

**F 3018**

Regine Leibinger, Mike Schlaich, Claudia Lösch  
Philip Rieseberg, Matthias Ballestrem

# **Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG)**

**F 3018**

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2017

ISBN 978-3-7388-0050-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

---

Forschungsvorhaben:

# **Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG)**

## **Abschlussbericht**

25.04.2016

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.

(Aktenzeichen: II 3-F20-12-1-145 / SWD – 10.08.18.7-13.41)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Autoren:

Regine Leibinger\*, Mike Schlaich\*\*, Claudia Lösch\*\*, Philip Rieseberg\*, Matthias Ballestrem\*

\*Institut für Architektur

Fachgebiet Baukonstruktion und Entwerfen

Professor Regine Leibinger

Gastprofessor Matthias Ballestrem

\*\*Institut für Bauingenieurwesen

Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren - Massivbau

Prof. Mike Schlaich



Bundesinstitut  
für Bau-, Stadt- und  
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen  
und Raumordnung



FORSCHUNGSINITIATIVE  
**Zukunft BAU**

## Kurzfassung

Das Projekt „Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau“ (INBIG) wurde initiiert, um die architektonischen und baukonstruktiven Potentiale von Infraleichtbeton oder auch Infra-Lightweight-concrete (ILC) für den Geschosswohnungsbau zu erforschen. Ziel war es, die Anwendung und Marktakzeptanz dieses wärmedämmenden Hochleistungsleichtbetons zu fördern.

Hierzu wurden exemplarische Entwürfe von typischen Wohnbauten erstellt und anschließend baukonstruktiv ausgearbeitet. Baukonstruktive Leitdetails, die hinsichtlich des ILC einer materialspezifischen Ausführung bedürfen, wurden untersucht, weiterentwickelt und exemplarisch als Prototypen gebaut und getestet.

Das Projekt gliedert sich in fünf Arbeitspakete über einen Gesamtzeitraum von 24 Monaten.

### Arbeitspaket 1: Grundlagenermittlung (2 Monate)

Die Grundlagenermittlung diente der Sammlung und Prüfung vorhandener Informationen, dem Wissenstransfer sowie der Recherche und Besichtigung von fertiggestellten und konkret geplanten Referenzprojekten. Die Ergebnisse wurden in einem separaten Bestandsbericht zusammengefasst.

### Arbeitspaket 2: Ausarbeitung der Typenentwürfe (6 Monate)

Es wurden sechs typologische Entwürfe unter besonderer Berücksichtigung der Materialeigenschaften des ILC entwickelt. Hierzu wurden zunächst vier prägnante Typen des Geschosswohnungsbaus betrachtet: Punkthaus, Zeilenbau, Blockrandbebauung und Baulückenschließung. Aufgabe war es, zu jedem Typ ein bis zwei Varianten zu entwickeln. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Architekten und Bauingenieuren diente dabei dazu, die sich aus den speziellen Eigenschaften des Infraleichtbetons ergeben Fragestellungen, entwurflich auf unterschiedlichen Ebenen zu bearbeiten. Auf Basis von ausgewählten Grundstücken in Berlin wurden die folgenden sechs Entwürfe entwickelt:

- 2x Baulücke (Kantstraße 126, Kantstraße 128)
- 2x Zeilenbau (Alte Jakobstraße, Kracauer Platz)
- 1x Punkthaus, mehrgeschossiges Referenzgebäude als Basis für die Erstellung einer Parametermatrix (ohne Grundstück)
- 1x Punkthaus, Stadtvilla (Stavanger Straße)



Bild 1: Zeilenbau Alte Jakobstraße

Da Infraleichtbeton u.a. aufgrund seiner Trockenrohddichte unter  $800 \text{ kg/m}^3$  nicht unter die im EC2 geregelten Leichtbetone fällt und somit außerhalb der Norm liegt, sind für die Bemessung zum Teil Anpassungen der Ansätze der Normen und besondere Betrachtungen verschiedener Punkte, wie z.B. Dauerhaftigkeit, Brandschutz, Schallschutz oder langfristiges Verformungsverhalten, erforderlich. Als Grundlage der Planung der Typenentwürfe wurden die vorliegenden Erkenntnisse zu verschiedenen Eigenschaften des Infraleichtbetons erläutert und Vorgehensweisen aufgezeigt, wie diese Eigenschaften bei der Entwurfs- und Tragwerksplanung berücksichtigt werden können.

### Arbeitspaket 3: Baukonstruktive Ausarbeitung (6 Monate)

In dieser Phase wurden die Entwürfe konstruktiv ausgearbeitet. Details, die bei der Ausführung in Infraleichtbeton besonderer Beachtung bedürfen, z.B. Fensteranschlüsse sowie die Einbindung von Balkonen und Decken in ILC-Wände, wurden identifiziert und ausgearbeitet. Baukonstruktiv besonders prägnante oder geeignete Details wurden für die Produktion als Prototyp in der anschließenden Phase weiterentwickelt. In diesem Zuge wurden auch energetische Untersuchungen wie z.B. thermische Simulationen und Wärmebrückenanalysen der Anschlüsse durchgeführt, mit dem Ziel, die entwickelten Details aus energetischer und bauphysikalischer Sicht zu bewerten zu können und anschließend zu optimieren.



*Bild 2: Prototyp 1, Fassadenelement*



*Bild 3: Prototyp 3, Balkonanschluss*

### Arbeitspaket 4: Bau und Untersuchung von Prototypen (6 Monate)

In dieser Arbeitsphase wurden die zuvor entwickelten Prototypen praktisch 1:1 umgesetzt. Dabei wurden unterschiedliche Betonrezepturen und verschiedene Schal- und Bewehrungsmaterialien, sowie Herstellungsverfahren genutzt und erprobt. Im Anschluss wurden einige der Prototypen im Hinblick auf Tragverhalten und Feuchtigkeitsaufnahme geprüft. Darüber hinaus wurden Begleitversuche zu Materialeigenschaften wie z.B. Wasserdampfdiffusion, Wassereindringtiefe, Frost-Tau-Widerstand und Schwindverhalten durchgeführt und baupraktische Aspekte wie Ausschallfristen, geeignete Schalplatten und Trennmittel oder Fallhöhen bei der Betonage untersucht.

Arbeitspaket 5: Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse (4 Monate)

In diesem abschließenden Schritt wurden die Ergebnisse der vorhergehenden Projektphasen zusammengefasst und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

Projektstand nach Abschluss

Die Ergebnisse sollen im Anschluss an das Projekt in der aufgearbeiteten Form eines Leitfadens im Buchhandel publiziert werden, der Bauherren, Planern und Bauunternehmen den Umgang mit dem Material Infraleichtbeton aufzeigt. Die notwendigen theoretischen und praktischen Erkenntnisse für diese Publikation konnten in dem vorgegebenen Projektzeitraum von 2 Jahren erarbeitet werden. Die Publikation selbst ist nicht Teil des Forschungsprojekts, die Voraussetzungen für deren Realisierung werden aktuell geklärt.

## Inhalt

<b>0</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>8</b>
0.1	KURZBESCHREIBUNG DES FORSCHUNGSVORHABENS .....	8
0.2	AUFGABENSTELLUNGEN UND PROJEKTABLAUF .....	8
<b>1</b>	<b>ARBEITSPAKET 1: GRUNDLAGENERMITTLUNG .....</b>	<b>13</b>
1.1	ZUSAMMENSTELLUNG INTERNER FORSCHUNGS-, SEMINAR- UND STUDIENARBEITEN .....	13
1.2	ZUSAMMENSTELLUNG VON EXTERNEN FORSCHUNGSPROJEKTEN ZUM THEMA DÄMMBETON .....	18
1.3	ZUSAMMENSTELLUNG PRÄGNANTER REALISierter REFERENZPROJEKTE .....	20
1.3.1	<i>Einfamilienhaus Berlin</i> .....	20
1.3.2	<i>Amtsgericht, Frankfurt/Oder</i> .....	21
1.3.3	<i>Büroerweiterung David Chipperfield Architects</i> .....	22
1.3.4	<i>Einfamilienhaus H36</i> .....	23
1.3.5	<i>Monohaus</i> .....	24
1.3.6	<i>Volta-Zentrum</i> .....	25
1.3.7	<i>Zusammenfassung und Vergleich der Referenzprojekte</i> .....	26
1.4	INFRALEICHTBETON IM KONTEXT DER ENERGIEEINSPARVERORDNUNG (ENEV) .....	27
<b>2</b>	<b>ARBEITSPAKET 2: AUSARBEITUNG DER TYPENENTWÜRFE .....</b>	<b>32</b>
2.1	AUSWAHL DER GRUNDSTÜCKE .....	32
2.2	AUSARBEITUNG DER ENTWÜRFE .....	35
2.2.1	<i>Referenzgebäude (kein Grundstück)</i> .....	36
2.2.2	<i>Baulücke Kantstraße 126/128 (Grundstück 1)</i> .....	38
2.2.3	<i>Punkthaus Urban Living Karl-Marx-Allee (Grundstück 2)</i> .....	40
2.2.4	<i>Zeilenbau Alte Jakobstraße (Grundstück 3)</i> .....	41
2.2.5	<i>Zeilenbau Kracauer Platz (Grundstück 4)</i> .....	43
2.2.6	<i>Punkthaus Stadtvilla Stavanger Straße (Grundstück 6)</i> .....	45
2.3	GRUNDLAGEN DER PLANUNG .....	47
2.3.1	<i>Parametertabelle zur entwurflichen und statischen Vorbemessung</i> .....	48
2.3.2	<i>Dauerhaftigkeit</i> .....	49
2.3.3	<i>Bemessungsansätze</i> .....	51
2.3.4	<i>Brandschutz</i> .....	59
2.3.5	<i>Schallschutz</i> .....	61
2.3.6	<i>Ökobilanz</i> .....	63
2.3.7	<i>Ökonomische Betrachtung</i> .....	65
<b>3</b>	<b>ARBEITSPAKET 3: BAUKONSTRUKTIVE AUSARBEITUNG.....</b>	<b>68</b>
3.1	ABLEITUNG PRÄGNANTER DETAILS AUS DEN ENTWÜRFE N .....	68
3.1.1	<i>Baulücke Kantstr. 126</i> .....	69
3.1.2	<i>Fensteranschlüsse</i> .....	70
3.1.3	<i>Referenzgebäude</i> .....	71
3.1.4	<i>Freiformoberfläche als Fertigteil</i> .....	72
3.1.5	<i>Zusammenfassung der zu untersuchenden Details:</i> .....	73
3.2	BEISPIELHAFTE LEITDETAILS FÜR DIE PLANUNG VON GEBÄUDEN AUS INFRALEICHTBETON .....	75
3.3	ENERGIETECHNISCHE ANALYSEN .....	81
3.3.1	<i>Dynamisch-Thermische Analyse</i> .....	81

3.3.2	<i>Dynamische-Hygrische Analyse</i> .....	100
3.3.3	<i>Wärmebrückenanalyse</i> .....	113
<b>4</b>	<b>ARBEITSPAKT 4: BAU UND UNTERSUCHUNG VON PROTOTYPEN</b> .....	<b>125</b>
4.1	PROTOTYP 1 "FASSADENELEMENT MIT AUSKRAGENDEM BALKON" .....	126
4.2	PROTOTYP 2 (ILC 800, ILC 600) „FENSTERELEMENT“ .....	130
4.3	PROTOTYP 3 – „BALKONELEMENT MIT WANDSTUMMEL UND DECKENANSCHLUSS“ .....	136
4.4	PROTOTYP 4 - "FASSADENELEMENT MIT GEWELLTER OBERFLÄCHENSTRUKTUR" .....	141
4.5	BEGLEITVERSUCHE ZUM ILC.....	143
4.6	BAUPRAKTISCHE ASPEKTE BEIM UMGANG MIT ILC .....	144
4.6.1	<i>Mischregime zur Herstellung von ILC</i> .....	144
4.6.2	<i>Geeignete Schalungen</i> .....	144
4.6.3	<i>Ausschalzeiten</i> .....	148
4.6.4	<i>Oberflächengestaltungen</i> .....	149
4.6.5	<i>Nachbearbeitung und Betonkosmetik</i> .....	153
4.6.6	<i>Vermeidung von Betonierhorizonten, Fallhöhen</i> .....	156
<b>5</b>	<b>ARBEITSPAKT 5: ZUSAMMENFASSUNG UND WEITERER FORSCHUNGSBEDARF</b> .....	<b>158</b>
	<b>LITERATUR</b> .....	<b>164</b>
	<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>168</b>
	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>173</b>
	<b>ANHANG: BEMESSUNG BAUTEILE REFERENZGEBÄUDE</b> .....	<b>175</b>
	<b>ANHANG: BEWEHRUNGSPLAN PROTOTYP 2</b> .....	<b>179</b>
	<b>ANHANG: GRUNDLAGEN DER PLANUNG – SCHALLSCHUTZNACHWEIS KRACAUER PLATZ</b> .....	<b>180</b>
	<b>ANHANG: ENERGIETECHNISCHE ANALYSEN –VARIANTENBETRACHTUNG WÄRMEBRÜCKEN</b> .....	<b>187</b>

## Abkürzungsverzeichnis

DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
EC2	Eurocode 2
E-Modul	Elastizitätsmodul
EnEV	Energieeinsparverordnung
FG	Fachgebiet
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
HPLWAC	High Performance Lightweight Aggregate Concrete (Hochleistungs- leichtbeton)
ILC	Infra-Lightweight Concrete (d: Infraleichtbeton)
INBIG	Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau
LB	Leichtbeton
LWA	Lightweight Aggregate
LWAC	Lightweight Aggregate Concrete
NB	Normalbeton
o. V.	ohne Verfasser
PT	Prototyp

## **0 Einleitung**

### **0.1 Kurzbeschreibung des Forschungsvorhabens**

Im Projekt „Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau“ (INBIG) sollen die architektonischen und baukonstruktiven Potentiale von Infraleichtbeton für den Geschosswohnungsbau erforscht werden. Ziel ist es, Anwendung und Marktakzeptanz dieses wärmedämmenden Hochleistungsbetons zu fördern.

Infraleichtbeton (ILC = Infra-Lightweight Concrete) ist die Bezeichnung für einen seit 2007 an der TU Berlin entwickelten Hochleistungsleichtbeton (HPLWAC) mit leichter Gesteinskörnung (LWA) aus Blähton, der nicht nur tragend, sondern aufgrund seiner geringen Rohdichte auch wärmedämmend ist.

Die Besonderheit von ILC gegenüber vergleichbaren, sogenannten Dämmbetonen - gefügedichte Leichtbetone mit geringer Wärmeleitfähigkeit [1] – liegt in seinem günstigen Verhältnis von Druckfestigkeit zur Rohdichte. Am Markt vertretene Dämmbetone stoßen heute aufgrund der gestiegenen energetischen Anforderungen häufig an ihre Grenzen. Monolithisch verwendbare Materialien wie der Porenbeton verfügen zwar über sehr gute Wärmedämmeigenschaften, jedoch vergleichsweise geringe Festigkeiten, was den Einsatz auf Mauerwerksteine für Gebäude mit wenigen Geschossen beschränkt. Dies trifft auf Infraleichtbeton nicht zu. Aufgrund seiner Eigenschaften ist er prädestiniert für die Erstellung mehrgeschossiger Bauten. Dies gab den Anlass, die Einsatzmöglichkeiten von ILC im Geschosswohnungsbau zu untersuchen und seine Anwendung in der Praxis zu fördern.

Hierzu wurden exemplarische Entwürfe von typischen Wohnbauten erstellt und anschließend architektonisch und baukonstruktiv ausgearbeitet. Details, die hinsichtlich des ILC einer materialspezifischen Ausführung bedürfen, wurden systematisch untersucht und weiterentwickelt, mit dem Ziel, diese als 1:1 Prototypen baulich umzusetzen, zu untersuchen und weiterzuentwickeln. INBIG erforscht aber nicht nur die technischen Aspekte des Materials, sondern auch seine architektonisch-räumlichen Potentiale wie z.B. das Zusammenspiel von Außenwand und Raum und von Material und Formgebungsmöglichkeiten.

Das Aufzeigen des Anwendungsspektrums und architektonischen Potentials von ILC anhand exemplarischer Entwürfe bis hin zu Leitdetails und Prototypen soll sowohl Bauherren, Planern als auch Bauunternehmen einen Leitfaden für den Umgang mit diesem zukunftsweisenden Material liefern.

### **0.2 Aufgabenstellungen und Projektablauf**

INBIG muss im Kontext der Entwicklung des Materials ILC an der TU Berlin gesehen werden. Das Fachgebiet von Prof. Mike Schlaich forscht seit 2007 an diesem Baustoff und arbeitet derzeit an verschiedenen Forschungsprojekten für die Weiterentwicklung des ILC.

Das Fachgebiet von Prof. Regine Leibinger arbeitet seit 2011 verstärkt an der Entwicklung einer Architekturlehre, die den Begriff der Nachhaltigkeit als Beziehung zwischen der Dauerhaftigkeit des Gebäudes und der energetischen Performativität der Gebäudehülle versteht. Damit verschiebt sich der Fokus weg von dem reinen Streben nach immer geringeren Ener-

gieverlusten der Hülle, die meist einher gehen mit immer komplexeren und wenig dauerhaften Fassaden und Gebäudehüllen, hin zu robusten Gebäuden mit klaren und einfachen Aufbauten.

INBIG beschäftigt sich als Kooperationsprojekt zwischen Architekten und Bauingenieuren ausdrücklich NICHT mit der technischen Weiterentwicklung des Baustoffes, sondern mit der Erforschung des erweiterten architektonischen und baukonstruktiven Anwendungsspektrums, das sich durch die verbesserten Materialeigenschaften eröffnet. In diesem Rahmen wurden verschiedene Aspekte<sup>1</sup> untersucht, wie z.B.:

- Materialgerechte Planung
- Hybride Konstruktionen mit Stahlbeton
- Hybride Konstruktionen mit Holz
- Materialspezifische baukonstruktive Details
- Verschiedene Arten der Bewehrung
- Gestalterische Potentiale
- Konformität zur Energieeinsparverordnung

Das Projekt gliedert sich in fünf Arbeitspakete über einen Gesamtzeitraum von 24 Monaten:

- Arbeitspaket 1: Grundlagenermittlung (2 Monate)  
Die Grundlagenermittlung dient der Sammlung und Prüfung vorhandener Informationen, Wissenstransfer, der vorbereitenden Projektorganisation sowie Besichtigung und Recherche bestehender existierender Bauten
- Arbeitspaket 2: Ausarbeitung der Typenentwürfe (6 Monate)  
Es werden sechs typologische Entwürfe unter besonderer Berücksichtigung der Materialeigenschaften des ILC entwickelt. Hierzu werden vier prägnante Typen des Geschosswohnungsbaus ausgewählt: Punkthaus, Zeilenbau, Blockrandbebauung und Baulückenschließung. Zu jedem Typen werden ein bis zwei Varianten mit 4 bis 6 Vollgeschossen entwickelt.
- Arbeitspaket 3: Baukonstruktive Ausarbeitung (6 Monate)  
Im ersten Teil der baukonstruktiven Ausarbeitung werden die Entwürfe konstruktiv detailliert, es werden prägnante Details, die in der Ausführung in Infrleichtbeton besonderer Beachtung bedürfen, identifiziert und ausgearbeitet. Im zweiten Teil dieser Phase wird die Fertigungsplanung der Prototypen durchgeführt.
- Arbeitspaket 4: Bau und Untersuchung von Prototypen (6 Monate)  
Diese Phase beinhaltet den Bau und die Untersuchung von verschiedenen Prototypen (Großversuche) sowie begleitende Kleinversuche.
- Arbeitspaket 5: Auswertung und Zusammenfassung der Ergebnisse (4 Monate)  
Die Ergebnisse der vorhergehenden Projektphasen werden ausgewertet und zusammengefasst. Die Erkenntnisse sollen im Anschluss an das Projekt in Form eines Leitfadens für die Planung und Konstruktion von Geschosswohnungsbauten im Buchhandel publiziert werden.

Der Zeitplan ist Bild 4 zu entnehmen (Stand März 2016).

---

<sup>1</sup> Eine ausführliche Aufgabenbeschreibung ist dem Antrag zu entnehmen.

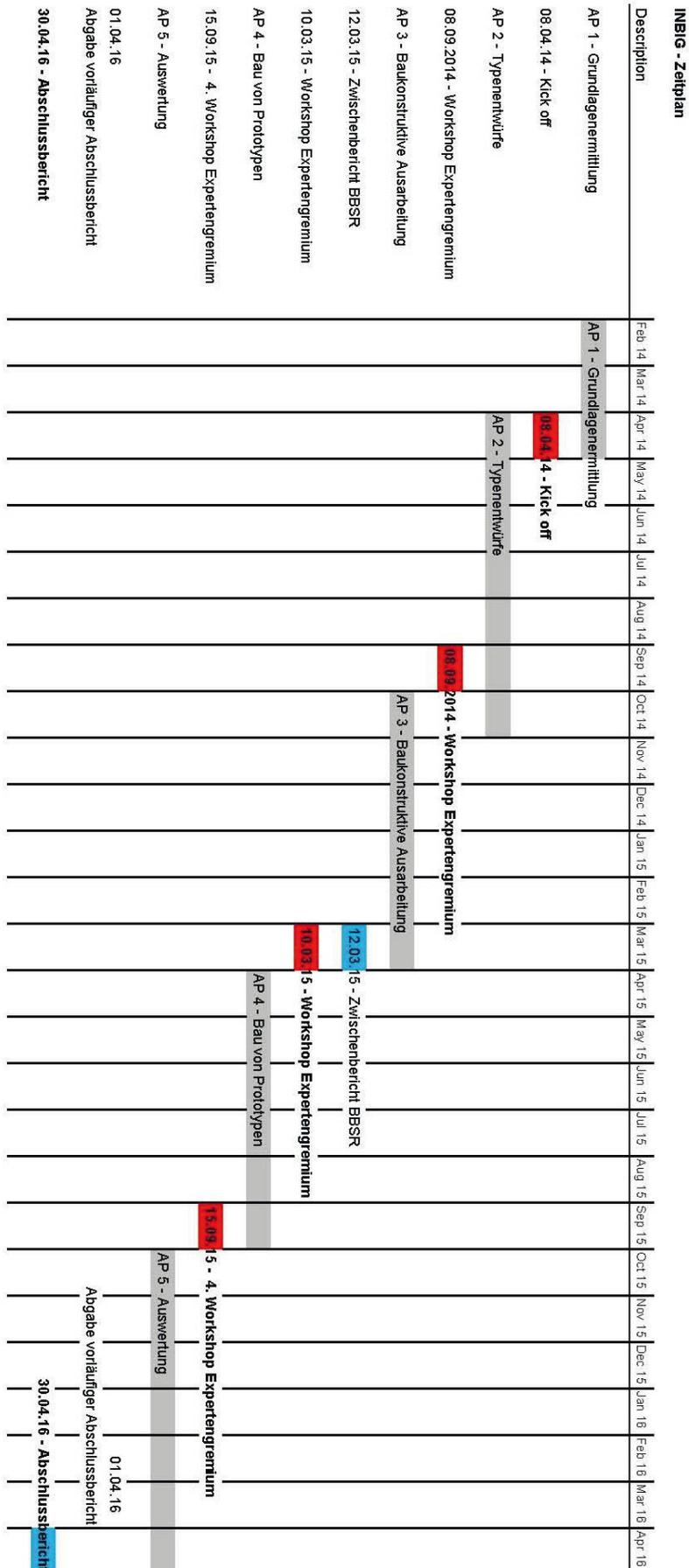


Bild 4: Zeitplan (Stand Januar 2016)

Das Projekt wurde von den folgenden Fachgebieten der TU Berlin bearbeitet:

- Baukonstruktion und Entwerfen, Prof. Regine Leibinger/ Gastprofessor Matthias Balrestrem, Institut für Architektur
- Fachgebiet Entwerfen und Konstruieren – Massivbau, Prof. Mike Schlaich, Institut für Bauingenieurwesen

Gefördert wird das Projekt von der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, sowie von einigen privaten Geldgebern:

- Barkow Leibinger Architekten
- schlaich bergemann und partner sbp
- Transsolar Energietechnik
- HeidelbergCement AG
- Liapor GmbH
- Peri GmbH
- Schöck Bauteile GmbH
- Pfeifer Seil- und Hebeteknik GmbH

Als offizielle Gutachter begleiten Prof. Frank U. Vogdt (TU Berlin), Prof. Arno Brandhuber (adbk Nürnberg) und Eike Roswag (Roswag Architekten, Berlin) das Projekt. Des Weiteren stehen vier zusätzliche Berater aus verschiedenen Fachdisziplinen zur Verfügung (siehe Bild 5).

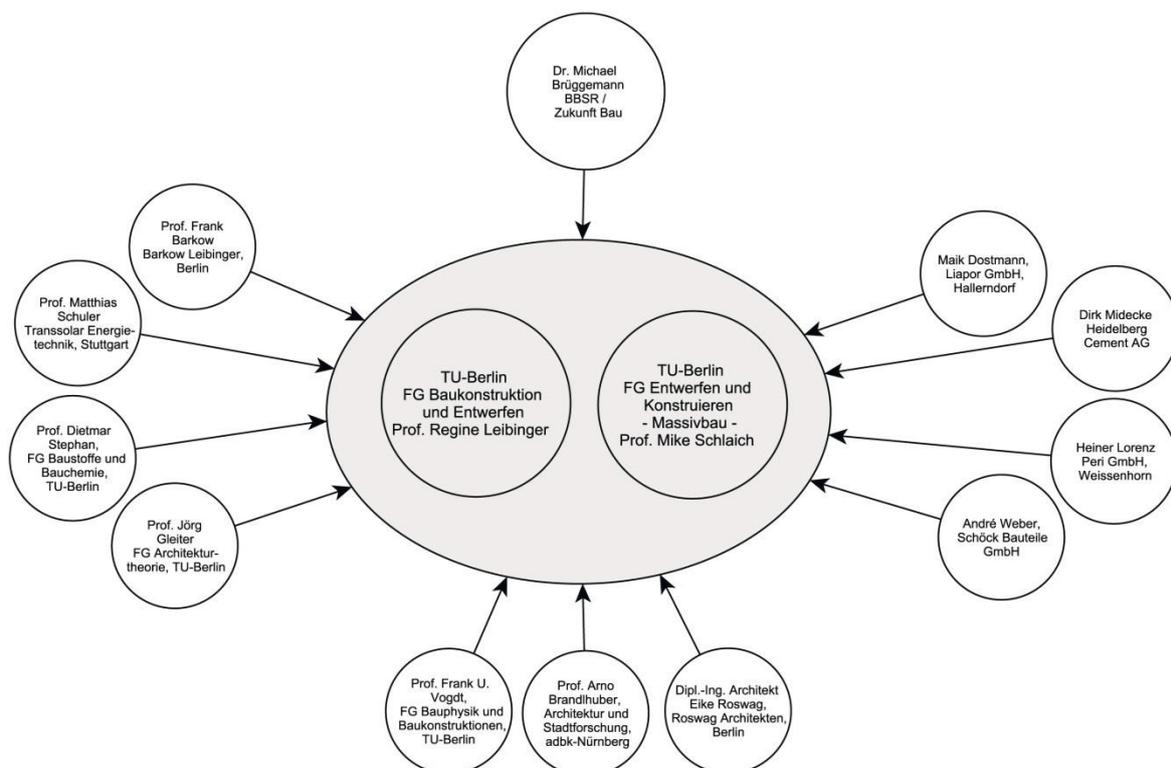
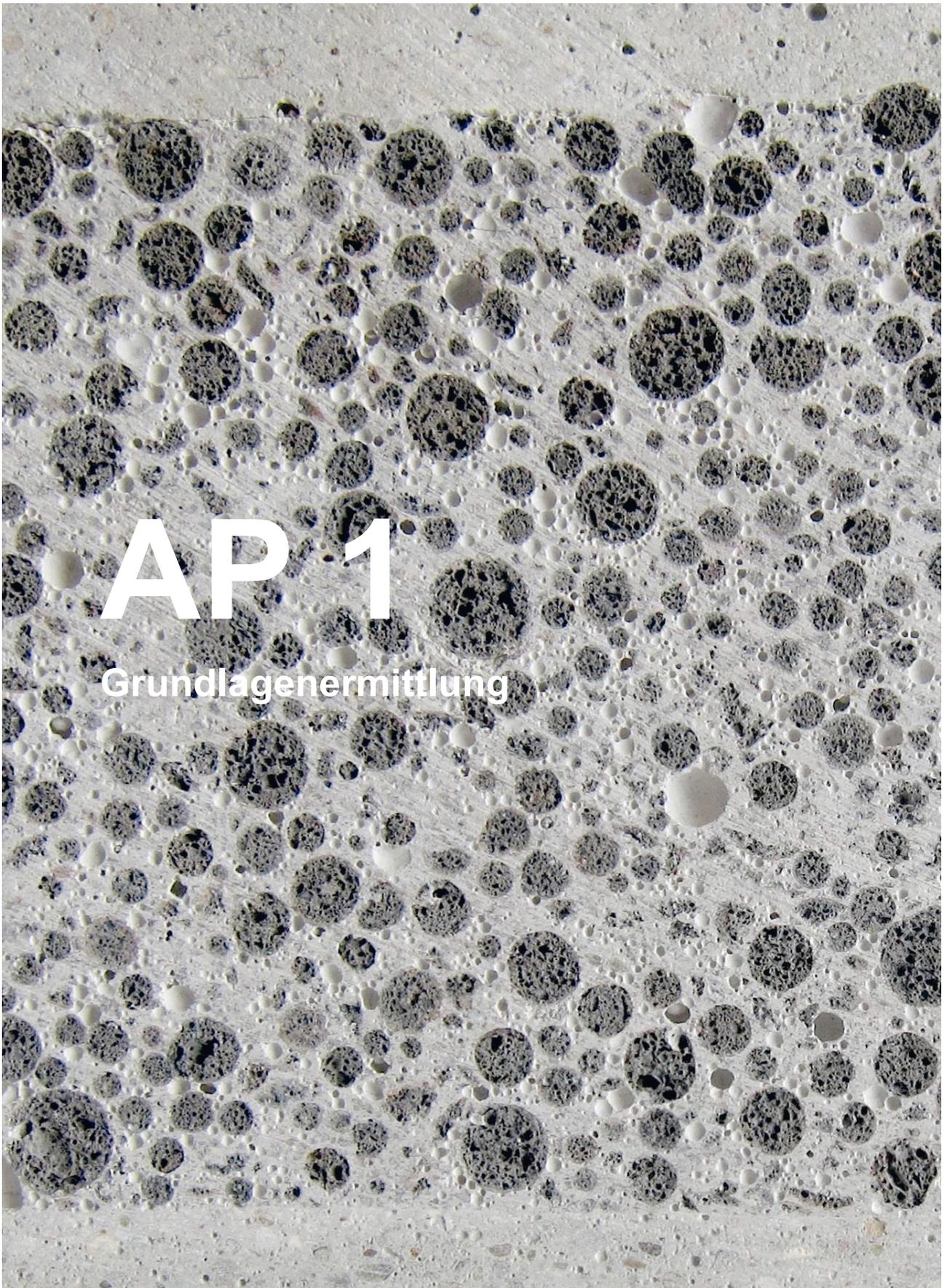


Bild 5: Projektbeteiligte



# AP 1

## Grundlagenermittlung

## 1 Arbeitspaket 1: Grundlagenermittlung

Die Grundlagenermittlung diente der Sammlung und Prüfung vorhandener Informationen, dem Wissenstransfer und der vorbereitenden Projektorganisation. Dazu gehörten folgende Punkte:

- Transfer von Know-How, Abgleich des Wissensstandes der Beteiligten
- Sichtung und Sammlung von relevanter Literatur
- Prüfung vorhergehender Forschungsarbeiten
- Auswertung von Ergebnissen vorhergehender Seminare und Studienarbeiten der beteiligten Fachgebiete
- Besichtigung und Recherche von fertiggestellten und konkret geplanten Referenzprojekten; Erstellung eines separaten Bestandsberichts

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Recherchen zum Stand der Forschung sowie der Referenzprojekte in zusammengefasster Form vorgestellt.

### 1.1 Zusammenstellung interner Forschungs-, Seminar- und Studienarbeiten

Die Forschungsarbeit an der TU Berlin von Prof. Mike Schlaich beschäftigt sich seit 2007 intensiv mit dem Thema Infraleichtbeton. Bereits damals wurde ein Wohngebäude mit tragenden Wänden aus ILC errichtet. Das Gebäude erfüllt mit einem monolithischen Wandaufbau von 50 cm die EnEV 2007 und hat sich nach mehreren Jahren Standzeit in Nutzung und Dauerhaftigkeit bewährt [2].

Seitdem wurde die Forschungsarbeit am Fachgebiet „Entwerfen und Konstruieren – Massivbau“ (FG EK-Massivbau) konsequent weiterverfolgt. Die Materialeigenschaften konnten durch eine weiterentwickelte Rezeptur erheblich verbessert werden. Bei gleichbleibenden Wärmedämmeigenschaften wurde die Festigkeit nahezu verdoppelt [3]. Die bisher entwickelte Rezepturpalette für konstruktiven Infraleichtbeton reicht derzeit von einer Trockenrohichte von  $600 \text{ kg/m}^3$  bis  $800 \text{ kg/m}^3$  bei einer Wärmeleitfähigkeit von ca.  $\lambda_{10^\circ, \text{tr}} = 0,14$  bis  $0,19 \text{ W/mK}$ .

Aktuell werden und wurden an der TU-Berlin neben dem Projekt INBIG weitere Drittmittel-Forschungsprojekte bearbeitet bzw. vorbereitet:

- „Trag- und Verformungsverhalten von biegebeanspruchten Bauteilen aus Infraleichtbeton“ (DFG) – abgeschlossen 9 / 2015

Dieses Projekt untersucht neben dem Verhalten bei Biegebeanspruchung auch das Verbund- und Rissverhalten. Hierdurch werden Erkenntnisse zum grundlegenden Materialverhalten erlangt, die für die Bemessung von ILC fundamental sind.

- „Multifunktionale Leichtbetonbauteile mit inhomogenen Eigenschaften (Multi LC)“ (BMBF) - Beginn 2016

In dem 3jährigen Projekt „Multi LC“ will ein multidisziplinäres Team aus konstruktiven Ingenieuren, Materialtechnologen, Bauphysikern und Partnern aus der Industrie und Planung Wände aus Infraleichtbeton mit weiteren Funktionalitäten versehen. Wände mit über den Querschnitt verteilten Festigkeits- und Wärmedämmeigenschaften kom-

biniert mit Funktionen wie Wärmespeicherung, Wandaktivierung, Vakuumisolation und Photokatalyse sollen konzipiert werden.

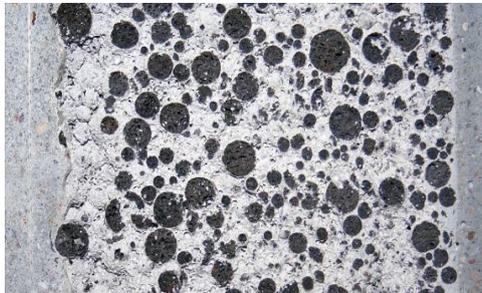


Bild 6: Prinzip der gesteuerten Porosität im Infraleichtbeton; Probekörper mit Kapillarrohrmatten für Wandaktivierung

- „Stabwände – Wärmedämmende Infraleichtbetonwände mit knickstabilisierter Druckbewehrung“ - geplant

Das Projekt zielt hauptsächlich auf die Realisierung von Hochhäusern mit Infraleichtbeton. Dabei sollen in den ILC Druckglieder integriert werden, die analog zum Zusammenwirken von Knochen und Muskeln Druckkräfte aufnehmen und durch den umliegenden ILC stabilisiert werden.

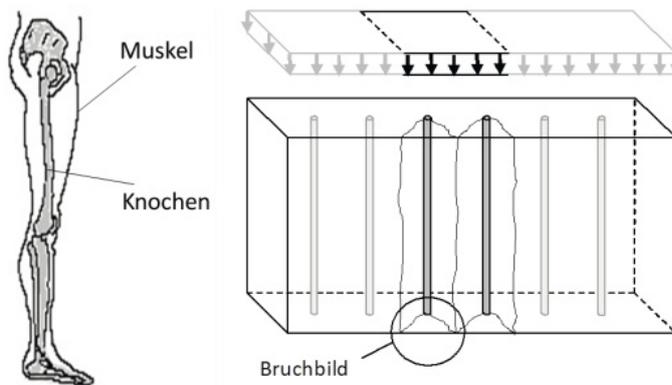


Bild 7: Funktionsweise der knickstabilisierten Druckbewehrung

- C<sup>3</sup> – Carbon Concrete Composite: C3\_B4\_1a, Infraleicht - Gebäudehüllen aus Infraleichtbeton – 2016 (BMBF, laufend)

Dieses Projekt hat die Entwicklung einer massiven, multifunktionalen Gebäudehülle aus homogenem bzw. funktional geschichtetem, carbonbewehrtem Infraleichtbeton zum Thema.

Des Weiteren wurden in einer Vielzahl von Bachelor- und Masterarbeiten bereits diverse Themen untersucht, u.a.:

- Bestimmung und Bewertung der spezifischen Wärmekapazität
- Numerische Untersuchung an Bauteilen aus gradiertem Infraleichtbeton
- Potential von Hochleistungszement „Nanodur Compound“ bei Infraleichtbeton
- Kriechen und Schwinden
- Oberflächennachbehandlung und Betonkosmetik
- Wasserdampfdurchlässigkeit von Infraleichtbeton
- Beschreibung des Lastabtrags mittels optischer Verformungsanalyse
- Entwicklung von Rezepturen zur Herstellung von Infraleichtbeton in verschiedenen Rohdichteklassen
- Experimentelle Untersuchungen zum Einfluss von Microsilica auf die Festigkeit von Infraleichtbeton
- Optimierung der Festigkeit von Infraleichtbeton
- Experimentelle Untersuchungen an gradierten Balken
- Bruchmechanik von Infraleichtbeton
- Das Verhalten von Infraleichtbeton bei hohen Temperaturen

Neben den technisch orientierten Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit dem Fachgebiet Baukonstruktion und Entwerfen (FG Architektur) von Prof. Regine Leibinger zwei Entwurfsseminare durchgeführt:

- **„Dickhäuter“** – Entwurfsseminar Ws 2012/13  
FG Baukonstruktion und Entwerfen, FG EK Massivbau

Thema:

Die Entwurfsaufgabe - Wohnungsneubau auf einem innerstädtischen Grundstück in Berlin - beschäftigt sich mit Wohnen in einer dicken Haut. Durch die Weiterentwicklung seiner Zusammensetzung kann Beton heute wieder als dicke, einschalige Außenwand eingesetzt werden. Welche plastischen Potentiale entstehen dadurch, welche Formen kann die Haut annehmen und wie kann sie die heutigen Formen des Wohnens mitgestalten?

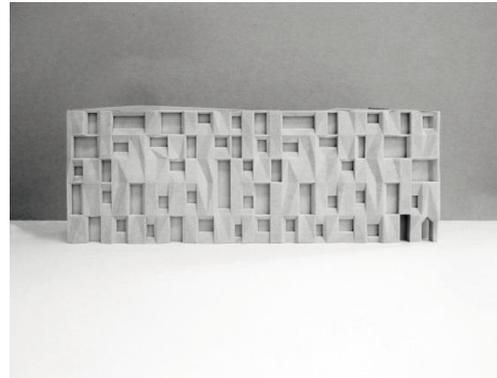


*Bild 8: Entwurf Abertshofer/ Tratz/ Winkler*

- „**Robust**“ – Entwurfsseminar SoSe 2013  
FG Baukonstruktion und Entwerfen

Thema:

Was ist robuste Architektur? Im Rahmen der Entwurfsaufgabe des Egon Eiermann Preises 2013 "SMART SKIN - Ein Haus der Materialforschung" wird die Frage untersucht, wie auch eine einschalige, robuste Außenwand eine intelligente Gebäudehülle werden kann.



*Bild 9: Entwurf Hagspiel/ Tannenberger/ Kowalsky*

An dieser Stelle soll als weiteres Referenzprojekt auch das Smart Material House genannt werden, entworfen und konzipiert von Barkow Leibinger Architekten, sbp Schlaich bergermann und partner, sowie Transsolar Energietechnik, die gemeinsam als private Förderer das Projekt INBIG initiiert haben und es zudem finanziell unterstützen. Das Smart Material House basiert auf einem Grundgerüst aus identischen Infraleichtbeton-Fertigteilen kombiniert mit durchlaufenden Massivholzdecken. Das Projekt gewann 2012 einen 2. Preis des Global Holcim Award [3].



*Bild 10: Smart Material House [3]*

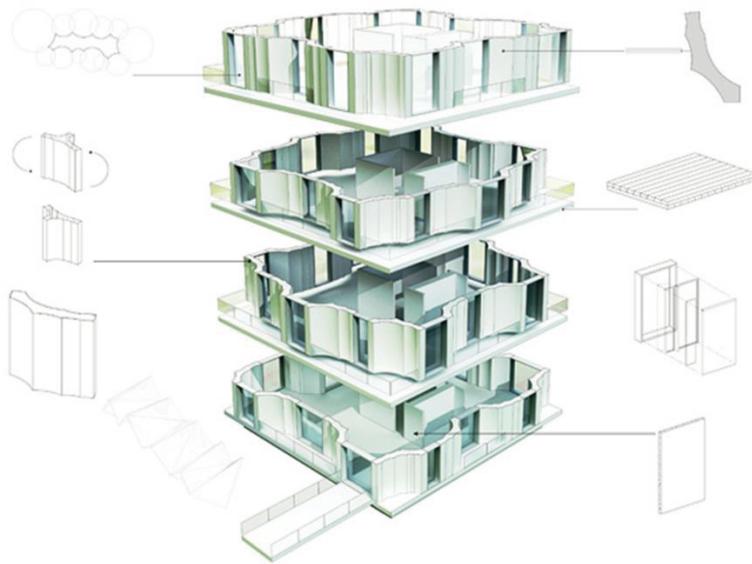


Bild 11: Aufbau des Smart Material House [4]

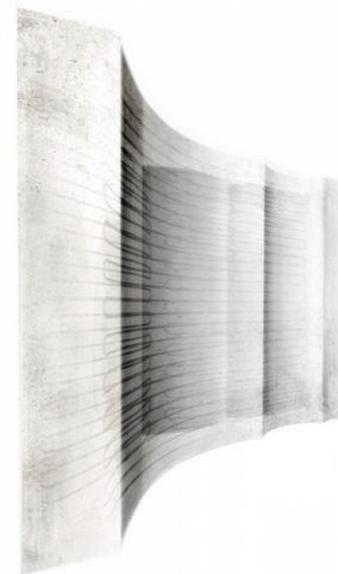


Bild 12: Wandelement des Smart Material House [4]

Eine Weiterentwicklung dieses Ansatzes erfolgte im Rahmen des Wettbewerbs „Urban Living“, bei dem ein 16-stöckiger Geschosswohnungsbau mit einer tragenden Außenhaut aus Infraleichtbetonelementen entwickelt wurde. Als Weiterentwicklung des strukturellen Ansatzes des smart Material house wurden diese Elemente mit Druckstäben verstärkt. Diese Stäbe nehmen die Druckkräfte auf, während der umgebende Infraleichtbeton als Knickstabilisierung wirkt.



Bild 13: Entwurf Urban Living [5]

## 1.2 Zusammenstellung von externen Forschungsprojekten zum Thema Dämmbeton

Im Folgenden werden einige wesentliche Forschungsprojekte, die sich mit der Thematik des hochwärmedämmenden Betons befassen, stichpunktartig zusammengestellt<sup>2</sup>:

- Prof. Breit, FG Werkstoffe im Bauwesen/ Prof. Schnell, FG Massivbau und Baukonstruktion; TU Kaiserslautern [7]:
  - aktuell laufendes Projekt „Small House 1 - Dämmbeton“: Experimentalgebäude auf dem Campus
  - Trockenrohdichte < 700 kg/m<sup>3</sup>
  - Kombination Leichtbeton/ Kerndämmung geplant
- Prof. Curbach, Institut für Massivbau, TU Dresden:
  - Mehraxiale Belastungen von Hochleistungsleichtbetonen
  - Hochleistungsleichtbetone unter Impakt [8]
- Prof. Garrecht, Institut für Massivbau, TU Darmstadt [9]:
  - Mineralisch ummantelte Holzspäne als Zuschlag für Leichtbeton
- Prof. Knippers, Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen (ITKE), Universität Stuttgart, 2013 [10]:
  - Aerogele als Zuschlag
  - Rohdichten von bis zu ca. 400 kg/m<sup>3</sup>
  - Wärmeleitfähigkeit ca. 0,06 W/mK
  - Problematisch beim Schwinden
  - geringe Festigkeiten (bis zu ca. 5MPa nach Änderung der Rezeptur)
- Prof. Leibundgut, ETH Zürich [11]
  - Low-Ex-Heat Barrier, Dämmbeton und Kapillar-Rohrnetz, kombiniert mit Erdwärme
- Prof. Müller, Karlsruher Institut für Technologie KIT, 2012 [12]:
  - Entwicklung Schaumbeton
  - Zuschläge: expandiertes Polystyrol (EPS) und Blähglas in verschiedenen Kombinationen
  - Wärmeleitkoeffizient z.B. < 0,08 W/(mK) bei Trockenrohdichte von ca. 600 kg/m<sup>3</sup>
  - Variierende Festigkeiten abhängig vom Zuschlag
- Dr. Rübner, Bundesanstalt für Materialprüfung und –forschung [13]:
  - Entwicklung hochwertiger leichter Gesteinskörnungen aus heterogenem Mauerwerksbruch
- Prof. Sobek, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart [14; 15]
  - aktuell laufendes Projekt „Gradientenbeton“: Steuerung der Porosität
  - Untersuchung verschiedener Zuschläge (z.B. Blähglas, Aerogele)
  - Herstellungsverfahren wird entwickelt (Automatisierung mittels Manipulator)

---

<sup>2</sup> Die nachfolgenden Informationen sind dem Bestandsbericht zum Arbeitspaket 1 [6] vom 24.11.14 entnommen, der Zukunft Bau bereits vorliegt.

- Prof. Thienel, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Universität der Bundeswehr [16]:
  - Zahlreiche Veröffentlichungen zum Thema Leichtbeton, aktuelles Forschungsvorhaben zur Entwicklung eines speziellen Leichtbetons als Sandwecheinlage für Doppelwandrumpfe im Frachtschiffsbau

Im internationalen Bereich sind diverse Publikationen zu LWAC (Lightweight Aggregate Concrete) sowie u.a. auch Forschungsaktivitäten zu den Stichpunkten HPLWAC (High Performance Lightweight Aggregate Concrete), „insulating concrete“ und „ultra-lightweight aggregates“ zu verzeichnen. Des Weiteren finden sich verschiedene Patente für z.B. Schaumbetone, Betone mit Aerogelen oder Betone mit Magnesiumoxid.

Des Weiteren sollen an dieser Stelle auch die Dämmbeton-Produkte der Leichtzuschlaghersteller erwähnt werden:

Tabelle 1: Dämmbetone von Leichtzuschlagherstellern im Vergleich zum Infralichtbeton

	Liapor	TECHNOlith	Misapor	ILB der TU
Rohdichte	D1.0	D0.8/1.0	D1/1.2	D0.8
Druckfestigkeit	LC 8/9	$f_{cm}=10,9 \text{ Mpa}^*$	LC 8/9	LC 8/9 ( $f_{cm}=13\text{MPa}^*$ )
Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	0,27	0,22	0,27	0,19

\* $f_{cm}$ : Mittelwert der Druckfestigkeit; Bei Druckfestigkeitsklasse LC8/9:  $f_{cm} \sim 12\text{MPa}$

Die Rezepturen basieren dabei zum Teil auf Blähglas bzw. Schaumglasschotter, zum Teil auf Blähton [17–19].

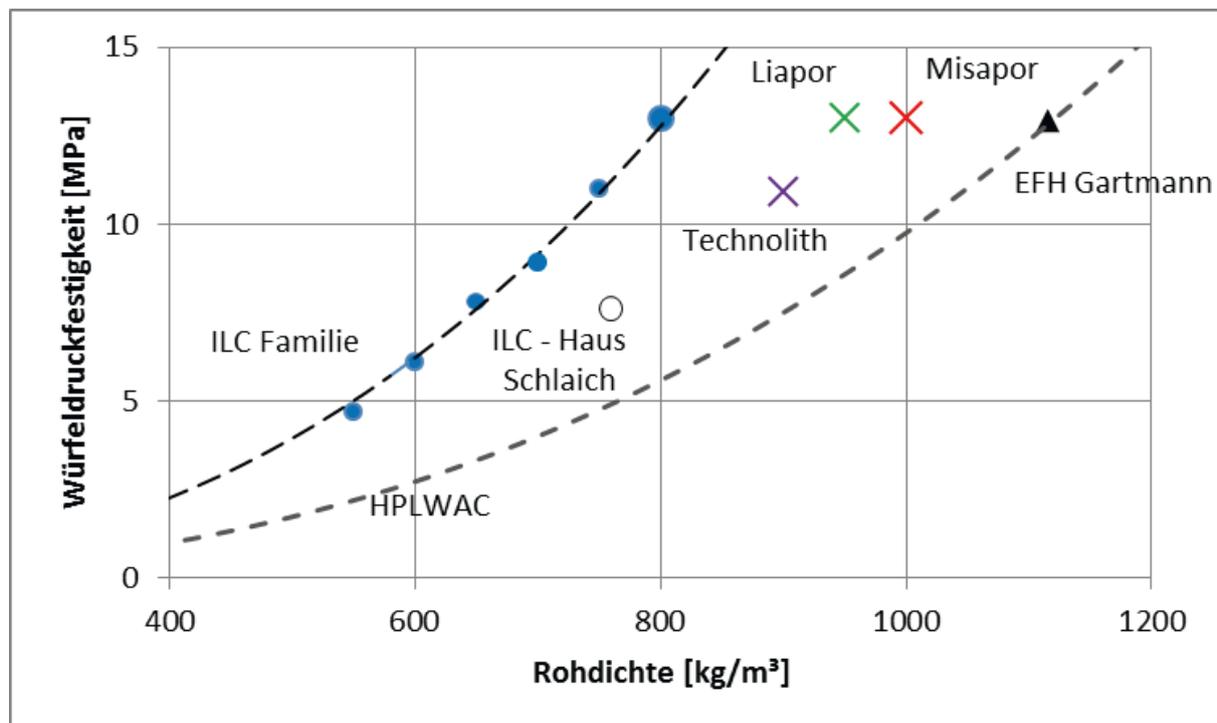


Bild 14: Verlauf von Druckfestigkeit über Rohdichte verschiedener Dämmbetone

### 1.3 Zusammenstellung prägnanter realisierter Referenzprojekte

Bei der Zusammenstellung prägnanter realisierter Referenzprojekte kam es zu intensivem Austausch mit den an den Projekten beteiligten Planern und auch den Bauherren.

Unter anderem wurden folgende Aspekte genauer betrachtet:

- Verwendung von Oberflächenbehandlungen (Hydrophobierung, Lasuren etc.)
- Detaillösungen, insbesondere Fensteranschlüsse, Balkone, Deckenanschlüsse etc.
- Optische Kontrolle der Oberflächen auf Schäden – Dauerhaftigkeit des Materials
- Probleme beim Bauablauf, in der Nutzung der Gebäude
- Art der verwendeten Schalungen
- Architektonische/ gestalterische Aspekte im Umgang mit monolithischer Bauweise

Des Weiteren wurde abschließend die in jedem Projekt verwendete Betonrezeptur im Hinblick auf die Wärmeleitfähigkeit, Druckfestigkeit und Trockenrohddichte verglichen und deren Leistungsfähigkeit bewertet.

Im Folgenden werden Informationen zu ausgewählten Referenzobjekten in zusammengefasster Form dargestellt. Die Inhalte der nachfolgenden Abschnitte 1.3.1 bis 0 stellen dabei eine Kurzfassung der ausführlichen Beschreibung im separaten Bestandsbericht zum Arbeitspaket 1 dar (siehe [6]: Bestandsbericht zum Arbeitspaket 1, Referenzprojekte, Forschungsarbeiten, vom 24.11.14; unveröffentlicht, liegt Zukunft Bau vor).

#### 1.3.1 Einfamilienhaus Berlin

Adresse: Stavangerstr. 15 a, 10439 Berlin



Bild 15: Einfamilienhaus Berlin (Fotos: W. Dechau)

Zusammenfassung:

- Architektur: Prof. C. Bonnen, A. Schlaich, Berlin
- Tragwerksplanung: M. Schlaich, L. Werner, Berlin
- Baujahr 2007
- Trockenrohddichte: 760 kg/m<sup>3</sup>
- Druckfestigkeit: 7 MPa

- Wärmeleitfähigkeit: 0,18 W/mK (ILC 800: 0,193 W/mK)
- Außenwände: 50cm
- Wärmedurchgangskoeffizient:  
 $U = 0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$  (ILC 800: 0,36 W/m<sup>2</sup>K)
- Glasfaserbewehrung

### 1.3.2 Amtsgericht, Frankfurt/Oder

Adresse: Müllroser Chaussee 55, 15236 Frankfurt (Oder)



Bild 16: Amtsgericht Frankfurt/Oder (Ansicht 1; Foto: P. Rieseberg)

Zusammenfassung:

- Architektur: Georg Bumiller Architekten
- Tragwerksplanung: Pichler Ingenieure
- Baujahr 2006
- Trockenrohdichte: 1200 kg/m<sup>3</sup>
- Druckfestigkeit: LC16/18
- Wärmeleitfähigkeit: 0,54 W/mK (ILC 800: 0,193 W/mK)
- Außenwände: 60cm – 90cm
- Wärmedurchgangskoeffizient bei 60cm:  
angegeben  $U = 0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; berechnet  $U = 0,78 \text{ W/m}^2\text{K}$  (ILC 800: 0,31 W/m<sup>2</sup>K)
- Stahlbewehrung
- keine Hydrophobierung

### 1.3.3 Büroerweiterung David Chipperfield Architects

Adresse: Joachimstraße 11, 10119 Berlin

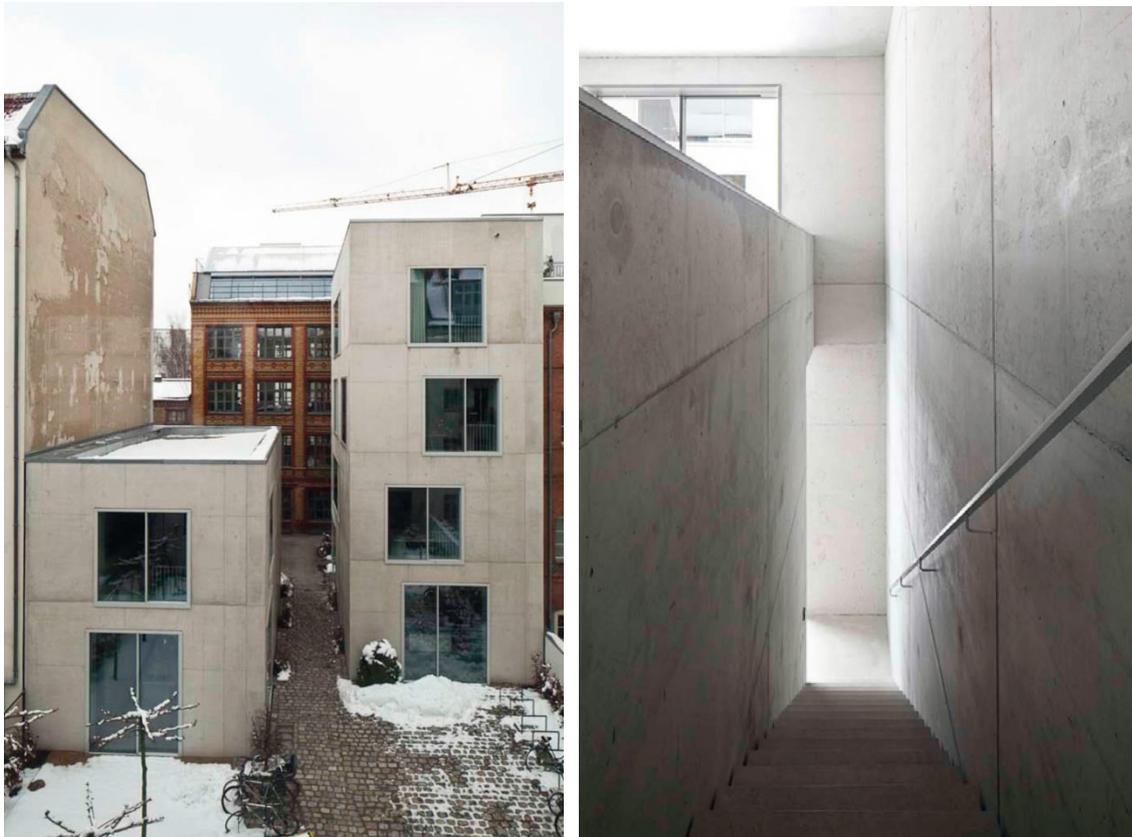


Bild 17: David Chipperfield Architects (Ansicht 1, Innentreppe; Fotos: David Chipperfield Architects)

#### Zusammenfassung:

- Architektur: David Chipperfield Architects
- Tragwerksplanung: Reiner von Pohlheim
- Baujahr 2013
- Trockenrohddichte: 1200 kg/m<sup>3</sup>
- Druckfestigkeit: LC16/18
- Wärmeleitfähigkeit: 0,40 W/mK (ILC 800: 0,193 W/mK)
- Außenwände: 50cm
- Wärmedurchgangskoeffizient:  
U = 0,70 W/m<sup>2</sup>K (ILC 800: 0,36 W/m<sup>2</sup>K)
- Stahlbewehrung
- Hydrophobierung, Graffitischutz

### 1.3.4 Einfamilienhaus H36

Adresse: Hasenberg, Stuttgart



Bild 18: Einfamilienhaus H36, Stuttgart (Ansicht 1) [20]

#### Zusammenfassung:

- Architektur: MBA/S Matthias Bauer Associates
- Tragwerksplanung: RFR Ingenieure GmbH, Stuttgart
- Baujahr 2014
- Trockenrohddichte:  $950 \text{ kg/m}^3$
- Druckfestigkeit: LC8/9
- Wärmeleitfähigkeit:  $0,22 \text{ W/mK}$  (ILC 800:  $0,193 \text{ W/mK}$ )
- Wärmedurchgangskoeffizient:  
 $U = 0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$  (ILC 800:  $0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$ )
- Wandstärken: 45cm Dachhaut; Außenwände 50cm mit Bauteilaktivierung
- Hydrophobierung
- Stahlbewehrung

### 1.3.5 Monohaus

Adresse: Christinenstraße 39, Berlin

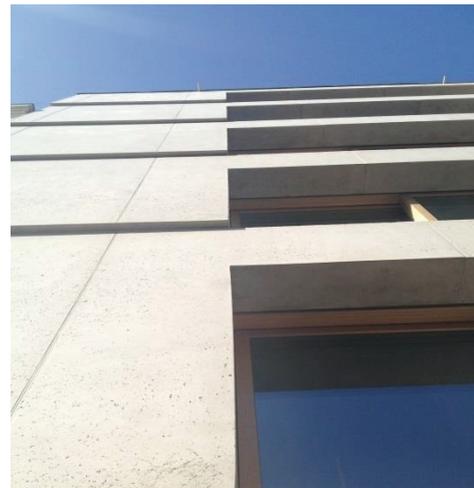


Bild 19: Monohaus, Christinenstraße (Ansicht 1 und 2; Foto: J. Kunze)

#### Zusammenfassung:

- Architektur: Zanderroth Architekten Berlin
- Tragwerksplanung: Andreas Leipold
- Baujahr 2014
- Trockenrohdichte:  $1.200 \text{ kg/m}^3$
- Druckfestigkeit: LC 12/13
- Wärmeleitfähigkeit:  $0,40 \text{ W/mK}$  (ILC 800:  $0,193 \text{ W/mK}$ )
- Außenwände: 55cm
- Wärmedurchgangskoeffizient:  
 $U = 0,65 \text{ W/m}^2\text{K}$  (ILC 800:  $0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$ )
- Stahlbewehrung
- Hydrophobierung, Graffitienschutz

### 1.3.6 Volta-Zentrum

Adresse: Bahnhofplatz St. Johann, Basel



Bild 20: Volta-Zentrum, Basel (Ansicht 1) [21]

#### Zusammenfassung:

- Architektur: Buchner Bründler Architekten, Basel
- Tragwerksplanung: nicht bekannt
- Baujahr 2010
- Rohdichte:  $900 \text{ kg/m}^3$
- Druckfestigkeit: 10-12 MPa
- Wärmeleitfähigkeit:  $0,27 \text{ W/mK}$  (ILC 800:  $0,193 \text{ W/mK}$ )
- Außenwände: 40 cm
- Wärmedurchgangskoeffizient:  $U = 0,61 \text{ W/m}^2\text{K}$  (ILC 800:  $0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$ )
- Hydrophobiert/ weiß lasiert

### 1.3.7 Zusammenfassung und Vergleich der Referenzprojekte

Der Vergleich der unterschiedlichen gebauten Referenzprojekte ergab folgende Erkenntnisse:

- Auch die Gebäude ohne Hydrophobierung hatten keine erkennbaren Schäden der Außenfassade.
- Bei den verwendeten Betonarten handelt es sich zumeist um gängige Leichtbetone, die innerhalb der Norm liegen.
- Die Verarbeitung des Materials erfolgte durch unterschiedliche Bauunternehmen ohne besondere Vorkenntnisse mit dem Material.
- Betonschalungen müssen genau geplant werden.
- Als Armierung wurde hauptsächlich konventioneller Baustahl verwendet.
- Der Anschluss der Decken erfolgt meist über Klappbewehrung.
- Die Wandstärken lagen zwischen 45 cm und 90 cm.
- Es waren keine bauphysikalischen Probleme erkennbar (Schimmel, Feuchtigkeit etc.).

In nachfolgender Tabelle werden die Betonrezepturen der vorgestellten Referenzgebäude gegenübergestellt. Über den Kennwert der modifizierten Druckhöhe nach Faust [22] wurde die Leistungsfähigkeit der Betonrezepturen bewertet. Der Infralichtbeton der TU-Berlin liegt dabei mit einer modifizierten Druckhöhe von 106,9 weit über dem für HPLWAC eingeführten Minimalwert von 70.

Tabelle 2: Vergleich der Betonrezepturen der Referenzgebäude

	EFH Berlin	Amtsgericht Frankfurt/ Oder	Büro Chipper- field	H36, Stuttgart	Christinen- straße	Volta- Zentrum	ILC TU Berlin
Trockenrohddichte $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	760	1200	1200	950	1200	900	780
Druckfestigkeit [MPa]	$f_{cm} \sim 7$	LC16/18	LC16/18	LC8/9	LC12/13	$f_{cm} \sim 10-12$	LC 8/9 ( $f_{cm}=13$ )
Wärmeleitfähig- keit [W/m·K]	0,18	0,54	0,40	0,22	0,40	0,27	0,19
Wanddicke [cm]	50	60 – 90	50	45	55	40	/
Wärmedurch- gangskoeffizient [W/m <sup>2</sup> ·K]	0,34	0,78	0,70	0,45	0,65	0,61	/
modifizierte Druckhöhe*	/	72,8	72,8	65,3	54,6	65,4	106,9

\*modifizierte Druckhöhe nach Faust als Maß für die Leistungsfähigkeit des Betons:

$$f_{ck} / (\rho/2200)^{2,5} \quad [22: S. 4]$$

#### 1.4 Infralichtbeton im Kontext der Energieeinsparverordnung (EnEV)

Die sich in regelmäßigen Abständen seit 1977 zunächst in der Wärmeschutzverordnung, später in der Energieeinsparverordnung festgelegten Anforderungen an den Energieverbrauch verschärfen sich in regelmäßigen Abständen.

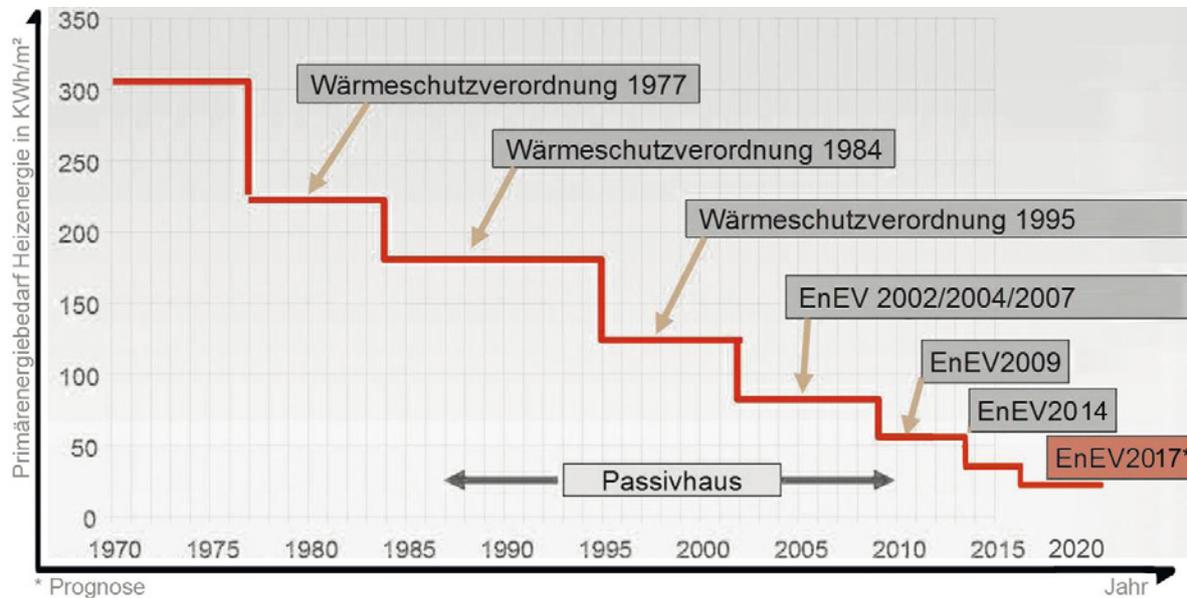


Bild 21: Entwicklung der Gesetzgebung in Deutschland

Aus diesen Rahmenbedingungen ergibt sich zwangsweise die Erkenntnis, dass die Entwicklung von Strategien zur Nachhaltigkeit eine der zentrale Fragen an alle am Bauprozess beteiligten Akteure ist.

Da sich das Projekt INBIG hauptsächlich mit der Erstellung von Wänden, also der vertikalen Hüllfläche von Gebäuden beschäftigt, galt es also zunächst festzulegen, welche Anforderungen dem Projekt zugrunde gelegt werden sollten. Hier wurde entschieden, den verschärften Energie-Standard für Neubauten der EnEV 2014 (gültig ab 01.01.2016) als Grundlage für die Erstellung der Entwürfe und Prototypen anzunehmen. Dies beinhaltet eine Erhöhung der Anforderungen an den Jahres-Primärenergiebedarf um 25% gegenüber der EnEV 2009 [23; 24].

Der U-Wert der Außenwand des Referenzgebäudes wird in der EnEV2009/2014/2016 [25] mit  $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$  angegeben. Eine weitere Verschärfung des U-Werts durch die EnEV 2017 wird nach derzeitigem Erkenntnisstand bei voraussichtlich 20% liegen.

Die EnEV stellt zwar beim Neubau keine direkten Anforderungen an Einzelbauteile außer der Einhaltung des Mindestwärmeschutzes, dennoch sollten die Werte nicht zu weit vom Referenzwert entfernt liegen.

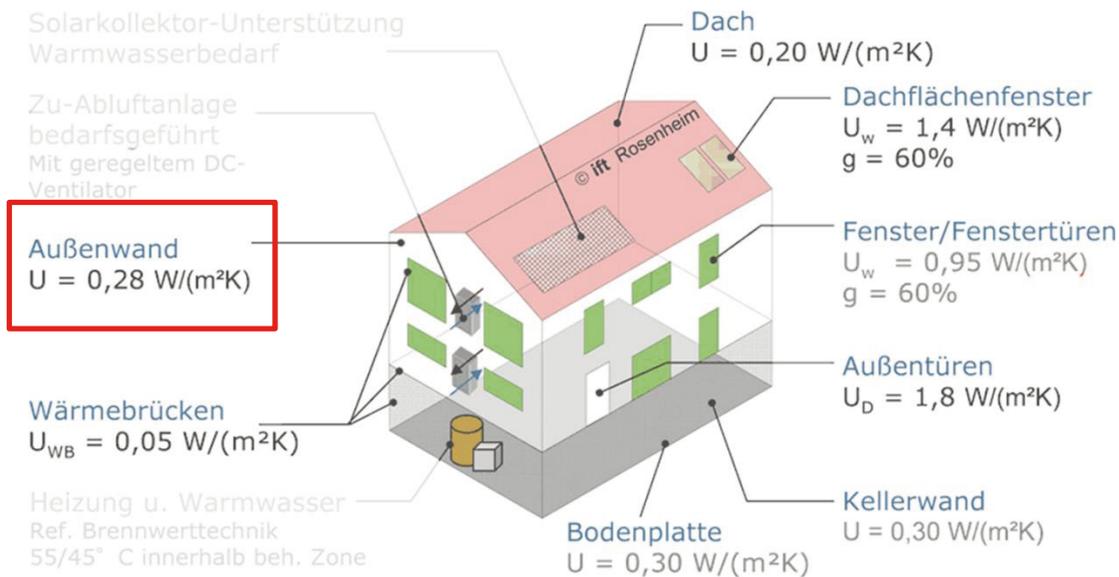


Bild 22: EnEV – Nachweisgrößen –  $HT'$  gemäß EnEV 2009/2014/2016 [26]

In einem ersten Vergleich wurden also unterschiedliche Wandaufbauten mit EnEV konformen Aufbau hinsichtlich des U-Wertes und hinsichtlich der Bauteilstärke verglichen. Ziel dabei war es eine Art Vordimensionierung der Bauteile hinsichtlich des Wärmeschutzes für die zukünftigen Entwurfsplanungen zu erhalten. Bei der Berechnung gemäß EnEV wurde die Qualität der Außenwand des Referenzgebäudes zugrunde gelegt.

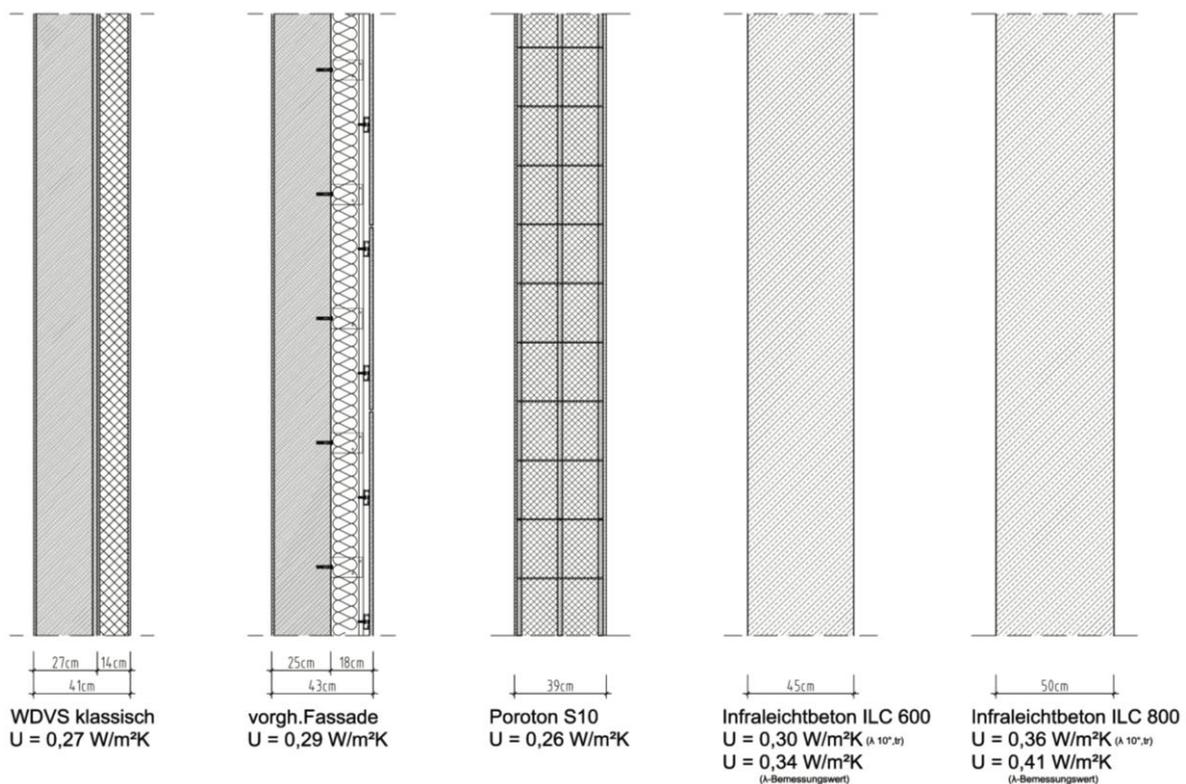


Bild 23: Vergleich verschiedener Wandaufbauten unter Annahme des Referenzwertes  $U=0,28\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

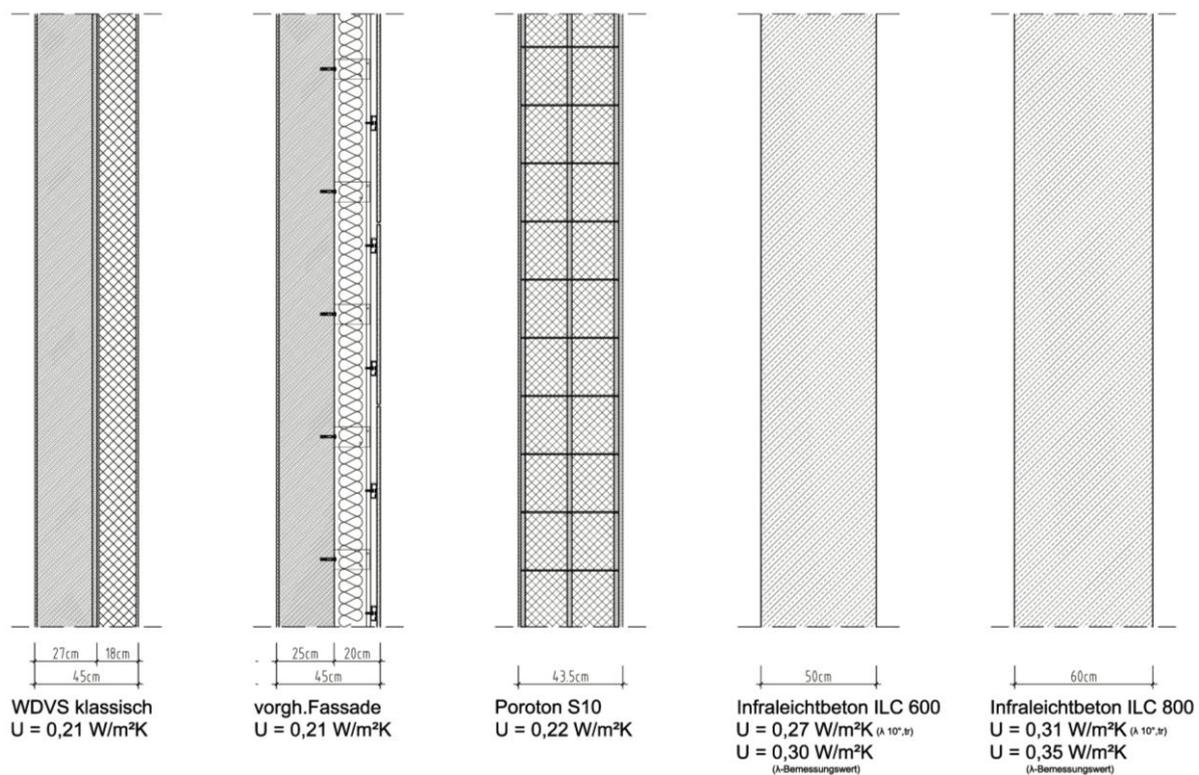


Bild 24: Vergleich verschiedener Wandaufbauten unter dem fiktiven Ansatz um 20% verschärfter Anforderungen des U-Wertes

Die U-Werte der ILC-Aufbauten wurden unter Berücksichtigung von zwei unterschiedlichen Ansätzen für die Wärmeleitfähigkeit gerechnet. Für die Berechnung nach EnEV wurde der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit, ermittelt gemäß DIN EN ISO 10456, zugrunde gelegt. Gleichzeitig wurde darauf geachtet, die Wandstärke in einem ökonomisch vertretbaren Maß zu halten.

Der Vergleich der Wandstärken zeigt deutlich, dass die tragende Außenwand aus Infraleichtbeton durch andere Bauteile entsprechend kompensiert werden muss, da die weit höhere Leistungsfähigkeit des Baustoffes in Bezug auf das Tragverhalten natürlich mit einer verringerten Dämmeigenschaft einhergeht. Der Vergleich zeigt aber ebenso, dass selbst unter Annahme weiterer Verschärfungen der Bauteilanforderungen eine Wand aus Infraleichtbeton genug Dämmwirkung hat, um EnEV-konforme Gebäude zu errichten.

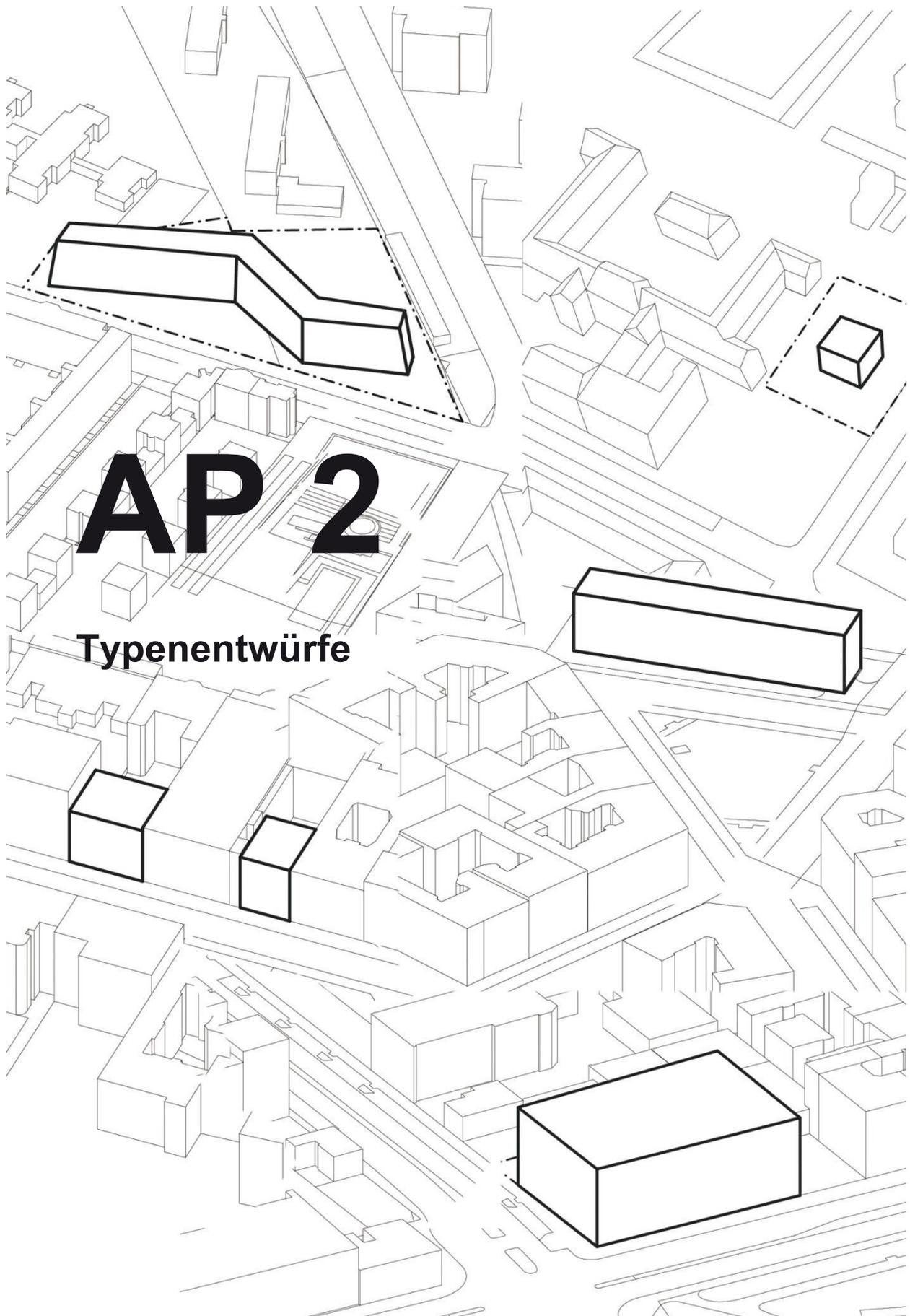
## Zusammenfassung

Besonders bei den "leichten" Rezepturen mit 600 kg/m³ reicht die Wärmeleitfähigkeit des Materials aus, um mit Wandstärken von 65cm den U-Wert der Außenwand des Referenzgebäudes fast einzuhalten. Bei "schwereren" Rezepturen müssen die Wände durch andere Bauteile kompensiert werden. Die im Folgenden ausgearbeiteten Entwürfe wurden sämtlich

unter Bedingungen der EnEV 2014/2016<sup>3</sup>, sowie unter Annahme einer weiteren Verschärfung der Anforderungen an die Hüllfläche um 20% durchgerechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass das Material auch unter künftigen Verschärfungen der Energieeinsparverordnung für Wandaufbauten geeignet ist.

---

<sup>3</sup> Im Folgenden sind mit EnEV 2014/2016 die verschärften Anforderungen der EnEV seit 01.01.2016 gemeint



# AP 2

## Typenentwürfe

## 2 Arbeitspaket 2: Ausarbeitung der Typenentwürfe

### 2.1 Auswahl der Grundstücke

In dieser Phase wurden sechs typologische Entwürfe unter besonderer Berücksichtigung der Materialeigenschaften des ILC entwickelt. Hierzu wurden vier prägnante Typen des Geschosswohnungsbaus ausgewählt: Punkthaus, Zeilenbau, Blockrandbebauung und Baulückenschließung.

Aufgabe war es, zu jedem Typen ein bis zwei Varianten mit 4 bis 6 Vollgeschossen zu entwickeln. Hier spielte die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Architekten und Bauingenieuren eine große Rolle, um die unterschiedlichen Fragestellungen, die sich aus den speziellen Eigenschaften des Infrleichtbetons ergeben, entwurflich zu bearbeiten.

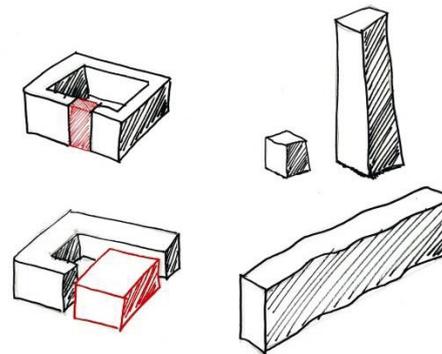
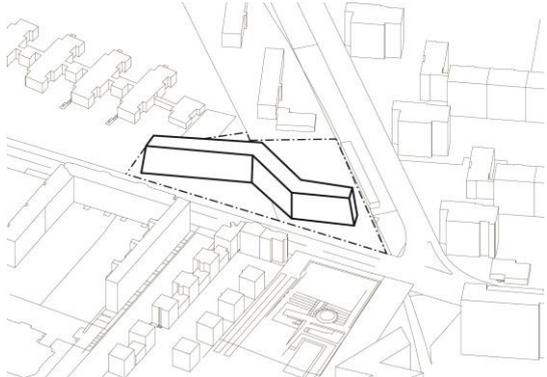
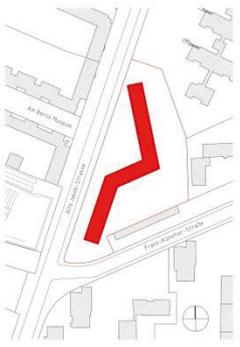
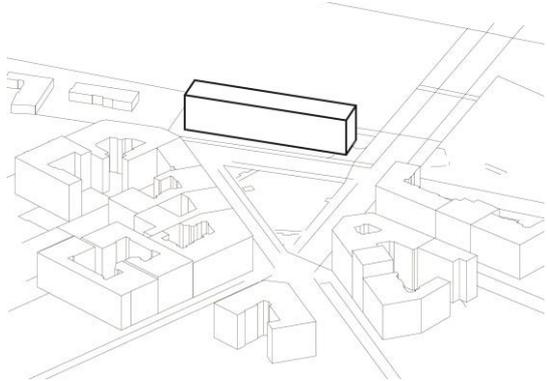
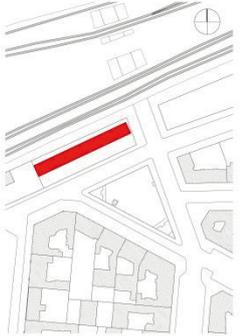
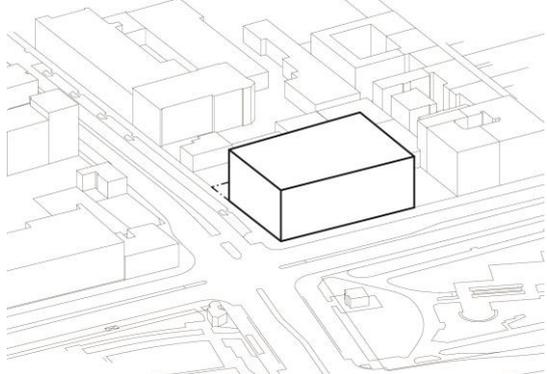
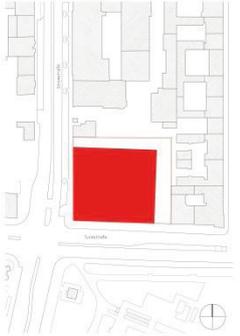
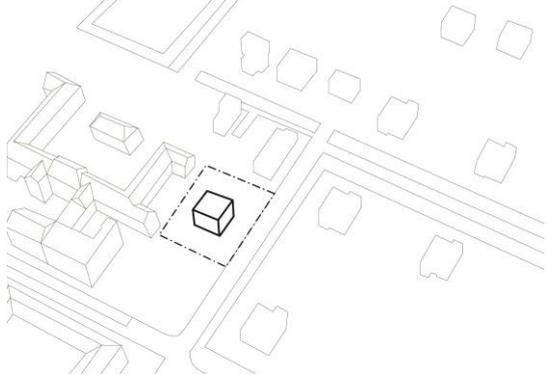
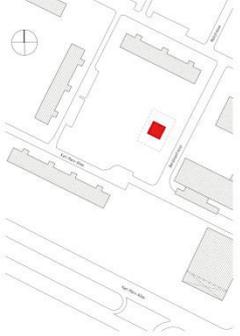


Bild 25: Typologien

In einem ersten Arbeitsschritt wurden für jeden Typen 3 potentielle Grundstücke im Innenstadtbereich Berlins herausgesucht. Diese Vorauswahl wurde in enger Abstimmung mit dem Expertengremium reduziert und dann den gesamten Projektbeteiligten im Kick-off-Meeting am 08.04.2014 vorgestellt. Bei jedem Typ und jedem Grundstück stellen sich unterschiedliche Fragen in der Bearbeitung.

Tabelle 3: Übersicht Typenentwürfe

<p>Grundstück 01 Kantstraße <b>Baulücke</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bauweise in Ort-beton</li> <li>- Südfassade mit Balkonen</li> </ul>		
<p>Grundstück 02 Karl-Marx-Allee <b>Punkthaus</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bauweise mit Fertigteilen</li> <li>- Wie erreicht man große Gebäudehöhe?</li> </ul>		

<p>Grundstück 03 Alte Jakobstraße <b>Zeile 1</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bauweise mit Fertigteilen</li> <li>- Verbindung ILC mit Holzbalkendecken</li> </ul>		
<p>Grundstück 04 Kracaueer Platz <b>Zeile 2</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bauweise in Ort-beton</li> <li>- Kriechen /Schwinden (Ort-betonbau)</li> <li>- Schallschutz (Gleisanlagen)</li> </ul>		
<p>Grundstück 05 Stromstraße <b>Blockrand</b></p>		
<p>Grundstück 06 Stavanger Straße <b>Stadtvilla</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bauweise in Ort-beton</li> <li>- Umgang mit Wand als gestalterisches Element</li> </ul>		

Schon aus der Lage und unmittelbaren Umgebung jedes einzelnen Grundstückes ergaben sich bereits eine große Anzahl unterschiedlicher Fragen an architektonische Gestaltung und technische Ausformulierung der Gebäude.

Fragestellungen Tragwerk	Fragestellungen Architektur
<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringe Festigkeit: welche Geschosszahl kann z.B. beim Punkthaus realisiert werden?</li> <li>• Wie werden Balkone sinnvoll integriert?</li> <li>• welche Stützweiten sind z.B. für Überzüge denkbar?</li> <li>• Wie können Auskragungen realisiert werden?</li> <li>• Erhöhte Kriech- und Schwindneigung des Materials: welche Maßnahmen sind beispielsweise bei Zeilen-/Blockrandbebauung erforderlich? (z.B. zeitversetzte Betonierabschnitte; Abschätzung der Verformungen etc.)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Welche Art der Gestaltung von Öffnungen in den Fassaden ist möglich / sinnvoll?</li> <li>• Wie geht man mit dem Thema der dicken Wand räumlich um?</li> <li>• Wann baut man in Ortbeton, wann mit Fertigteilen?</li> <li>• Wie erzeugt man im Fertigteilbau ausreichende Varianz?</li> <li>• Wo nutzt man die Potentiale des Materials am besten aus?</li> <li>• Wie entwickelt man Balkone, Auskragungen materialgerecht?</li> </ul>

## 2.2 Ausarbeitung der Entwürfe

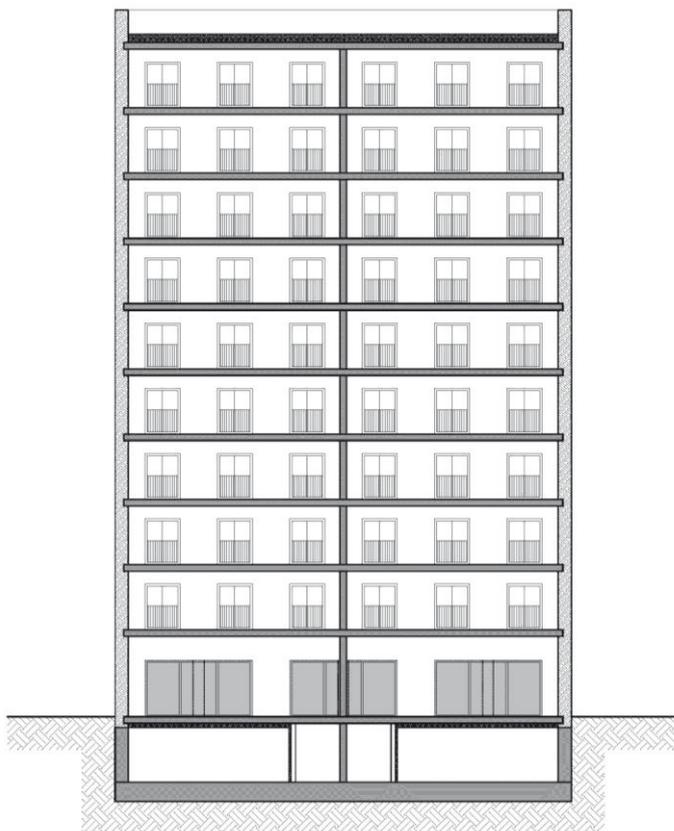
Die folgenden sechs Entwürfe wurden entwickelt:

- 1x Punkthaus, mehrgeschossiges Referenzgebäude als Basis für die Erstellung einer Parametermatrix (ohne Grundstück)
- 2x Baulücke (Kantstraße 126, Kantstraße 128)
- 2x Zeilenbau (Alte Jakobstraße, Kracauer Platz)
- 1x Punkthaus, Stadtvilla (Stavanger Straße)

Des Weiteren wurde nach Absprache im Rahmen des Kick-off-Meetings vom 08.04.2014 zusätzlich der bereits bestehende Entwurf des Hochhauses Urban Living (siehe Kapitel 1.1; Grundstück 02 Karl-Marx-Allee) für eine Analyse verschiedener Einflussgrößen herangezogen.

Aufgrund des bereits sehr umfangreichen Arbeitsaufwandes für die oben aufgeführten Entwürfe wurde in Abstimmung mit dem Expertengremium auf eine Ausarbeitung des Blockrandes verzichtet.

Für jeden Entwurf wurde im Rahmen des Entwurfsprozesses direkt ein Nachweis nach Energieeinsparverordnung (EnEV) 2014 (Stand 01.01.2016) [24] erstellt. So kann gewährleistet werden, dass die Wahl des Materials, der Wandstärke und des Fensterflächenanteiles ausreicht, um auch die zukünftigen rechtlichen Rahmenbedingungen zu erfüllen.



Exemplarischer Aufbau eines Gebäudes aus Infralichtbeton:

- Außenhülle als tragende, monolithische ILC-Schicht
- Decken aus Beton, Massivholz oder ähnlich
- Tragender, innenliegender Normalbeton-Kern bzw. -Wände
- Dach aus Leichtbeton mit Dämmung und Abdichtung
- Keller aus konventionellen Baustoffen (hier unbeheizter Keller aus WU-Fertigteilen)

Bild 26: Schematischer Aufbau eines mehrgeschossigen Wohnhauses aus ILC

### 2.2.1 Referenzgebäude (kein Grundstück)

Das sogenannte Referenzgebäude dient der Vorbemessung von entwurfsrelevanten Parametern:

- Wie viele Stockwerke kann man mit einer tragenden Außenwand aus ILC in welcher Materialmischung realisieren?
- Welche Wandstärken sind dafür notwendig?
- Welche Wandstärken und welcher maximale Fensterflächenanteil kann zur Einhaltung der Anforderungen der EnEV angenommen werden (mögliche Kompensationen durch gezielte Überbemessung sind hier noch nicht eingerechnet)?

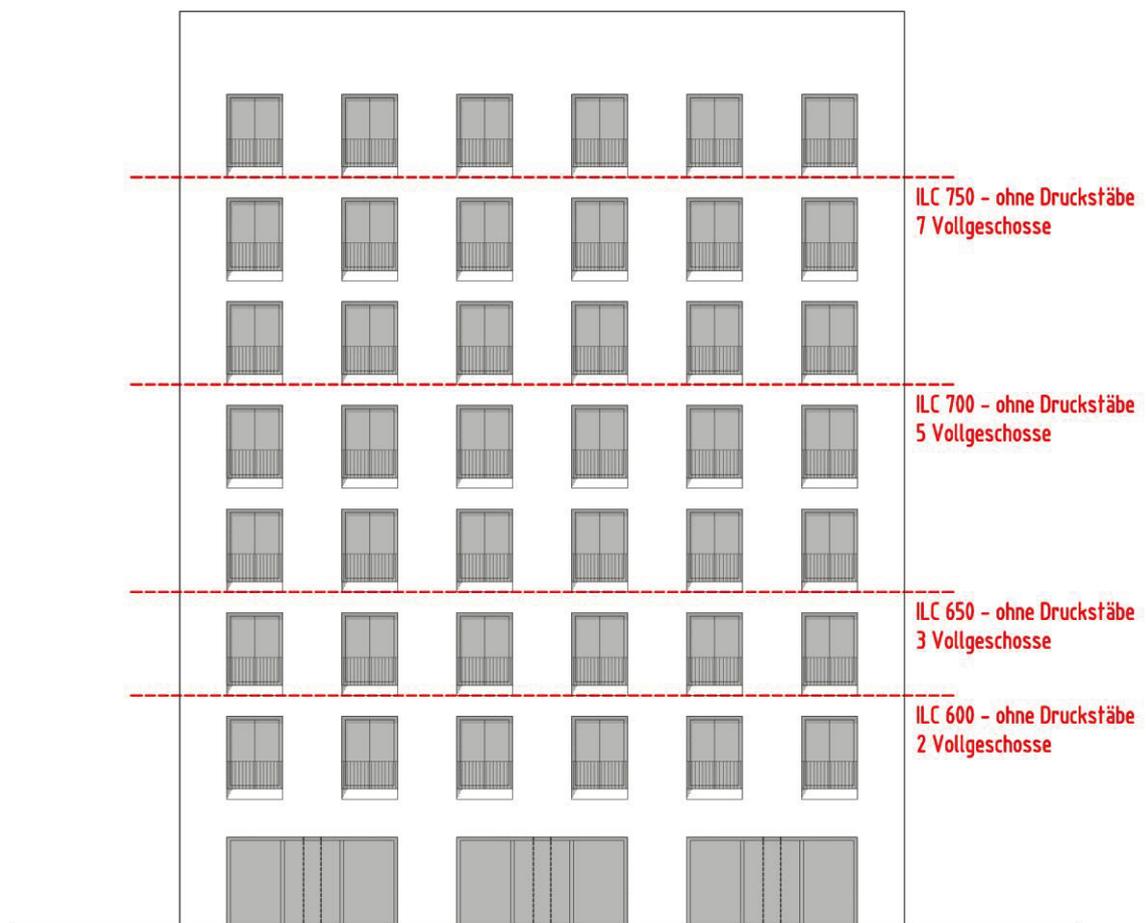


Bild 27: Mögliche Gebäudehöhen bei unterschiedlichen Festigkeitsklassen

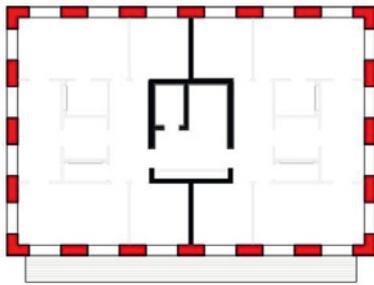


Bild 28: Schematischer Gebäudeaufbau mit tragender Außenwand aus ILC (rot)

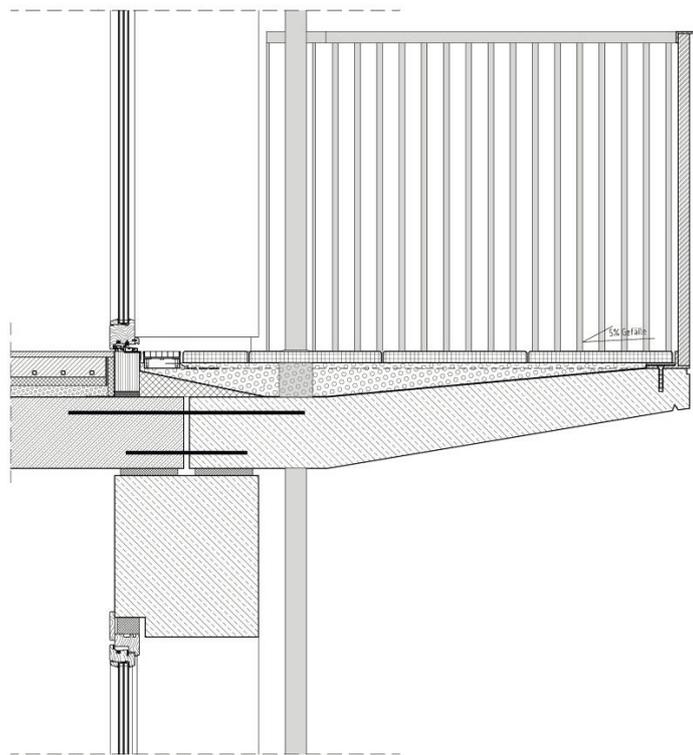


Bild 29: Anschlussdetail Balkon mit Fertigteil aus ILC und Rückverankerung (schematisch) in der Deckenplatte

Gleichzeitig wurde anhand des Referenzgebäudes eines der Details für auskragende Bauteile entwickelt. Die auskragende Balkonplatte aus ILC ist in der Decke aus Normalbeton rückverankert und wird ohne zusätzliche Wärmedämmungen angeschlossen. ILC wird also als auskragendes, biegebeanspruchtes Bauteil verwendet.

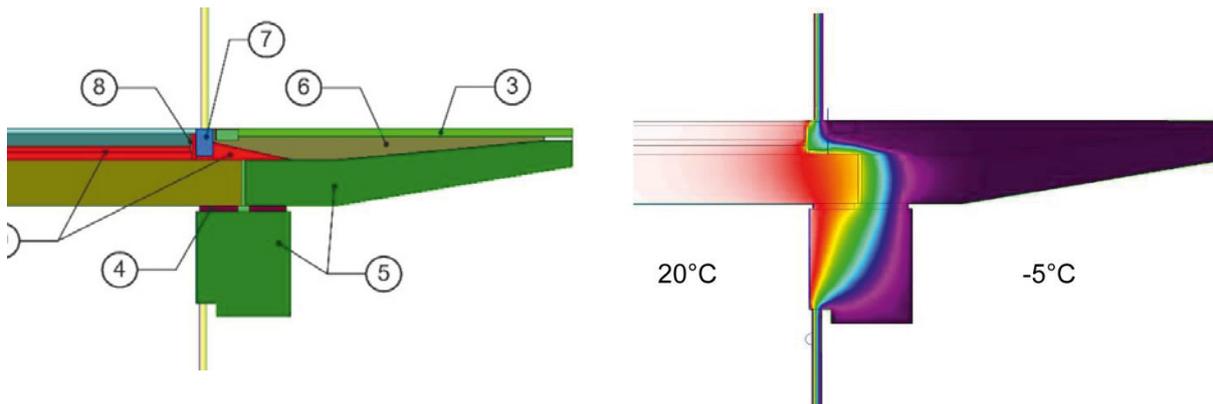


Bild 30: Bauteilaufbau und Isothermenverlauf beim Anschlussdetail Balkon (Bauteil 5 Infraleichtbeton)

Das Referenzgebäude diente im weiteren Verlauf des Projektes zur Erstellung von thermischen Simulationen und der Ökobilanz.

### 2.2.2 Baulücke Kantstraße 126/128 (Grundstück 1)

Für die Baulücke in der Kantstraße 126 und 128 wurden zwei unterschiedliche Gebäude entwickelt. Beide basieren auf dem klassischen Konstruktionsprinzip des Berliner Mietshauses mit zwei tragenden Außenfassaden und einer tragenden Mittelwand. Die Decken spannen dabei von innen nach außen.

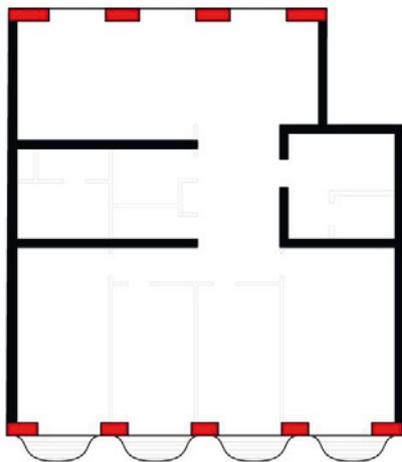


Bild 31: Schematischer Gebäudeaufbau Kantstraße 126 mit tragender Außenwand aus ILC (rot)

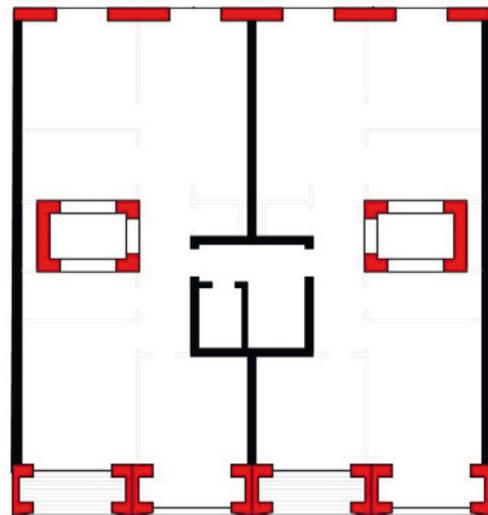


Bild 32: Schematischer Gebäudeaufbau Kantstraße 128 mit tragender Außenwand aus ILC (rot)

Beide Gebäude ähneln sich stark in der Gestaltung der straßenseitigen Nordfassade. Hier präsentieren sie sich als simple urbane Lochfassade. Mehr Aufwand wurde hingegen auf die Gestaltung der hofseitigen ruhigen Südfassade verwendet. Hier spielt das Thema der Verschattung ebenfalls eine Rolle.

Die Kantstraße 126 wird durch eine regelmäßige Anordnung geschwungener Balkone dominiert. Diese entwickeln sich direkt aus der Fassade heraus. Das aus Ort beton gegossene Gebäude nutzt das Potential des Materials Infraleichtbeton, jede beliebige Form annehmen zu können. Gleichzeitig ist das Anschlussdetail äußerst simpel. Der Balkon wird monolithisch aus der Fassade heraus entwickelt. Wie beim Referenzgebäude findet sich auch hier kein gängiges Anschlussdetail wie ein Isokorb oder ähnliches. Die Freiform der Außenwand bildet sich auch auf der Innenseite des Gebäudes ab. Innenraum und Äußeres stehen also in einem direkten formalen Zusammenhang.

Die Kantstraße 128 präsentiert sich als Gebäude, dessen Rückfassade durch ein System gleichförmiger "Loggienkästen" dominiert ist. Die Bauteile werden als Fertigteile angeliefert und sind allseitig aus Infraleichtbeton gefertigt. Dadurch kann der äußere Abschluss beliebig verschoben werden. Manchmal erscheint die Außenhaut als Balkon/Loggia und manchmal als Innenraum.

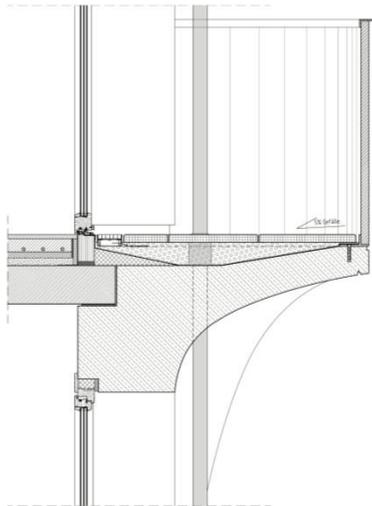


*Bild 33: Südfassade Kantstraße 126*

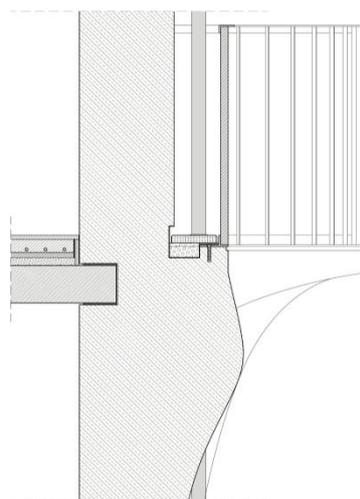


*Bild 34: Südfassade Kantstraße 128*

Um beim Haus Nr. 126 die Lasten der auskragenden Balkonplatten aufnehmen zu können, werden in die Außenwand Konsolen integriert. In der späteren Ausarbeitung wurde insbesondere der Schnitt des Gebäudes noch im Hinblick auf Tragverhalten und Wärmebrücke optimiert.



*Bild 35: Balkon Kantstraße 126*



*Bild 36: Balkon Kantstraße 126*

### 2.2.3 Punkthaus Urban Living Karl-Marx-Allee (Grundstück 2)

Das aus dem Urban Living Wettbewerb hervorgegangene, von Barkow Leibinger Architekten und schlaich bergemann und partner entworfene Hochhaus an der Karl-Marx-Allee ist für das Projekt INBIG von daher interessant, als dass das Material hier weit über seine bisherigen Grenzen ausgereizt wird.

Anders als bei allen anderen Gebäuden des Forschungsprojektes wird der Infraleichtbeton hier hauptsächlich als aussteifendes und weniger als druckfestes Material eingesetzt. Die Tragfunktion wird von den in den Wänden liegenden Bewehrungen übernommen, die nicht nur auf Zug sondern auch auf Druck belastet werden. Die Untersuchung dieses Tragwerkskonzepts ist Gegenstand eines eigenen Forschungsprojekts („Stabwände – Wärmedämmende Infraleichtbetonwände mit knickstabilisierter Druckbewehrung“, siehe Abschnitt 1.1).

Gleichzeitig schafft es dieser Entwurf, mit einer einzigen Form von Fertigteilen ein komplexes Gebäude zu erzeugen.

Bei der parallel zur Bearbeitung erfolgenden EnEV-Berechnung ergab sich, dass die Wände mit 60cm Stärke im Hinblick auf die Wärmeverluste nicht das problematische Bauteil des Entwurfes darstellen. Vielmehr geht es um die Verluste an den verglasten Bauteilen. Es wäre also eine Möglichkeit, die Fenster zu verkleinern oder eine neue Lösung zu finden, die ggf. der ohnehin recht massiven Wand aus ILC gerecht wird. Die Wahl fiel daher auf die Erstellung einer hinterlüfteten Dreischeibenverglasung als begehbare Loggia (vgl. Bild 39).

Diese greift die Stärke der Wand auf und erzeugt einen nutzbaren variablen Zwischenraum, der im Winter geschlossen wird. Im Sommer kann dann entweder nur die äußere Einscheibenverglasung oder die innenliegende Dreischeibenverglasung geschlossen werden.



Bild 37: Urban Living Ansicht [5]

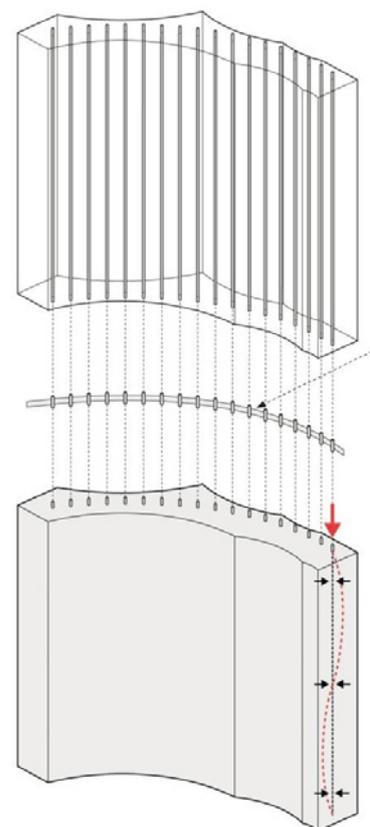
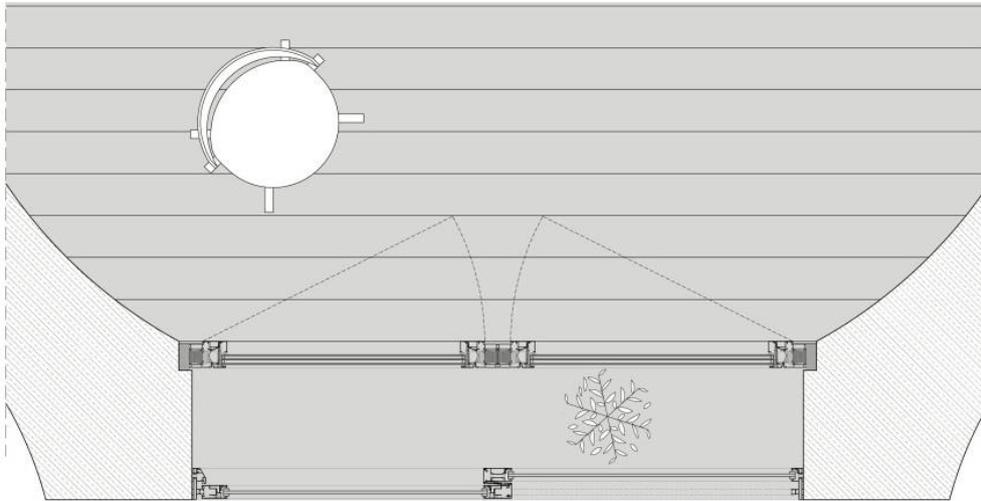


Bild 38: Urban Living Tragwerksprinzip [5]



*Bild 39: Urban Living Loggiafenster*

## 2.2.4 Zeilenbau Alte Jakobstraße (Grundstück 3)



*Bild 40: Alte Jakobstraße Visualisierung*

Das Grundstück in der Alten Jakobstraße ermöglicht einen Zeilenbau mit einer Länge von ca. 150m. Die Geschosshöhe wurde aus Gründen des Brandschutzes auf 8 Vollgeschosse beschränkt.

Durch das sehr große Gesamtvolumen des Gebäudes und die Lage in einem Wohngebiet stellte sich hier die Frage der kompletten industriellen Vorfabrikation. Aufgrund der ungewöhnlichen Ausmaße des Gebäudes beinhaltete dies auch Vorteile bezüglich der erhöhten Kriech- und Schwindneigung des Materials. Das Entwurfsprinzip basiert auf der Idee, einzelne Bauabschnitte aus ILC-Fertigteilen in regelmäßigen Abständen zu positionieren, und diese anschließend mit Holzbalkendecken miteinander zu verbinden. Die entstehenden Zwischenräume können dann entweder als einzelne Zimmer oder auch als Balkone und Loggien genutzt werden. Durch die Dämmeigenschaft der Wände und der Holzbalkendecken kann die thermische Trennung quasi frei verschoben und so Außenräume variabler Größe erzeugt werden.

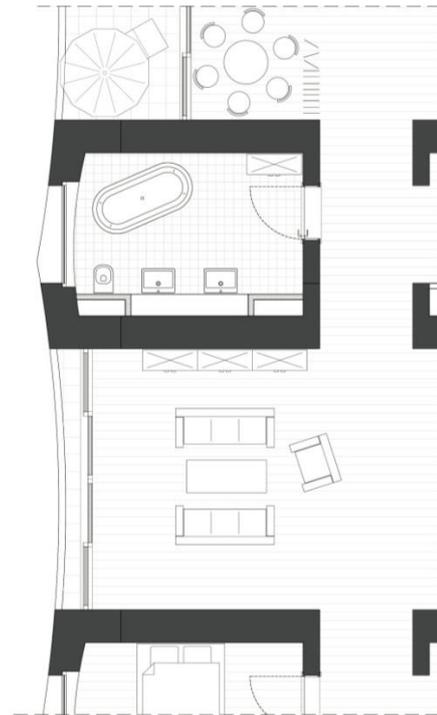


Bild 41: Alte Jakobstraße Grundriss

Diese Möglichkeit schafft eine Fassade, die trotz der starken Regelmäßigkeit der Gebäudestruktur unterschiedlichste Gestaltungsfreiräume zulässt. So können die Abstände zwischen den Betonkernen variiert werden, Öffnungen auch über 2 Geschosse sind möglich. Durch eine unregelmäßige Verteilung von Treppenhäusern entstehen Wohnungen mit variablen Wohnungsgrößen.

Technisch stellt sich hier die Fragestellung der Kombination von Beton-Fertigteilen mit Holzbalken- bzw. Massivholzdecken, wobei insbesondere die Frage der Verbindung von Bedeutung ist.

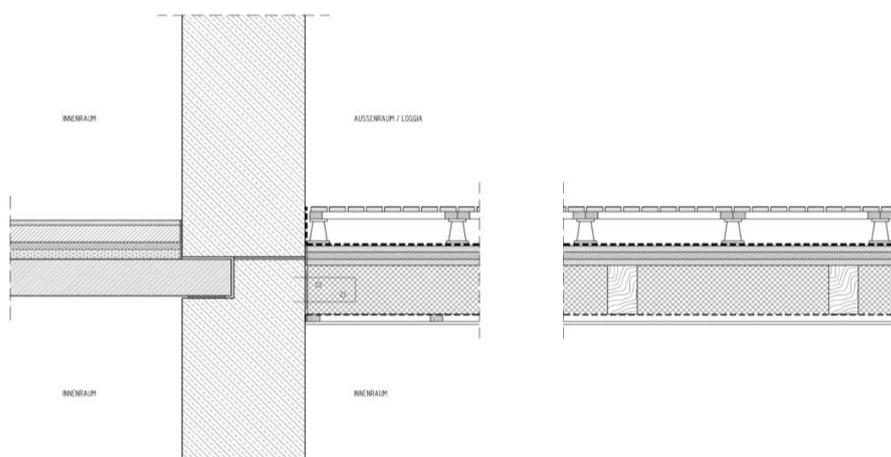


Bild 42: Alte Jakobstraße Detail Deckenanschluss – links Betondecke, rechts Holzbalkendecke

## 2.2.5 Zeilenbau Kracauer Platz (Grundstück 4)

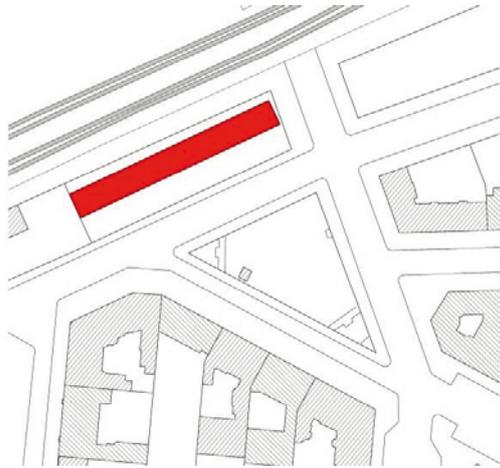


Bild 43: Kracauer Platz - Lageplan

Der Zeilenbau am Kracauer Platz befindet sich auf einem Grundstück entlang der stark befahrenen Ost-West Verbindung der Berliner S-Bahn. Die Nordseite des Gebäudes bildet eine Art Schallmauer, während die Südseite dem städtischen Platz zugewandt ist.

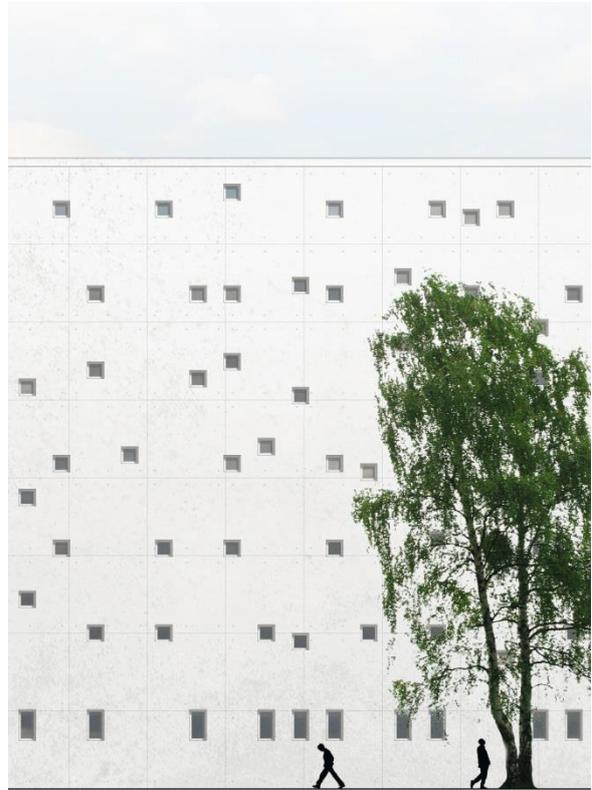


Bild 44: Kracauer Platz – Visualisierung Nordfassade

Um dieser Lage gerecht zu werden, wurde ein Gebäude mit einem starken Rücken aus Infrleichtbeton und einer leichten, durch durchlaufende Balkonplatten charakterisierten Fassade aus Holz entwickelt. Hier soll das Schalldämm-Maß des Materials gezielt eingesetzt werden. Gleichzeitig wurden an dieser ca. 60m langen Wand aus Ortbeton die Effekte des Kriechens und Schwindens untersucht.



Bild 45: Kracauer Platz – Ausschnitt Grundriss

Die Rückwand des Gebäudes bildet eine Zone, in der die Nebenräume des Gebäudes untergebracht sind. Hier finden sich Toiletten, Küchen, Arbeitsräume und auch Schlafnischen. Die Wand variiert in ihrer Dicke und bildet punktuell kleine Taschen (Pochées) aus.

Die kleinen Öffnungen in der Rückwand haben eine Größe von 65cm x 65cm und sind in unregelmäßigen Abständen pixelhaft über die gesamte Wandfläche verteilt. Die Schalung erfolgt mit Standard-Schalung von 2,5m x 2,5m.

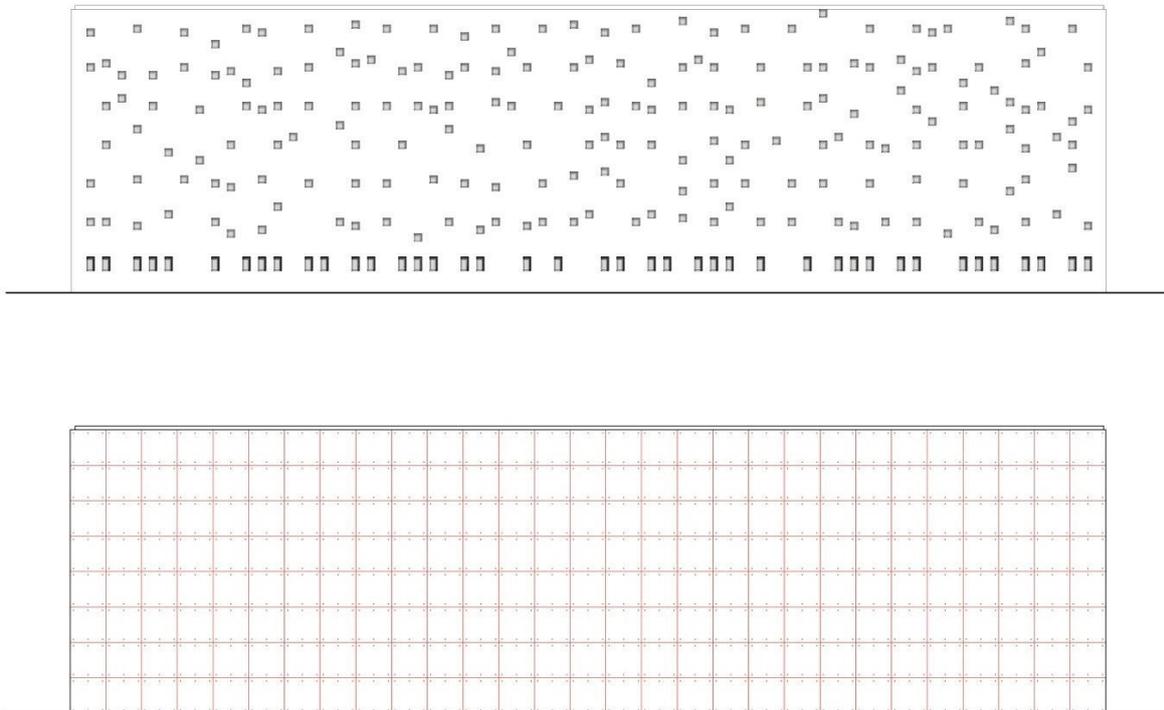


Bild 46: Kracauer Platz – Fensterverteilung und Schalmuster

Die Decken des Gebäudes werden durch quer zum Gebäude verlegte Holzbalken gebildet. Diese durchstoßen die Südfassade des Gebäudes und bilden so die meandernden Balkone entlang des Stadtplatzes.

Auch hier kommt es also zu einer Verbindung von Infrleichtbetonbau mit Holzkonstruktion. Nachzuweisen ist neben der bauphysikalischen Eignung des Materials in der gewählten Konfiguration also auch der Anschluss von Holzdecken an eine tragende Wand aus ILC. Eine Betrachtung zum Schallschutz wird in Abschnitt 2.3.5 beschrieben.

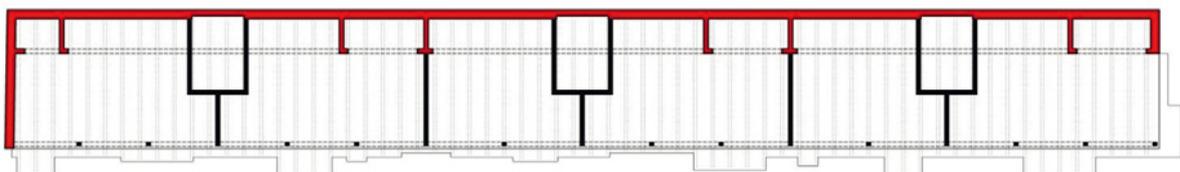


Bild 47: Kracauer Platz – Konstruktionsschema mit ILC (rot), Normalbeton (schwarz) und Holzkonstruktion (gestrichelt)

## 2.2.6 Punkthaus Stadtvilla Stavanger Straße (Grundstück 6)



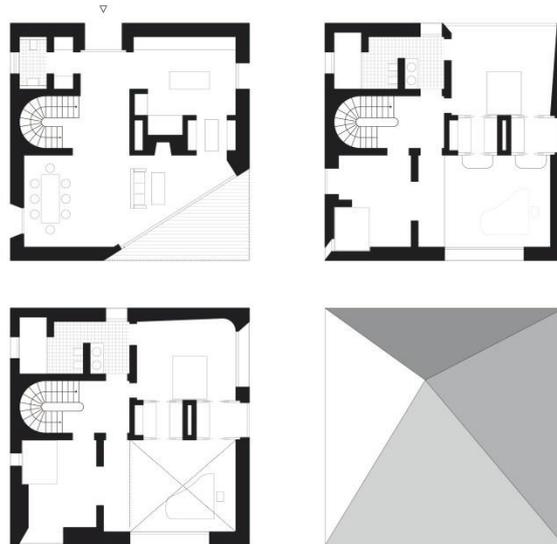
Bild 48: Stadtvilla – Grundriss EG

Die freistehende Villa ist eine der Typologien, bei denen Dämmbetone oder andere Varianten des Baustoffes bis dato am meisten eingesetzt wurden. Dies lag in der Regel an der bei frühen Rezepturen noch geringen Tragfähigkeit des Materials sowie auch an noch nicht vorhandenen bauaufsichtlichen Zulassungen.

Obwohl die Tragfähigkeit des ILC bei der Stadtvilla kein Problem mehr darstellt, eignet sich die Typologie dennoch nach wie vor für eine Betrachtung spezifischer Lösungen mit Infralichtbeton. Der hiesige Entwurf soll folglich dazu dienen, technische Fragen bzw. Randbereiche der Anwendung von ILC aufzuzeigen, die Thema zukünftiger Forschungsprojekte sein könnten.

Im Unterschied zum Geschosswohnungsbau, der dazu tendiert, generische Lösungen für Wohnungsgrundrisse zu produzieren, bietet der Typus der Stadtvilla die Chance spezifische, auf spezielle Nutzer hin abgestimmte räumliche Lösungen zu finden. Gleichzeitig ist hier der Druck, möglichst günstige und effiziente Lösungen zu finden, geringer. Die Wandstärke unterliegt nicht denselben ökonomischen Zwängen und kann freier moduliert werden.

Damit rückt ein architektonisches Thema in das Zentrum der Betrachtung, nämlich die Gestaltung von Räumen mittels dicker Wände, Versprünge, Nischen, Pochées. Die dicke Wand wird also von einem aus technischen Gründen (Tragwerk, EnEV, Bauphysik) dimensionierten Bauteil zu einem gestalterischen Leitmotiv. So kommen die plastischen Qualitäten des Materials voll zur Geltung und es ist gleichzeitig möglich, ein Haus komplett aus einem Baustoff zu errichten.



*Bild 49: Stadtvilla – Grundrisse*

Bei der Analyse gebauter Referenzen aus Infraleichtbeton / Dämmbeton stellt sich beim Einfamilienhaus / der Villa immer wieder die Frage der Realisierung großer Auskragungen.

Um diesem Thema gerecht zu werden hat der regelmäßige quadratische Baukörper des Entwurfes eine Aussparung einer Ecke des Gebäudes. Die so entstehende Auskragung hat Abmessungen von 6,60m x 4,20m. Es gilt also nachzuweisen, ob derartige Spannweiten für Auskragungen und auch für Öffnungen in Infraleichtbeton ohne weitere technische Hilfsmittel und Tricks wie verdeckte Fachwerkträger oder ähnliches realisierbar sind.



*Bild 50: Stadtvilla – Ansicht/Visualisierung*



*Bild 51: Meisterhäuser Dessau, Bruno/ Fioretti/ Marquez, Foto: Christoph Rokitta, Berlin*

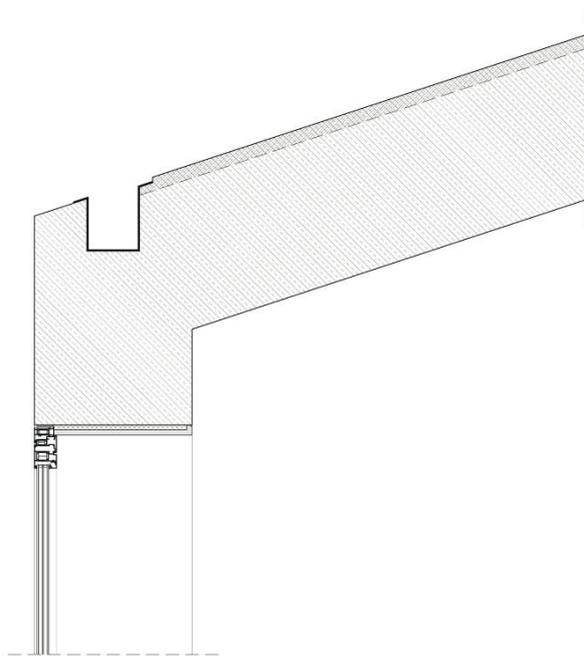


Bild 52: Stadtvilla – Detail Dach

Ebenso war geplant, nicht nur die Außenwände des Gebäudes, sondern auch die Dachhaut als reines Betonbauteil zu errichten. Ziel ist es mithilfe einer Verbindung von ILC als Tragwerk und einer Abdichtung ein monolithisches, funktionsfähiges Dachbauteil zu entwickeln. Analog zu erfolgreich getesteten Betonkanus aus Infraleichtbeton könnte z.B. eine zementbasierte Abdichtungsebene auf das Rohbetondach aufgebracht oder der ILC mit einer wasserabweisenden Beschichtung versehen werden.

### 2.3 Grundlagen der Planung

Nachdem in Abschnitt 2.2 die entwickelten Entwürfe vorgestellt wurden, sollen im Folgenden die Ansätze, die der Planung der Entwürfe zugrunde gelegt wurden, erläutert werden.

Infraleichtbeton ist ein verhältnismäßig neues Material, das mit seiner Trockenrohdichte von weniger als  $800 \text{ kg/m}^3$  sowie einer Festigkeitsklasse geringer LC12/13 unterhalb der in EC2 [27] geregelten Grenzen für Leichtbetone und damit außerhalb der Norm liegt. Seine speziellen Eigenschaften erfordern in Teilen eine Anpassung der Ansätze der Normen für die Bemessung sowie besondere Betrachtungen verschiedener Aspekte wie Dauerhaftigkeit, Brandschutz oder Schallschutz.

Nachfolgend wird zunächst eine Parametertabelle vorgestellt, die der entwurflichen und statischen Vorbemessung dienen soll. Die Tabelle zeigt anhand der Typenentwürfe - insbesondere des Referenzgebäudes - ermittelte Kenngrößen auf, wie z.B. Anzahl möglicher Geschosse, erforderliche Wandstärken für U-Werte bzw. Einhaltung der EnEV etc.

Anschließend daran werden vorliegende Erkenntnisse zu verschiedenen Eigenschaften des Infraleichtbetons zusammengefasst. Dabei stammen die Erkenntnisse zum Teil aus vorhergehenden und parallelen Forschungsarbeiten (siehe jeweilige Referenzen), zum Teil wurden sie im Rahmen von INBIG erarbeitet. Darauf aufbauend wurden für INBIG Vorgehensweisen erarbeitet, wie diese Erkenntnisse bzw. Eigenschaften bei der Entwurfs- und Tragwerksplanung berücksichtigt werden können.

### 2.3.1 Parametertabelle zur entwurflichen und statischen Vorbemessung

Tabelle 4: Parametertabelle zur entwurflichen und statischen Vorbemessung

Projekt / Parameter	Rezeptur	Wandstärke ILC	Geschosszahl geplant	Technische Parameter ILC		Menge ILC [m <sup>3</sup> ]	Baweise Ortbeton od. Fertigteil	Fensterflächenanteil	U-Wert Fenster [W/m <sup>2</sup> K]	Anforderungen ENEC 2016			Wärmebrückenkorrekturfaktor	A / Ve
				maximal mögliche Geschosszahl*	geplante Stützweite Fensteröffnungen [m]					HT zulässig ENEC 2016 [W/m <sup>2</sup> K]	HT zulässig Referenzg. [W/m <sup>2</sup> K]	HT vorhanden [W/m <sup>2</sup> K]		
<b>Site-00</b> Referenzgebäude	ILC 800 ILC 700 ILC 600	60	7 (EG+6)	7 4 2	1,8 (max. möglich ca. 3,5m) (max. möglich ca. 3m) (max. möglich ca. 2m)	1390	Ortbeton	34%	0,88	0,50	0,56	0,468	0,05	0,32
<b>Site-01</b> Punkthaus Urban living	ILC 800 ILC 700 ILC 600	60	EG+16 (Entwurf mit Druckstäben)	8 5 2	n/a (Fensterst. = NB-Decke)	1325	Fertigteil	34%	0,67**	0,50	0,62	0,476	0,10	0,24
<b>Site-02</b> Baulücke Kanstrasse Gebäude 1 - Hausnummer 128	ILC 800 ILC 700 ILC 600	50	7 (EG+6)	7 4 2	3m (Rückseite, Fertigteil) bzw. 2,5m (Front, Ortbeton)	375	Fertigteil und Ortbeton	36%	0,96	0,65	0,48	0,48	0,10	0,19
<b>Gebäude 2 - Hausnummer 126</b>	ILC 800 ILC 700 ILC 600	50	7 (EG+6)	7 4 2	2,8	181	Ortbeton	44%	0,87	0,65	0,50	0,46	0,10	0,23
<b>Site-03</b> Zeilenbau Alte Jakobstraße	ILC 800 ILC 700 ILC 600	60	8 (EG+7)	8 5 1	1,8	6250	Fertigteil							
<b>Site-04</b> Zeilenbau Kracauer Platz	ILC 800 ILC 700 ILC 600	60	7 (EG+6)	n/a n/a n/a	0,6	1245	Ortbeton	30%	0,95	0,50	0,54	0,50	0,10	0,31
<b>Site-06</b> Stadtvilla	ILC 800 ILC 700 ILC 600	60	3 (EG+2)	n/a n/a n/a	n/a	192	Ortbeton							

\* ermittelt auf Basis des Nachweises der Betondruckspannungen  
 \*\* Loggfenster mit Einfachverglasung Außen

INBIG - Parameter Typologien

Stand: 31.03.2016

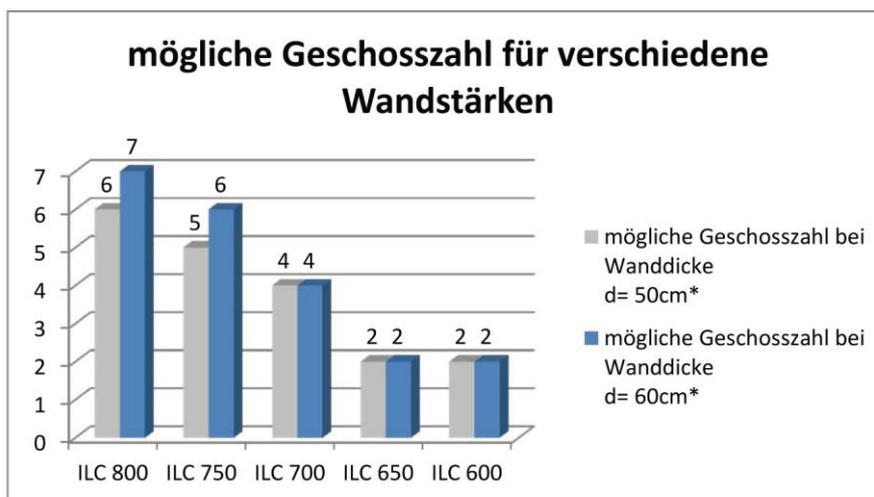
Tabelle 5: Parameter ILC gemäß Referenzgebäude (Site-0)

**Parameter ILC gemäß Referenzgebäude (Site-0)**

ILC - Klassen	charakteristische Druckfestigkeit $f_{ck}^{**}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	mögliche Geschosshöhe bei Wanddicke d= 50cm*	mögliche Geschosshöhe bei Wanddicke d= 60cm*	Wärmeleitfähigkeit $\lambda_{10^{\circ},tr}$ [W/mK]	Wärmeleitfähigkeit (Bemessungswert) $\lambda_{Bem}$ [W/mK]	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K] bei d= 50cm mit $\lambda$ - Bemessungswert	U-Wert [W/m <sup>2</sup> K] bei d= 60cm mit $\lambda$ - Bemessungswert
ILC 800	11	6	7	0,193	0,219	0,41	0,34
ILC 750	9	5	6	0,178	0,202	0,38	0,32
ILC 700	8	4	4	0,166	0,189	0,35	0,30
ILC 650	5	2	2	0,153	0,174	0,33	0,28
ILC 600	4	2	2	0,141	0,160	0,30	0,26

\* ermittelt auf Basis der Randbedingungen des Referenzgebäudes, Nachweis Betondruckspannungen

\*\* ermittelt für die Ergebnisse aus [28]



\* ermittelt auf Basis der Randbedingungen des Referenzgebäudes, Nachweis Betondruckspannungen

Bild 53: Mögliche Geschosshöhen in Abhängigkeit der Wandstärke und Rezeptur

### 2.3.2 Dauerhaftigkeit

Beton schützt im Allgemeinen durch seine hohe Alkalität (pH-Wert: 12,5 – 13,5) die Bewehrung vor Korrosion (Bild 54), durch die sogenannte Passivierung. Hierfür genügen i.d.R. schon wenige Zentimeter Betondeckung, um einen dauerhaften Schutz vor angreifenden Medien zu gewährleisten. Infraleichtbeton besitzt eine hohe Porosität, die das Eindringen von Wasser und Kohlenstoffdioxid nicht im gleichen Maße wie Normalbeton verhindern kann. Zudem kommen ein Zement und Zusatzstoff zum Einsatz, die den pH-Wert durch verringerten Eintrag und erhöhten Verbrauch von Alkalien auf 11,5 beschränken.

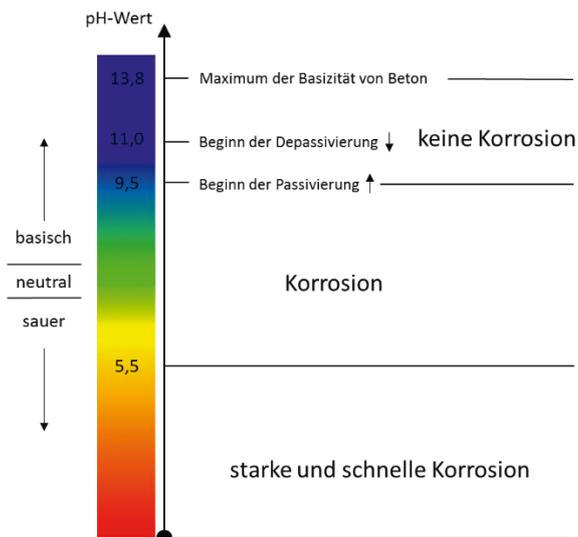


Bild 54: Korrosion in Abhängigkeit des pH-Wertes [28]

Aufgrund dieser Problematik wurde im Rahmen einer Studienarbeit [28] eine vorhandene ILC-Wand [3] auf ihre Carbonatisierungstiefe<sup>4</sup> hin untersucht. Hierfür wurden aus der überwiegend trocken gelagerten Wand drei Bohrkernentnommen (Bild 55) und anschließend gespalten und mit einer 1-%igen Phenolphthaleinlösung besprüht.

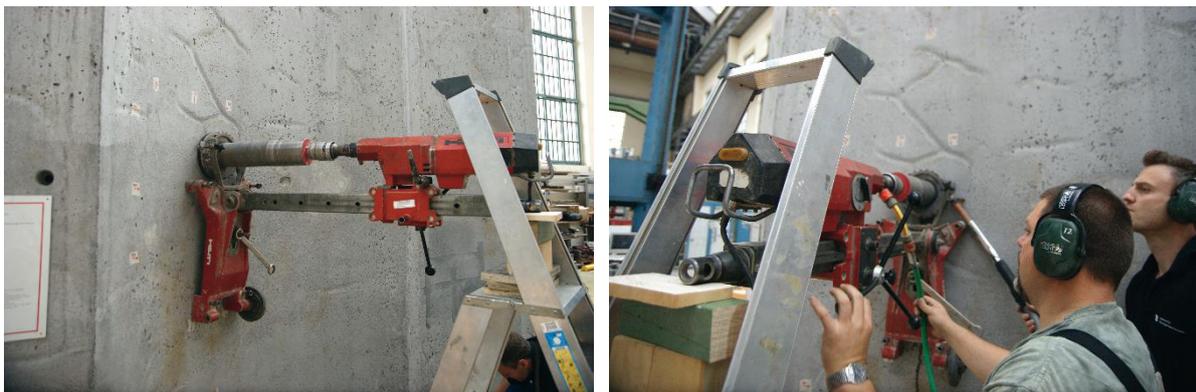


Bild 55: Bohrkernentnahme ( $d = 150 \text{ mm}$ ;  $l = 135 \text{ mm}$ ) [28]

Durch den entstehenden Farbumschlag (farblos = carbonatisiert), konnten die Carbonatisierungstiefen gemessen werden (Bild 56). Es ergab sich ein Mittelwert der Eindringtiefe von  $y = 45 \text{ mm}$  nach einer Zeit von  $t = 2,75 \text{ Jahren [a]}$ . Mit Hilfe des Wurzel-t-Gesetzes  $k = \frac{y}{\sqrt{t}}$  ergibt sich somit ein Carbonatisierungskoeffizient von  $k = 27,14 \text{ mm/a}^{0,5}$  (zum Vergleich:  $k_{\text{Normalbeton}} = 3,54 \text{ mm/a}^{0,5}$ ) [30: S. 119–121]. Ein Normalbeton erreicht mit einer Betondeckung von  $35 \text{ mm}$  ein theoretisches Alter von  $97,75 \text{ a}$ , bevor die Bewehrung auf Korrosion untersucht werden muss. Bei Infralichtbeton wäre dies schon nach  $1,66 \text{ a}$  der Fall, dies entspricht einem um Faktor 60 beschleunigten Alterungsprozess [30].

<sup>4</sup> Carbonatisierung bezeichnet einen Prozess, bei dem an freien Betonoberflächen, die der Umgebungsluft ausgesetzt sind, Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) in den Beton eindiffundiert und dabei überwiegend mit dem Calciumhydroxid unter Bildung von Calciumcarbonat reagieren kann [29].

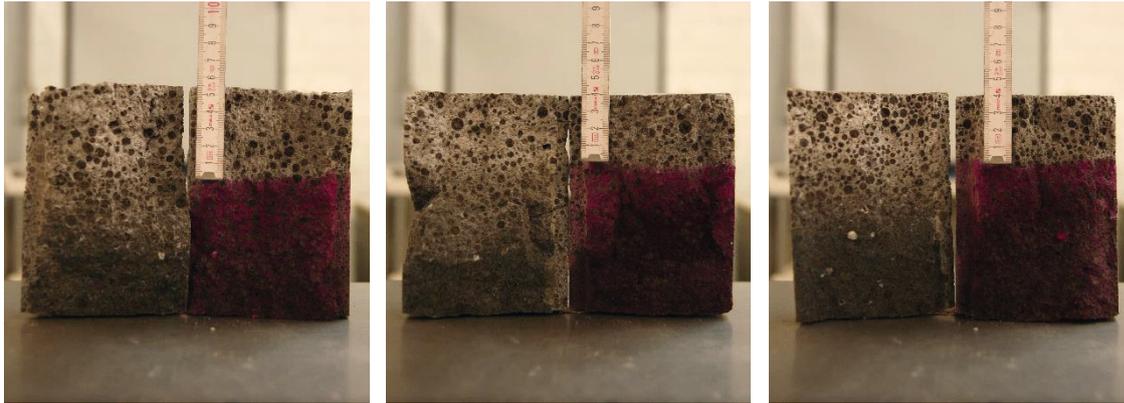


Bild 56: Messung der Carbonatisierungstiefe am ILC 2.0 [3] in [28]

In einem weiteren Versuch wurde ein Balken (ebenfalls ausschließlich trocken gelagert) aus dem Jahr 2006 [2] anhand eines Bohrkernes untersucht, dieser sollte die gemessenen Ergebnisse verifizieren. Es ergab sich ein Carbonatisierungsfaktor von  $k = 30 \text{ mm/a}^{0.5}$ . Der leicht erhöhte Wert ist durch den Beton zu begründen. Bei dem Balken handelt es sich um einen Infraleichtbeton der ersten Generation (ILC 800 von Dr.-Ing. Mohamed El Zareef [31]) und bei der Wand um den verbesserten ILC 2.0 von Dipl. Ing. Alex Hückler [3].

#### Fazit:

Infraleichtbeton ist ein diffusionsoffener Beton, wodurch er sehr schnell altert. Um dem Problem der Carbonatisierung entgegen zu wirken, können entweder die Betondeckung (ca. 200 mm für 50 Jahre) erhöht oder aber korrosionsbeständige Bewehrung, wie z.B. Glasfaserbewehrung, verzinkte bzw. beschichtete Stahlbewehrung oder Edelstahlbewehrung verwendet werden. Weitere Möglichkeiten der Einflussnahme auf den Alterungsprozess werden in [28] behandelt.

Aufgrund der Erkenntnisse wurde für das Projekt INBIG im Weiteren mit korrosionsbeständiger Bewehrung geplant. Da die Ergebnisse nur auf wenigen Stichproben beruhen, sollten diese durch weitere Untersuchungen, wie z.B. durch einen Zeitrafferversuch (Umströmen eines Probekörpers mit  $\text{CO}_2$  in einem luftdicht verschlossenen Kasten [32]), verifiziert werden.

### **2.3.3 Bemessungsansätze**

Im Folgenden werden die Bemessungsansätze zusammengefasst, die die Grundlage für die Typenentwürfe bildeten. Dabei basieren die Erläuterungen zu Materialkennwerten, Spannungs-Dehnungslinie, Verbundverhalten und Biegebemessung zum Großteil auf den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen aus [33]. Die bisherigen Erkenntnisse deuten darauf hin, dass ILC weitestgehend betonübliches Verhalten zeigt. Daher wird in den Bereichen, in denen keine expliziten Erkenntnisse zum Infraleichtbeton vorliegen (z.B. Querkrafttragverhalten), auf die Ansätze von Faust [22] und des EC2 [27] bzw. auf die Zulassung von Schöck ComBAR® [34] zurückgegriffen. Statistisch relevante Untersuchungen, ob diese Ansätze bei ILC anwendbar sind, liegen noch nicht vor.

Die Anwendung dieser Ansätze findet sich im Anhang exemplarisch für maßgebende Bauteile des Referenzgebäudes.

### 2.3.3.1 Materialkennwerte und Spannungs-Dehnungslinie

Im Folgenden sind die wesentlichen Materialkennwerte der verschiedenen ILC-Klassen zusammengefasst.

Tabelle 6: Zusammenfassung der ILC-Eigenschaften [33, Kap. 3.3.6]

Eigenschaft	ILC600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800
Zylinderfestigkeit $f_{ilcm,cyl}$ [MPa]	5,30	7,35	9,41	11,26	12,96
Charakt. Druckfestigkeit $f_{ilck}$ [MPa]	4,0	5,0	8,0	9,0	11,0
Bemessungswert Druckfestigkeit $f_{ilcd}^*$ [MPa]	2,0	2,5	4,0	4,5	5,5
Zugfestigkeit $f_{ilctm}$ [MPa]	0,65	0,71	0,76	0,82	0,87
Elastizitätsmodul $E_{ilcm}$ [MPa]	2300	2700	3100	3500	3900
Bruchdehnung $\epsilon_{ilc1}$ [‰]	2,4	2,7	3,0	3,2	3,5

\*mit  $f_{ilcd} = \alpha_{ilcc} \cdot f_{ilck} / \gamma_{ilc} = 0,75 \cdot f_{ilck} / 1,5$

Die Spannungs-Dehnungs-Linie verläuft bei ILC linear bis zu einer mittleren Druckfestigkeit  $f_{ilcm}$ . Zur Bemessung werden die obigen Werte der Bemessungsdruckfestigkeit  $f_{ilcd}$  in Kombination mit der Bruchdehnung von  $\epsilon_{ilc1}$  angesetzt.

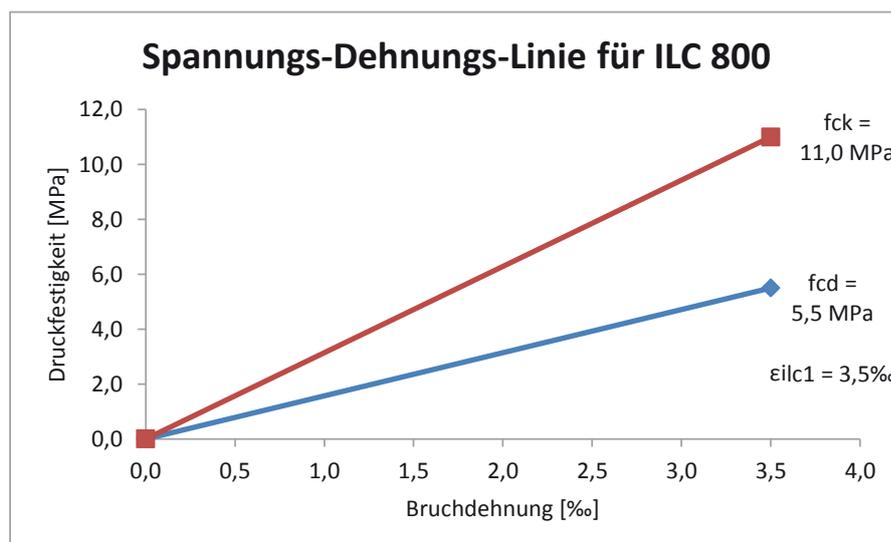


Bild 57: Spannungs-Dehnungs-Linie für ILC 800; Druckfestigkeiten  $f_{ilck}$  und  $f_{ilcd}$  (basierend auf [33])

### 2.3.3.2 Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT)

Der Bemessung bei Biegung mit Normalkraft wird das lineare Spannungs-Dehnungsdiagramm mit Völligkeitsbeiwert  $\alpha_R = 0,5$  [33] zugrunde gelegt. Die bezogene Druckzonenhöhe  $\xi = x/d$  wird für Leichtbeton auf  $\leq 0,35$  (anstatt 0,45 für Normalbeton) begrenzt. Wird der Wert überschritten, so ist eine Mindestbewehrung zur Umschnürung der Biegedruckzone anzuordnen ([22]: S 178).

Zur Bemessung bei Längsdruckkraft mit geringer Ausmitte wird gemäß Faust [22] das Modellstützenverfahren gewählt (aufgrund der großen ILC-Wandstärken wird die Knickgefahr in der Regel jedoch untergeordnete Bedeutung haben). Für Infraleichtbeton sind diese Interaktionsdiagramme nur eingeschränkt anwendbar, da nur Diagramme bis zu einer minimalen Trockenrohddichte von  $1200\text{kg/m}^3$  zur Verfügung stehen. Zudem wird wie oben beschrieben für ILC ein lineares statt bilineares Spannungs-Dehnungsdiagramm zu Grunde gelegt. Daher können die Interaktionsdiagramme von Faust [22: S. 285ff.] für eine Trockenrohddichte von  $1200\text{kg/m}^3$  zwar für eine Abschätzung herangezogen werden, sollten jedoch auf sicherer Seite durch eine Bemessung für reine Biegung ohne Berücksichtigung der Druckkraft überprüft werden.

Das Verhalten von ILC bei Querkraft ist noch nicht explizit untersucht. Solange keine Erkenntnisse vorliegen, wird auf Faust [22] zurückgegriffen. Bei der Querkraftbemessung wird gemäß Faust der Faktor  $\eta_1 = 0,4 + 0,6 * \rho/2200$  an verschiedenen Stellen zur Berücksichtigung der verringerten Zugfestigkeit des Leichtbetons eingeführt. Gleiches gilt bei Torsionsbeanspruchung. Bei einer Bemessung mit Schöck ComBAR wird der Querkraftwiderstand  $V_{Rd,c}$  für Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung gemäß der Zulassung [35] bestimmt. Zusätzlich wird die Formel in Anlehnung an Faust noch mit dem Faktor  $\eta_1 = 0,4 + 0,6 * \rho/2200$  zur Berücksichtigung der verringerten Zugfestigkeit des Leichtbetons multipliziert. Ein erster Tastversuch am Balkenelement Prototyp PT3 deutet (unter Vorbehalt) darauf hin, dass der o.g. angepasste Berechnungsansatz für Schock ComBAR realistische Werte liefert (vgl. Kap. 4.3).

### 2.3.3.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG)

- Die **Betondruckspannungen** werden für ILC analog zum EC2 [27] aufgrund der Bedeutung des Kriechens auf  $\sigma_c \leq 0,45 f_{ck}$  begrenzt.
- Experimentelle Untersuchungen zum **Rissverhalten** von ILC in [32] lassen darauf schließen, dass die Berechnungsansätze des EC2 auf ILC angewendet werden können. Zur Begrenzung der Rissbreiten und zur Bestimmung der Mindestbewehrung wird die experimentell ermittelte Zugfestigkeit des Infraleichtbetons, statt der vorgeschlagenen reduzierten Zugfestigkeit nach Faust [22], zugrunde gelegt. Zur Ermittlung der Mindestbewehrung infolge Zwang wird das Vorgehen für „dicke“ Bauteile gewählt [36: S. 5.97].
- Die Bestimmung der **Verformungen** wird nicht mittels der Begrenzung der Biegeschlankheit, sondern über die direkte Berechnung der Durchbiegung unter Berücksichtigung von Kriechen und Schwinden gemäß DAfStb-Heft 425 [37] durchgeführt. Für Schöck ComBAR® erfolgt die Ermittlung der Durchbiegung inkl. Kriechen und Schwinden gemäß dem Verfahren aus der Zulassung, Abschnitt 3.3.3 [35].

- Ermittlung der **Schwindmaße**

Ergebnisse zu Schwindmaßen stehen aus folgenden Untersuchungen zur Verfügung:

*Bachelorarbeit Stefan Dornburg [38]*

Das Kriech- und Schwindverhalten des Infraleichtbetons mit einer Trockenrohichte 800 kg/m<sup>3</sup> wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit untersucht. Dabei wurden Schwind- und Kriechversuche durchgeführt und Vergleichsberechnungen nach EC2 [27] aufgestellt. Die Ergebnisse zum Schwindmaß der o.g. Arbeit zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen wassergelagerten und nicht wassergelagerten Proben. Da in der Realität keine Wasserlagerung vorliegen wird, werden hier die Werte der nicht wassergelagerten Proben herangezogen. Dabei ergab sich für ILC 800 ein Schwindmaß von 0,6mm/m nach 80 Tagen, das näherungsweise dem Endschwindmaß gleichgesetzt werden kann (keine nennenswerte Veränderung mehr nach ca. 35 Tagen). Der Kurvenverlauf ist vergleichbar zu den Berechnungen nach EC2 [38: S. 34ff.].

*Schwindversuch ILC 600 gemäß DIN EN 12617-4 an Prüfkörpern 40x40x160, Juni-Nov 2014:*

Der Versuch wurde an 6 Probekörpern durchgeführt, die nach 24 Stunden ausgeschalt und in der Klimakammer gelagert wurden (kein Wasserbad). Es ergab sich nach 106 Tagen ein mittleres Schwindmaß von 0,971 mm/m. Das Schwindmaß zeigte zum Ende des Zeitraums nur noch sehr wenig Veränderung, so dass davon ausgegangen werden kann, dass das Schwindmaß nach 106 Tagen ungefähr dem Endschwindmaß entspricht.

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung, so liegt das mittlere Schwindmaß nach 28 Tagen bei ca. 85% des Endschwindmaßes nach 106 Tagen.

*Schwindmaße der Probekörper für Stabzugversuche, Dissertation Alex Hückler [33]:*

An Probekörpern für Stabzugversuche wurden bis zur Prüfung nach 28 Tagen die Schwindmaße bestimmt. Dabei zeigte sich, dass der Ausschaltzeitpunkt wesentlichen Einfluss auf das Schwindmaß nimmt. Da nur punktuell Messungen vorgenommen wurden (ca. 3-5 Messungen innerhalb 28 Tagen), lässt sich eine zeitliche Entwicklung nur schwer ableiten. Es wird daher für die hiesigen Zwecke eine zeitliche Entwicklung analog der Ergebnisse für ILC 600 unterstellt (85% nach 28 Tagen) und ein Endschwindmaß bestimmt.

*Tabelle 7: Schwindmaße aus Stabzugversuchen [33]*

	Ausgeschalt nach [Tagen]	Schwindmaß (28 Tage) [mm/m]	Endschwindmaß (abgeschätzt) [mm/m]
ILC 600	4	0,908	1,068
ILC 650	4	1,044	1,228
ILC 700	17	0,39	0,459
ILC 750	5	0,98	1,153
ILC 800	6	0,835	0,982

Die Betrachtung der vorgestellten Ergebnisse zeigt eine gewisse Streuung. Daher wird als konservativer Ansatz das maximal aufgeführte Endschwindmaß von **1,2 mm/m** (ermittelt aus Werten der Stabzugversuche [33]) für die weiteren Berechnungen für alle ILC Rezepturen verwendet.

*Hinweis zum Einfluss der Bauteilgeometrie:*

Das Schwindverhalten wird gemäß EC2 [27] vom Verhältnis  $h_0$  zwischen Querschnittsfläche zu luftberührtem Umfang beeinflusst. Je größer dieses Verhältnis, desto langsamer die Schwindentwicklung, und desto geringer das zu erwartende Endschwindmaß. Das Verhältnis  $h_0$  wird insbesondere bei ILC-Bauteilen mit großer Wandstärke deutlich kleiner sein, als bei den verwendeten Prüfkörpern. Sollten die Ansätze des EC2 auf ILC übertragbar sein, wäre demnach von einem späteren Erreichen des Endschwindmaßes auszugehen. Dies sollte bei der baupraktischen Umsetzung berücksichtigt werden, wenn zum Beispiel versetzte Betonierabschnitte und Zwischenbetonieren erst nach einer gewissen Zeitspanne erfolgen soll, um das erste Schwinden möglichst zwangungsfrei abklingen zu lassen.

- Ermittlung der **Kriechzahlen**

Zur Berücksichtigung des Kriechverhaltens des ILC 800 werden zunächst die Versuchsergebnisse der Bachelorarbeit [38] betrachtet. Diese ergaben bei einer kriecherzeugenden Spannung von  $0,25 \cdot f_{ck}$  eine Gesamtdehnung nach 100 Tagen von  $\epsilon_{ges}(100, 0) = 2 \text{ mm/m}$ . Aus diesen Ergebnissen wurde die Endkriechzahl  $\varphi(\infty, t_0)$  für einen ILC 800 wie folgt ermittelt:

*Tabelle 8: Bestimmung der Endkriechzahl für ILC 800 aus Versuchsergebnissen*

Trockenrohdichte	<800	kg/m <sup>3</sup>	
$\epsilon_{ges}(100, 0) = \epsilon_{el} + \epsilon_s + \epsilon_{cr} =$	2,0	mm/m	
$\sigma_c(t_0) =$	2,00	MN/m <sup>2</sup>	$\sigma_c(t_0) \sim 0,25 \cdot f_{ck}$ mit $f_{ck} = 8 \text{ MPa}$ (siehe[38])
$E_{ilc} =$	3900	MN/m <sup>2</sup>	experimentell ermittelt [33]
Schwinddehnung $\epsilon_s(80d) \sim$	0,38	mm/m	experimentell ermittelt [38]
$\epsilon_{el} = \sigma_c/E =$	0,51	mm/m	
$\epsilon_{cr} = \epsilon_{ges}(100,0) - \epsilon_{el} - \epsilon_s =$	1,11	mm/m	Annahme: $\epsilon_s(80d) \sim \epsilon_s(100d)$ (sichere Seite)
$\varphi_{lc}(100,0) = \epsilon_{cr}(100,0) / \epsilon_{el} =$	2,2		
$\varphi_{lc}(100,0) = \varphi_0 * \beta_c(100,0)$			
$\beta_c(100,0) =$	0,669		Um die Grundkriechzahl zu berechnen wird eine zeitliche Entwicklung analog EC2 angenommen (mit $h_0=20\text{mm}$ für Prüfkörper und $RH=65\%$ aus Bachelorarbeit [38])
$\varphi_0 = \varphi_{lc}(100,0) / \beta_c(100,0) =$	<b>3,2</b>		

(Zum Vergleich: ein Normalbeton C20/25 hätte bei gleichen Umgebungsbedingungen gemäß EC2 eine Grundkriechzahl von  $\varphi_0 = 2,2$ .)

*Hinweis zum Einfluss des E-Moduls:*

Untersuchungen im Rahmen einer Bachelorarbeit ergaben, dass die Ergebnisse der E-Modul Prüfungen maßgeblich voneinander abweichen, wenn es sich um bei Raumklima gelagerte Proben oder für 28 Tage im Wasserbad gelagerte Proben handelt [39]. Im ersten Fall ergaben sich für ILC 800 Werte von ca. 3900 MPa, bei Wasserbadlagerung ca. 5500 MPa. Gründe für die Erhöhung im zweiten Fall können zum einen die wassergefüllten Poren, zum anderen die innere Nachbehandlung sein. Welcher der beiden Effekte überwiegt ist nicht bekannt [39].

Der Unterschied im E-Modul würde sich bei der Rückrechnung der Kriechzahl auf die Bestimmung der elastischen Dehnung und damit die Kriechzahl selbst auswirken (größerer E-Modul bewirkt größeres  $\varphi_0 \sim 5,2$ ). Die Proben für die Kriechprüfung aus [38] wurden zunächst 28 Tage wassergelagert, danach jedoch bei Raumklima für 100 Tage geprüft. Es ist unklar, welcher Wert der E-Modul in diesem Fall anzusetzen ist.

Vergleichsberechnungen nach EC2 zur Bestimmung der Grundkriechzahl ergaben keine zufriedenstellenden Ergebnisse [38], weshalb auf dieses Verfahren nicht zurückgegriffen wird.

Aktuell werden im Rahmen einer Masterarbeit [40] zum Kriechverhalten an bewehrten Balken durchgeführt, die weiter Aufschluss über das Kriechen von ILC bzw. die damit verbundene Lastumlagerung auf die Bewehrung geben werden. Bis weitere Ergebnisse vorliegen, wird zunächst von der oben ermittelten Grundkriechzahl  $\varphi_0 \sim 3,2$  ausgegangen. Dies muss nach Abschluss der Balkenversuche verifiziert werden.

Für die anderen ILC Rezepturen neben ILC 800 liegen noch keine experimentellen Erkenntnisse für das Kriechverhalten vor. Daher wird für INBIG zunächst näherungsweise die für ILC 800 ermittelte Grundkriechzahl von  $\varphi_0 = 3,2$  in Anlehnung an EC2 auf die anderen ILC Rezepturen übertragen. Der EC2 geht bei der Berechnung der Kriechzahl von einem Einfluss der Druckfestigkeit durch den Term  $\beta = 16,8 / f_{cm}^{0,5}$  [27] aus. Dieser Term wird für die Abschätzung der Kriechzahlen für die ILC Familie wie folgt genutzt:

$$\varphi_0(ILC) = \varphi_0(ILC\ 800) * \frac{\beta(ILC)}{\beta(ILC800)}$$

Damit ergeben sich folgende Grundkriechzahlen:

Tabelle 9: Annahme zu den Grundkriechzahlen der ILC Familie

	$f_{ilcm,cyl}$	$\beta$	$\phi_0$
<b>ILC 600</b>	5,3	7,30	5,0
<b>ILC 650</b>	7,35	6,20	4,3
<b>ILC 700</b>	9,41	5,48	3,8
<b>ILC 750</b>	11,26	5,01	3,5
<b>ILC 800</b>	12,96	4,67	3,2

Diese Werte müssen durch weitere experimentelle Untersuchungen verifiziert werden.

*Hinweis zum Einfluss der Bauteilgeometrie:*

Der EC2 geht auch hier von einem Einfluss der Bauteilgeometrie auf das Kriechverhalten über den Faktor  $h_0 = 2 \cdot A_c / u$  ( $h_0$ : bezogene Bauteildicke [mm];  $A_c$ : Querschnittsfläche;  $u$ : der Luft ausgesetzter Querschnittsumfang) aus. Für die Prüfkörper ist  $h_0$  mit 20mm sehr klein, dementsprechend ergibt sich eine größere Grundkriechzahl. Für übliche Bauteile wie bei den INBIG-Planungen vorgesehen wird sich  $h_0$  voraussichtlich im Bereich 300 bis 500 mm bewegen, weshalb die Kriechneigung geringer sein dürfte.

- Auswirkung des **Schwindens** auf **Mindestbewehrung** und **Rissbildung**

Für ILC liegen bislang noch wenig praktische Erfahrungen in Hinblick auf Schwindverhalten und Rissbildung vor. Grundsätzlich wird durch die erhöhte Schwindneigung die Risschnittgröße bei vollem Aufbau des Zwangs erreicht:  $\epsilon_{ilc,s} \cdot E_{ilcm} \geq f_{ilct}$ . Der Ansatz der Risschnittgröße als Grundlage der Bestimmung der Mindestbewehrung für eine gewisse Rissbreite liegt zwar auf der sicheren, jedoch unwirtschaftlichen Seite [41: S. 39].

DAfStb-Heft 466 beschäftigt sich u.a. mit Zwangsbeanspruchungen bei Wänden auf fertiggestellten Fundamenten. Der Aufbau der Zwangskraft ist demnach deutlich vom Verhältnis  $l / h$  (Wandlänge / Wandhöhe) abhängig [41]. Sinnvoll erscheint es daher für ILC Bauwerke je nach Anwendungsfall in Anlehnung an Heft 466 das Verhältnis  $l/h$  durch Anordnung entsprechender Dehnungsfugen zu beschränken. Des Weiteren wird vorgeschlagen, für eine wirtschaftliche Auslegung der Bewehrung Wandbereiche gemäß [41] zu identifizieren, bei denen eine Reduzierung der Mindestbewehrung möglich ist. Dies sollte durch experimentelle Untersuchungen verifiziert werden.

- Berücksichtigung von **Kriechen und Schwinden bei Verformungsberechnungen**

Die Langzeitauswirkungen durch Kriechen des Betons werden durch eine Modifikation des E-Moduls durch die Endkriechzahl berücksichtigt:  $E_{eff} = E / (1 + \varphi_{\infty})$  [36: S. 5.64]. Zudem wird wie oben erläutert zur Bestimmung von Durchbiegungen das Verfahren nach DAfStb-Heft 425 [37] bzw. ComBAR® Zulassung [35] gewählt.

Bei Ermittlung der Verformungen von druckbeanspruchten ILC-Wandabschnitten bzw. -Stützen wird die erhöhte Kriechneigung durch den modifizierten E-Modul  $E_{eff}$  berücksichtigt. In der Realität werden sich jedoch voraussichtlich die Spannungen vom Beton auf die Bewehrung umlagern, was die kriecherzeugende Spannung verringert und damit eine weniger starke Erhöhung der Stauchung bewirken kann. Ob und in welcher Form solche Spannungsumlagerungen bei ILC stattfinden, wird aktuell im Rahmen der o.g. Masterarbeit [40] untersucht. Solange keine näheren Ergebnisse vorliegen, werden Spannungsumlagerungen daher zunächst vernachlässigt.

### **2.3.3.4 Besonderheiten bei der Bemessung mit GFK-Bewehrung**

Für die Bemessung mit ComBAR® der Firma Schöck stehen die Technische Zulassung [34] sowie das Bemessungskonzept [42] zur Verfügung (letzteres ist jedoch nur gültig für Betone der Klasse C20/25 und höher).

Für Betone niedrigerer Festigkeitsklassen werden in der Technischen Zulassung verminderte Werte für Dauerzugfestigkeit und Grenzdehnung angegeben, um Schlupf bei schwächerem Verbund zu begrenzen. Bisherige Versuchsergebnisse zeigten für ILC jedoch deutlich niedri-

gere Schlupfwerte bei maximaler Verbundspannung als Normalbeton [32]. Daher ist davon auszugehen, dass Schlupf bei ILC eine untergeordnete Rolle spielt und damit eine Abminderung der Dauerzugfestigkeit und Grenzdehnung aufgrund dieser Problematik nicht erforderlich ist. Dementsprechend werden die Grenzdehnungen von  $\varepsilon_{fud} = 7,4\text{‰}$  und der Bemessungswert der Dauerzugfestigkeit  $f_{fd} = 445 \text{ MPa}$  (bzw.  $6,1\text{‰}$  und  $370 \text{ MPa}$  bei statisch unbestimmten Tragwerken) angesetzt [32].

Aufgrund der Korrosionsbeständigkeit ergibt sich für Schöck ComBAR® eine geringe erforderliche Betondeckung (siehe oben). Werden jedoch Brandschutzanforderungen herangezogen, sind Besonderheiten zu beachten (siehe 2.3.4). Unter anderem bedingt die Anforderungen REI90 bzw. F90 eine Betondeckung von 65 mm [34].

Bei der Bemessung mit Schöck ComBAR® ist das Verformungsverhalten zu beachten. Aufgrund der geringeren Steifigkeit ( $E = 60.000 \text{ N/mm}^2$  für Zug) ergeben sich insbesondere in Kombination mit der geringen Steifigkeit und der erhöhten Kriech- und Schwindneigung des ILC größere Durchbiegungen. Verfahren zur Berechnung der Durchbiegung bei Kriechen und Schwinden mit Schöck ComBAR® sind in der Technischen Zulassung erläutert. Gegebenenfalls müssen allzu große Verformungen durch Maßnahmen wie beispielsweise überhöhtes Betonieren ausgeglichen werden.

### **2.3.3.5 Konstruktionsgrundlagen**

#### Betondeckung

Gemäß Faust [22: S. 201] bedarf es keiner Erhöhung der Betondeckung bei Leichtbeton, solange  $c_{nom} \geq d_{Größtkorn} + 5\text{mm}$  gewählt wird. Dies ergibt sich für ILC mit einem Durchmesser des Größtkorns von 6mm zu  $c_{nom} \geq 6\text{mm} + 5\text{mm} = 11\text{mm}$ .

Bei Einsatz von korrosionsbeständiger Bewehrung wird das Mindestmaß der Betondeckung  $c_{min}$  zur Sicherung des Verbundes maßgebend:  $c_{min} \geq d_s, c_{dev} = 10\text{mm}$  [36].

Für GFK-Bewehrung Schöck ComBAR® gilt zudem

$c_{min} = 10\text{mm}$  gemäß Schöck ComBAR® Zulassung ([34]: Punkt 3.1);

$\Delta c_{dev} = 10\text{mm}$  (siehe Bemessungskonzept Schöck ComBAR® [42])

Verbundbedingung:  $c_{min} \geq d_f$ ;

Damit ergibt sich

$$c_{nom} = c_{min} + c_{dev} = c_{min} + 10\text{mm} \geq 11\text{mm}$$

Dies gilt für Bauteile ohne Brandschutzanforderungen. Erforderliche Betondeckungen für Bauteile mit Brandschutzanforderungen siehe Abschnitt 2.3.4.

#### Verbundspannung

Untersuchungen zur Ermittlung der Verbundeigenschaften von ILC wurden durch [33] durchgeführt. Daraus ließ sich ableiten, dass die Ermittlung des Bemessungswerts der Verbundspannung nach EC2 gemäß folgender Formel für ILC konservative Werte liefert und damit sowohl für Baustahl als auch GFK-Bewehrung angewendet werden kann.

$$f_{bd} = 2,25 \cdot f_{lctk;0,05} / \gamma_c$$

Unter Ansatz der experimentell ermittelten Zugspannung  $f_{ilctm}$  von ILC und dem Zusammenhang gemäß EC2 von  $f_{ilctk;0,05} = 0,7 \cdot f_{ilctm}$  ergibt sich die Formel zu

$$f_{bd} = 2,25 \cdot f_{ilctm} \cdot 0,7 / \gamma_c$$

bei gutem Verbund (Abminderung auf 70% bei mäßigem Verbund). Die folgende Tabelle zeigt die Werte für die ILC-Familie.

Tabelle 10: Bemessungswert der Verbundspannung für ILC

	ILC 600	ILC 650	ILC 700	ILC 750	ILC 800
$f_{ilctm}$ [MPa]	0,65	0,71	0,76	0,82	0,87
$f_{bd}$ [MPa]	0,68	0,75	0,80	0,86	0,91

#### Hinweis für feuerverzinkte Baustähle:

Für feuerverzinkte Baustähle ist der Bemessungswert der Verbundspannung nach [43] auf 80% zu verringern.

Weitere Hinweise zur Konstruktion, z.B. Besonderheiten der Bewehrungsführung bei Leichtbetonen in Form von erhöhten Biegerollendurchmessern und Übergreifungslängen, finden sich in [22] bzw. in Bezug auf Schöck ComBAR in [35].

## 2.3.4 Brandschutz

### Anforderungen

Für alle vorgestellten Typenentwürfe gelten die folgenden Randbedingungen:

- Gebäudeklasse 5; unterhalb der Hochhausgrenze, demnach keine Sonderbauten
- Anforderungen an Wände und Stützen: Feuerbeständig– F90-AB bzw. REI 90 [36]
- Anforderungen an Balkone: gemäß §27 bzw. §31 der Bauordnung für Berlin [44] bzw. der Musterbauordnung (MBO) [45] keine Anforderung, ausgenommen offene Gänge, die als notwendige Flure dienen, sowie falls Balkone Teil des ersten (baulichen) Rettungsweges darstellen  
→ in den INBIG-Entwürfen keine Anforderung (jedoch kann das Übernehmen der Anforderungen an Decken für Balkone sinnvoll sein, wenn diese z.B. später als Wintergärten geschlossen werden sollen).

Schlussfolgerung für die INBIG-Entwürfe:

- für ILC Außenwände (inkl. Fensterstürze), Anforderung REI 90/ F90:
- für ILC-Balkon (Entwurf Referenzgebäude): keine erhöhten Anforderungen

- für ILC-Fertigteilkasten (Entwurf Kantstraße 128): Da dieser als Loggia und als Innenraum eingesetzt wird, müssen REI 90/ F90 und demnach die zuvor erwähnten Anforderungen für ILC Außenwände erfüllt sein.

### Infraleichtbeton

In erster Linie ist ILC, wie auch NC und LC, ein rein mineralischer Baustoff ohne organische Bestandteile und somit nach DIN 4102-1 als „nicht brennbar“, also der Baustoffklasse A1 zuzuordnen.

Betrachtet man die gemäß EC2, Nachweisstufe 1 (Tabellenverfahren) für Stahlbeton formulierten Anforderungen an Mindestquerschnittsabmessungen und Achsabstand der Bewehrung vom Bauteilrand [36], so ergeben sich für R90 je nach Bauteil folgende Punkte:

- tragende Wände, REI 90 bei einem Ausnutzungsgrad von  $\eta_{fi} = 0,7$ : maximal geforderte Mindestwanddicke 170 mm, maximal geforderter Achsabstand 25 mm.
- tragende Stützen bei R90, Ausnutzungsgrad  $\eta_{fi} = 0,7$ : maximal geforderte Mindestbreite 450 mm bei Achsabstand 40 mm.
- statisch bestimmte Balken, R90: Mindestbreite 400 mm, Achsabstand 35 mm
- statisch unbestimmte Balken, R90: Mindestbreite 200 mm, Achsabstand 12 mm

In den vorliegenden INBIG-Entwürfen betragen die Wand- bzw. Stützenstärken wie auch die Breite der Fensterstürze mindestens 50cm, so dass die oben genannten Mindestbauteildicken eingehalten würden. Die Achsabstände wären entsprechend zu wählen.

Die Mindestabmessungen berücksichtigen in Kombination mit der Auslastung die Reduktion der Betonfestigkeit bei hohen Temperaturen. Versuche im Rahmen einer Masterarbeit an der TU Berlin zeigten ein ähnliches Verhalten [46]. Über die Mindestbetondeckung wird der Schutz der Bewehrung vor hohen Temperaturen sichergestellt. Da ILC bessere Wärmedämmeigenschaften vorweist, liegt man auf der sicheren Seite. Dennoch besteht die Gefahr des Abplatzens, diese muss untersucht werden. Außerdem ist das Verhalten von bewehrten ILC-Bauteilen unter hohen Temperaturen unerforscht, insbesondere unter dem Aspekt des Einflusses der Bewehrung, da die thermischen Dehnungen bei hohen Temperaturen unterschiedlich sein und Verbundprobleme hervorrufen könnten. Die thermische Dehnung von ILC ist unerforscht und wird aktuell an der TU Berlin untersucht (im Allgemeinen ist die thermische Dehnung von Leichtbeton jedoch geringer als die von Normalbeton).

### GFK-Bewehrung im Brandfall

Gemäß Schöck ComBAR® Zulassung, Punkt 3.6, Brandverhalten [34] ist zur Erfüllung der Brandschutzklasse F90 eine Betondeckung von  $c = 65$  mm einzuhalten (die Feuerwiderstandsklassen nach DIN EN 13501-2 werden in der Zulassung nicht explizit benannt; für REI 90 werden daher die Anforderungen für F90 übernommen). Zudem ist mit abgeminderter Verbundfestigkeit zu rechnen [35: S. Abschnitt 3.6]. Die Anwendung dieser Anforderung ist je nach Bauteil und Funktion der Bewehrung (statisch erforderlich bzw. konstruktiv, z.B. zur Rissbreitenbeschränkung aus Zwang) individuell zu prüfen.

### 2.3.5 Schallschutz

Das bewertete Luftschalldämm-Maß der Infraleichtbeton-Klassen wird im Folgenden exemplarisch für eine Wanddicke von 55 cm berechnet. Zugrunde gelegt wird dabei die aktuell gültige DIN 4109 von 1989 [47].

Tabelle 11: Schalldämmmaß von Infraleichtbeton, gemäß DIN 4109, Beiblatt 1 [48], Einschalige, biegesteife Wand

	ILC 600	ILC650	ILC700	ILC750	ILC800	Bemerkung
Trockenrohddichte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	600	650	700	750	800	
Dichte unter Normalbedingungen [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	600	650	700	750	800	mit Trockenrohddichte gerechnet*
Abminderung [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]	50	50	50	50	50	s. DIN 4109, Beibl. 1, Tab. 2
Wanddicke [cm]	55	55	55	55	55	
flächenbezogene Masse $m'$ [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]	302,5	330	357,5	385	412,5	
Bewertetes Schalldämmmaß $R_{w,r}$ [dB]	<b>49</b>	<b>50</b>	<b>51</b>	<b>52</b>	<b>53</b>	s. DIN 4109, Beibl. 1, Tab. 1, linear interpoliert

\*Feuchtegehalt bei 23 °C, 80 % relativer Luftfeuchte gemäß DIN EN ISO 10456, Tab. 4, Beton mit Blähtonzuschlägen:  $u = 0,03\text{kg}/\text{kg}$ , daher hier auf sichere Seite mit Trockenrohddichte gerechnet.

(Anm.: gemäß SBT Tafel 10.63d um 2dB höhere Werte für Leichtbeton mit Blähtonzuschlag; jedoch in Beiblatt 1, Tab.1: "bis zu  $m'$  von  $250\text{kg}/\text{m}^3$ "! Daher hier nicht angesetzt.)

#### Exemplarische Schallschutzprüfung beim Typenentwurf Kracauer Platz

Zur Untersuchung der Schallschutzeigenschaften von Infraleichtbeton wurde exemplarisch ein Schallschutz-Nachweis am Entwurf Zeilenbau Kracauer Platz (Abschnitt 2.2.5) geführt (Details zum Nachweis siehe Anhang). Das Besondere an diesem Gebäude ist die geringe Entfernung (16,5 m) zu den Bahngleisen mit Güterverkehr. Der maßgebende Außenlärmpegel wurde zum einen nach der DIN 18005-1 Anhang A.3 [49] bestimmt und zum anderen auf der Lärmkarte der Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt von Berlin abgelesen.

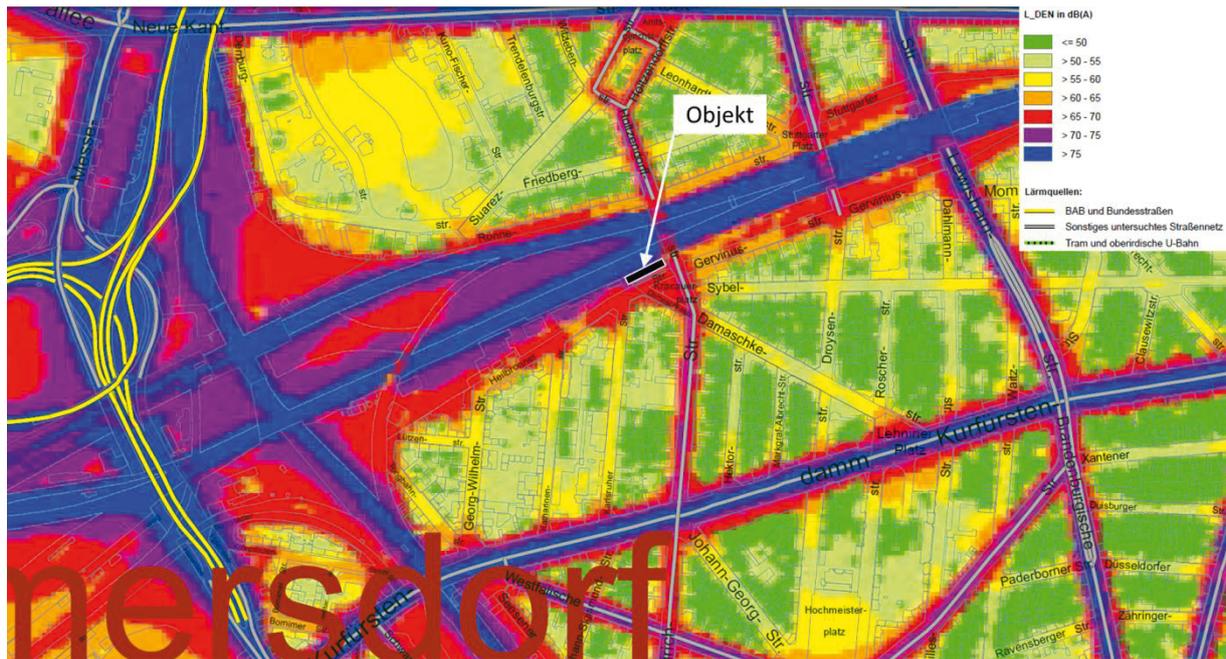


Bild 58: Kartenausschnitt aus strategischer Lärmkarte (Ausgabe 2013) bei Tag [50]



Bild 59: Kartenausschnitt aus strategischer Lärmkarte (Ausgabe 2013) bei Nacht [50]

Die Ergebnisse aus beiden Vorgehensweisen gleichen einander, so dass mit einem Außenlärmpegel von 75 dB(A) gerechnet werden konnte. Aus diesem wurde anschließend nach DIN 4109 Beiblatt 1 Tabelle 8 [47] ein erforderliches Schalldämm-Maß bestimmt. Die flächenbezogenen Masse der massiven ILC 700-Wand mit einer Dicke von 60 cm ergab ein Schalldämm-Maß von 52,3 dB(A). Das gesamte Schalldämm-Maß ermittelt sich durch:

$$R'_{w,R,res} = -10 \lg \left( \frac{1}{S_{ges}} \cdot \sum_{i=1}^n S_i \cdot 10^{-\frac{R_{w,R,i}}{10}} \right) \text{ dB} \quad (\text{DIN 4109 Beiblatt 1 Abschnitt 11 [47]})$$

Mit den Eingangsparametern der Wand- und Fensterfläche und durch Umstellen der Gleichung nach  $R_{w,R,Fenster}$  ergab dies ein erforderliches Schalldämm-Maß der Fenster von 27,2 dB(A).

#### Fazit:

Der Infraleichtbeton besitzt die notwendigen Schalldämmeigenschaften, so dass der Schallschutz-Nachweis für das betrachtete Gebäude in Kombination mit Fenstern mit einem bewerteten Schalldämm-Maß von rund 30 dB gut erfüllt werden kann.

### **2.3.6 Ökobilanz**

Zur Untersuchung des ökologischen Einflusses von Infraleichtbeton wurden zwei Masterarbeiten initiiert. Die erste befasste sich mit einem Vergleich eines Gebäudes in konventioneller WDVS-Bauweise und Infraleichtbeton-Ortbetonaußenwänden [51], die zweite Arbeit erstellte eine Ökobilanz zum Vergleich eines Gebäudes aus Infraleichtbeton-Fertigteilen und Fertigteilen in Sandwichbauweise mit Normalbeton und Kerndämmung [52].

Als Grundlage der Vergleiche wurde der bereits vorgestellte Typenentwurf des Referenzgebäudes gewählt. Die Außenwände der jeweiligen Bauweisen wurden so konzipiert, dass gleiche Wärmedurchgangskoeffizienten entstanden, um im Hinblick auf den Wärmeschutz und damit Energieverbrauch funktional gleichwertige Gebäude vergleichen zu können. Gewählt wurde für die ILC-Wände ein ILC 800 mit 58 cm, resultierend in einem U-Wert von 0,35 W/m<sup>2</sup>K.

Da zur Ökobilanzierung von ILC nicht auf einen bereits existierenden Datensatz der ÖKOBAUDAT [53] zurückgegriffen werden konnte, wurde dieser Datensatz zunächst mittels der Software GaBi [54] erstellt. Dazu wurde wo möglich auf konkrete Angaben der Hersteller und existierende Datensätze aus GaBi zurückgegriffen, in Teilen mussten Annahmen getroffen werden.

Die Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

#### Infraleichtbetonrezeptur

ILC geht mit einem relativ hohen Primärenergiebedarf (nicht erneuerbar (PEI<sub>ne</sub>) und erneuerbar (PEI<sub>e</sub>)) sowie einem hohen Treibhauspotential (GWP) einher. Maßgebende Einflussgrößen sind dabei die Bestandteile Microsilica, Blähton und Zement. Die ökologische Berücksichtigung von Microsilica ist jedoch strittig, da es als Nebenprodukt bei der Herstellung von metallurgischem Silicium anfällt. Es bieten sich zwei Optionen an:

- Ansatz 0%, d.h. es werden keine ökologischen Auswirkungen außer Verpackung und Transport bilanziert (dies entspricht den Angaben des Herstellers)
- Ansatz im Mengenverhältnis Nebenprodukt/Hauptprodukt, hier: Microsilica ca. 40% des Hauptprodukts

Bei Ansatz von 40% bewirkt Microsilica den Hauptanteil des PEI und GWP der Infraleichtbetonrezeptur.

Bei der Allokation von Microsilica sowie der Bilanzierung des Blähtons ist demnach ein Verbesserungspotential zu sehen, das weiter untersucht werden sollte.

### Vergleich auf Bauteilebene

Ein Vergleich je m<sup>2</sup> Außenwand spiegelt die Erkenntnisse aus der Bilanzierung der Rezeptur wieder. Am Beispiel des Vergleichs in ILC-Ortbetonbauweise lässt sich festhalten:

- PEI<sub>ne</sub> der Herstellung von 1m<sup>2</sup> ILC Wand (mit Microsilica (40%)) liegt bei ca. dem 5-fachen von 1m<sup>2</sup> Wand WDVS (bzw. 3-fachen mit Microsilica (0%))
- GWP der Herstellung von ILC Wand (mit Microsilica (40%)) liegt bei ca. dem 2,5-fachen von WDVS Wand (bzw. 2-fachen mit Microsilica (0%))
- Angesetzt wurde ein Austausch des WDVS alle 30 Jahre. Auch dann liegen die Werte für PEI und GWP der ILC-Wand bei Betrachtung eines Lebenszyklus von 70 Jahren noch über der WDVS Wand.

### Vergleich auf Gebäudeebene - Einfluss Außenwand auf Ökologie Gesamtgebäude

Bei Betrachtung des gesamten Gebäudes fiel auf, dass der Einfluss der Außenwand relativ gering ist. Im Lebenszyklus war vielmehr der Betrieb die entscheidende Phase (ca. 60-70% des PEI<sub>ne</sub> und ca. 60-65% des GWP) gegenüber den anderen Phasen wie Herstellung, Transport, Einbau, Ersatz, und Entsorgung.

Die Art der Außenwand beeinflusste demnach das Gesamtergebnis des Gebäudes über den Lebenszyklus nur gering (Gesamtergebnisse PEI<sub>ne</sub> und GWP mit ILC liegen ca. 5-10% über WDVS bzw. Sandwichfertigteilen). Die Unterschiede sind so gering, dass bei abschließender Bewertung nach NaWoh<sup>5</sup> die ILC- und WDVS- bzw. Sandwich-Gebäude bei fast allen Kriterien gleich zu bewerten sind [51; 52].

### Weiterer Untersuchungsbedarf:

Die durchgeführten Analysen haben verschiedene Fragen aufgeworfen, die weiter untersucht werden sollten:

- Die getroffenen Annahmen zur Bilanzierung der ILC-Rezeptur sollten verifiziert (insbesondere für Microsilica) und ggf. die Rezeptur selbst verbessert werden.
- Der für den Vergleich gewählte U-Wert der Außenwände ist relativ hoch. Darin liegt der große Einfluss der Betriebsphase begründet. Es wäre daher sinnvoll, einen Vergleich auf Gebäudeebene anzustellen, der bessere U-Werte berücksichtigt und damit einen realistischeren Einfluss des Betriebs darstellt.
- Gegebenenfalls sind bei den Gebäuden in WDVS- und Sandwichbauweise aus statischer Sicht Materialeinsparungen möglich, was sich in der Ökobilanz widerspiegeln würde. Dies sollte geprüft werden.
- Der Ansatz von realistischen Lebensdauern und der damit einhergehenden Erneuerungszeitpunkte, sowohl von ILC als auch WDVS und Sandwichfertigteile, bieten Raum für Diskussionen. Hier sollten weitere Untersuchungen angestellt werden.
- Gewisse Aspekte, wie z.B. die Auswaschung von Fungiziden bei WDVS, werden nicht in der Ökobilanz nach Norm berücksichtigt. Hier wären tiefergehende Betrachtungen sinnvoll.

---

<sup>5</sup> Bewertungssystem Nachhaltiger Wohnungsbau, <http://www.nawoh.de/nachhaltiger-wohnungsbau>.

## 2.3.7 Ökonomische Betrachtung

### 2.3.7.1 Herstellkosten

#### Richtpreis [m<sup>3</sup>] Infraleichtbeton:

Nach Angaben zweier verschiedener Anbieter kann zum Zeitpunkt der Erstellung des Berichts für ILC 800 von einem Richtpreis für 1m<sup>3</sup> Transportbeton von ca. 230- 250 Euro/m<sup>3</sup> ausgegangen werden (dieser Preis kann je nach Ausgangssituation des jeweiligen Anbieters (z.B. bereits vorhandene Gesteinskörnung, Zusatzstoffe und -mittel), abzunehmender Menge etc. stark schwanken).

#### Richtpreis für je 1m<sup>2</sup> Infraleichtbetonwand in Ortbeton

Die Herstellungskosten sind stark abhängig von Art und Menge der Bewehrung. Unter den korrosionsbeständigen Bewehrungen ist die verzinkte Stahlbewehrung mit Abstand am günstigsten, gefolgt von GFK. Als am teuersten ist Edelstahlbewehrung zu bewerten, weshalb diese in den hiesigen Betrachtungen nicht weiter berücksichtigt wurde.

Je nach Bewehrungsart und -grad bewegen sich die Herstellungskosten für 1m<sup>2</sup> Wand mit ILC 800 und 60cm Wandstärke zwischen ca. 330 € und 480 € [51]. Um die Herstellkosten zu minimieren ist daher besonderes Augenmerk auf die Bewehrung zu legen. Zum Vergleich: 1m<sup>2</sup> WDVS gemäß dem Aufbau aus [51] kosten ca. 280 €.

#### Richtpreis je 1m<sup>2</sup> Infraleichtbetonwand - Fertigteil:

Die Herstellungskosten für ILC-Fertigteile je m<sup>2</sup> sind ebenfalls stark abhängig von Bewehrungsart und -grad, ebenso spielt die Größe des Fertigteils eine wesentliche Rolle.

Die Untersuchungen in [52] ergaben für ILC-Fertigteile mit einer Größe von ca. 12m<sup>2</sup> Kosten zwischen 370 €/m<sup>2</sup> und 540 €/m<sup>2</sup>, für Elemente mit ca. 6m<sup>2</sup> zwischen ca. 400 €/m<sup>2</sup> und 570 €/m<sup>2</sup> (Dicke je ca. 60cm).

Zum Vergleich: ein Sandwichelement mit Aufbau gemäß [52] aus Normalbeton mit Kerndämmung (24cm NB, 10cm Dämmung, 10cm NB) liegt bei 450 €/m<sup>2</sup> (12m<sup>2</sup>) und 500 €/m<sup>2</sup> (6m<sup>2</sup>). Hier könnten also in Teilen mit ILC-Fertigteilen Kosteneinsparungen erzielt werden.

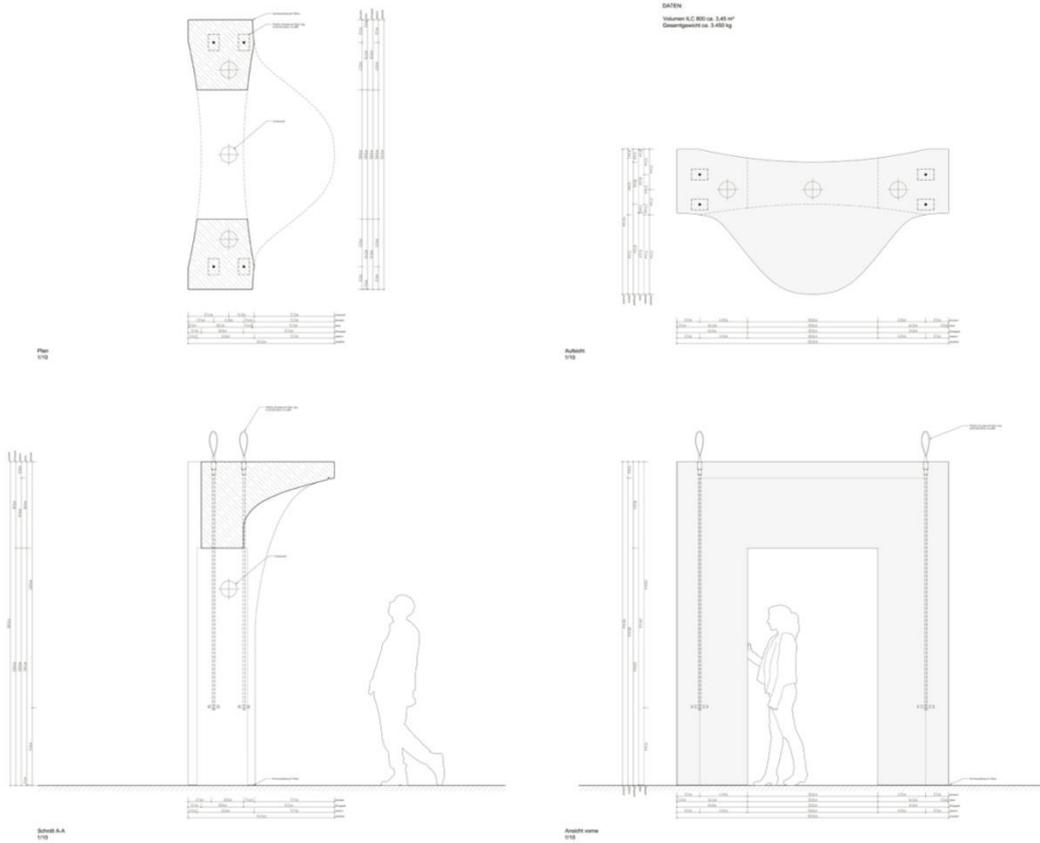
### 2.3.7.2 Lebenszykluskosten:

In [52] und [51] wurden neben der Ermittlung der Herstellkosten auch Betrachtungen über den gesamten Lebenszeitraum durchgeführt. Beim Vergleich der Lebenszykluskosten (Errichtungs-, Baunutzungs- und Rückbaukosten) der ILC-Ortbetonvariante mit dem WDVS lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die ILC Varianten zwischen 1 - 7% höher waren [51], die Ergebnisse also in vergleichbaren Größenordnungen liegen. Beim Vergleich der Fertigteilbauweise sind die Lebenszykluskosten des ILC-Gebäudes je nach Variante zum Teil leicht günstiger (ca. 2-3 %) als das Normalbeton-Sandwichelement [52], liegen also ebenfalls in ähnlichen Kategorien.

Dementsprechend werden beim Verfahren nach NaWoh, wie bereits bei der Ökobilanz, die zu vergleichenden Gebäude bei fast allen Kriterien gleich bewertet [52; 51].

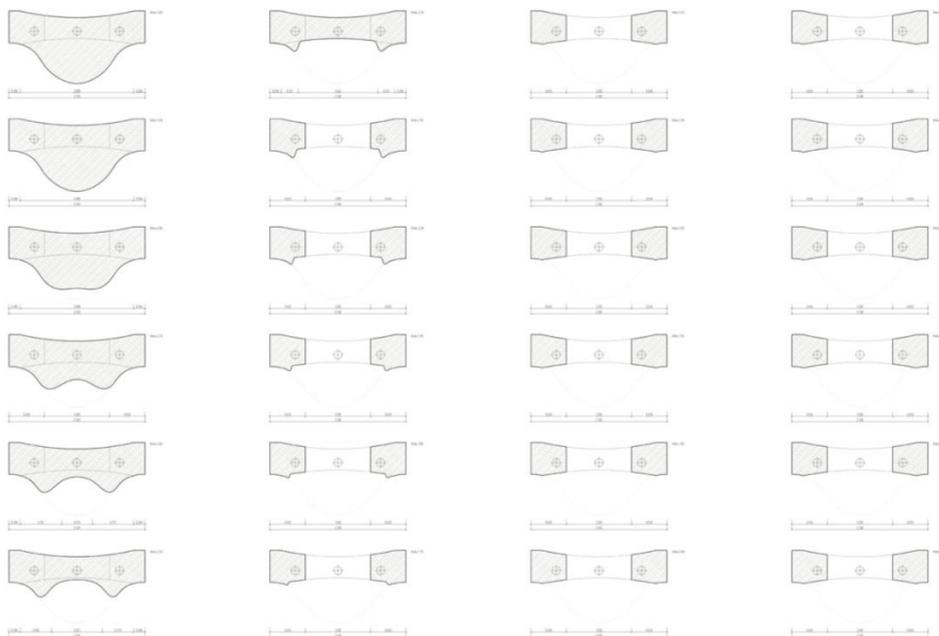
Weiterer Untersuchungsbedarf:

Auch hier werden diverse Fragen aufgeworfen. Genau wie bei der Ökobilanz gilt es, den gewählten U-Wert der Außenwände, mögliche Materialeinsparungen und angesetzte Lebensdauern (s.o.) zu überprüfen. Darüber hinaus sollten pauschale Ansätze, wie z.B. für Wartungs- und Inspektionskosten, hinterfragt werden.



# AP 3

## Baukonstruktive Ausarbeitung



### **3 Arbeitspaket 3: Baukonstruktive Ausarbeitung**

In dieser Phase wurden die vorhandenen Entwürfe analysiert und hinsichtlich des Materials ILC baukonstruktiv ausgearbeitet. Charakteristische Details wurden materialgerecht entwickelt und berechnet. Baukonstruktiv besonders prägnante oder geeignete Details wurden für die Produktion als Prototyp in der folgenden Phase ausgewählt und weiterentwickelt.

Im Verlauf der Projektbearbeitung ergab sich, dass viele der noch im Forschungsantrag erwähnten Details bereits mehrfach untersucht und realisiert wurden und auf Praxistauglichkeit am Bestand überprüft werden können. Es wurde daher die Entscheidung getroffen, diese Details im Rahmen des Projektes zu katalogisieren und zusammenzustellen, sie aber nicht in der Weiterbearbeitung des Projektes als Prototyp zu realisieren. Dazu gehören insbesondere die verschiedenen Fensteranschlüsse, Decken- sowie Attikaanschlüsse. Die Ausarbeitung als Leitdetails der verschiedenen Anschlusssituationen ist in Abschnitt 3.2 zu finden.

#### **3.1 Ableitung prägnanter Details aus den Entwürfen**

Aufgrund der während der Planung der Typenentwürfe in Arbeitspaket 2 erlangten Erkenntnisse wurden prägnante Details ausgewählt und diese zur weiteren Ausarbeitung als Prototyp vorgeschlagen. Das Untersuchungsprogramm beinhaltet nun die Erstellung eines großen und mehrerer kleiner Prototypen.

### 3.1.1 Baulücke Kantstr. 126

#### Prototyp 1

Fassadenbauteil mit aus der Außenwand  
auskragendem Balkon  
(Entwurf Kantstraße 126)  
ILC 800 - Transportbeton

Detailsituationen:

- Wandelement
- monolithischer Balkonanschluss
- Deckenaufleger der Betondecke
- Fensteranschluss

Untersuchung:

- Baubarkeit (Schalung)
- ILC als Transportbeton
- Oberflächenbehandlung: innen-  
außen

Abmessungen ca.:

H: 300 cm

B: 250 cm

T: 60 cm

Fensteranteil: ca. 50 %;

Volumen: ca. 3,5 m<sup>3</sup>

Gewicht: ca. 3500 kg

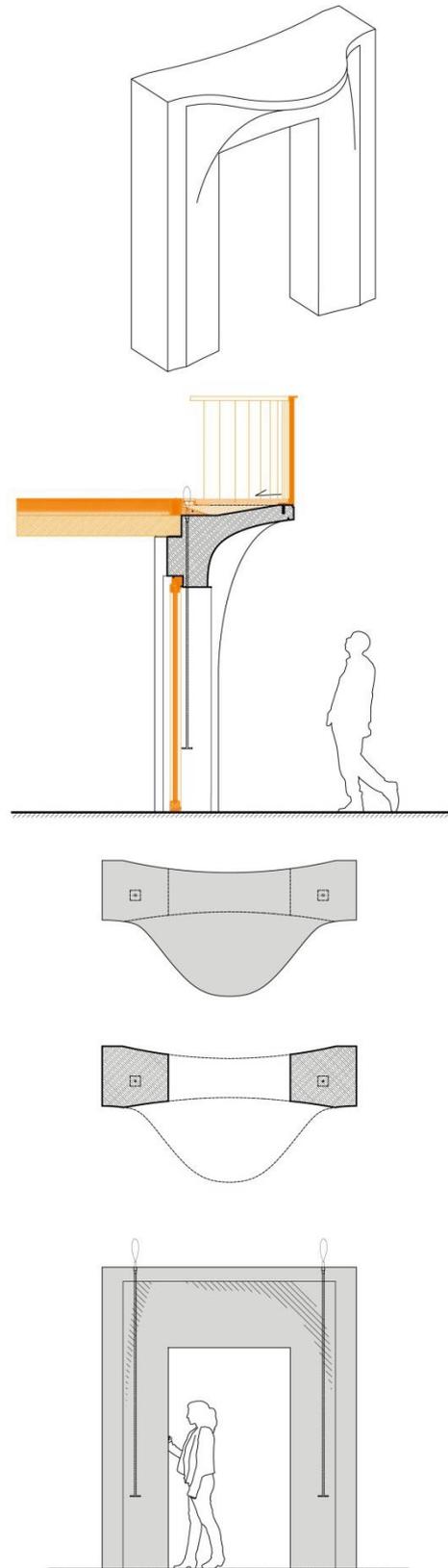


Bild 60 : Prototyp 1

### 3.1.2 Fensteranschlüsse

#### Prototyp 2

2 baugleiche Wandelemente mit Fensteröffnung (mittig) und Fensterbank aus ILC für Schlagregenversuch

1 x ILC 800

1 x ILC 600

Untersuchung:

- Baubarkeit
- GFK-Bewehrung
- Oberflächenbehandlung
- Eindringen von Feuchtigkeit durch Schlagregenversuch

Abmessungen:

H: 125 cm

B: 100 cm

T: 50 cm

Gewicht: ca. 500 kg (ILC 800)

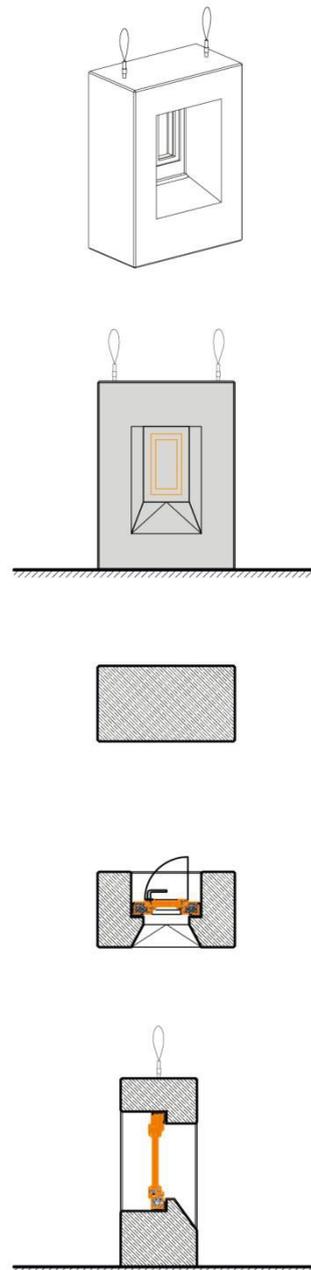


Bild 61: Prototyp 2

### 3.1.3 Referenzgebäude

#### Prototyp 3

2 baugleiche ILC Balkonbauteile mit Rückverankerung in Normalbetondecke auf Wandstummel (Entwurf Referenzgebäude)

1 x Herstellung als Fertigteil

1 x Herstellung als Ortbetonbauteil

Detailsituationen:

- GFK-Bewehrung Balkon
- Anschluss ILC/Normalbeton-Decke

Untersuchung:

- Baubarkeit
- Biegung: Last- Verformungskurve, Rissverhalten, Belastung des Balkons bis zur Nutzlast, anschließend bis zum Bruch

Abmessungen:

H: 100 cm

B: 100 cm

T: 250 cm

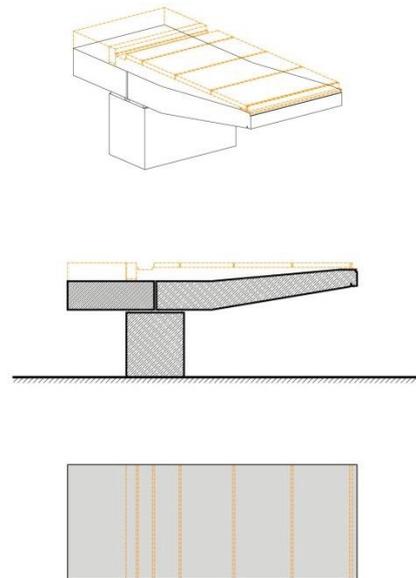


Bild 62: Prototyp 3

### 3.1.4 Freiformoberfläche als Fertigteil

#### Prototyp 4

Wandelement als ILC-Fertigteil - monolithische Vorhangfassade.

Untersuchung:

- Baubarkeit
- Oberflächengestaltung
- Schalung Styrodur

Abmessungen:

H: 200 cm  
B: 180 cm  
T: 35 cm

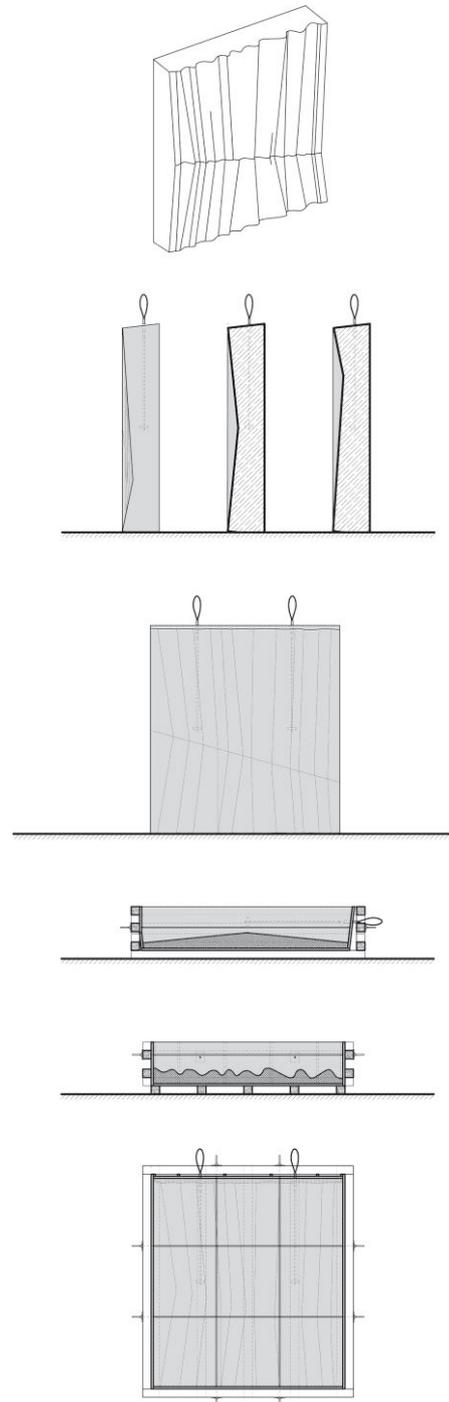


Bild 63: Prototyp 4

### 3.1.5 Zusammenfassung der zu untersuchenden Details:

- mehrere Wandelemente (Prototypen 1, 2, 4)
- 1 x Wand-Deckenanschluss (Betondecke, Prototyp 3)
- 2 x Wand-Balkonanschluss (Prototypen 1, 3)
- 1 x Wand-Fenster-Anschluss (mittig) in Prototypen 2  
für Schlagregenstand

#### Erstellung der Probekörper

Bei der Erstellung der wandartigen Prüfkörper (z.B. bei den Prototypen 1, 2 und 4) waren die folgenden Punkte zu untersuchen:

- verschiedene Schalungsoberflächen, z.B.
  - o saugend (→ dunkler)
  - o Platten mit dünner bzw. leicht saugender Filmbeschichtung
  - o nicht saugend (z.B. Fin-ply, Styropor, Epoxydharz)
- Verschiedene Bewehrungsmaterialien (GFK, Stahl) mit verschiedenen Abstandshaltern
- maximale Fallhöhen bei der Betonage, Vermeiden von Betonierhorizonten
- Oberflächennachbehandlung und Betonkosmetik

#### Begleitversuche

Parallel zur Untersuchung der Prototypen 1 bis 4 wurden die folgenden Begleitversuche durchgeführt:

- a) Wasserdampfdiffusion
- b) Wassereindringtiefe
- c) Frost-Tau-Wechsel
- d) Schwindversuche
- e) frühestmöglicher Ausschalzeitpunkt
- f) **Error! Reference source not found.:**

#### Zusammenfassung des Volumens der Prototypen

Tabelle 12: Volumen der Prototypen

Prototyp	Volumen ca. [m <sup>3</sup> ]
1	3,5

2 (2x)	1
3 (2x)	1,4
4	1
Begleitversuche a) bis e)	1
<b>Summe:</b>	<b>8</b>

Im Folgenden werden die als Leitdetails ausgearbeiteten charakteristischen Anschlusssituationen dargestellt.

### 3.2 Beispielhafte Leitdetails für die Planung von Gebäuden aus Infraleichtbeton

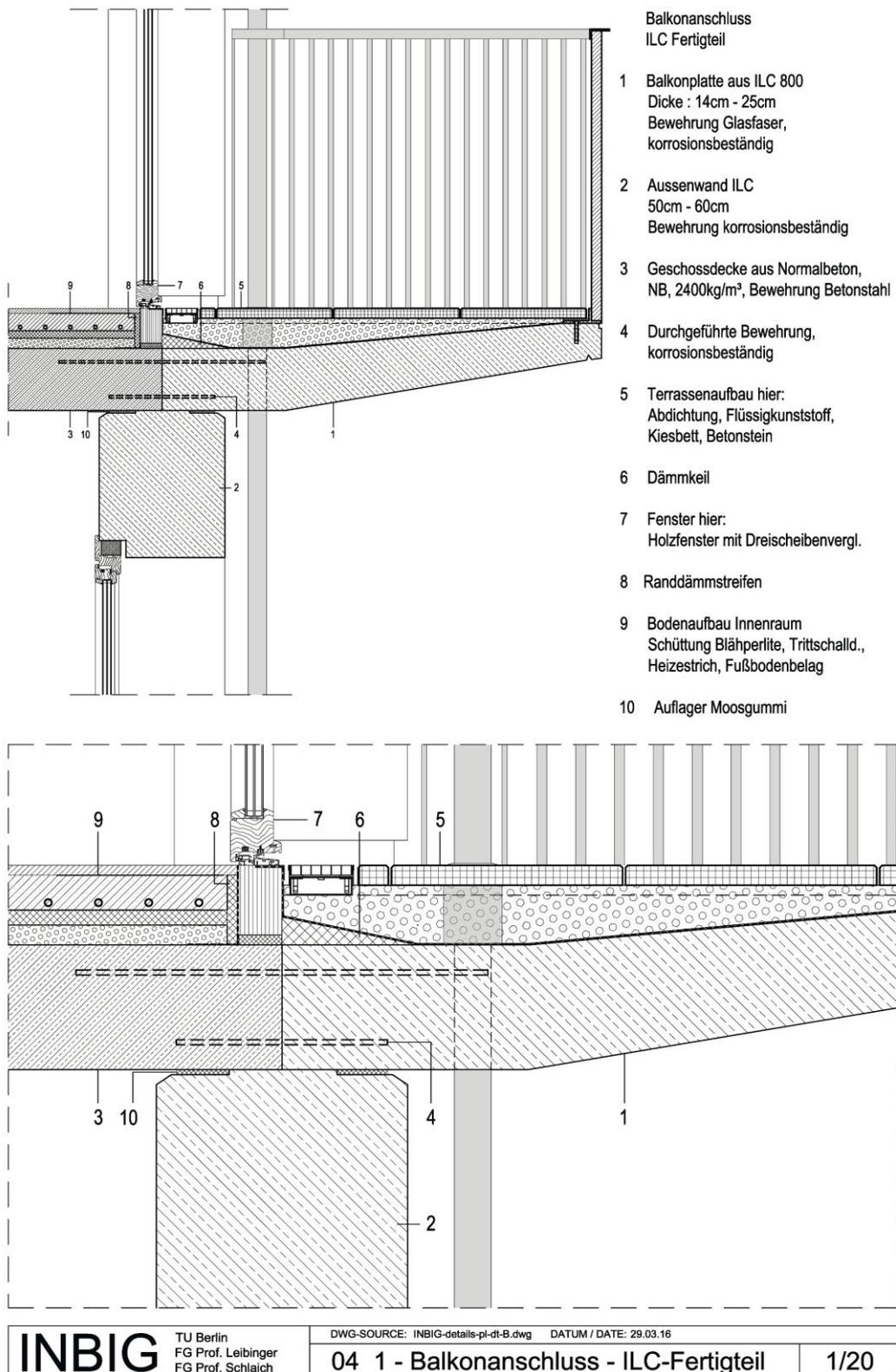


Bild 64: Anschlussdetail für rückverankerte Balkonelemente aus Infraleichtbeton

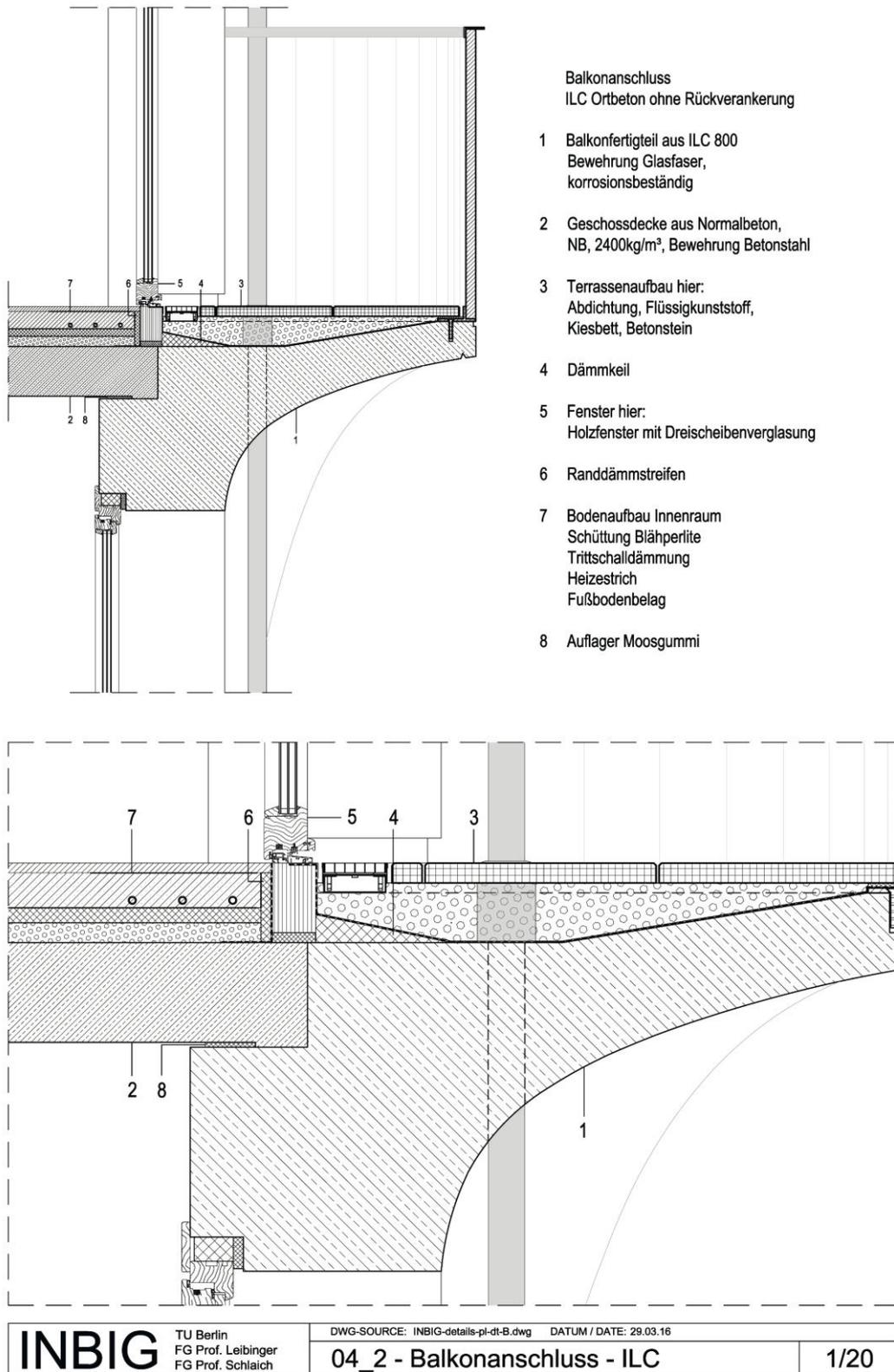
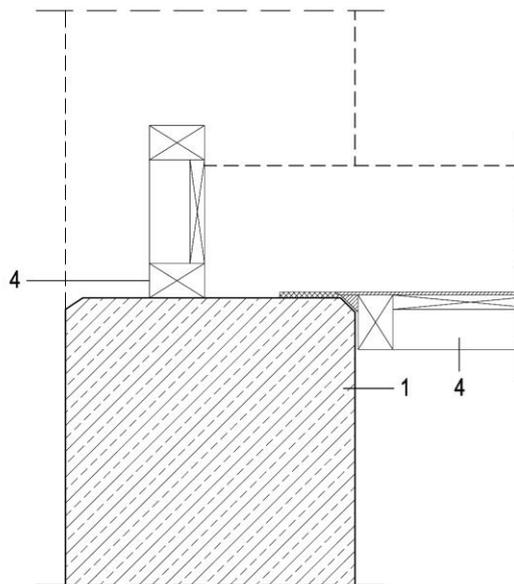
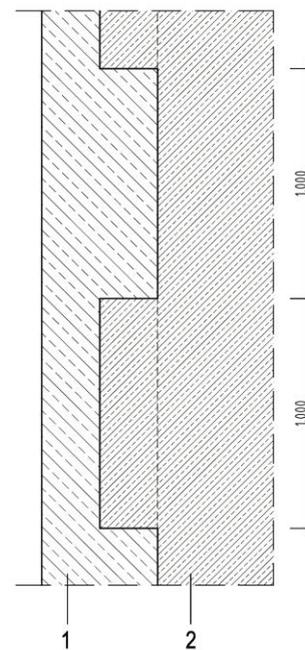
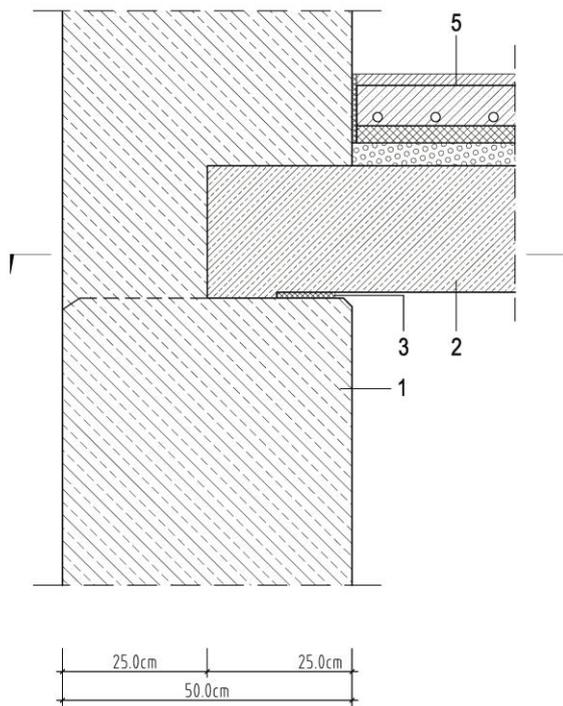


Bild 65: Aus der Fassade entwickeltes Balkonelement aus Infralichtbeton



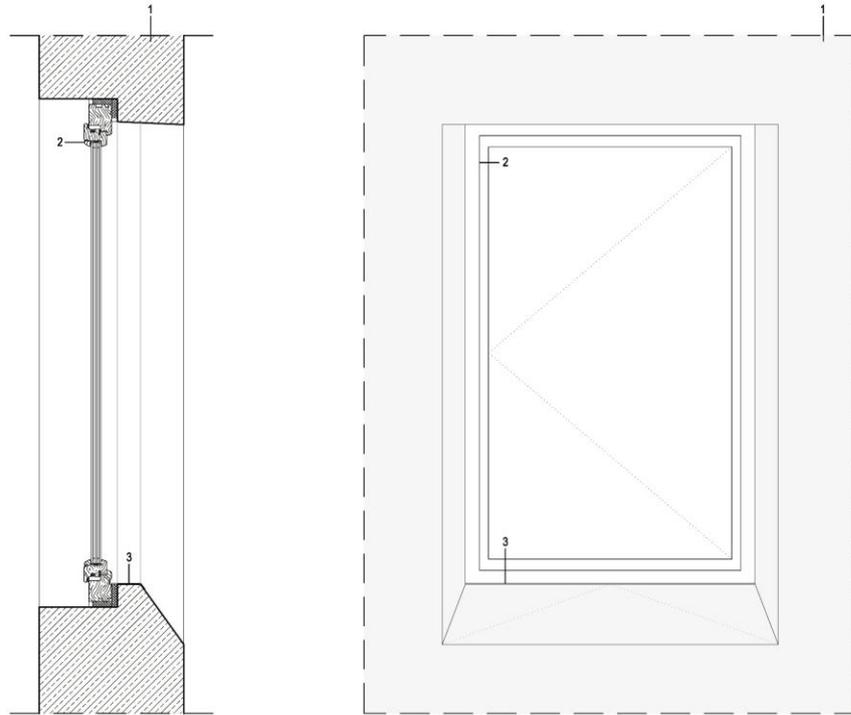
- Deckenanschluss  
& Schalung
- 1 Außenwand ILC  
50cm-60cm  
Bewehrung korrosionsbeständig
  - 2 Geschosdecke Normalbeton,  
NB, 2400kg/m<sup>3</sup>
  - 3 Auflager Moosgummi
  - 4 Schalung
  - 5 Bodenaufbau  
Schüttung Bläherlite  
Trittschalldämmung  
Heizestrich  
Fußbodenbelag



Systemschnitt Deckenaufleger  
Alternative zu kontinuierlichem Auflager;  
Auflagertaschen

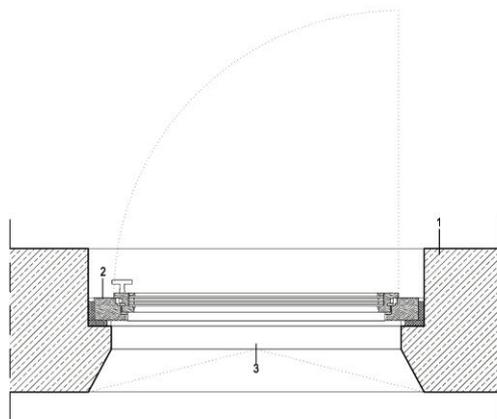
<b>INBIG</b>	TU Berlin FG Prof. Leibinger FG Prof. Schlaich	DWG-SOURCE: INBIG-details-pl-dt-B.dwg    DATUM / DATE: 29.03.16	
		02_2 - Deckenanschluss + Schalung	1/10

Bild 66: Deckenanschluss Normalbetondecke in Außenwand aus Infraleichtbeton



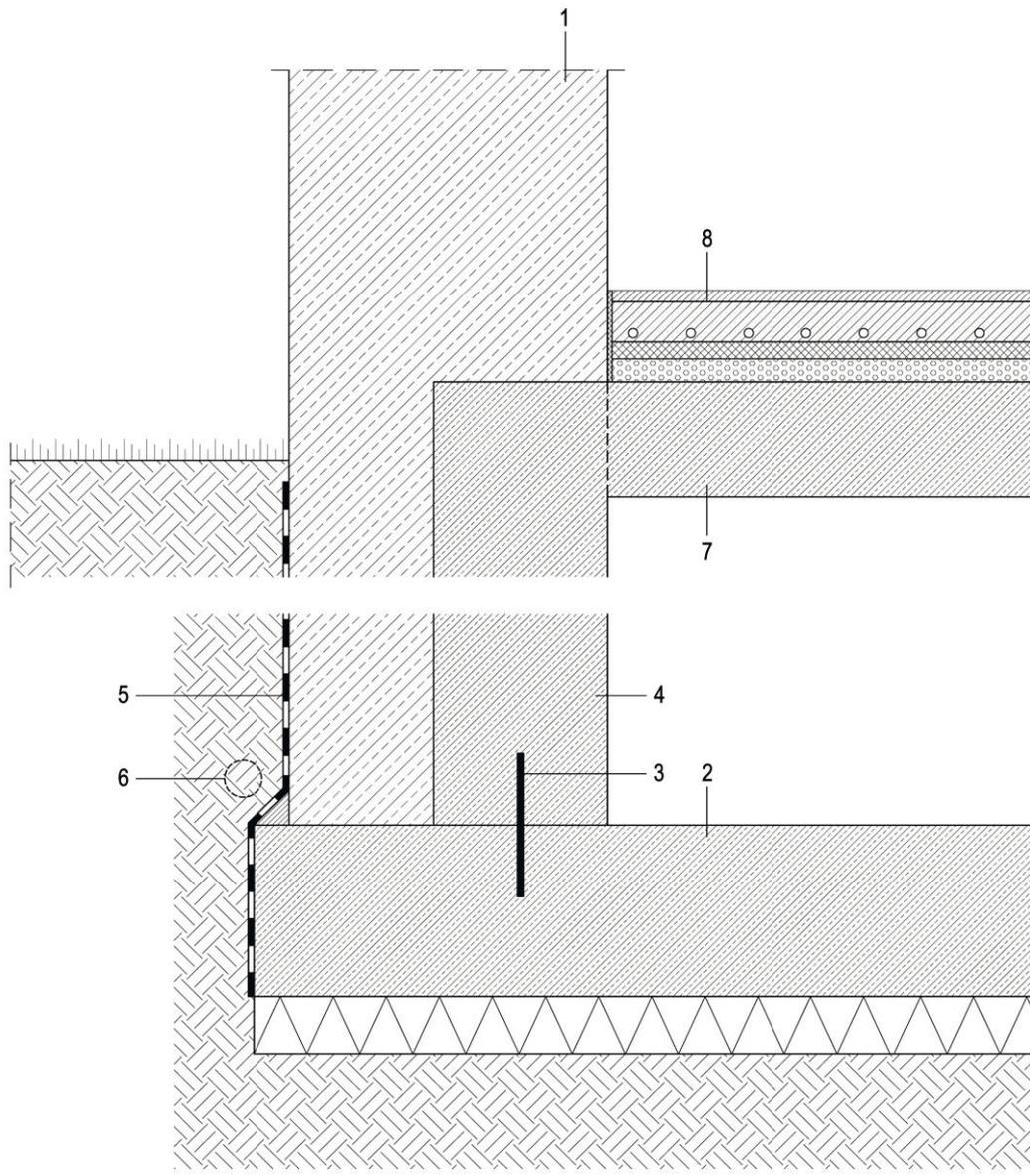
Fensteranschluss mittig  
ohne Fensterverblechung

- 1 Außenwand ILC  
50cm-60cm  
Bewehrung korrosionsbeständig
- 2 Fenster hier:  
Holzfenster mit Dreischeibenverglasung
- 3 Fensterverblechung im Bereich  
des horizontalen Fensteranschlags  
Fensterbank außen aus hydrophobiertem  
Sichtbeton



<b>INBIG</b>	TU Berlin FG Prof. Leibinger FG Prof. Schlaich	DWG-SOURCE: INBIG-details-pl-dt-A.dwg    DATUM / DATE: 07.03.16	
		<b>03_1 - Fensteranschlüsse - Fenster mittig</b>	<b>1/20</b>

Bild 67: Fensteranschlussdetail – Fenster mittig mit konventionellem Fensteranschlag

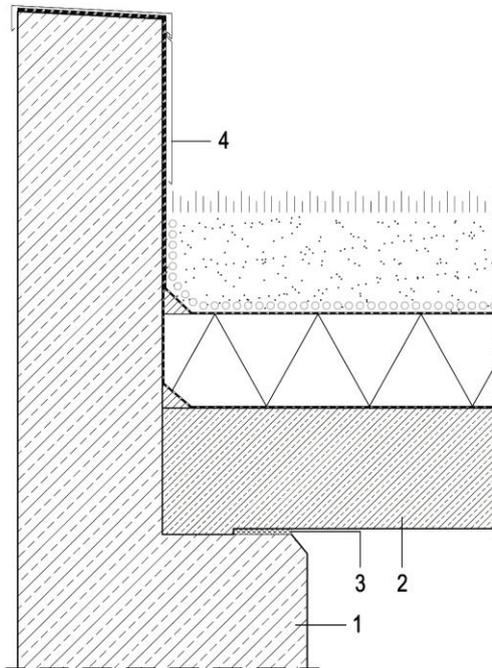


Fußpunkt EFH Schlaich

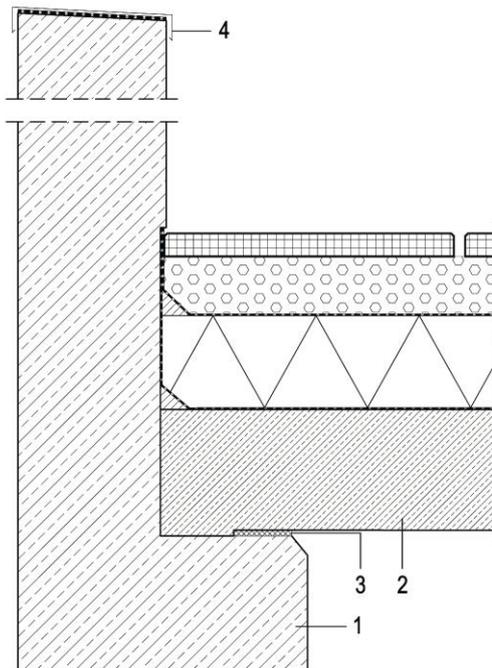
- |   |   |  |
|---|---|--|
| 1 Außenwand ILC<br>50cm-60cm<br>Bewehrung korrosionsbeständig | 4 Kellerwand WU - Beton                                   | 8 Bodenaufbau<br>Schüttung Blähperlite<br>Trittschalldämmung<br>Heizestrich<br>Fußbodenbelag |
| 2 Sohlplatte aus WU-Beton<br>und Dämmschicht                  | 6 Drainage nach Bodenverhältnissen                        |  |
| 3 Fugenbleche   | 7 Geschossdecke Normalbeton,<br>NB, 2400kg/m <sup>3</sup> |  |
|   | 5 Vertikale Abdichtung                                    |  |

<b>INBIG</b>	TU Berlin FG Prof. Leibinger FG Prof. Schlaich	DWG-SOURCE: INBIG-details-pl-dt-A.dwg	DATUM / DATE: 08.03.16
		<b>06_1 - Fußpunkt</b>	<b>1/10</b>

Bild 68: Fußpunktdetail – Keller aus WU-Beton mit vorlaufender Schale aus ILC



- Attika vollverblecht
- 1 Aussenwand ILC  
50cm - 60cm  
Bewehrung korrosionsbeständig
  - 2 Flachdachaufbau:  
Normalbetonplatte 210mm,  
Dampfsperre, Dämmung 160mm im Mittel,  
Abdichtung, Drainageschicht,  
Dachbegrünung 170mm
  - 3 Auflager Moosgummi 10mm
  - 4 Attikaverblechung innen  
an der Attika heruntergeführt



- Attika als Brüstung
- 1 Aussenwand ILC  
50cm - 60cm  
Bewehrung korrosionsbeständig
  - 2 Flachdachaufbau:  
Normalbetonplatte 210mm,  
Dampfsperre, Dämmung 160mm im Mittel,  
Abdichtung, Kiesschüttung 100mm,  
Betonplatten 40mm
  - 3 Auflager Moosgummi 10mm
  - 4 Attikaverblechung

<b>INBIG</b>	TU Berlin FG Prof. Leibinger FG Prof. Schlaich	DWG-SOURCE: INBIG-details-pl-dt-A.dwg    DATUM / DATE: 01.03.16	
		05_1 - Details - Attika	1/10

Bild 69: Attikadetail – Keller aus WU-Beton mit vorlaufender Schale aus ILC

### **3.3 Energietechnische Analysen**

Autoren: Matthias Schuler, Max Bauer, Samuel Meile, Jan Mehnert, Johannes Steinbeißer (TRANSSOLAR Energietechnik GmbH)

#### **3.3.1 Dynamisch-Thermische Analyse**

Das Ziel der thermischen Analyse ist eine Betrachtung des Komforts. Um eine Einschätzung zu ermöglichen wird die monolithische Bauweise mit Infraleichtbeton mit anderen Bauweisen (leicht und schwer) verglichen. Die dynamische Simulation basiert auf gleichen Randbedingungen, um Fehlerquellen zu minimieren und die Komplexität gering zu halten. Dadurch soll eine Vergleichbarkeit geschaffen werden um mögliche Potentiale des Infraleichtbetons kritisch zu betrachten.

Darüber hinaus wird der Einsatz einer aktiven Dämmung untersucht und betrachtet welche Aufwendungen für eine solche Technik notwendig erscheinen und wo deren Vor- und Nachteil liegt.

#### **TRNSYS als dynamische Simulationsumgebung**

Das Simulationsprogramm TRNSYS (TRaNsientSYstems Simulation) ermöglicht dynamische Anlagen und Gebäudesimulationen [56]. Der Vorteil eines dynamischen Simulationsprogramms ist, dass Berechnungen über einen längeren Zeitraum abgebildet werden können und nicht nur zu einem bestimmten (statischen) Zeitpunkt wie es bei klassischen Berechnungsverfahren der Fall ist. Da es sich bei TRNSYS um ein thermisches Simulationsprogramm handelt können die thermischen Effekte, welche einen Raum beeinflussen, genutzt werden um Angaben bezüglich des Nutzerkomforts als auch zu den Energiebedarfen und Leistungen zu machen.

#### **Randbedingungen der thermischen Simulation**

Für eine thermische Simulation wird ein Raum generiert, für welchen die angestrebten Untersuchungen vorgenommen werden.

Repräsentativ wird ein Raum mit einer Größe von 28 m<sup>2</sup> und Südorientierung simuliert. Der Fensterflächenanteil der Außenfassade beträgt 55,5 %. Decke, Boden und Innenwände sind als adiabat angenommen, d.h. über diese Bauteile findet kein Wärmeaustausch statt, da auf der anderen Seite dieser Innenwände gleiche Bedingungen herrschen.



Bild 70: Modellierter Raum welcher in der Simulationsumgebung TRNSYS abgebildet wurde

### Verglasung und Verschattung

Die Fenster sind als 3-fach Wärmeschutzverglasung mit folgenden Kennwerten ausgeführt.

Tabelle 13: Verglasungsgüte der 3-fach Wärmeschutzverglasung

Ug-Wert	g-Wert	Solare Transmission	Visuelle Transmission
0.59	0.451	0.358	0.658

Der Rahmenanteil beträgt 30%.

Die Fenster besitzen einen außenliegenden Sonnenschutz mit einem Verschattungsfaktor  $F_c$  von 0.2. Diese Verschattung ist mit einer Hysterese strahlungsabhängig gesteuert und schließt bei  $140 \text{ W/m}^2$  solarer Einstrahlung auf die Fassade und öffnet bei  $120 \text{ W/m}^2$ .

### Interne Wärmegewinne

Interne Lasten kommen durch anwesende Personen und Beleuchtung zustande. Der Raum wird von einer Person montags bis freitags von 16:00-7:00 Uhr und am Wochenende ganztägig genutzt, was einer typischen Wohnungsnutzung entspricht. Die Beleuchtung wird mit  $10 \text{ W/m}^2$  (Tageslichtabhängig an/aus gesteuert) abgebildet.

### Infiltration

Die Undichtigkeit des Gebäudes wird mit einem Standard EnEV-Wert von  $0,1 \text{ h}^{-1}$  angenommen.

### Natürlicher Luftwechsel

Der betrachtete Raum wird natürlich mit einem Luftwechsel von  $0,5 \text{ h}^{-1}$  belüftet, was den hygienisch notwendigen Mindestluftwechsel darstellt. Als Variante wird zusätzlich eine erhöhte Nachtlüftung (nachfolgend als Nachtpülung bezeichnet) betrachtet, bei welcher in der Zeit

von 22:00-6:00 Uhr mit einem erhöhten Luftwechsel von  $2 \text{ h}^{-1}$  gelüftet wird. Diese erhöhte Nachtpülung nach DIN 4108-2 [57] wird nur eingesetzt, wenn der Tagesdurchschnitt der Außentemperatur über  $18^\circ\text{C}$  liegt. Die Beheizung des Raumes erfolgt ideal mit  $22^\circ\text{C}$ . Geheizt wird nur, wenn der Tagesdurchschnitt der Außentemperatur unter  $12^\circ\text{C}$  liegt.

### Außenwandaufbau

Folgende Tabelle fasst die verwendeten Materialien mit ihren Kennwerten hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  [W/mK], Wärmekapazität  $c$  [J/kgK] und Rohdichte  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] zusammen. Der Wandaufbau aller Varianten wird dabei so gewählt, dass derselbe U-Wert von  $0,31 \text{ W/m}^2\text{K}$  erreicht wird.

Tabelle 14: Als Varianten verwendete Bauweisen, ausgelegt auf denselben U-Wert:  
1 Leichte Bauweise 2 ILC 3 Schwere Bauweise 4 ILC mit Kapillarrohren (aktive Dämmung)

Nr.	Variante	Materialien	$\lambda$ [W/mK]	$c$ [J/kgK]	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Außenwand (U-Wert: <math>0,31 \text{ W/m}^2\text{K}</math>):</b>					
1	Leichte Bauweise Holzständerbauweise	OSB	0,130	2100	660
		Fichte	0,130	2100	450
		Holzwolle	0,045	2100	50
2	Infralichtbeton monolithisch 60cm	ILC	0,193	870	800
3	Schwere Bauweise Beton + WDVS	Beton	2,300	880	2300
		Mineralwolle	0,035	830	20
4	Infralichtbeton mit Kapillarrohren (von innen bei 11 cm)	ILC	0,193	870	800
		Vorlauftemperatur: $15^\circ\text{C}$ Massenstrom: $10 \text{ kg/m}^2$			
<b>Innenwände:</b>					
1-4	Alle	Leichtbeton	0,488	1000	1000

### Wetterdatensatz

Als Wetterdatensatz wird das Testreferenzjahr Potsdam für den Standort Berlin verwendet.

### Infralichtbeton mit Kapillarrohrsystem

Bei Variante 4 handelt es sich um eine Konstruktion aus Infralichtbeton mit integrierten Kapillarrohren, mit welchen zusätzlich aktiv geheizt oder gekühlt werden kann. Die Kapillarrohre liegen von innen gesehen in einer Tiefe von 11 cm. Es versteht sich, dass ein solches System nur Sinn ergeben kann, wenn die benötigte Energie regenerativ und entsprechend kostenlos zur Verfügung gestellt werden kann. Denkbar wäre beispielsweise eine Kombination mit Grauwassernutzung oder auch Geothermie. In der thermischen Untersuchung wurde lediglich der Mehrwert hinsichtlich einer Kühlvariante untersucht. Entsprechend könnte das System ebenfalls zum Heizen genutzt werden. Es wurde mit einer Vorlauftemperatur von  $15^\circ\text{C}$  und einem Massenstrom von  $10 \text{ kg}$  pro Quadratmeter Wandfläche gerechnet. Außerdem ist diese sogenannte „aktive Dämmung“ lediglich dann aktiviert, wenn die durchschnittliche Tagesaußentemperatur über  $18^\circ\text{C}$  liegt.

## Ergebnisse

Die Ergebnisse der dynamischen Simulation werden in diesem Abschnitt erläutert. Der Jahresverlauf der Außentemperatur und die Raumtemperaturen der untersuchten Varianten sind in der folgenden Abbildung gezeigt. Auf das Komfortniveau während der Sommermonate ist ein wesentliches Augenmerk gelegt. Aus dem Jahresverlauf ist ersichtlich, dass ohne aktive Kühlung operative Raumtemperaturen von über 30°C erreicht werden. Der Unterschied zwischen leichter, schwerer und ILC Bauweise wird im Folgenden detailliert erläutert.

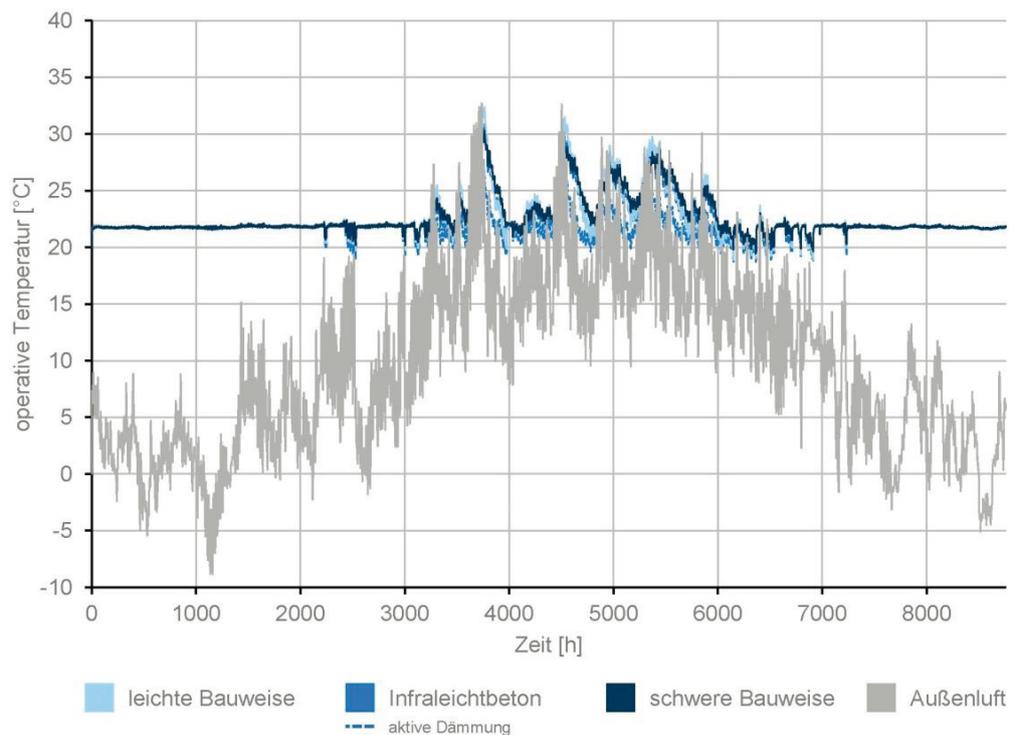


Bild 71: Temperaturverlauf eines Jahres

Blaue Einfärbung: Operative Temperaturen, Grau: Außenlufttemperatur

Betrachtet man bei einer typischen Sommerwoche den Vergleich der verschiedenen Bauweisen hinsichtlich der operativen Temperaturen (siehe Bild 72), so fällt zunächst auf, dass die leichte Bauweise am schnellsten aufheizt, die schwere hingegen am langsamsten (vgl. 1). Die monolithische Konstruktion mit Infralichtbeton liegt etwas über der schweren. Sobald die Temperaturen wieder fallen, kühlt die leichte Bauweise am stärksten ab, die schwere am langsamsten (vgl. 2). Die Bauweise mit dem Infralichtbeton liegt nahe der leichten Bauweise, jedoch noch über dieser.

Es ist ebenfalls ersichtlich, dass die Konstruktion mit Infralichtbeton bei fallenden Außentemperaturen zunächst unterhalb der leichten Bauweise liegt (vgl. 3). Dies liegt daran, dass sich der Raum mit der Konstruktion aus Infralichtbeton gar nicht so weit aufheizt wie der Raum in leichter Bauweise. Recht zügig ändert sich dies, da die leichte Bauweise aufgrund der fehlenden Masse schneller auskühlt. Der Einsatz einer aktiven Dämmung zur Vermei-

dung einer Überhitzung sorgt dafür, dass sich der Raum kaum aufheizt da alle solaren Gewinne durch die Absorption an der Außenwand direkt über das Fluid abgeführt werden.

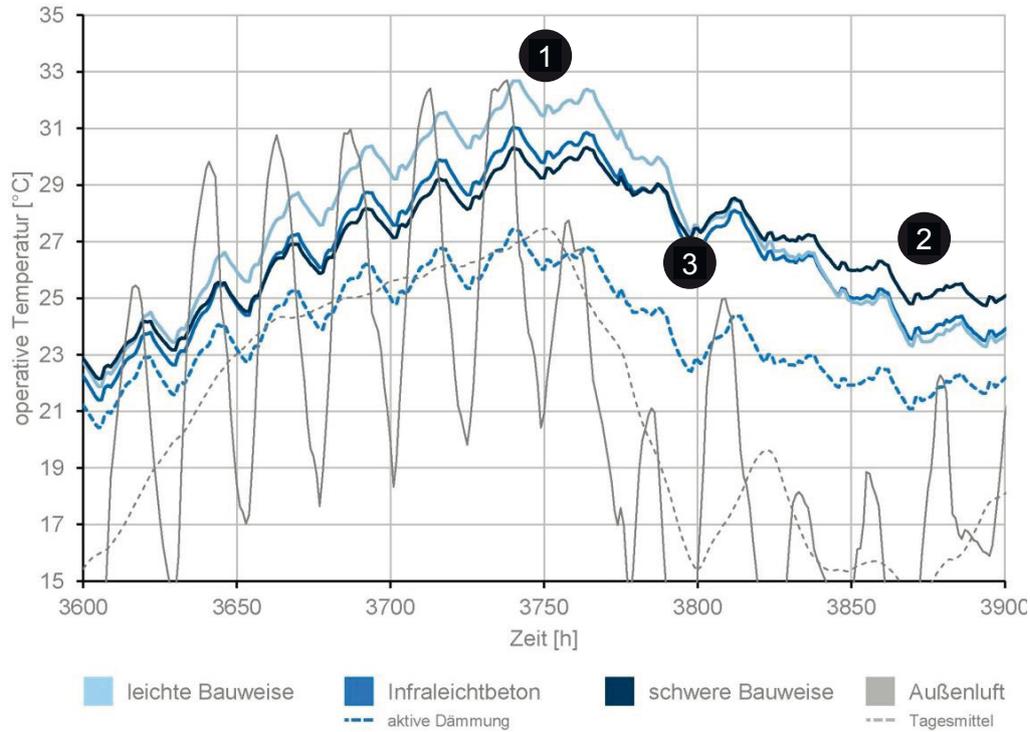


Bild 72: Temperaturverlauf einer Sommerwoche:

Blaue Einfärbung: Operative Temperaturen, Grau: Außenlufttemperatur und Außenlufttemperatur um Tagesmittel

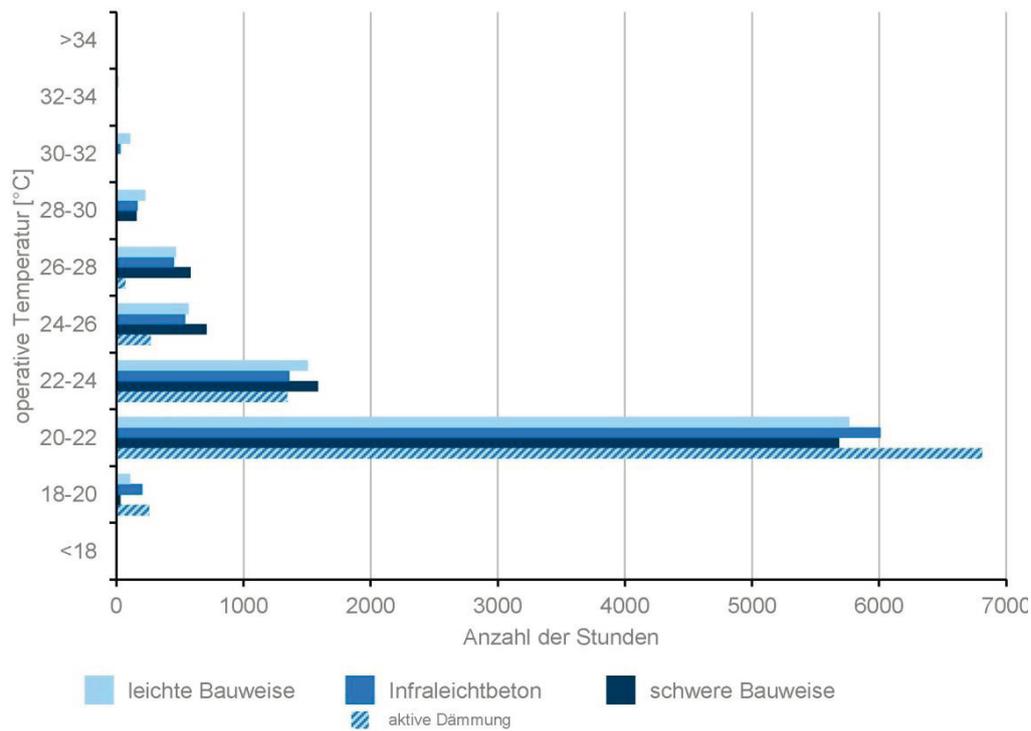


Bild 73: Auftretende Häufigkeiten der operativen Temperaturen

Die Jahresstatistik der operativen Temperaturen zeigt die Anzahl der Stunden im jeweiligen Temperaturintervall auf. Die operative Temperatur der leichten Bauweise ist in 815 h größer als 26°C, die der Konstruktion mit Infraleichtbeton in 650 h und die der schweren Bauweise in 752 h. Werden die Kelvinstunden über 26°C betrachtet, d.h. die Summe der Kelvin, die über 26°C liegen, so ergibt sich Folgendes: die leichte Bauweise liegt mit 1253 Kh (Kelvinstunden) am höchsten, danach folgt die schwere Bauweise mit 713 Kh und die Konstruktion mit Infraleichtbeton liegt mit 694 Kh am niedrigsten. Hier wird die Fähigkeit des Infraleichtbetons deutlich, zum einen durch seine vorhandene thermische Masse nicht so schnell aufzuheizen und zum anderen durch keine zu hohe thermische Kapazität die Wärme auch schneller wieder abzugeben. Durch eine aktive Dämmung in der Konstruktion mit Infraleichtbeton kann im Sommer eine Überhitzung vermieden werden, wodurch die operativen Temperaturen hauptsächlich im komfortablen Bereich liegen (lediglich 72h über 26°C, 33 Kh über 26°C).

Folgende Grafik zeigt die Häufigkeit der Stunden im jeweiligen Intervall der operativen Temperatur. Betrachtet wird nur der Sommer bzw. die Stunden mit einer mittleren Außentemperatur des Tages über 18°C. Die schwere Bauweise hat ihren Vorteil in der geringeren Überhitzung, wohingegen die leichte Bauweise häufiger überhitzt und auch viele Stunden über 28°C liegen. Der Infraleichtbeton liegt dazwischen. Eine aktive Dämmung sorgt für einen hohen Komfort, wodurch die meisten Stunden zwischen 20 und 26°C liegen.

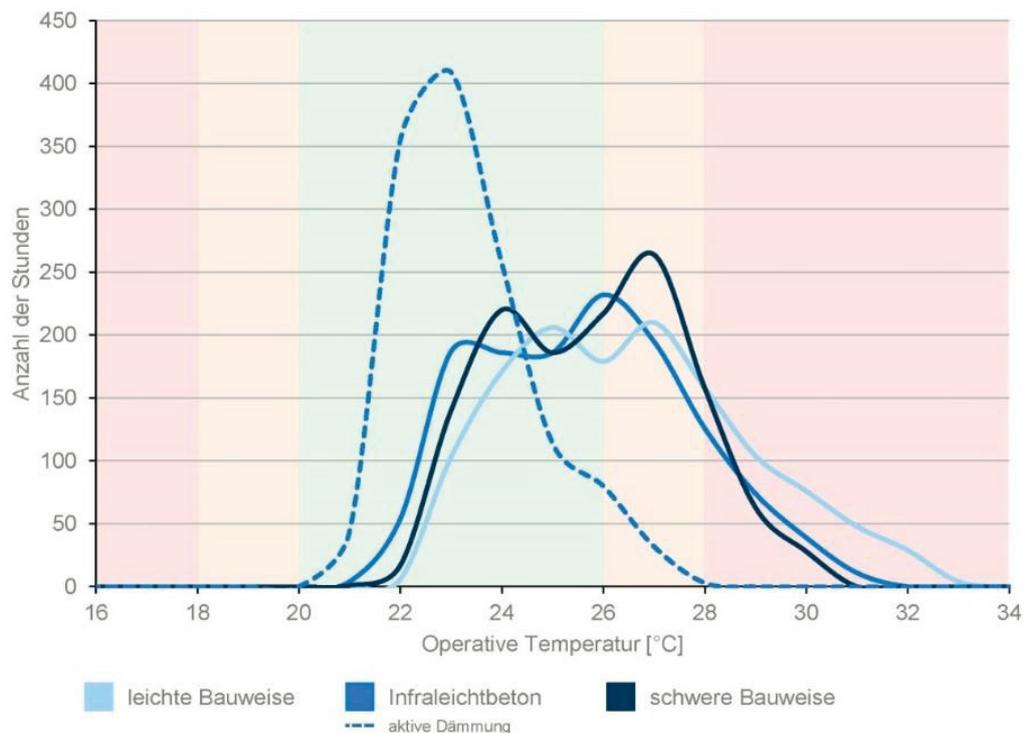


Bild 74: Häufigkeitsverteilung der operativen Temperatur im Sommer  
(Tagesdurchschnitt der Außentemperatur >18°C)

Wird zusätzlich eine Nachtspülung genutzt so verringern sich in allen Fällen die Überhitzungsstunden. Eine Nachtlüftungspülung führt Wärme aus der thermischen Speichermasse aus dem Gebäudeinneren ab. Durch die unterschiedliche Wärmekapazität der Bauweisen kann auftretende Wärme am folgenden Tag wieder aufgenommen werden. Dabei kann die schwere Bauweise mit einer massiven Betonwand eine größere Wärmemenge aufnehmen als die leichte Bauweise. Der ILC Baustoff hat eine vergleichsweise mittlere Wärmekapazität, sodass Wärme aufgenommen wird allerdings nicht in dem Maße wie es bei der schweren Bauweise der Fall ist. Jedoch sinken höhere Raumtemperaturen schneller in Richtung des Temperaturniveaus der Außenluft ab wie es bei der leichten Bauweise der Fall ist. Dieser Zusammenhang ist anhand der Häufigkeitsverteilung in der folgenden Abbildung (Bild 75) zusammengefasst. Dabei kann gerade mit dem ILC Beton ein nahezu gleichwertig komfortables operatives Temperaturniveau von 220 h wie mit der schweren Bauweise (229 h) erzielt werden. Im Vergleich dazu liegt die leichte Bauweise bei 327 h mit über 26°C operativer Temperatur. Der Einsatz einer aktiven Dämmung bewirkt wiederum den Effekt, dass die

Überschreitung der Stunden über 26°C im Vergleich mit den anderen Varianten auf ein Minimum reduziert werden kann.

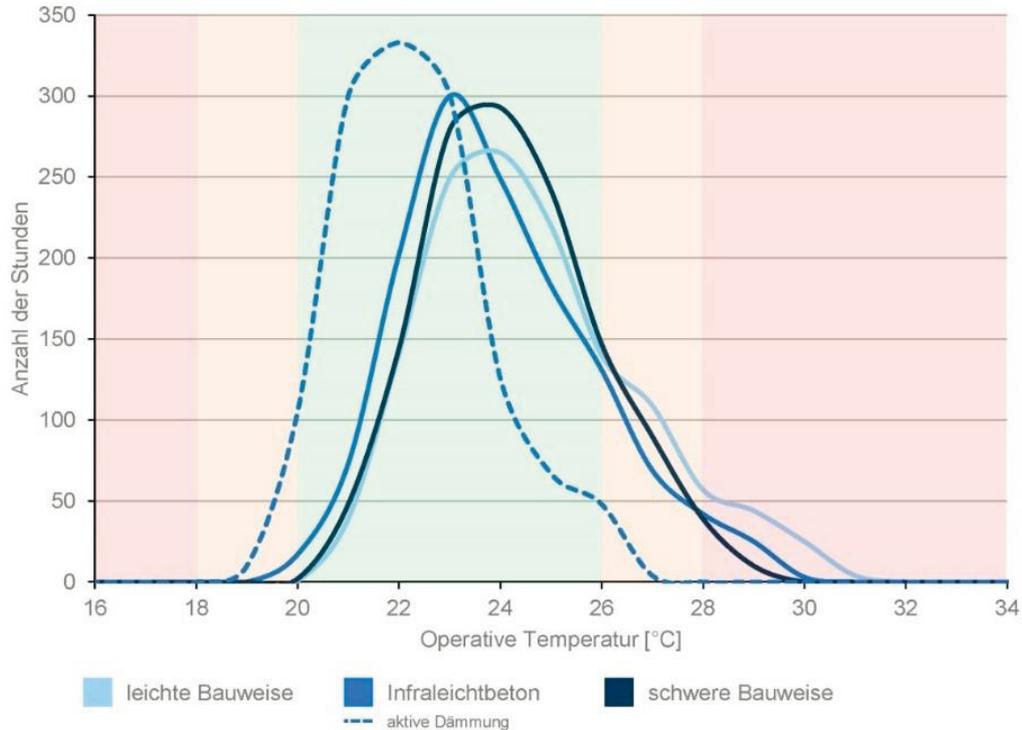
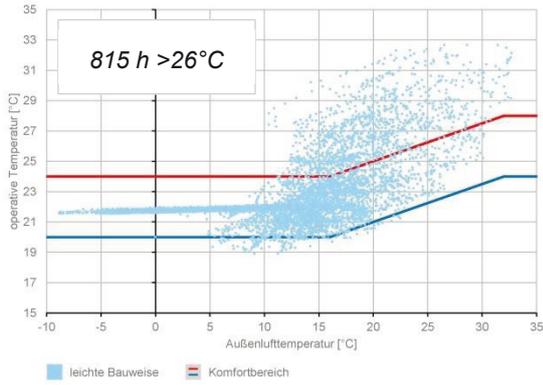
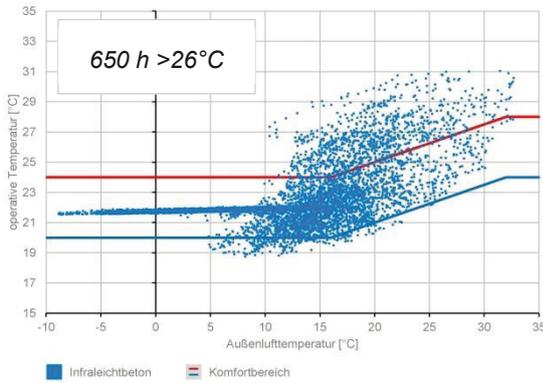


Bild 75: Häufigkeitsverteilung der operativen Temperatur im Sommer bei einer Nachtlüftungspülung (Tagesdurchschnitt der Außentemperatur >18°C)

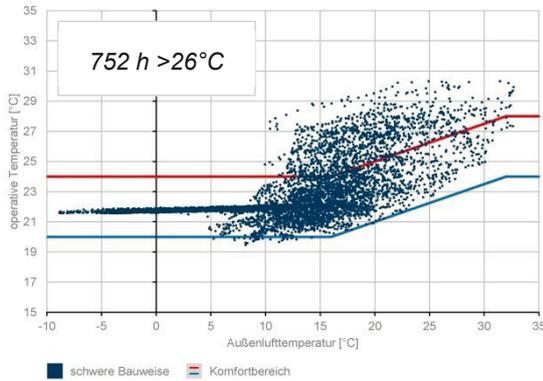
Die Abbildungen der nachfolgenden Seite stellen jeweils die operative Temperatur über der Außenlufttemperatur dar. Jeder Punkt steht für eine Stunde im Jahr. Der adaptive Komfortbereich ist durch die rote und blaue Linie gekennzeichnet. Die Varianten zeigen die Unterschiede hinsichtlich der Maximaltemperaturen deutlich. Ebenso ist der Einfluss einer Nachtspülung ersichtlich. Für den Infralichtbeton ergeben sich ohne Nachtspülung am wenigsten Überhitzungsstunden (650 h > 26°C und 694 Kh > 26°C). Wird zusätzlich die Variante mit aktiver Dämmung berücksichtigt so wird deutlich, dass mit dieser Variante bezüglich der Überhitzung die besten Ergebnisse erzielt werden können.



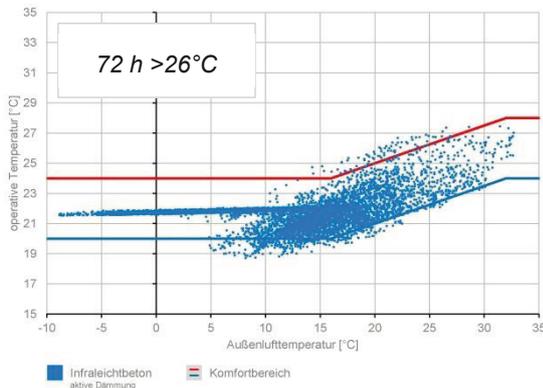
Leichte Bauweise



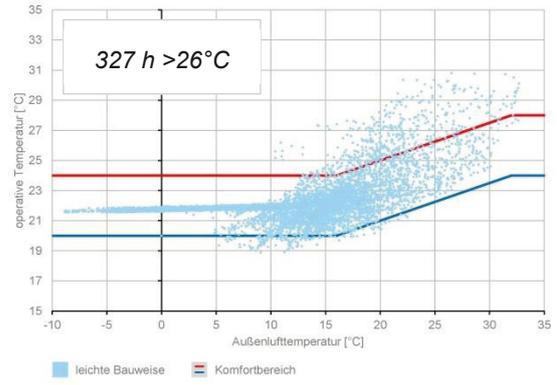
Infraleichtbeton



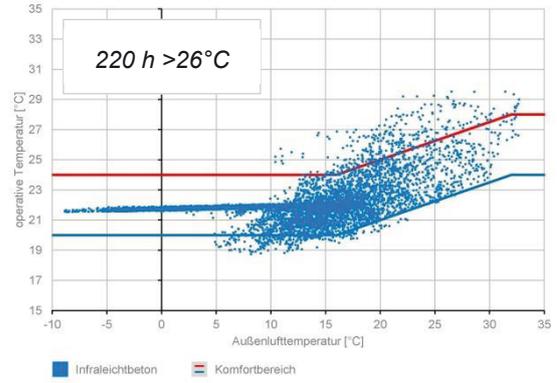
Schwere Bauweise



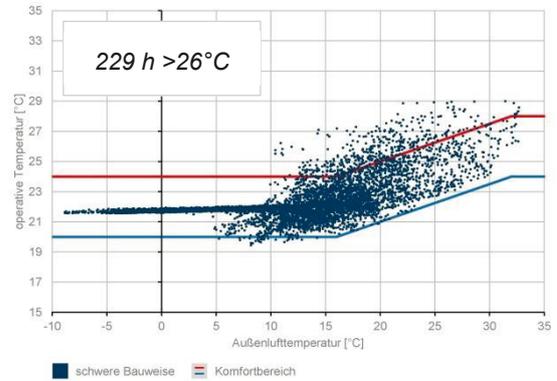
Infraleichtbeton mit Kapillarrohren  
Abschlussbericht



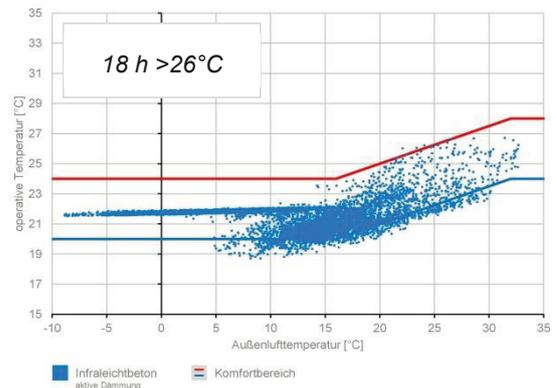
Leichte Bauweise mit Nachtspülung



Infraleichtbeton mit Nachtspülung



Schwere Bauweise mit Nachtspülung



Infraleichtbeton mit Kapillarrohren und Nachtspülung  
Seite 89

### **Zusammenfassung thermische Simulation Nutzerkomfort**

Der Infraleichtbeton weist zwei wichtige Eigenschaften auf, welche den thermischen Komfort beeinflussen. Einerseits hat der Infraleichtbeton mehr thermische Masse als eine leichte Bauweise und reagiert somit träger auf Temperaturänderungen, was sich besonders im Sommer in einer langsameren Temperaturerhöhung zeigt. Andererseits ist der Infraleichtbeton nicht so träge wie eine schwere Bauweise, was eine schnellere Auskühlung nach heißen Tagen ermöglicht. Ohne eine Lüftung während der Nachtstunden ist dadurch eine geringere Temperaturüberschreitung von 26°C im Vergleich zu der schweren Bauweise möglich. Erfolgt eine Nachspülung, so gleichen sich diese Übertemperaturstunden an (Differenz von 9h).

Zusätzlich kann festgehalten werden, dass Erfahrungen aus der Vergangenheit zeigen, dass der Einfluss von beispielsweise freien Decken auf das Temperaturspeicherverhalten sehr viel größer ist als der Einfluss der Außenwände. Demnach kann der thermische Komfort für einen Raum weiter beeinflusst werden, indem beispielsweise Einfluss auf die Decke eines Raumes genommen wird.

Des Weiteren stellt eine aktive Dämmung eine sehr effektive Möglichkeit dar, den thermischen Komfort weiter stark zu verbessern.

## Verwendung einer aktiven Dämmung

Wie die Simulationsergebnisse der vorherigen Seiten zeigen, erscheint der Einsatz einer aktiven Dämmung aus komforttechnischer Sicht äußerst sinnvoll. Nachfolgende Untersuchung verdeutlicht, welche zusätzlichen Anforderungen und Eigenschaften eine aktive Dämmung mit sich bringt. Anhand einer thermischen Simulation wird dabei ermittelt, welche Aufwendungen notwendig sind, um Rahmenbedingungen für möglich Quellen und Senken zu schaffen.

Die Simulation wird wiederum für den in Bild 70 dargestellten Raum durchgeführt. Die Randbedingungen entsprechen den im vorherigen definierten Bedingungen, allerdings ist die Ebene der aktiven Dämmung im äußeren Bereich der Wand angeordnet. Die Überdeckung der Kapillarrohre von der Außenseite beträgt 5 cm.

Intention der Simulation ist es zunächst herauszufinden, inwieweit die Dicke einer ILC Außenwand reduziert, sowie die Dichte dieser Wand erhöht werden kann, um unter Verwendung einer aktiven Dämmung den gleichen Heizenergiebedarf für den Raum erzielen zu können als ohne aktive Dämmung (mit einer monolithischen ILC Wand). Dabei wurde der Variante 1, eine 60 cm monolithische ILC-Wand mit einer Rohdichte von  $600 \text{ kg/m}^3$ , Variante 2, eine lediglich 40 cm dicken ILC-Wand mit aktiver Dämmung (Kapillarrohren) und einer erhöhten Rohdichte von  $800 \text{ kg/m}^3$ , gegenübergestellt. Die konkreten Eigenschaften der beiden untersuchten Wände sind nachfolgend aufgeführt.

Tabelle 15: Als Varianten verwendete Bauweisen:

1 monolithischer ILC 2 ILC mit Kapillarrohren (aktive Dämmung)

Nr.	Variante	Materialien	$\lambda$ [W/mK]	c [J/kgK]	$\delta$ [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Außenwand (U-Wert: 0,31 W/m<sup>2</sup>K):</b>					
1	Infralichtbeton monolithisch 60cm	ILC <sub>600</sub>	0,141	870	600
2	Infralichtbeton 40cm mit Kapillarrohren	ILC <sub>800</sub>	0,193	870	800
		Vorlauftemperatur: 15 °C			
<b>Innenwände:</b>					
1&2	Alle	Leichtbeton	0,488	1000	1000

Nachfolgende Abbildung zeigt Variante 1 ohne aktive Dämmung und Variante 2 mit aktiver Dämmung. Zusätzlich sind Angaben bezüglich der Wandaufbauten und den damit verbundenen Eigenschaften aufgeführt.

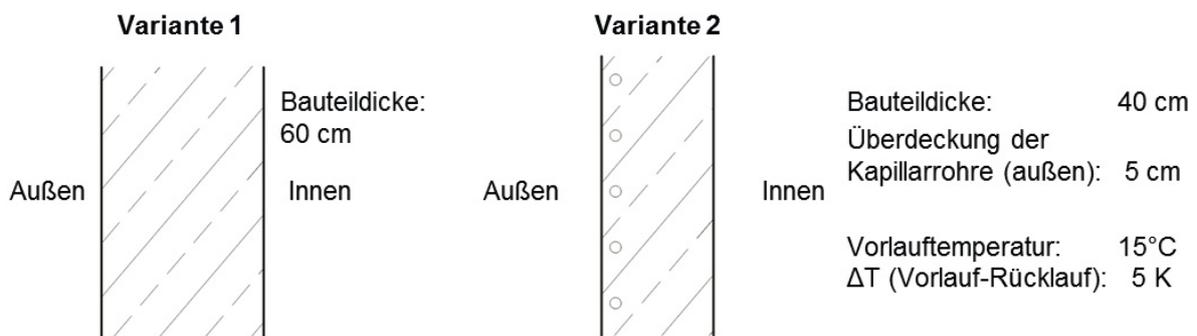


Bild 76: Variante 1 monolithisch sowie Variante 2 mit aktiver Dämmung

Um die Leistung, welche durch die aktive Dämmung in Variante 2 abgegeben werden muss, berechnen zu können wird anhand der thermischen Simulation der Massenstrom durch die aktive Dämmung ermittelt. Anhand der Temperaturspreizung und des Massenstroms kann dann die zu übertragende Leistung ermittelt werden. Wird eine Vorlauftemperatur von 15 °C und einer Temperaturspreizung von 5 K zwischen Vor- und Rücklauf des Wassers angesetzt, so ergibt sich für eine Winterwoche im Februar der nachfolgend dargestellte Wassermassenstrom in der aktiven Dämmung.

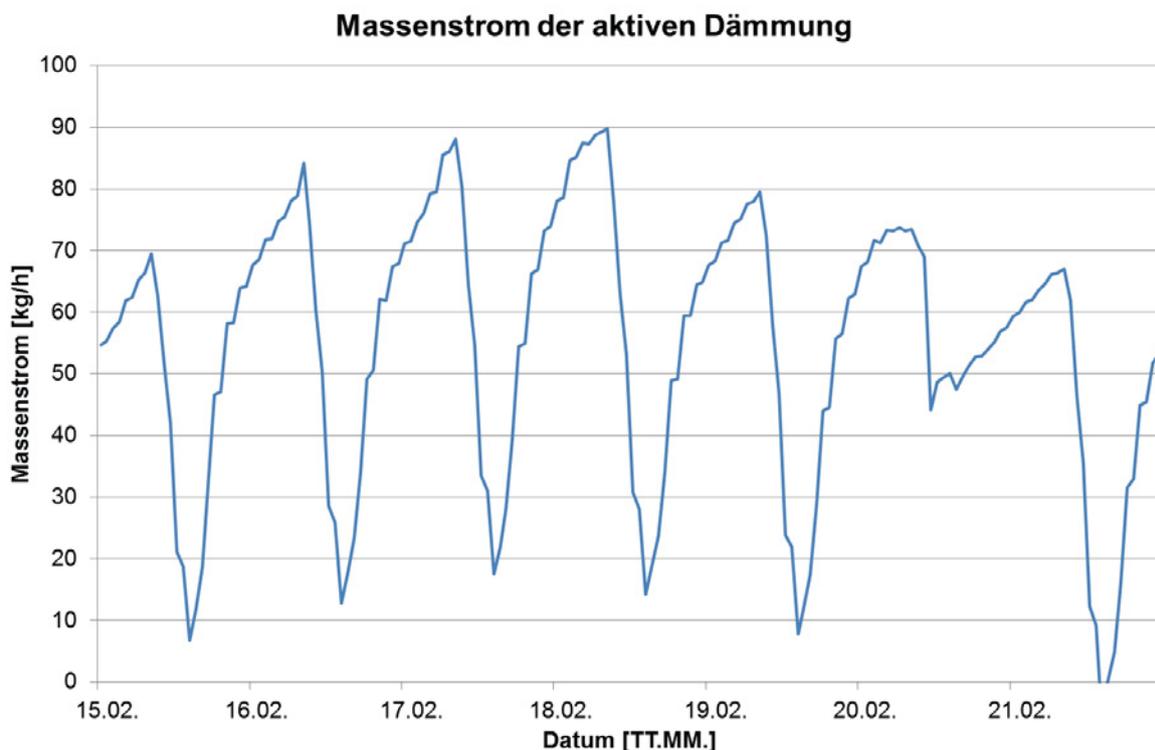


Bild 77: Wassermassenstrom der aktiven Dämmung vom 15.02. bis 21.02.

Die entsprechende Winterwoche wird betrachtet, da die Simulation über ein Jahr zeigt, dass in dieser der maximale Wassermassenstrom anliegt.

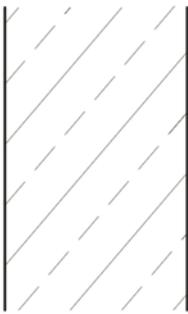
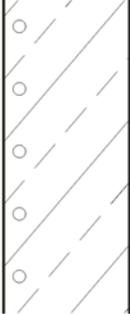
Der Verlauf verdeutlicht, dass die Simulation so aufgebaut ist, dass der Wassermassenstrom von der solare Strahlung und der Außentemperatur abhängig ist. Demnach variiert der Wassermassenstrom in Abhängigkeit der Temperatur der Außenwand.

Der mittlere Massenstrom für die exemplarisch herausgegriffene Woche beträgt ca. 55 kg/h (0,05 m<sup>3</sup>/h) und der maximal Massenstrom 90 kg/h.

Da der Rechenalgorithmus des TRNSYS-Modells für die definierte Außenwandfläche nicht in der Lage ist, mit einem kleineren Massenstrom als 71 kg/h zu rechnen ist der Massenstrom für die nachfolgende Auswertung immer auf minimal 71 kg/h begrenzt. Dies bedeutet für alle Zeiten, in welchen der Massenstrom in Bild 77 kleiner als 71 kg/h ist, wird in der Simulation ein Massenstrom von 71 kg/h angesetzt. Durch diese Begrenzung ergibt sich ein mittlerer Massenstrom für die gewählte Woche von 73 kg/h.

Der aus der Simulation ermittelte Heizenergiebedarf für die exemplarisch heraus gegriffene Woche wird in nachfolgender Aufführung sowohl für die Variante ohne, als auch mit aktiver Dämmung aufgeführt.

Tabelle 16: Energiebedarfe für Variante 1 monolithisch und Variante 2 mit aktiver Dämmung

	Variante 1	Variante2
		
Q <sub>Heiz</sub>	3,91 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2_{\text{Wohnfläche}} \cdot \text{Woche}}$	4,05 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2_{\text{Wohnfläche}} \cdot \text{Woche}}$
Q <sub>aktive Dämmung</sub>		2,71 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2_{\text{Fassadenfläche}} \cdot \text{Woche}}$
Q <sub>Pumpe</sub>		0,028 $\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2_{\text{Fassadenfläche}} \cdot \text{Woche}}$

Die Aufführung verdeutlicht, dass durch die Simulation für beide Varianten nahezu der gleiche Heizenergiebedarf abgebildet werden kann. Dies bedeutet, dass auch nahezu dieselben Temperaturen für beide Varianten im Raum erzielt werden können.

Um die angestrebten Temperaturen bei demselben Heizenergiebedarf einhalten zu können, muss bei Variante 2 zusätzlich Energie für die aktive Dämmung aufgebracht werden (ca. 2,7 kWh/m<sup>2</sup>Woche). Der Energiebedarf, welcher für die Zirkulation des Wassers durch eine

Pumpe in der aktiven Dämmung notwendig ist, wird auf ca. 0,03 kWh/m<sup>2</sup>Woche berechnet. Diese Angaben beziehen sich jeweils auf die Fassadenfläche.

In Realität ist mit Abweichungen zu rechnen, da der durch das Simulationsprogramm ange-setzte Massenstrom nicht genau mit dem tatsächlich benötigten Massenstrom überein-stimmt. Da die auf die aktive Dämmung einwirkenden Temperaturen in den wärmeren Über-gangszeiten höher sind, können die Massenströme in diesen Zeiten niedriger angesetzt wer-den. In den Sommermonaten kann wie im ersten Teil dieses Kapitels, wiederum von einem erhöhten Massenstrom ausgegangen werden.

Neben der Betrachtung der leistungsabhängigen Werte werden auch die Oberflächentempe-raturen der Außenwände der beiden Varianten in Bezug auf den Nutzerkomfort betrachtet. Dabei wird nachfolgend ausschließlich die Heizperiode betrachtet.

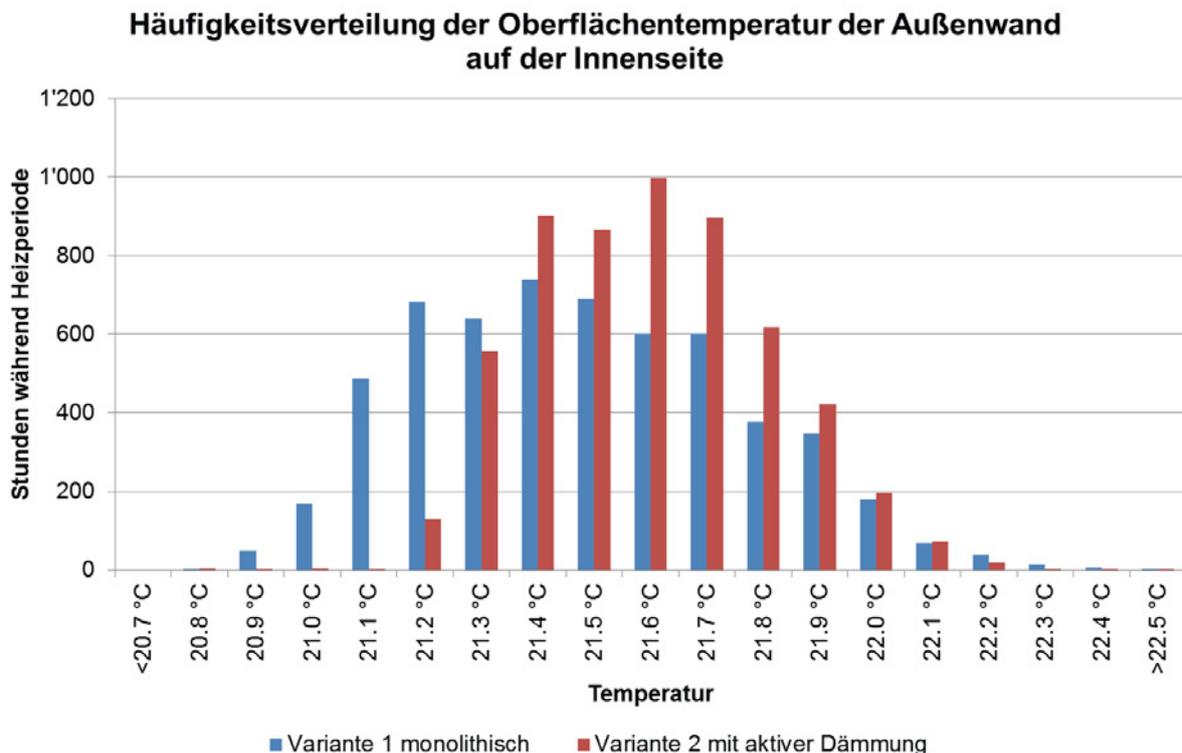


Bild 78: Oberflächentemperaturen auf der Innenseite der Außenwand für die monolithische Variante sowie die Variante mit aktiver Dämmung

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass die Unterschiede nur sehr gering sind. Dennoch kann festgehalten werden, dass die monolithische Variante mehr Stunden mit niedrigen Oberflächentemperaturen aufweist als die Variante mit aktiver Dämmung. Die wärmeren Oberflächentemperaturen bei der Variante mit aktiver Dämmung sorgen für einen besseren Nutzerkomfort, da ein geringerer Strahlungsaustausch zwischen Personen und der Außenwand entsteht. Demnach kann das Verhalten der aktiven Dämmung bezüglich der Oberflächentemperaturen und dem damit verbundenen Nutzerkomfort als positiv bewertet werden.

Wie der Vergleich der beiden Varianten zeigt, kann durch den Einsatz einer aktiven Dämmung der gleiche Heizenergiebedarf für einen Raum erzielt werden wie für eine monolithische Bauart. Dieses Verhalten kann erzielt werden, obwohl die ILC-Wand in ihrer Dicke reduziert und gleichzeitig die Rohdichte erhöht wird.

Die höhere Rohdichte bietet die Möglichkeit, die Produktionskosten zu verringern und die Tragfähigkeit der Wand zu erhöhen. Die geringere Dicke des Bauteils spart andererseits Material. Beide Effekte tragen demnach dazu bei, dass die Investitionskosten für die Außenwand reduziert werden können. Durch einen geringeren Wandaufbau steht zudem mehr Wohnfläche zur Verfügung, was einem Vermieter mehr Mietgewinne ermöglicht.

Auf der Gegenseite muss der Mehraufwand berücksichtigt werden, welcher erbracht werden muss, um das Rohrsystem für die aktive Dämmung in den ILC einzubringen. Außerdem muss Energie in die aktive Dämmung gesteckt werden, um den gleichen Heizenergiebedarf für den Raum zu gewährleisten. Neben der Bereitstellung dieser Energie muss auch die entsprechende Infrastruktur für diese zur Verfügung gestellt werden.

### **Quellen und Senken einer aktiven Dämmung**

Wie die Aufführung der vorherigen Seiten verdeutlicht, erscheint der Einsatz einer aktiven Dämmung besonders dann als sinnvoll, wenn eine Energiequelle genutzt werden kann, welche kostenlos/kostengünstig zur Verfügung steht. Als solche Energiequellen wird beispielsweise eine Grauwassernutzung, aber auch die Geothermie gesehen.

Nachfolgend wird exemplarisch das Potential für eine Grauwassernutzung berechnet. Dafür wird exemplarisch von einem Regelgeschoss eines Mehrfamilienhauses ausgegangen. Die entsprechenden Rahmenbedingungen sind nachfolgend aufgeführt:

Fläche Regelgeschoss	171,2 m <sup>2</sup> Wohnfläche mit 4 Apartments (34,9-50,4 m <sup>2</sup> )
Personen je Geschoss	6
Grauwasser	100 l/Tag und Person 600 l/Tag und Regelgeschoss 2/3 des Grauwassers mit 10 °C 1/3 des Grauwassers mit 30 °C daraus ergibt sich eine mittlere Grauwassertemperatur: 16,6 °C

Für die nachfolgend aufgeführten berechneten Leistungen wird davon ausgegangen, dass die Temperaturspreizung zwischen dem Vor- und Rücklauf des Grauwassers 10 K beträgt. Es wird dabei vereinfachend davon ausgegangen, dass der Massenstrom konstant 600 Liter beträgt, eine konstante Vorlauftemperatur von 16,6 °C aufweist und die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf dauerhaft 10 K beträgt.

Die daraus berechnete Energie, welche je Regelgeschoss durch Grauwasser zur Verfügung gestellt werden kann, beträgt 6,96 kWh/Tag.

Zur Systemtrennung wird zwischen dem Grauwasser und der aktiven Dämmung ein Wärmetauscher vorgesehen. Es kann definiert werden, dass dieser einen Wirkungsgrad von 80% hat.

Daher stehen 5,57 kWh/Tag effektiv je Regelgeschoss an der aktiven Dämmung zur Verfügung.

Nachfolgende Darstellung verdeutlicht schematisch die Einbindung des Grauwassers in die aktive Dämmung:

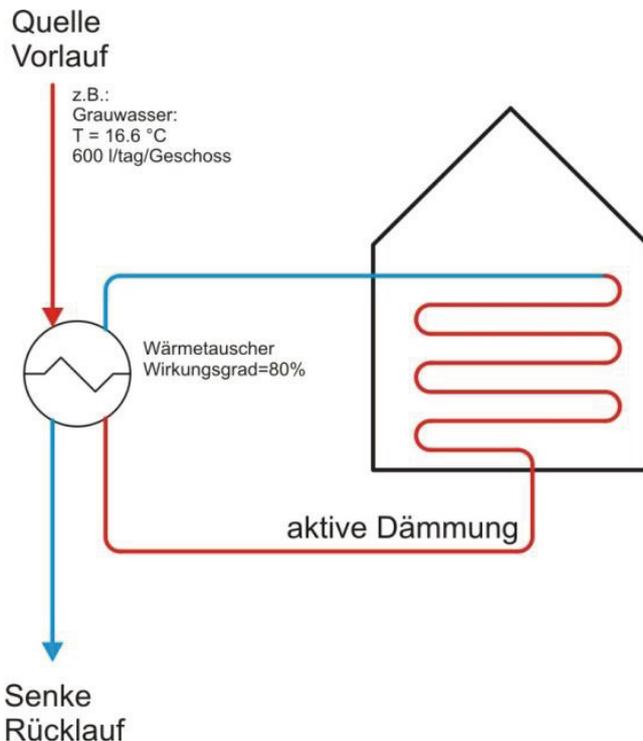


Bild 79: Schematische Darstellung der Einbindung der Grauwassernutzung in die aktive Dämmung

Die ermittelten Energiebedarfe werden nachfolgend auf die Hüllfläche der Fassade umgerechnet.

Hüllfläche	200 m <sup>2</sup>
Fensterflächenanteil	30%
Opake Hüllfläche	140 m <sup>2</sup>
Wärmezufuhr über aktive Dämmung	39,79 Wh/m <sup>2</sup> und Tag
Spezifische Leistung opake Hüllfläche	1,66 W/m <sup>2</sup>

Anhand dieser Definitionen wird nachfolgend untersucht, inwieweit diese Leistung genutzt werden kann, um die Dicke der ILC Wand mit Aktivierung zu reduzieren und die Rohdichte zu erhöhen. Dafür wird eine statische Betrachtung zu einem Zeitpunkt mit einer Außentemperatur von 0 °C und einer Innenraumtemperatur von 20 °C angesetzt. Nachfolgende Grafik verdeutlicht die entsprechenden Optimierungsvarianten.

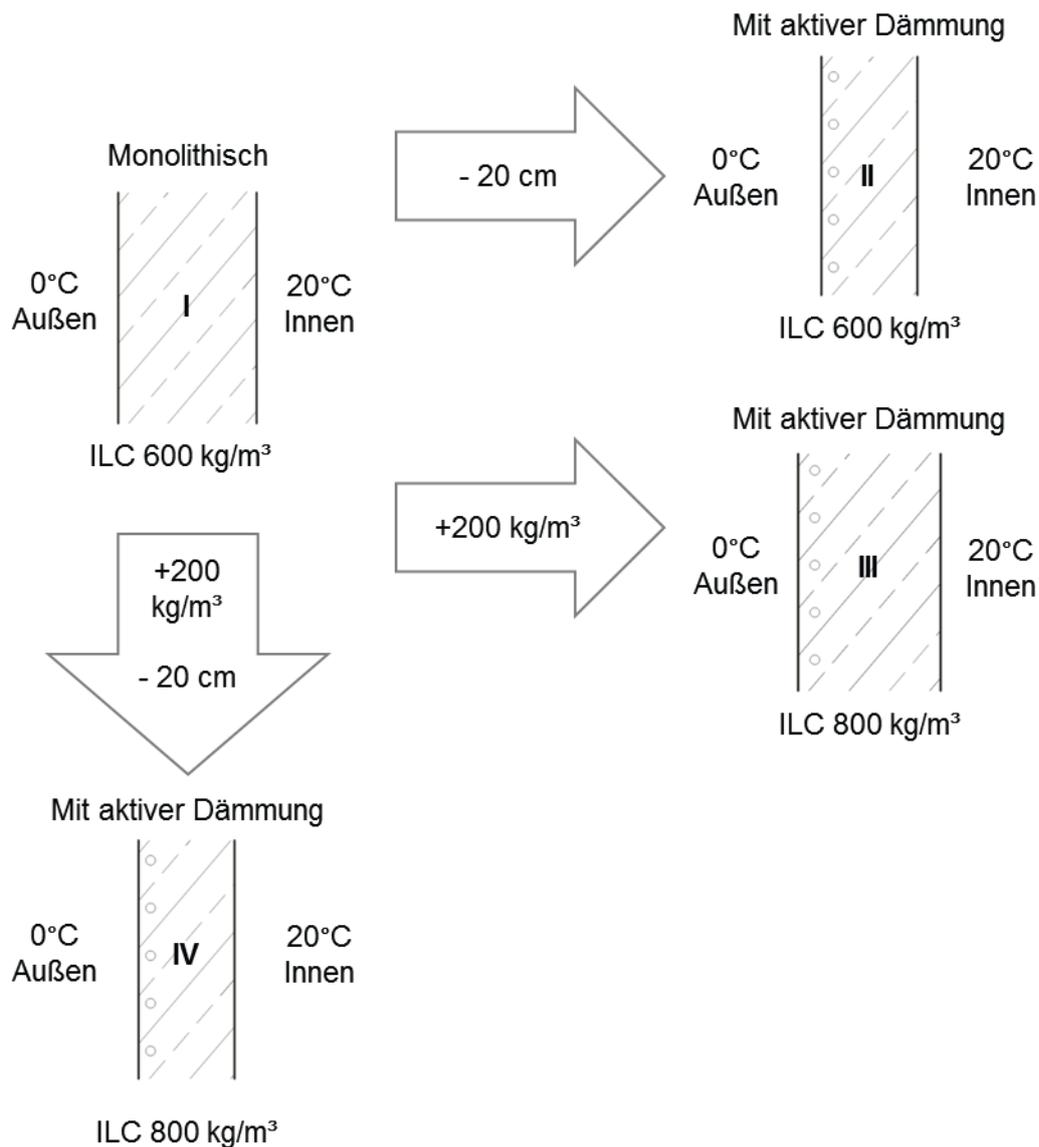


Bild 80: Optimierung der monolithischen ILC-Außenwand mit einer aktiven Dämmung

Für die statische Berechnung wird der U-Wert angesetzt. Anhand dessen kann berechnet werden, inwieweit für die ermittelte Leistung, welche durch eine Grauwassernutzung erbracht werden kann, die angestrebten Werte eingehalten werden können. Als anzustrebender Wert gilt dabei der nach EnEV definierte U-Wert von 0,280 W/m²K.

Die Berechnung basiert auf folgender Formel:

$$U = \frac{1}{R_{Si} + \sum_{k=1}^n \frac{d_k}{\lambda_k} + R_{Se}}$$

Mit:

$$R_{Si} = 0,130 [(m^2K)/W]$$

$$R_{Se} = 0,040 \text{ [(m}^2\text{K)/W]}$$

$$\lambda_k = \text{Wärmeleitfähigkeit des ILC [W/(mK)]}$$

$$d_k = \text{Dicke der ILC-Wand [m]}$$

## I

Für Variante I mit einer 60 cm dicken ILC-Wand mit einer Rohdichte von  $600 \text{ kg/m}^3$  und einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,141 \text{ W/mK}$  ergibt sich ein U-Wert von:  $0,226 \text{ W/m}^2\text{K}$

Der von der EnEV geforderte Wert von  $0,280 \text{ W/m}^2\text{K}$  kann demnach eingehalten werden.

## II

Für Variante II mit einer 40 cm dicken ILC-Wand mit einer Rohdichte von  $600 \text{ kg/m}^3$  und einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,141 \text{ W/mK}$  ergibt sich ein U-Wert von:

$$0,333 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Um den EnEV Wert von  $0,280 \text{ W/m}^2\text{K}$  einzuhalten müssen also  $0,053 \text{ W/m}^2\text{K}$  durch die aktive Dämmung geleistet werden. Bei einer Temperaturdifferenz von  $20 \text{ K}$  würde dies einer Leistung von  $1,06 \text{ W/m}^2$  entsprechen. Diese Leistung könnte durch eine Grauwassernutzung (wie oben aufgeführt) erbracht werden.

## III

Für Variante III mit einer 60 cm dicken ILC-Wand mit einer Rohdichte von  $800 \text{ kg/m}^3$  und einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,193 \text{ W/mK}$  ergibt sich ein U-Wert von:

$$0,305 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Um den EnEV Wert von  $0,280 \text{ W/m}^2\text{K}$  einzuhalten müssen also  $0,025 \text{ W/m}^2\text{K}$  durch die aktive Dämmung geleistet werden. Bei einer Temperaturdifferenz von  $20 \text{ K}$  würde dies einer Leistung von  $0,50 \text{ W/m}^2$  entsprechen. Diese Leistung könnte durch eine Grauwassernutzung (wie oben aufgeführt) erbracht werden.

## IV

Für Variante IV mit einer 40 cm dicken ILC-Wand mit einer Rohdichte von  $800 \text{ kg/m}^3$  und einer Wärmeleitfähigkeit von  $0,193 \text{ W/mK}$  ergibt sich ein U-Wert von:

$$0,446 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Um den EnEV Wert von  $0,280 \text{ W/m}^2\text{K}$  einzuhalten müssen also  $0,166 \text{ W/m}^2\text{K}$  durch die aktive Dämmung geleistet werden. Bei einer Temperaturdifferenz von  $20 \text{ K}$  würde dies einer Leistung von  $3,32 \text{ W/m}^2$  entsprechen. Diese Leistung könnte durch eine Grauwassernutzung (wie oben aufgeführt) nicht erbracht werden.

## Zusammenfassung aktive Dämmung

Wie die Simulationen und die Berechnungen zeigen, erscheint die Integration einer aktiven Dämmung in eine ILC-Außenwand, bezüglich der Einflussnahme auf Nutzerkomfort sowie Leistungen und Energiebedarfe, als durchaus zielführend. Durch ein solches System kann das Verhalten eines Raumes signifikant verbessert werden. Dies verdeutlichen am besten die Simulationen, bei welchen die unterschiedlichen Wandaufbauten für den Sommerfall verglichen wurden. Darüber hinaus bekräftigen diese Aussage die Simulationen der Oberflächentemperaturen der Außenwand mit aktiver Dämmung für den Winterfall.

Wie die Ausführungen verdeutlichen ist das Verhalten einer solchen aktiven Dämmung allerdings von vielen Faktoren abhängig. Neben der Vorlauftemperatur spielt der Massenstrom eine wesentliche Rolle. Darüber hinaus kann durch die Lage des Kapillarrohrsystems Einfluss auf das Verhalten der aktiven Dämmung genommen werden. Wie die Ausführungen in diesem Kapitel verdeutlichen wurden die Simulationen für den Winter- und Sommerfall jeweils mit einer unterschiedlichen Lage der aktiven Dämmung durchgeführt. Die jeweilige Lage birgt Vorteile für den entsprechenden Klimatisierungsfall. Aufgrund dessen wird deutlich, dass zukünftig unter anderem Untersuchungen bezüglich der idealen Lage einer aktiven Dämmung angestrebt werden sollten und dabei auch eine Variante mit aktivierten Flächen zum Raum und nach außen in Erwägung gezogen werden sollten.

Mit den aufgeführten Eigenschaften sind auch die Kosten für die aktive Dämmung verbunden. Mit Kosten sind zum einen Investitionskosten gemeint, hierzu zählt der erhöhte Aufwand zum Einbringen der Kapillarrohre, sowie die zugehörigen Infrastruktur (Pumpen, Wärmetauscher, etc.). Zum anderen sind hier die Betriebskosten gemeint, diese beinhalten u.a. den Pumpenstrom, Wartung, etc. Um zusätzliche Kosten für die benötigte Energie zu vermeiden, sollten Quellen und Senken genutzt werden, welche kostengünstig zur Verfügung stehen, beispielsweise Grauwasser oder auch Geothermie.

Entsprechend dem Temperaturniveau der zur Verfügung stehenden Quelle muss eine separate Betrachtung der Nutzbarkeit geprüft werden. Das Verhalten dieser ist wie aufgeführt stark von der Vorlauftemperatur sowie dem Massenstrom abhängig, wodurch sich für unterschiedliche Quellen verschiedene Potentiale ergeben. Für die Heizperiode kann definiert werden: Je höher die Vorlauftemperatur, umso größer die Möglichkeit zur Reduzierung der Dicke und die Erhöhung der Rohdichte.

Ein Potential für weitere Untersuchungen bezüglich der aktiven Dämmung wird in folgenden Bereichen gesehen:

- Variation der Lage der Kapillarrohrmatten
- Detailliertes Zusammenspiel zwischen Wassermassenstrom und Vorlauftemperatur
- Ermittlung der Investitions- und Betriebskosten

### 3.3.2 Dynamische-Hygrische Analyse

Die Simulation des hygrysch/thermischen Verhaltens wird genutzt, um den Feuchtetransport eines Bauteils und den dadurch verbundenen Einfluss auf den Innenraum zu untersuchen. Für die Simulation wird das Tool „WUFI®“ (Wärme und Feuchte Instationär) des Fraunhofer IBP verwendet. Das Anwendungsgebiet dieses Simulationsprogramm ist die realitätsnahe instationäre Untersuchung des Wärme- und Feuchtetransport (sowohl ein- als auch zweidimensional) von Bauteilen und Gebäuden [58].

Nachfolgend wird mit dem Programm der Feuchteaustausch zwischen verschiedenen Außenwandvarianten und einem Referenzraum untersucht. Diese Untersuchung soll es ermöglichen, das hygrysche Verhalten des ILC im Vergleich zu anderen Wandaufbauten zu ermitteln.

#### Randbedingungen

Nachfolgende Auflistung enthält die Randbedingungen, auf welchen die Simulationen aufgebaut sind:

- Simulierter Raum: 4 m x 7 m / Raumhöhe: 3,4 m
- Eine Außenwand mit 2 Fenstern (2 m x 2,25 m) ( $U_F = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ )
- 3-Scheibenverglasung
- alle restlichen Bauteile wurden als adiabate Bauteile definiert
- Ideale Heizung/Kühlung auf min. 20°C und max. 27°C konditioniert
- Infiltration von  $0,1 \text{ h}^{-1}$
- mechanische Lüftung mit  $0,5 \text{ h}^{-1}$  und 80% Wärmerückgewinnung, ohne Feuchterückgewinnung
- Interne Lasten:
  - Beleuchtung  $10 \text{ W/m}^2$  von 6:00-7:00 Uhr und 20:00-24:00 Uhr
  - 1 Person: Mo-Fr 16:00-7:00 Uhr; Sa-So 0:00-24:00Uhr
  - (Feuchteabgabe: nachts „relaxed“ mit  $43 \text{ g/h}$ , tagsüber „middle activity“ mit  $123 \text{ g/h}$ )

Nachfolgende Grafik veranschaulicht den für die Simulation generierten Raum.

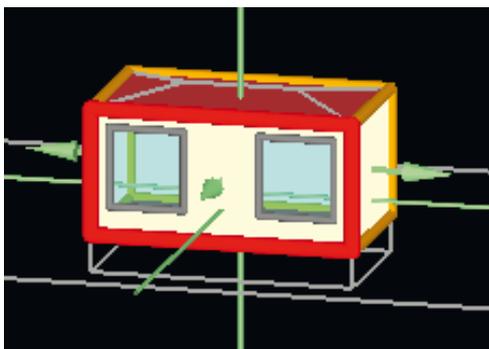


Bild 81: WUFI® Simulationsmodell

Der Simulationsraum wurde verwendet, um das Feuchteverhalten für verschiedene Wandaufbauten zu untersuchen.

Nachfolgende Auflistung enthält die verschiedenen untersuchten Wandaufbauten. Alle Wände weisen dabei nahezu denselben U-Wert auf, um den gleichen Einfluss der Temperaturen auf den Raum zu haben. Um dies realisieren zu können, unterscheiden sich die verschiedenen Varianten bezüglich der Dicke des Wandaufbaus.

Der Wert für die Wärmeleitfähigkeit des ILC basiert dabei auf ursprünglich gemessenen Werten bei 10°C, da davon ausgegangen wird, dass auch die anderen Werte wie Wärmekapazität etc. bei dieser Temperatur erfasst wurden.

**Variante 1: ILC-Wand mit Dampfsperre** auf der Innenseite ( $s_d = 1500 \text{ m}$ )

Diese Variante repräsentiert die Option, bei welcher der Innenraum von keiner Feuchtespeicherung der Wand profitiert. Der aufgeführte Wandaufbau gilt jeweils sowohl für die Außenwand als auch für alle anderen raumumschließenden Flächen.

Wandaufbau (Außen nach Innen)

ILC:  $d = 0,60 \text{ m}$   $\lambda = 0,193 \text{ W/mK}$

Dampfsperre:  $d = 0,01 \text{ m}$   $\lambda = 2,300 \text{ W/mK}$

Materialeigenschaften für ILC:

Trockenrohdichte:  $800 \text{ kg/m}^3$

Porosität: ca. 20%

Wärmekapazität: massenspezifische Wärmekapazität  $c = 870 \text{ J/(kgK)}$

Wärmeleitfähigkeit trocken:  $0,193 \text{ W/mK}$

Diffusionswiderstandszahl trocken: Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl 25/35

Ein entscheidender Wert für die hygrische Simulation ist die Sorptionsisothermensteigung. Diese ist in WUFI® für die Standardmaterialien in einer Bibliothek hinterlegt. Die hinterlegten Werte basieren auf Messungen. Für den ILC existieren diese Werte allerdings noch nicht. Aufgrund dessen wurden diese in Absprache mit dem Fraunhofer Institut für den ILC als Mittelwert aus den Angaben für Beton und Porenbeton ermittelt. Es wurde demnach davon ausgegangen, dass die Werte für den ILC zwischen beiden Materialien liegen, da die Eigenschaften des ILC im Bereich zwischen Beton und Porenbeton angenommen werden. Die daraus resultierende Sorptionsisothermensteigung ist nachfolgend aufgeführt:

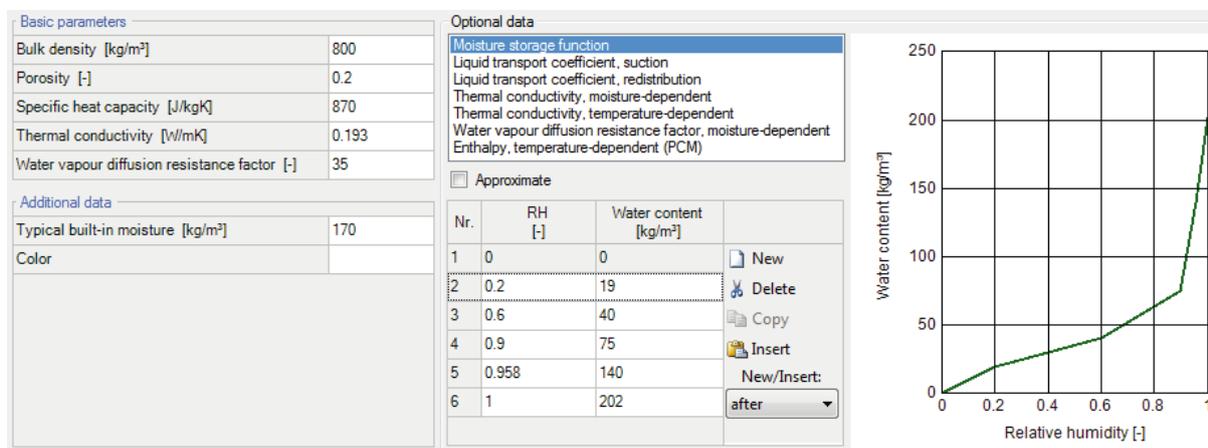


Bild 82: Materialeigenschaften inklusiv ermittelter Sorptionsisothermensteigung ILC

Bei den ermittelten Werten handelt es sich demnach um eine Annahme. Für verlässlichere/genauere Simulationen müsste die tatsächliche Sorptionsisothermensteigung ermittelt werden.

Materialeigenschaften aus der WUFI-Datenbank für die verwendete Dampfsperre:

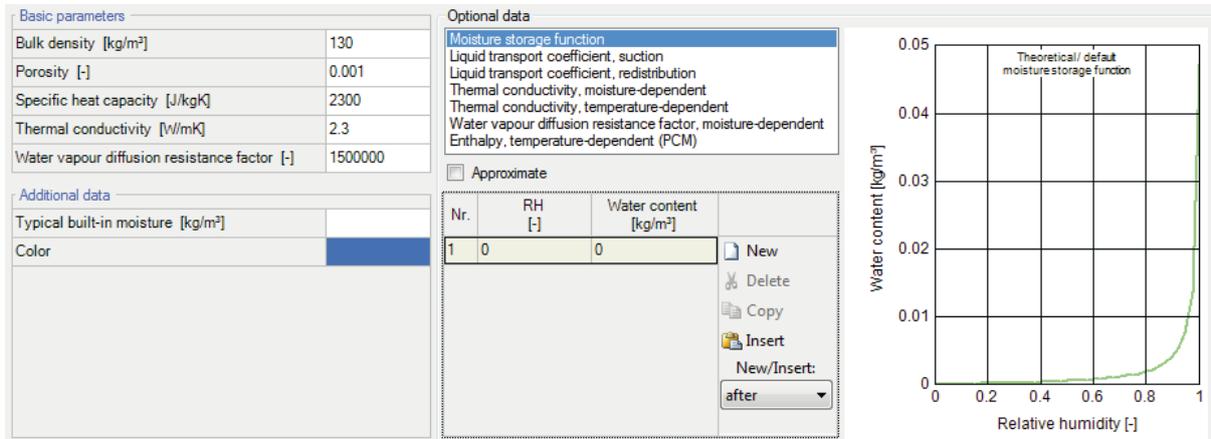


Bild 83: Materialeigenschaften Dampfsperre

**Variante 2: ILC-Wand**

Diese Variante repräsentiert den angestrebten ILC Wandaufbau.

Wandaufbau (Außen nach Innen)

ILC: d = 0,6 m λ = 0,193 W/mK

**Variante 3: ILC-Wand mit 2 cm Lehmputz innen**

Diese Variante repräsentiert die Option, bei welcher der Innenraum von einer hohe Feuchtespeicherung der Wand profitiert.

Wandaufbau (Außen nach Innen)

ILC: d = 0,5958 m λ = 0,193 W/mK

Lehm: d = 0,02 m λ = 0,900 W/mK

Materialeigenschaften aus der WUFI-Datenbank für den verwendeten Lehmputz:

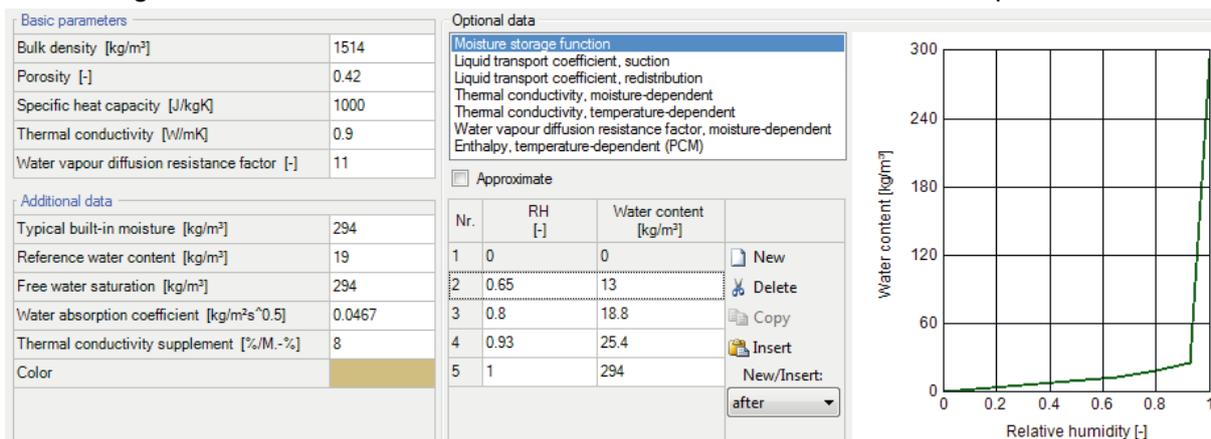


Bild 84: Materialeigenschaften Lehmputz

**Variante 4: Sicht-Stahlbeton**

Diese Variante repräsentiert einen in der Realität häufig vorkommenden Wandaufbau, bei welchem verglichen werden kann inwieweit sich der ILC vom klassischen Beton bezüglich des hygrischen Verhaltens unterscheidet.

Wandaufbau (Außen nach Innen)

Gipsputz: d = 0,02 m λ = 0,350 W/mK

Mineralwolle  $d = 0,1015 \text{ m}$   $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$

Normalbeton:  $d = 0,25 \text{ m}$   $\lambda = 1,373 \text{ W/mK}$

Materialeigenschaften aus der WUFI-Datenbank für den verwendeten Beton:

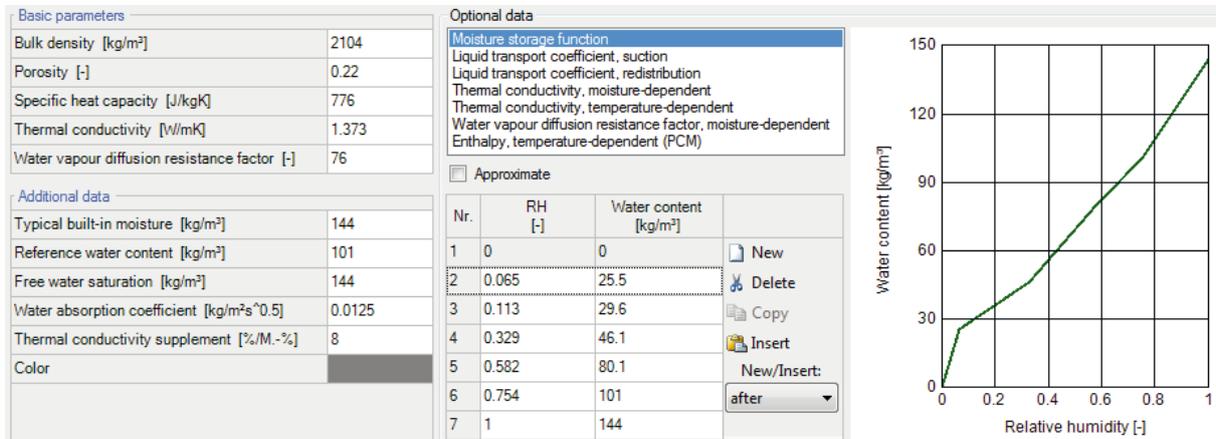


Bild 85: Materialeigenschaften Beton

### Variante 5: Stahlbetonwand mit Innenputz

Diese Variante repräsentiert einen in der Realität häufig vorkommenden Wandaufbau, bei welchem verglichen werden kann, inwieweit sich der ILC vom klassischen verputzten Beton bezüglich des hygrischen Verhaltens unterscheidet.

Wandaufbau (Außen nach Innen)

Gipsputz:  $d = 0,02 \text{ m}$   $\lambda = 0,350 \text{ W/mK}$

Mineralwolle  $d = 0,1015 \text{ m}$   $\lambda = 0,035 \text{ W/mK}$

Normalbeton:  $d = 0,25 \text{ m}$   $\lambda = 1,373 \text{ W/mK}$

Gipsputz:  $d = 0,02 \text{ m}$   $\lambda = 0,200 \text{ W/mK}$

Materialeigenschaften aus der WUFI-Datenbank für den verwendeten Gipsputz:

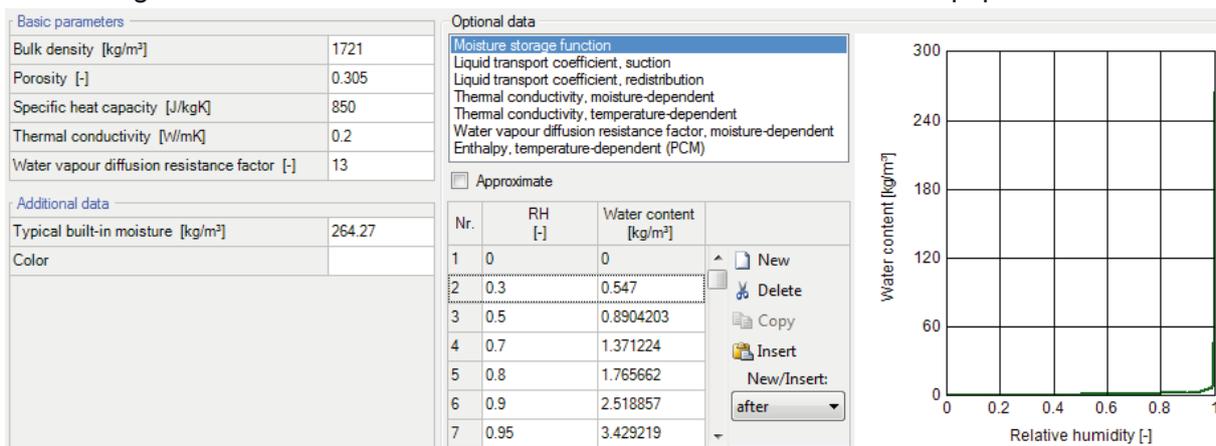


Bild 86: Materialeigenschaften Gipsputz

## Ergebnisse

In einem ersten Schritt ist das hygrische Verhalten einer monolithischen ILC-Wand im Vergleich mit Variante 1 (dampfdiffusionsdichten Folie auf der Wandinnenseite) sowie mit Variante 3 (Lehmputz auf der Wandinnenseite) aufgeführt. Die Variante mit dampfdiffusionsdichter Folie repräsentiert dabei die Variante mit nahezu keiner hygrischen Speicherfähigkeit. Der Lehmputz stellt hingegen die Variante mit hoher hygrischer Speicherkapazität dar.

Nachfolgende Darstellung verdeutlicht den Verlauf der relativen Feuchte im Raum für die unterschiedlichen Wandaufbauten. Der Betrachtungszeitraum bezieht sich dabei auf einen repräsentativen Zeitraum im Sommer. Es wurde ein Zeitraum im Sommer gewählt, da in diesem die höheren absoluten Feuchten gegenüber dem Winter herrschen.

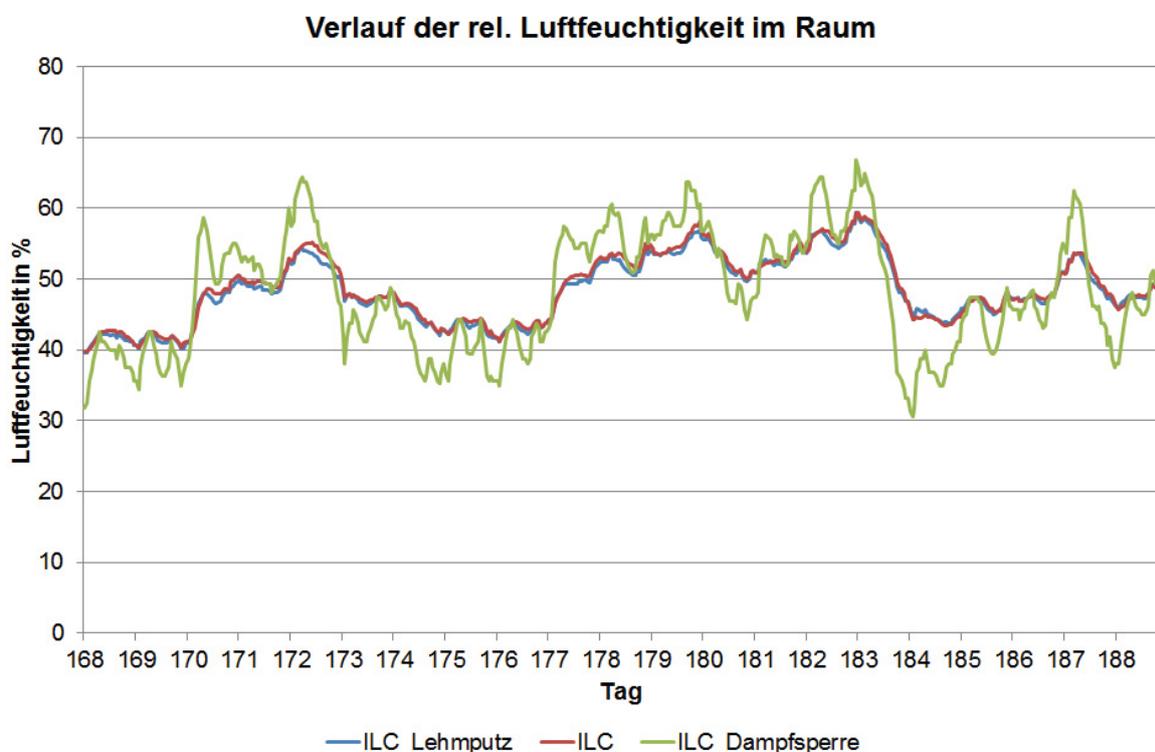


Bild 87: Relative Feuchte im Raum für verschiedene ILC Wandaufbauten vom 17. Juni bis 07. Juli

Die blaue Kurve der Wand mit Lehmputz weist, genauso wie die rote Kurve der ILC-Wand, deutlich geringere Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit auf, als die Variante mit Dampfsperre (grüne Kurve).

Die zusätzliche Betrachtung der absoluten Raumluftfeuchte (um den Einfluss minimaler Temperaturunterschiede im Raum auszuschließen) zeigt die gleiche Tendenz bezüglich des Feuchteverhaltens.

Nachfolgend ist sowohl das Diagramm zur absoluten Feuchte als auch der Temperaturen im Raum aufgeführt.

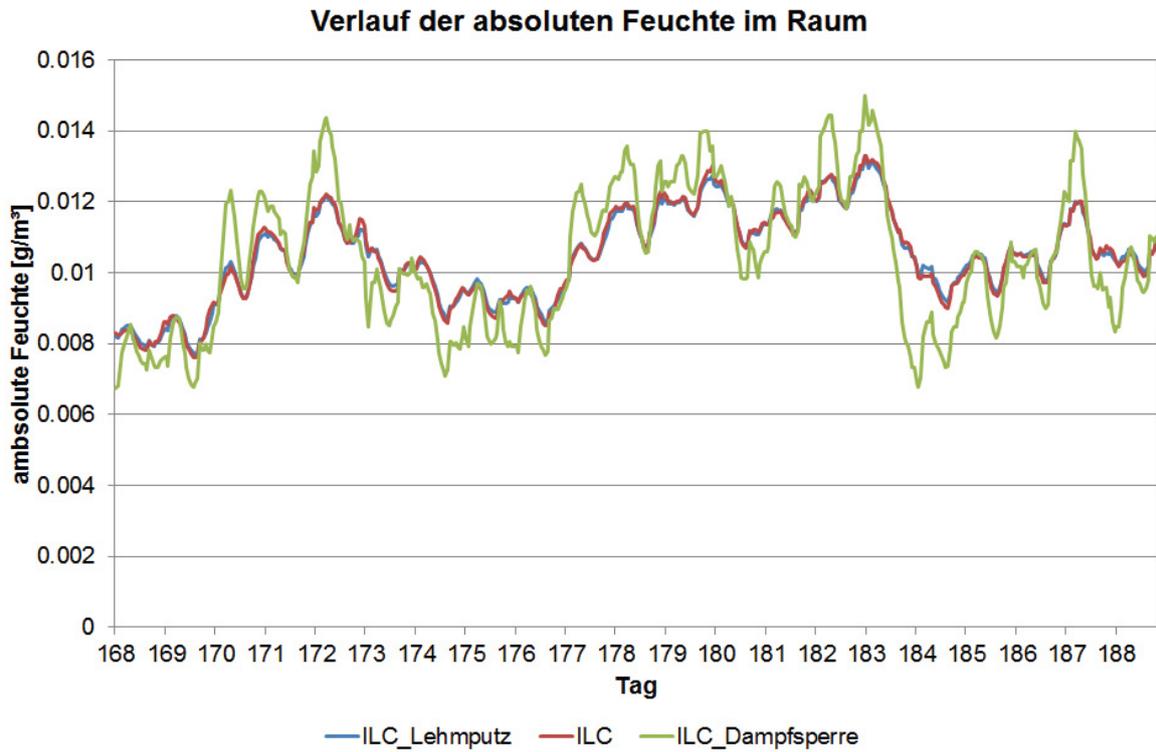


Bild 88: Absoluten Feuchte im Raum für verschiedene ILC Wandaufbauten vom 17. Juni bis 07. Juli

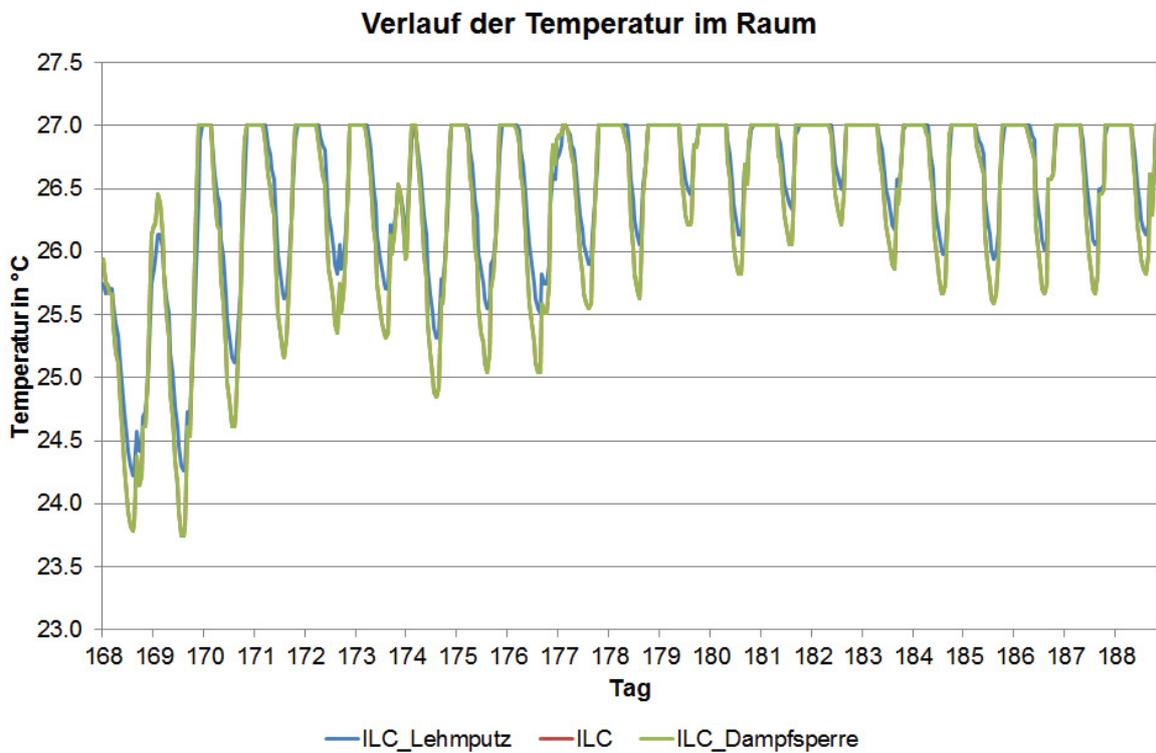


Bild 89: Temperatur im Raum für verschiedene ILC Wandaufbauten vom 17. Juni bis 07. Juli

Die Darstellungen bezüglich der Feuchte verdeutlichen, dass sowohl der Lehmputz als auch der ILC ein gewisses hygri-sches Speicherverhalten aufweisen. Der Vergleich mit der Dampfsperre verdeutlicht, wie sich die Feuchte im Raum verhalten würde, wenn ein Material mit keinem hygri-schen Speicherverhalten verwendet werden würde.

Die Aufführung der Raumtemperaturen verdeutlicht, dass die minimalen Temperaturunterschiede nicht der Grund für die Feuchteunterschiede sind, sondern das hygri-sche Verhalten der Materialien.

Darüber hinaus kann die Verteilung der Stunden bezogen auf die relative Luftfeuchtigkeit im Raum dargestellt werden. Ein Raum sollte dabei möglichst eine relative Feuchte zwischen 30-60% aufweisen.

Diese Verteilung ist in nachfolgender Grafik dargestellt:

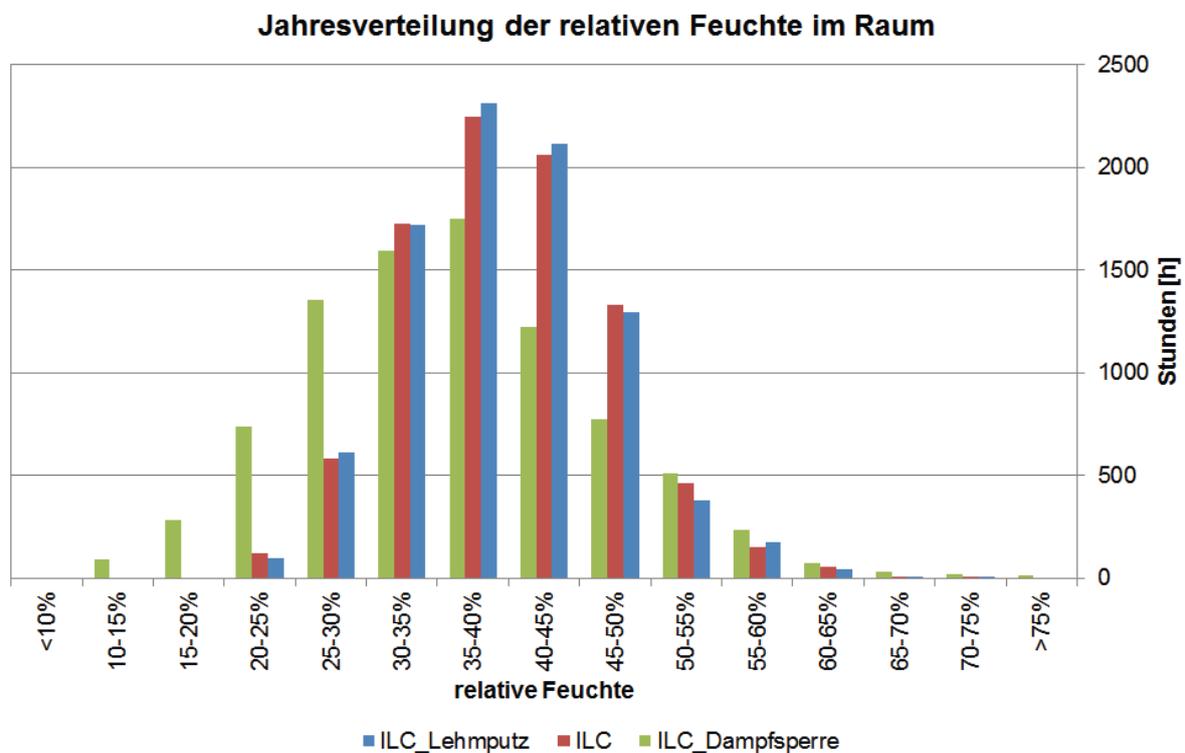


Bild 90: Relative Luftfeuchtigkeit im Raum für verschiedene ILC Wandaufbauten über ein Jahr

Die Darstellung zeigt, dass der Raum mit Dampfsperre viele Stunden mit Luftfeuchten unter 30% aufweist. Bei der Variante mit Lehmputz, sowie bei der Variante mit ILC-Wand sind jedoch deutlich mehr Stunden im zentralen Bereich zwischen 35-50% zu erwarten. Dies ist wiederum durch das hygri-sche Speicherverhalten der Materialien zu begründen.

Betrachtet man nun lediglich die Stunden, die außerhalb 30-60% Luftfeuchtigkeit liegen, reduzieren sich diese durch die ILC-Wand gegenüber einer dichten Dampfsperre um 72%. Mit dem 2 cm dicken Lehmputz kann hingegen eine Verbesserung um 71% erzielt werden.

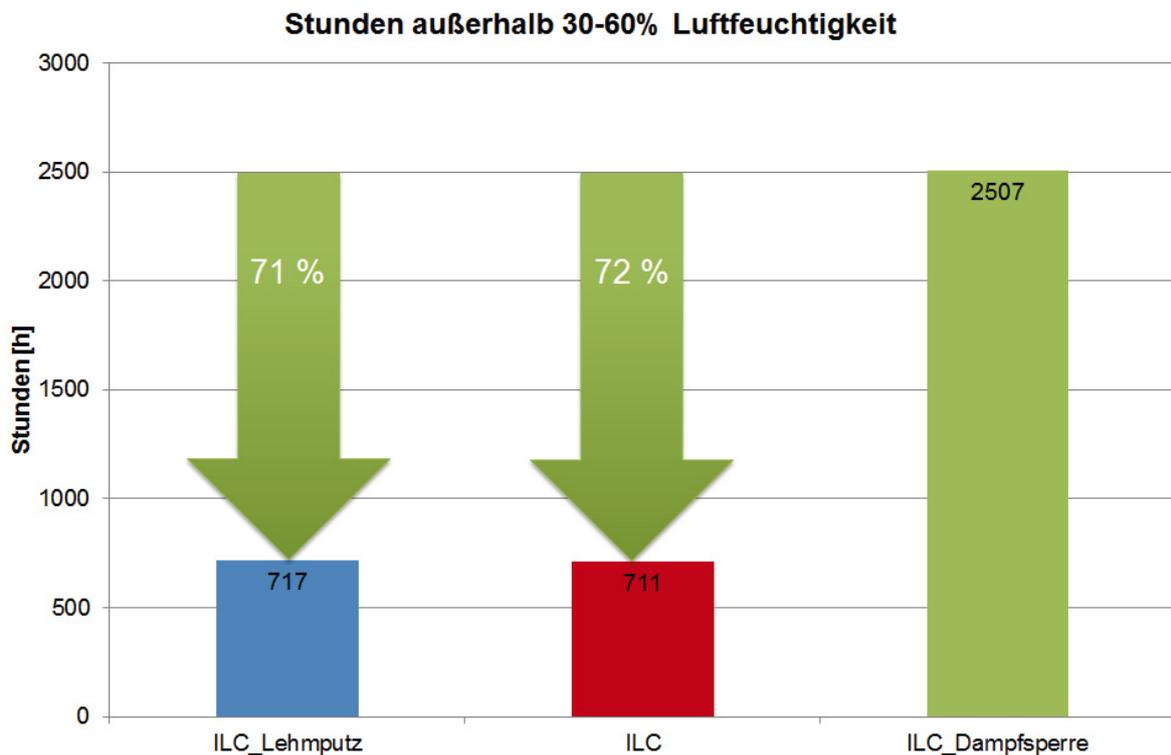


Bild 91: Häufigkeit der Raumluftfeuchte außerhalb 30-60% relativer Feuchte im Raum für verschiedene ILC Wandaufbauten

Wie aus den Abbildungen schlussgefolgert werden kann, können mit einer ILC Wand oder einem Lehmputz im Vergleich zur Variante mit Dampfsperre über ein Jahr ca. 1750 Stunden mit einer Luftfeuchtigkeit unter 30% vermieden werden. Dies hat besonders im Winter Einfluss auf den Komfort im Raum, da hier häufig sehr niedrige Luftfeuchtigkeiten auftreten.

Demzufolge ist eine ILC-Wand mit einem 2cm Lehmputz vergleichbar.

Es kann demnach festgehalten werden, dass eine ILC-Wand (unter den getroffenen Annahmen), ähnlich einem Lehmputz, positiv zum Feuchteverhalten eines Raumes beiträgt. Vor allem Stunden mit sehr geringer relativer Luftfeuchtigkeit können vermieden werden.

Nachfolgend ist der Vergleich der ILC-Wand mit einer Variante 4 (Betonwand mit Wärmedämmung zur Außenseite und Beton zum Raum) sowie einer Variante 5 (Betonwand mit einer Wärmedämmung zur Außenseite und einer zusätzlichen Gipsputzschicht zum Raum) aufgeführt.

Zunächst erfolgt die Betrachtung der Raumtemperaturen mit den unterschiedlichen Varianten. Bei der Simulation zeigt die Variante mit der ILC-Wand größere Temperaturschwankungen des Raumes, als die beiden Stahlbetonvarianten. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Wärmeleitfähigkeit des ILC deutlich unter der des Normalbetons liegt. Dadurch kann der Normalbeton die Temperaturschwankungen des Raumes besser abpuffern. Dies haben auch die Simulationen in Kapitel 3.3.1 gezeigt. Nachfolgende Aufführung verdeutlicht die Temperaturschwankungen des Raumes für die verschiedenen Varianten:

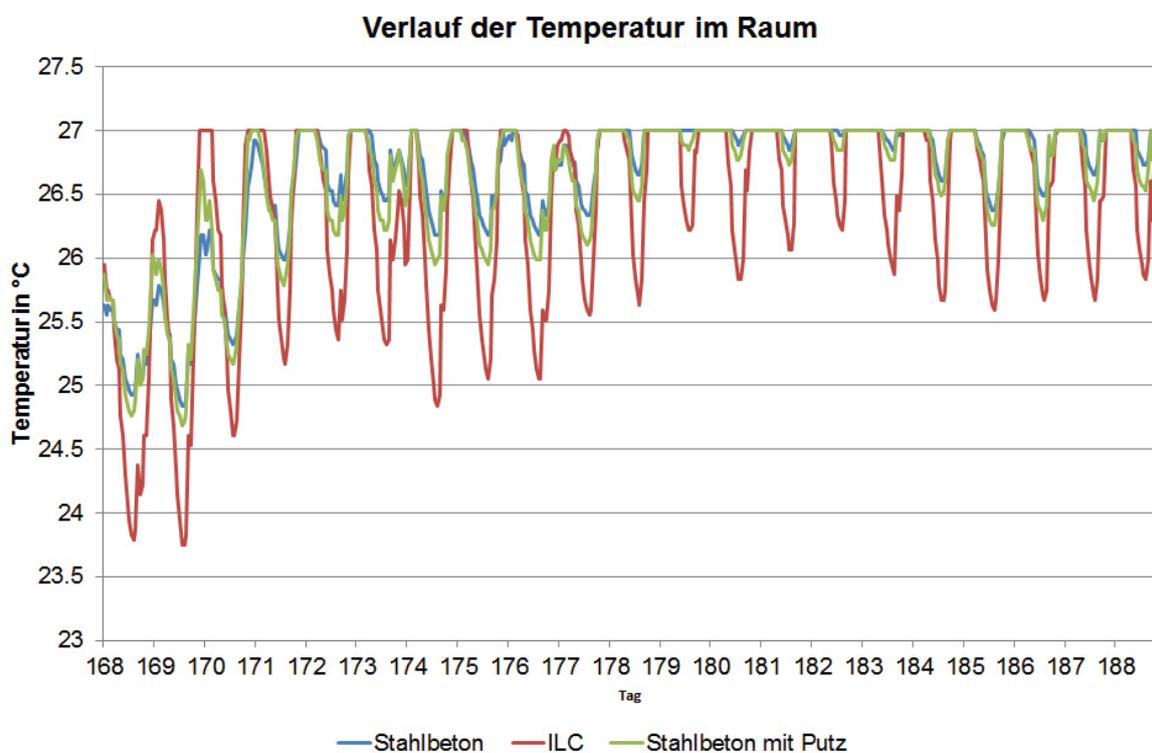


Bild 92: Temperatur im Raum für verschiedene Wandaufbauten vom 17. Juni bis 07. Juli

Die Betrachtung der relativen Raumfeuchte in nachfolgender Abbildung verdeutlicht, dass alle drei Varianten ungefähr die gleichen Verläufe aufweisen.

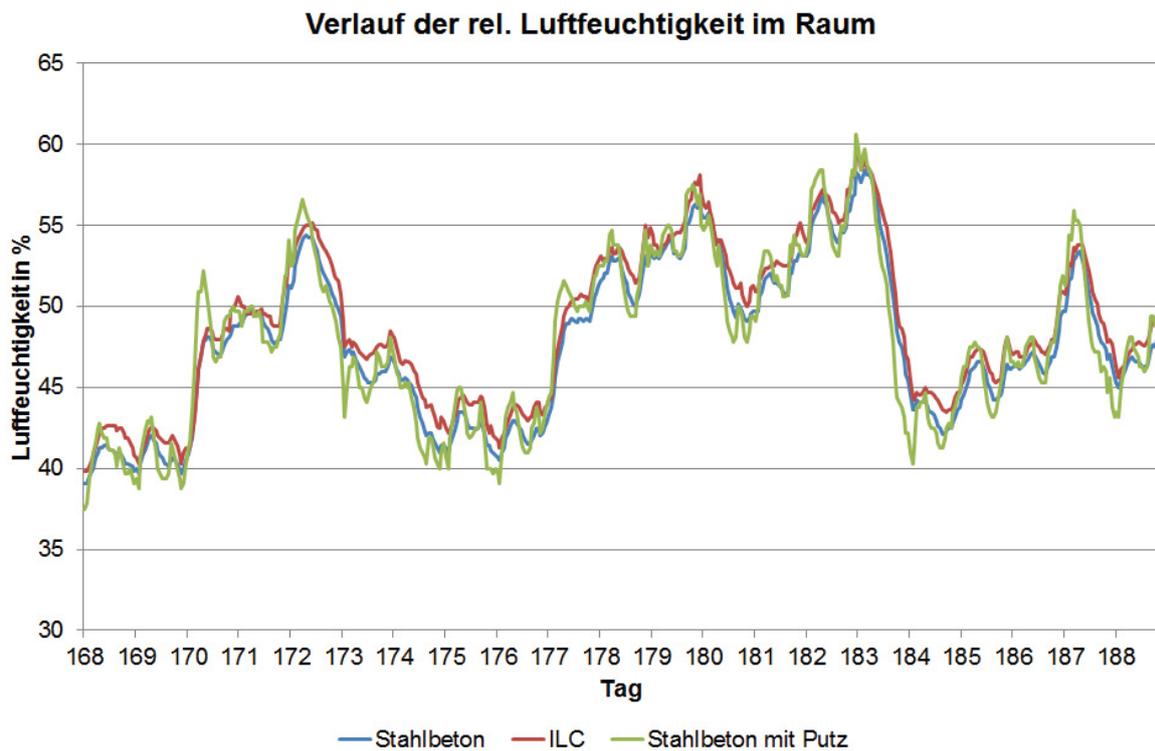


Bild 93: Relative Feuchte im Raum für verschiedene Wandaufbauten vom 17. Juni bis 07. Juli

Es muss berücksichtigt werden, dass die Aufführung der relativen Feuchte aufgrund der unterschiedlichen Raumtemperaturen nur eine beschränkte Aussagekraft besitzt. Eine genauere Angabe macht demzufolge das Verhalten der absoluten Feuchte im Raum. Diese schließt den Einfluss unterschiedlicher Raumtemperaturen aus.

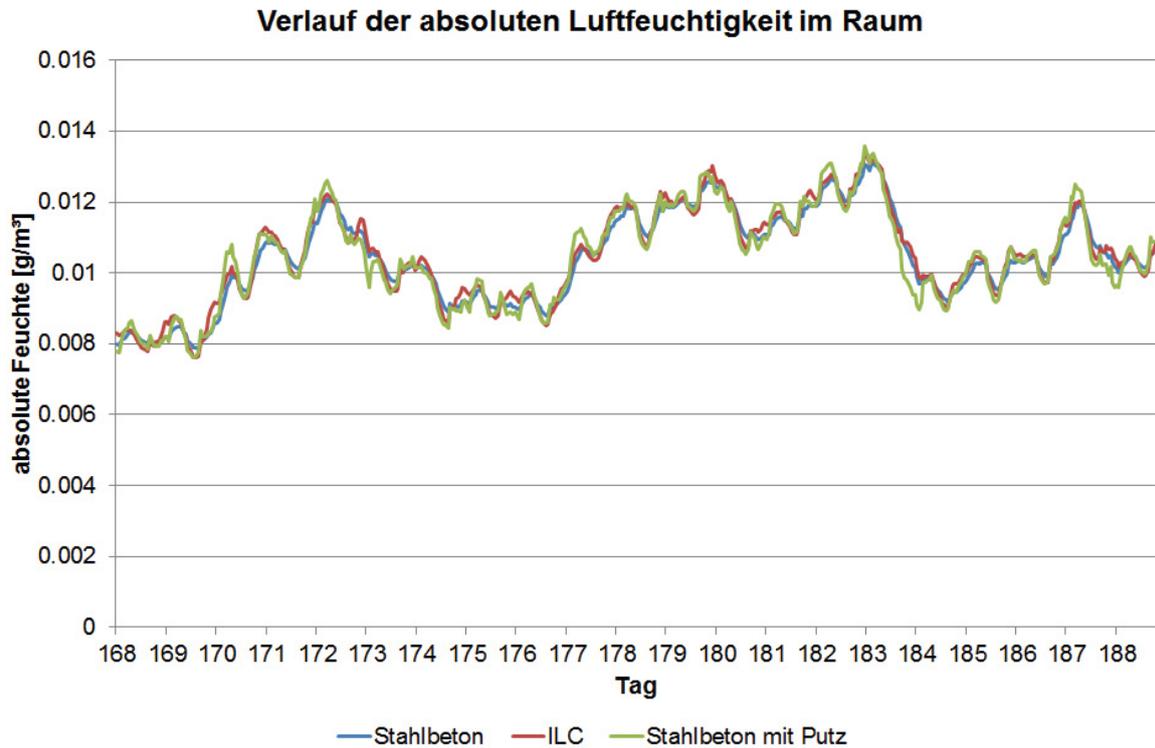


Bild 94: Absolute Feuchte im Raum für verschiedene Wandaufbauten vom 17. Juni bis 07. Juli

Die Betrachtung der absoluten Raumlufffeuchte verdeutlicht den sehr ähnlichen Verlauf der unterschiedlichen Varianten. Demnach kann der Verlauf der relativen Feuchte als durchaus repräsentativ angesehen werden und für die weiteren Untersuchungen genutzt werden.

Auch die Jahresverteilung der Raumlufffeuchtigkeit verdeutlicht das sehr ähnliche Verhalten der Wandaufbauten. Der ILC Wandaufbau weist in erster Linie weniger Stunden mit 35-40% relativer Feuchte auf und im Bereich von 45-50% hingegen mehr Stunden. Diese Unterschiede sind aber nur gering und, da sie im angestrebten Bereich zwischen 30-60% relativer Feuchte liegen, nicht als negativ zu bewerten.

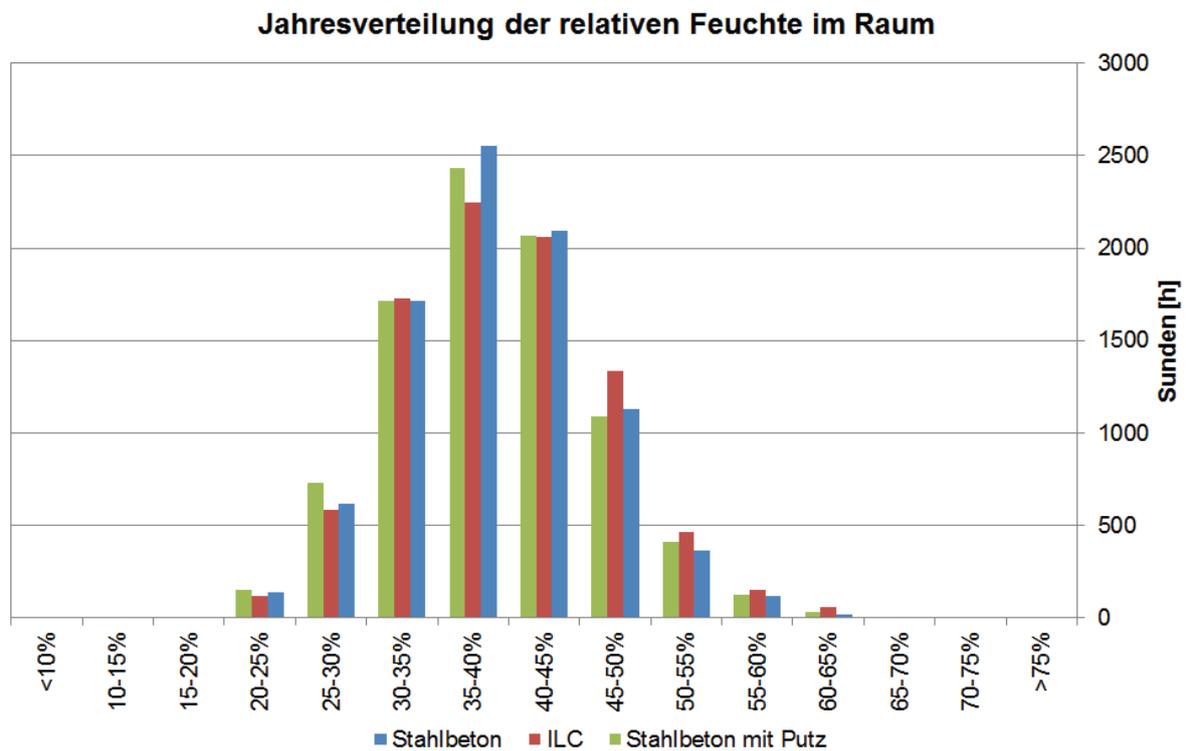


Bild 95: Relative Luftfeuchtigkeit im Raum für verschiedene Wandaufbauten über ein Jahr

Werden die Stunden außerhalb 30-60% relativer Raumluftfeuchtigkeit betrachtet, so schneidet die ILC-Wand am besten ab. Die Verbesserung zur Variante mit Gipsputz beträgt dabei ca. 20%. Die Variante 4 mit Sichtbeton weist gegenüber der Variante 5 mit Gipsputz eine Verbesserung um ca. 14% auf. Demnach beträgt die Verbesserung von Variante 4 auf die Variante 2 (monolithische ILC-Wand) ca. 6%.

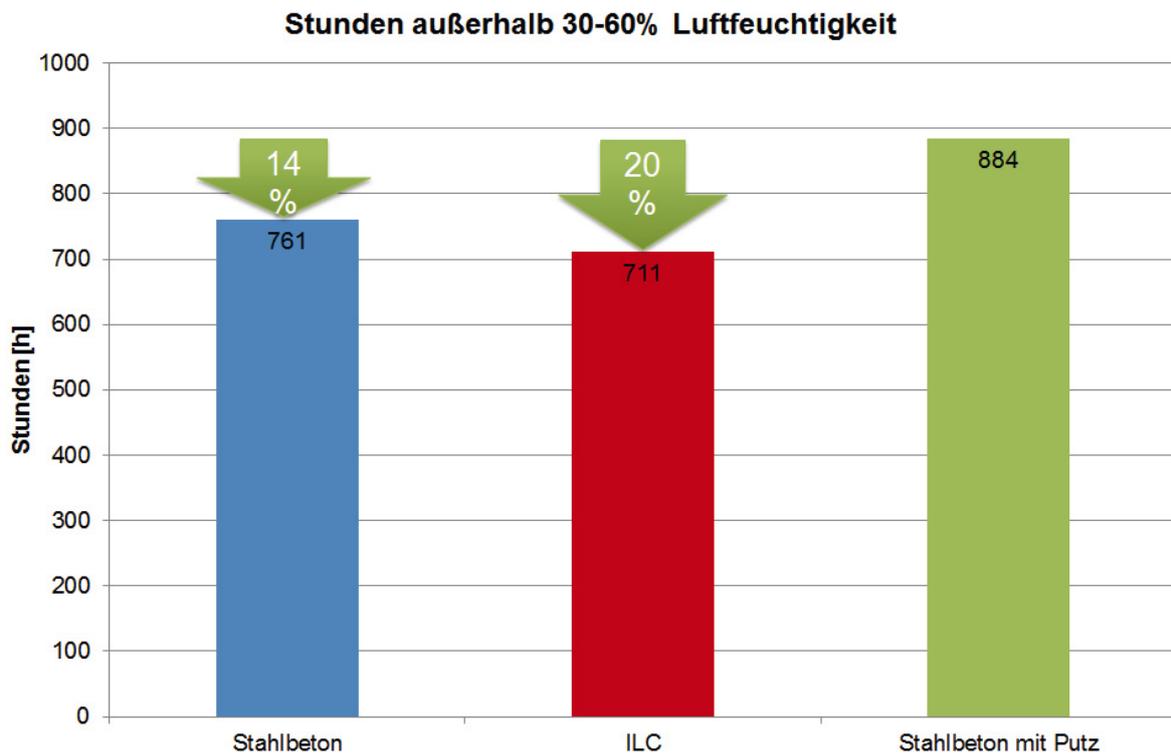


Bild 96: Häufigkeit der Raumlufffeuchte außerhalb 30-60% relativer Feuchte im Raum für verschiedene Wandaufbauten

Die Ergebnisse der Simulation zeigen demnach, dass mit dem ILC durchaus Einfluss auf das Feuchteverhalten des Raumes genommen werden kann.

### Zusammenfassung hygrische Simulation

Die Simulationsergebnisse verdeutlichen, dass Beton in der Außenwand allgemein ein durchaus positives Verhalten auf das hygrische Raumklima nimmt. Dies zeigen die Vergleiche zwischen ILC, der Dampfsperre und dem Lehmputz. Demnach ist das Verhalten des ILC fast so gut wie das Verhalten der ILC-Wand mit einer 2 cm dicken Lehmputzschicht auf der Innenseite.

Der Vergleich zwischen einer Betonaußenwand und einer ILC-Außenwand weist hingegen geringere Unterschiede bezüglich des hygrischen Verhaltens des Raumes auf. Dies ist dadurch zu begründen, dass die beiden Materialien sich sehr ähneln. Dennoch kann bei der Betrachtung der Stunden außerhalb des gewünschten Bereiches von 30-60% relativer Raumfeuchte festgestellt werden, dass die Stunden außerhalb des gewünschten Bereiches mit dem ILC optimiert werden können.

### 3.3.3 Wärmebrückenanalyse

Neben der Betrachtung der thermischen und hygrischen Einflüsse des ILC auf den Raum und dem damit verbundenen Nutzerkomfort sowie dem energetischen Verhalten des Raumes, spielt das thermische Verhalten im Bauteil eine ebenso wichtige Rolle. Die Betrachtung der Temperaturverläufe im Bauteil und die damit verbundene Ermittlung von Schwachstellen werden als Wärmebrückenbetrachtung bezeichnet. Im Gebäude erfolgt durch Wärmebrücken eine schnellere Wärmeübertragung vom Innenraum an die äußere Umgebung als durch „normale“ Bauteile.

#### Detaillierte Erklärung Wärmebrücke

Durch verbesserten Wärmeschutz von Gebäuden wird versucht, Wärmeverluste zu minimieren. Bei einer Gebäudehülle treten aber immer geometrische oder konstruktive Wärmebrücken auf. An diesen Stellen (punkt- oder linienförmige Wärmebrücken) geht mehr Energie verloren als an homogenen/planen Flächen der Gebäudehülle. Der Mehr-Verlust der an diesen Stellen auftritt, wird im Wärmebrückenverlustkoeffizient  $d(\psi\text{-Wert})$  angegeben. Dieser Wert ist allerdings nicht nur von der Geometrie der Wärmebrücke, sondern vor allem auch vom Wandaufbau abhängig. Bei guten U-Werten der Außenhülle können so Wärmebrücken viel stärker ausgeprägt sein, als bei schlechter Wärmedämmung der Außenhülle. Dies ist wiederum darauf zurückzuführen, dass sich der  $\psi$ -Wert immer auf das homogene/plane Bauteil bezieht.

Es gilt jedoch nicht nur aus Sicht des Wärmeschutzes, Wärmebrücken zu vermeiden. An Wärmebrücken liegen geringere Innenoberflächentemperaturen an, wodurch die Gefahr der Schimmelbildung erhöht ist. Neben der Schimmelbildung und der damit verbundenen gesundheitlichen Gefährdung kann im Extremfall, durch den Ausfall von Tauwasser, auch eine Beschädigung der Bausubstanz entstehen.

An einem Gebäude kann eine Vielzahl an unterschiedlichen Wärmebrücken auftreten. Für die Bestimmung von Wärmebrücken stehen Wärmebrückenkataloge für die gängigen Bauweisen, mit einer großen Liste an verschiedenen Wärmebrücken, U-Werten der Bauteile und geometrischen Feinheiten zur Verfügung. Diese Kataloge repräsentieren „typische“ Wärmebrücken, in welchen die zugehörigen Wärmebrückenverlustkoeffizienten aufgeführt sind, wodurch diese nicht explizit berechnet/simuliert werden müssen. Nachfolgende Abbildung repräsentiert typische Wärmebrücken, welche an einem Gebäude auftreten können.

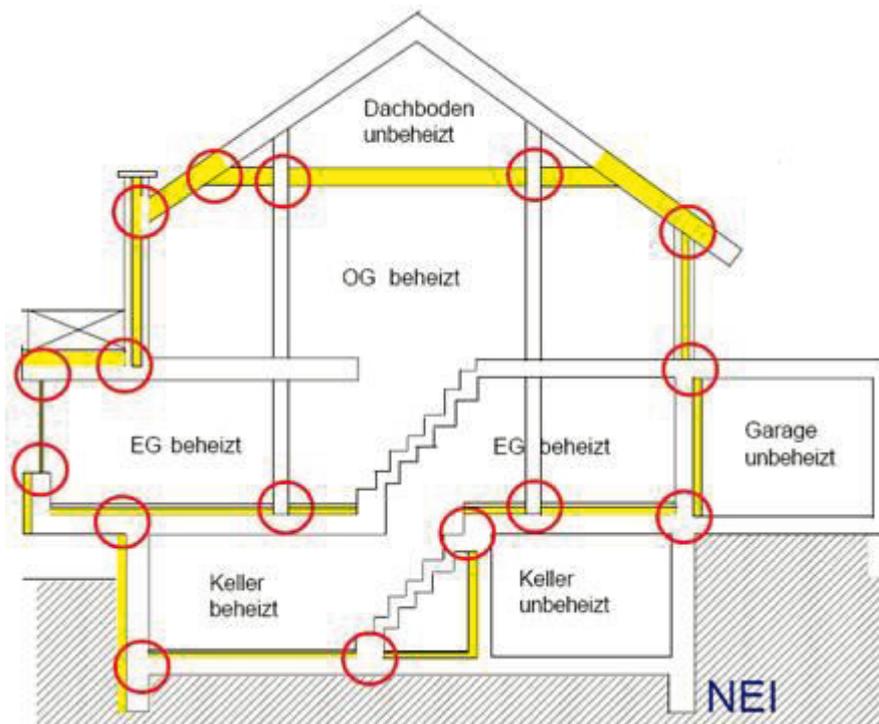


Bild 97: Mögliche Wärmebrücken in einem Gebäude [59]

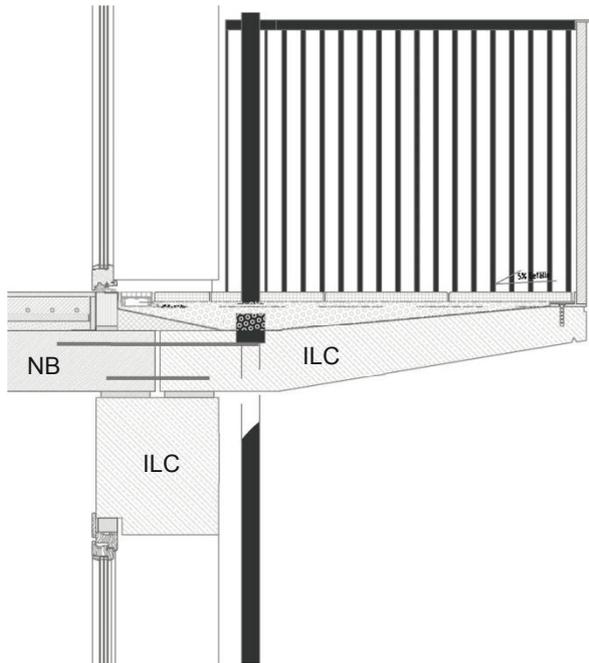
Die aufgeführte Abbildung verdeutlicht, dass sowohl ein „einfacher“ Scheibenanschluss zu einer Wärmebrücke führt, als auch ein Zwischendeckenanschluss und ein Balkonanschluss. Durch die geometrische Veränderung der Bauteile und das Einfügen von weniger leitenden Bauteilen (Dämmstoffe) kann die Wärmebrücke verbessert werden. Es wird somit durch den Optimierungsprozess der erhöhte Wärmedurchgang durch den kritischen Bereich vermindert.

Da für die ILC-Bauweise bisher kein Wärmebrückenkatalog zur Verfügung steht und daher kein Vergleich möglich ist, muss eine detaillierte Wärmebrückenbetrachtung durchgeführt werden. Dies erfolgt mit Hilfe des Simulationsprogrammes „THERM“. Es handelt sich dabei um ein Simulationsprogramm des Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) zur Modellierung von zweidimensionalen Wärmeübertragungseffekten [60].

In der folgenden Wärmebrückenbetrachtung werden jeweils 2 Details eines Balkonanschlusses mit darüber und darunterliegendem Fassadenanschluss abgebildet.

Die beiden Details unterscheiden sich dabei zum einen durch den Balkonanschluss, welcher bei Variante 2 als Rundboden ausgebildet ist. Zum anderen weist Variante 1 eine 50 cm dicke ILC-Wand auf, wobei Variante 2 hingegen eine 62 cm dicke Wand aufweist.

Variante 1



Variante 2

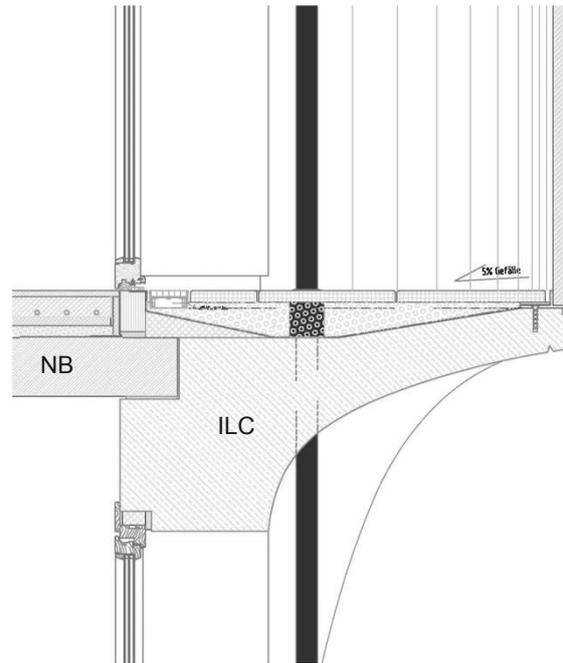


Bild 98: Zwei analysierte Wärmebrückendetails eines Balkonanschlusses

### Randbedingungen

Für die Berechnung von Wärmebrücken müssen Rahmenbedingungen definiert werden. In Tabelle 17 sind die anliegenden Temperaturen und die damit zusammenhängenden Wärmeübergangskoeffizienten aufgeführt.

Tabelle 17: Gerichtete Normtemperaturen und Wärmeübergangswiderstände für Innen und Außen

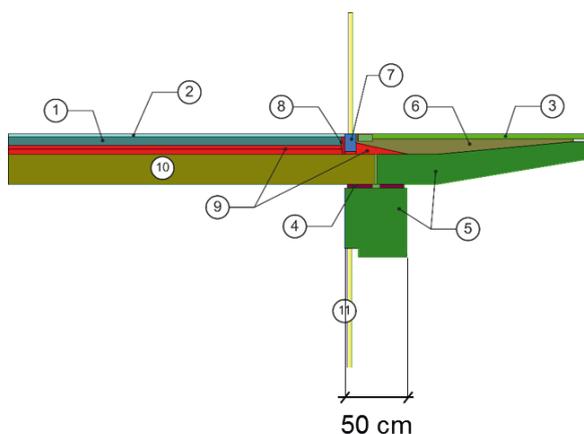
Richtung des Wärmestroms	Umgebungstemperatur [°C] (gemäß DIN 4108-2 [57])	Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K]
<b>Innen</b>		
Aufwärts	20	10
Abwärts	20	5,88
Horizontal	20	7,69
<b>Außen</b>		
Aufwärts	-5	25
Abwärts	-5	25
Horizontal	-5	25

Materialabhängige Wärmeleitfähigkeiten, welche den Wärmestrom beeinflussen sind in der folgenden Tabelle 18 aufgeführt. Die Zuordnung zu den Details ist der im Anschluss aufgeführten Abbildung zu entnehmen. Dabei wurden alle für die Simulation nicht relevanten Bauteile entfernt. Die entsprechenden Wärmeleitfähigkeiten der Bauteile basieren auf Angaben der TU Berlin und stammen aus genormten Datenbanken des Simulationsprogramms „THERM“. Der Wert für die Wärmeleitfähigkeit des ILC basiert auf verbesserten Bemessungswerten der TU Berlin.

Tabelle 18: Wärmeleitfähigkeiten der Materialien

Nr.	Material	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
1	Estrich	1,4
2	Fußboden	0,13
3	Granitplatte	2,8
4	Gummi	0,6
5	Infralichtbeton	0,22
6	Kies	2
7	Kunststoffhohlblock	0,2
8	Mineralwolle	0,04
9	Polyurethan	0,035
10	Stahlbeton	1,8
11	3-fach verglastes Fenster	$U_w = 1,0 \text{ W/m}^2\text{K}$

Variante 1



Variante 2

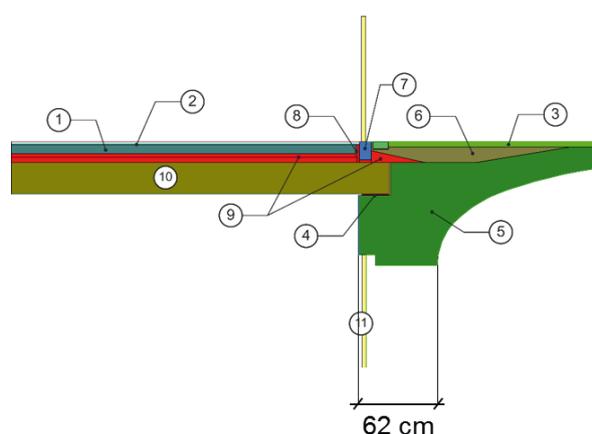


Bild 99: Zuordnung der Materialien bezogen auf die zwei untersuchten Balkonanschlussdetails

Wie die Darstellung verdeutlicht, besitzt Variante 1 eine dünnere Außenwand als Variante 2. Diese Vorgaben sind bei der Simulation der beiden Varianten explizit berücksichtigt.

## Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt sind die Ergebnisse der Berechnungen für die beiden unterschiedlichen Balkondetails dargestellt. Die Ergebnisse zeigen verschiedene simulierte Varianten welche jeweils unterschiedlichen Einfluss auf die Wärmebrücken nehmen. Anhand der Ergebnisse kann eine Aussage getroffen werden, welche Maßnahmen die Wärmebrücke positiv bzw. negativ beeinflussen.

### Bestimmung der U-Werte homogener Bauteile mit „THERM“

In einem ersten Schritt erfolgt die Berechnung der U-Werte der homogenen Bauteile (Wand und Verglasung). Diese U-Werte werden zur Berechnung des Wärmebrückenverlustkoeffizienten der Balkonanschlüsse benötigt.

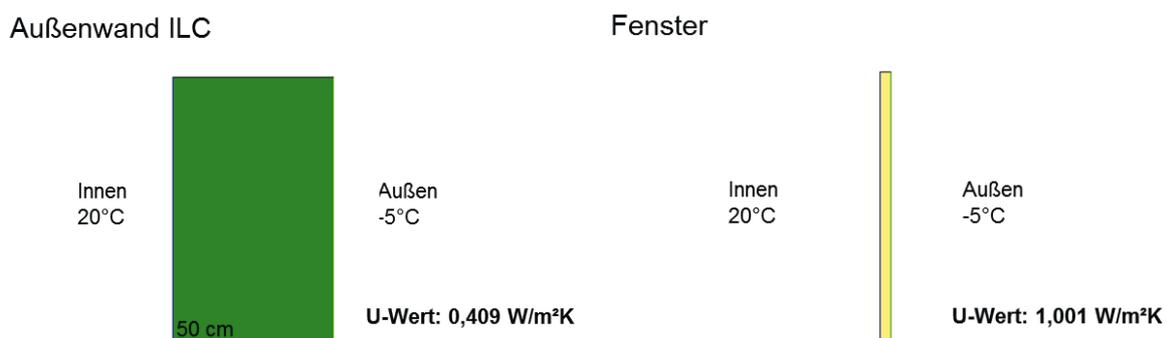


Bild 100: U-Werte homogene Wand sowie Verglasung

Die Abbildungen verdeutlichen die berechneten U-Werte für die Wand sowie der Verglasung.

### Fensteranschluss

Um das Verhalten der Wärmebrücke interpretieren zu können, wird zunächst die Wärmebrücke für das Fenster ermittelt. Dabei wird die Wärmebrücke, welche bei der Anbindung zwischen Glas und Wand entsteht, ermittelt.

Die Berechnung der Wärmebrücke erfolgt dabei aus dem thermischen Verhalten des gesamten Bauteils unter Berücksichtigung der homogenen Bauteile (Wand und Verglasung). Der  $\psi$ -Wert der Wärmebrücke berechnet sich dabei wie folgt:

$$\psi\text{-Wert} = (U_{\text{Therm1}} * L_{\text{Therm1}} * F_{\text{Therm1}}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$$

$U_{\text{Therm1}}$ : U-Wert des gesamten Bauteils (Fensteranschluss) [W/m²K]

$L_{\text{Therm1}}$ : Länge des gesamten Bauteils (Fensteranschluss) [m]

$F_{\text{Therm1}}$ : Korrekturfaktor des gesamten Bauteils (Fensteranschluss) [-]

$U_1$ : U-Wert von Bauteil 1 (Außenwand) [W/m²K]

$L_1$ : Länge von Bauteil 1 (Außenwand) [m]

$F_1$ : Korrekturfaktor von Bauteil 1 (Außenwand) [-]

$U_2$ : U-Wert von Bauteil 2 (Verglasung) [W/m²K]

$L_2$ : Länge von Bauteil 2 (Verglasung) [m]

$F_2$ : Korrekturfaktor von Bauteil 2 (Verglasung) [-]

Die Berechnung anhand der Simulationsergebnisse ist im nachfolgenden dargestellt.

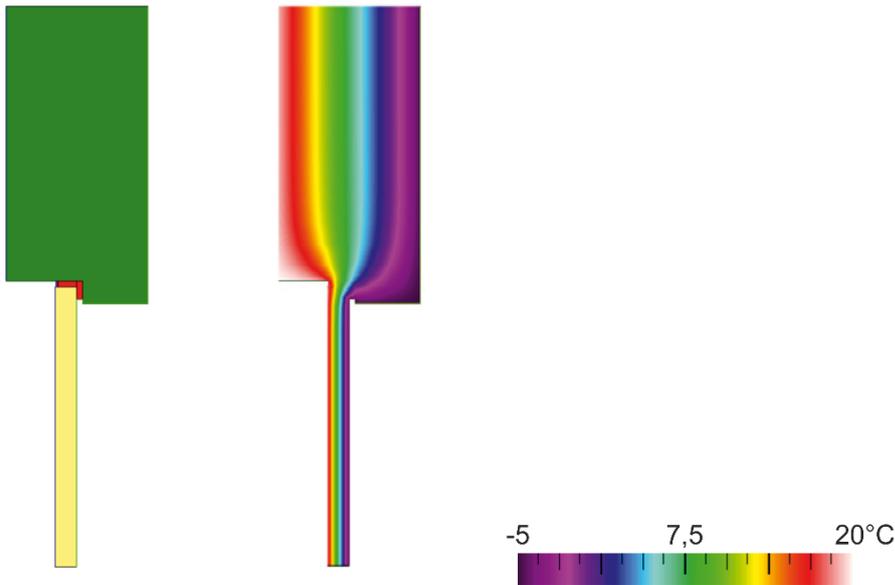


Bild 101: Oberer Fensteranschluss mit und ohne Temperaturverlauf

Anhand der oberen Darstellung kann ermittelt werden, dass die sogenannten 12,6°C Isotherme, welche aus feuchteschutztechnischen Gründen als kritischer Wert gesehen wird, nicht an einer an den Innenraum angrenzenden Oberfläche verläuft. Diese Temperatur sollte von Oberflächen, welche an den Innenraum angrenzen, aus besagten Gründen nicht unterschritten werden.

Tabelle 19: Berechnung des  $\Psi$ -Wertes für den oberen Fensteranschluss

Bauteil 1:	Außenwand
U <sub>1</sub> -Wert:	0,409 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>1</sub> :	1,00 m
F <sub>1</sub> =	1
U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> =	0,409 W/(m*K)

Bauteil 2:	Fenster
U <sub>2</sub> -Wert:	1,001 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>2</sub> :	1,0 m
F <sub>2</sub> =	1
U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> =	1,001 W/(m*K)

Therm 1:	
U <sub>Therm1</sub> -Wert:	0,726 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>Therm1</sub> :	2,00 m
F <sub>Therm1</sub> =	1
(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )=	1,452 W/(m*K)

$\Psi$ -Wert=(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )-( U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> +U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> )
$\Psi$ -Wert= 0,042 W/(m*K)

Der Wärmebrückenverlustkoeffizient  $\psi$  beträgt 0,042 W/m\*K

Tabelle 19 zeigt, dass für den oberen Fensteranschluss an eine 50cm dicke ILC-Wand ein Wärmebrückenverlustkoeffizient von 0,042 W/mK berechnet wird.

Die Berechnung des unteren Fensteranschlusses erfolgt dabei nach demselben Prinzip. Die entsprechenden Ergebnisse sind nachfolgend aufgeführt.

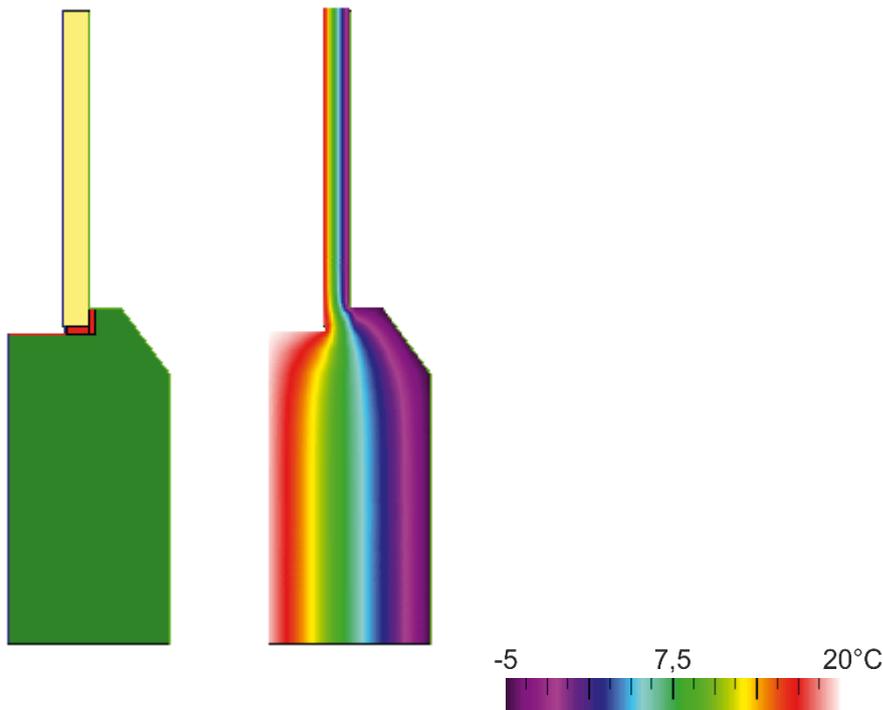


Bild 102: Unterer Fensteranschluss mit und ohne Temperaturverlauf

Auch bei dieser Variante besteht keine Gefahr der Unterschreitung der 12,6°C Isothermen an Oberflächen, welche in Verbindung mit dem Innenraum stehen.

Tabelle 20: Berechnung des  $\Psi$ -Wertes für den unteren Fensteranschluss

Bauteil 1:	Außenwand
$U_1$ -Wert:	0,409 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_1$ :	1,00 m
$F_1$ =	1
$U_1 * L_1 * F_1$ =	0,409 W/(m*K)

Bauteil 2:	Fenster
$U_2$ -Wert:	1,001 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_2$ :	1,0 m
$F_2$ =	1
$U_2 * L_2 * F_2$ =	1,001 W/(m*K)

Therm 1:	
$U_{Therm1}$ -Wert:	0,727 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_{Therm1}$ :	2,00 m
$F_{Therm1}$ =	1
$(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1})$ =	1,454 W/(m*K)

$\Psi$ -Wert= $(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$
$\Psi$ -Wert= 0,044 W/(m*K)

Der Wärmebrückenverlustkoeffizient  $\psi$  beträgt 0,044 W/m\*K

Die Einordnung der ermittelten Wärmebrückenverlustkoeffizienten nach DIN 4108 Beiblatt 2 [55] ist nachfolgend dargestellt.

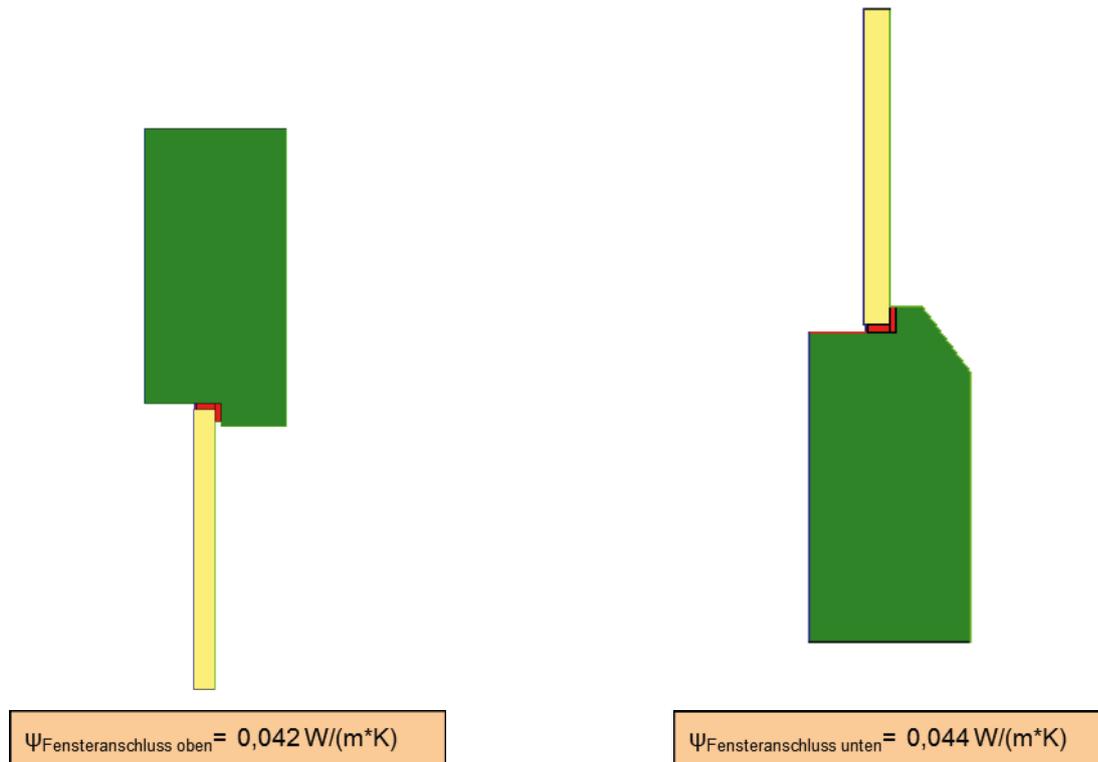


Bild 103: Oberer und unterer Fensteranschluss mit den berechneten  $\Psi$ -Werten

<b>48</b>	<b>monolithisches Mauerwerk</b>		Der Referenzwert für $\Psi$ ist für mittigen Einbau angegeben. Gilt analog für den Fall, dass die Lage des Fensters im mittleren Drittel der Wand ist. Die Fuge zwischen Blendrahmen und Baukörper ist mit Dämmstoff ( $\geq 10 \text{ mm}$ ) ausgefüllt.	$\leq 0,05 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
-----------	---------------------------------	--	---	---

Bild 104: Zulässiger  $\Psi$ -Wert für einen Fensteranschluss an einem monolithischen Mauerwerk [55]

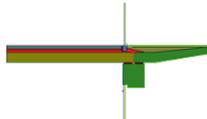
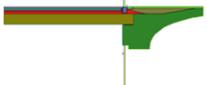
Der Vergleich der berechneten  $\Psi$ -Werte mit dem in der Norm als zulässig definierten Wert zeigt, dass der nach Norm definierte Wert eingehalten werden kann. Dies bedeutet, es darf der berechnete  $\Psi$ -Wert für diesen Bauteilanschluss angesetzt werden.

## Balkonanschlüsse

Für die Betrachtung der Balkonanschlüsse erfolgt zunächst die Simulation einer Wand mit unterem und oberem Fensteranschluss. Anschließend werden die Zwischendecke sowie die Balkonaustragung integriert.

Darauf aufbauend werden verschiedene Formen der Varianten 1 und 2 simuliert, um z.B. eine Dämmung des Deckenkopfes oder Verschiebungen des Fensters etc. zu untersuchen. Die detaillierten Ergebnisse finden sich im Anhang. Zusammenfassend sind die Erkenntnisse in folgender Tabelle dargestellt.

### Direkter Vergleich Variante 1 und 2

	Basis	Fenster mittig (ohne Dämmung)	Gedämmter Zwischenkopf	Inkl. Dämmkeil	Fensterposition mittig	Fensterposition außen
	Variante 1.2 $\psi_{\text{Wert}} = 0,463$ W/(m <sup>2</sup> K)	Variante 1.2mittig $\psi_{\text{Wert}} = 0,320$ W/(m <sup>2</sup> K)	Variante 1.3 $\psi_{\text{Wert}} = 0,346$ W/(m <sup>2</sup> K)	Variante 1.4 $\psi_{\text{Wert}} = 0,285$ W/(m <sup>2</sup> K)	Variante 1.5 $\psi_{\text{Wert}} = 0,191$ W/(m <sup>2</sup> K)	Variante 1.6 $\psi_{\text{Wert}} = 0,273$ W/(m <sup>2</sup> K)
	Variante 2.1 $\psi_{\text{Wert}} = 0,436$ W/(m <sup>2</sup> K)	-	Variante 2.3 $\psi_{\text{Wert}} = 0,328$ W/(m <sup>2</sup> K)	Variante 2.4 $\psi_{\text{Wert}} = 0,320$ W/(m <sup>2</sup> K)	Variante 2.5 $\psi_{\text{Wert}} = 0,192$ W/(m <sup>2</sup> K)	Variante 2.6 $\psi_{\text{Wert}} = 0,218$ W/(m <sup>2</sup> K)

Der Vergleich der beiden Varianten zeigt, dass Variante 2 mit Rundbogen aufgrund der dickeren Überdeckung des Zwischendeckenkopfes bei der Basisvariante besser abschneidet. Mit bestimmten Maßnahmen kann jedoch dafür gesorgt werden, dass die Variante 1 ohne Rundbogen besser abschneidet als Variante 2.

### Zusammenfassung Wärmebrückensimulation

Nachfolgend sind die wichtigsten Punkte der Wärmebrückenuntersuchung stichpunktartig zusammengefasst.

- Es besteht keine Gefahr durch Tauwasserausfall (keine Berührung des Zwischenbodenkopfes; kritischer Punkt (wurde über 12,6°C Isotherme ermittelt, welche in diesem Bericht nicht aufgeführt sind) liegt beim Fensteranschluss und kann einfach verbessert werden, bzw. müsste detaillierter betrachtet werden).
- Ein Zwischendeckenanschluss verschlechtert in erster Linie den Wärmebrückenverlustkoeffizienten, d.h. es geht mehr Energie verloren.
- Durch das schrittweise Verbessern des Bauteils bis Variante 1.5 bzw. Variante 2.5 kann die Wärmebrücke soweit verbessert werden, dass dadurch weniger Wärmeverluste entstehen als ohne Balkon (Verbesserung von  $\psi$ -Wert Referenz 2 = 0,511 W/(m<sup>2</sup>K) auf  $\psi$ -Wert Variante 1.5 = 0,191 W/(m<sup>2</sup>K) bzw.  $\psi$ -Wert Variante 2.5 = 0,192 W/(m<sup>2</sup>K)).
- Die Einordnung der Ergebnisse nach DIN 4108 ist schwierig, da mehrere Wärmebrücken auf einmal betrachtet werden. Nach DIN 4108 müsste jede einzelne Wärmebrücke (Fensteranschluss oben, Fensteranschluss unten, Balkonanschluss) separat betrachtet werden mit jeweils anschließend 1 m unberührten Bauteilen.

Das nachfolgend formulierte Fazit basiert auf dem Bestreben, die Wärmebrücke des Bauteils so weit wie nur möglich zu optimieren. Eine Abschätzung, inwieweit die Optimierungsmaßnahmen aus technischer und finanzieller Sicht umsetzbar erscheinen, müssen an einer anderen Stelle bewertet werden.

### Fazit Wärmebrückensimulation

- Variante 2 wird Variante 1 vorgezogen, da diese weniger Wärmeverluste garantiert.
- Es wird empfohlen den Zwischendeckenkopf abzuschrägen, zu dämmen und die Fenster in die Mitte der ILC-Bauteile zu verschieben, um eine Optimierung der Wärmebrückenverluste zu erzielen.

Im Weiteren erfolgt die Beurteilung der Wärmebrücken aus Sicht der Energieeinsparverordnung (EnEV).

### Einordnung nach EnEV

Die EnEV schreibt ausdrücklich vor, dass Wärmebrücken sowohl bei Wohn- als auch bei Nichtwohngebäuden berücksichtigt werden müssen. Dabei ist definiert welche U-Werte für Wärmebrücken angesetzt werden müssen:

- Grundsätzlich darf nach EnEV für Neubauten ein Wärmebrückenzuschlag von  $\Delta U_{WB} = 0,1 \text{ W/m}^2\text{K}$  (ohne Nachweis) angesetzt werden.
- Ein Wärmebrückenzuschlag von  $\Delta U_{WB} = 0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$  darf dann angesetzt werden, wenn alle Anforderungen aus DIN 4108 Beiblatt 2 [55] erfüllt werden.

Für die Betrachtung der untersuchten Bauteile kann folgendes Festgehalten werden:

- Die Fensteranschlüsse sind besser ausgeführt als der geforderte Wert:

<b>48</b>	<b>monolithisches Mauerwerk</b>		<p>Der Referenzwert für <math>\psi</math> ist für mittigen Einbau angegeben. Gilt analog für den Fall, dass die Lage des Fensters im mittleren Drittel der Wand ist. Die Fuge zwischen Blendrahmen und Baukörper ist mit Dämmstoff (<math>\geq 10 \text{ mm}</math>) ausgefüllt.</p>	$\leq 0,05 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$
-----------	---------------------------------	--	--	--

Bild 105: Fensteranschluss an einem monolithischen Mauerwerk [55]

- Für den Balkonanschluss ist ab Variante 1.3 bzw. Variante 2.3 kein Nachweis erforderlich, da thermisch getrennte Konstruktionen verwendet werden:

Balkonplatte				
70	außen- gedämmtes Mauerwerk		Es werden thermisch getrennte Konstruktionen verwendet.	Kein weiterer Nachweis erforderlich.

Bild 106: Balkonplatte an einem außen gedämmten Mauerwerk [55]

Darüber hinaus muss für die Betrachtung der Wärmebrücken nach EnEV folgendes beachtet werden:

- Um den Wärmebrückenzuschlag von  $0,05 \text{ W/m}^2\text{K}$  bei einem Wohngebäude ansetzen zu dürfen, müssten zusätzlich zu den simulierten Wärmebrücken alle anderen geforderten Wärmebrücken betrachtet werden (z.B. Anschluss Bodenplatte, Attika,...).
- Wenn alle Wärmebrücken selbst nachgerechnet werden (nach DIN 4108-6) [61], darf auch der tatsächliche Wärmebrückenzuschlag angesetzt werden.



# AP 4

Bau von Prototypen

#### 4 Arbeitspaket 4: Bau und Untersuchung von Prototypen

In der Versuchsphase wurden die im vorigen Arbeitspaket 3 geplanten Prototypen anlog des Versuchsprogramms gefertigt und getestet. Nähere Informationen zum Versuchsprogramm finden sich bei der Beschreibung des Arbeitspakets 3.



Bild 107: Ankündigung Baupraktikum in der Universität

Um die hohe Anzahl an Probekörpern innerhalb eines Monats (10. August – 4. September 2015) anfertigen zu können, wurde entschieden, die Bauphase in den Lehrplan der Studierenden des Bauingenieurwesens und der Architektur einzuarbeiten. Die Jungingenieure konnten somit im Rahmen des Moduls „Infraleichtbeton in der Praxis“ neben dem Pflichtpraktikum Erfahrungen im Umgang mit Schalung, Bewehrung und Beton sammeln. Für Studierende des Bereichs Architektur wurde ein Ersatz des Baupraktikums angeboten. Es beteiligten sich 5 Architektur- und 8 Bauingenieurstudenten, wodurch die Anzahl des Teams auf 17 stieg. Durch einen detaillierten Zeitplan konnten alle Arbeiten innerhalb des gesetzten Zeitrahmens von einem Monat erledigt werden.

Die größte Schwierigkeit bestand darin, die Arbeitsfelder Schalungsbau, Betonieren, Ausschalen und Nachbehandlung mit den zur Verfügung stehenden Geräten und Materialien sinnvoll abzustimmen, da beispielsweise nur ein Zwangsmischer mit einem Mischvolumen von 160 l vorhanden war. Aufgrund des relativ geringen Mischvolumens war es nötig, mehrere Chargen für die Probekörper herzustellen. Zwischen den jeweiligen Chargen vergingen jeweils zwischen 55 bis 65 min, da nach jedem Durchgang der Mischer gereinigt werden musste und ein ILC-Gemisch ca. 45 min benötigt (siehe 4.6.1).

Im folgenden Abschnitt wird auf Besonderheiten und Probleme der jeweiligen Prototypen eingegangen.

#### 4.1 Prototyp 1 “Fassadelement mit auskragendem Balkon”

Der Prototyp 1 ist der größte der vier hergestellten Probekörper. Seine Schalung bestand auf der einen Seite aus einer saugenden Holzschalung (*PERI Beto-S*) und auf der anderen aus einem gefrästen Styroporkörper. Als Aufstandsfläche diente eine handelsübliche Schalttafel. Da es sich bei der Vorderansicht dieses Baukörpers um eine 2-fach gekrümmte Fläche handelt, war gefrästes Styropor bei einer einmaligen Herstellung des Prototyps die ökonomisch wirtschaftlichste Variante der Schalungsherstellung. Bei einer Serienherstellung oder Mehrfachverwendung von Schalungen würde man hier auf ein anderes Material (z.B. Stahlschalung) zurückgreifen.

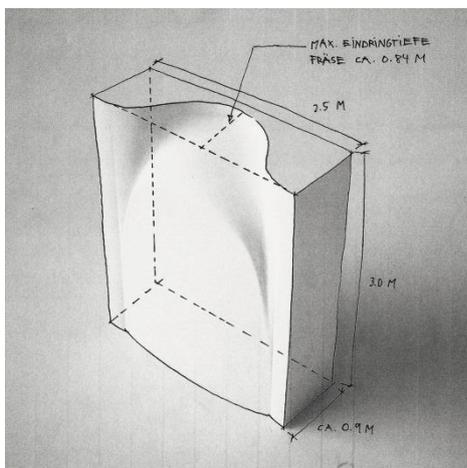


Bild 108: Skizze Schalungskörper aus Styropor

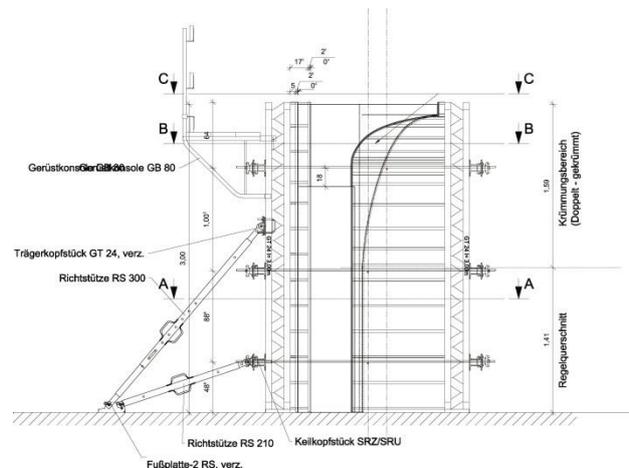


Bild 109: Schalplan Prototyp 1

Um dem Betondruck standzuhalten, wurde die Holzschalung umlaufend geschlossen und mit Spannankern und Riegeln verspannt. Aufgrund der Abmessungen des Prototyps war es nötig, die Holz- als auch die Styroporschalung zu stoßen. Die Stöße und Schraubenköpfe wurden verspachtelt und abgeschliffen. Zusätzlich wurde der Styroporblock mit einem dünnen Epoxydharzfilm aus drei Anstrichen beschichtet.



Bild 110: Aufbau Schalung Prototyp 1



Bild 111: Bewehrung Prototyp 1

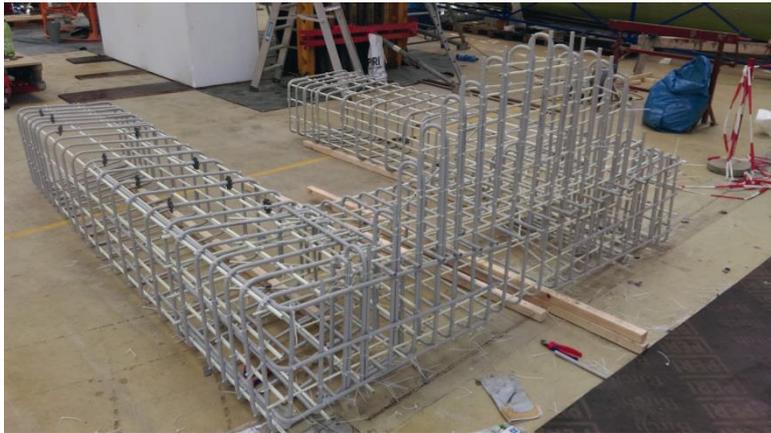


Bild 112: Bewehrung Prototyp 1

Als Bewehrung wurde *Schöck ComBAR®* Ø 8, 12 und 16 mm verwendet, die durch Kabelbinder miteinander verbunden wurden. Für die Herstellung des Bewehrungskorbs mit zwei Arbeitern wurden insgesamt 5 Tage benötigt.

Zunächst wurden die Körbe für die Stützen auf Stahlböcken zusammengebunden. Im Anschluss konnten diese aufgerichtet und innerhalb der Schalung mit der Bewehrung für den Sturz und den auskragenden Balkon versehen werden.

Aufgrund des Probekörpervolumens von 3,5 m<sup>3</sup> war es sinnvoll, den Beton extern in einem Betonwerk herzustellen und liefern zu lassen. Hierfür wurde eigens im Betonlabor die Betonrezeptur für den ILC 800 auf die vorhandenen Zuschläge im Betonwerk abgestimmt. Es wurden die üblichen Leichtzuschläge, der Zement und die Form des Microsilicas (Slurry statt Pulver) angepasst.



Bild 113: Frischbetonprüfung nach Ankunft



Bild 114: Betonieren von Prüfkörpern

Hinzu kam ein Luftporenbildner, da der Stabilisierer im Mischer des Betonwerks Verklebungen hervorgerufen hätte. Weiterhin sorgte eine verkürzte Mischzeit von 45 auf 3 bis 4 min für eine Veränderung der Konsistenz (vergleichbar mit Schlagsahne), jedoch stand noch die Lieferzeit (ca. 35 min) vom Betonwerk zur Versuchshalle aus. Nach erneuter Frischbetonprüfung wurden Wasser (10 l) und Fließmittel (1 l) ergänzt und erneut im Fahrmischer gemischt.

Anschließend erfolgte das Einbringen des Betons mit einem Betonkübel (1000 l). Zunächst wurden die vertikalen Seiten komplett verfüllt, danach wurden der Sturz und der Balkon be-

toniert. Da bei einer Fallhöhe von 3 m die Gefahr einer Entmischung des Betons bestand, wurde eine Regenrinne für einen kontrollierten Einbau verwendet.



Bild 115: Betonage Prototyp 1



Bild 116: Betonage Prototyp 1

Um eine lunkerfreie Oberfläche und scharfe Kanten zu erhalten, wurde in den Eckbereichen mit einem Bewehrungsstab händisch nachverdichtet, zudem wurde ein Außenrüttler (Wacker Neuson AR 36) eingesetzt, dessen Nutzen allerdings nicht abschließend geklärt werden konnte, da immer noch leichte Betonierhorizonte an der Oberfläche zu erkennen waren. Die Oberfläche wurde von Hand glattgezogen.

Nach 6 Tagen wurde der Prototyp 1 ausgeschalt. Trotz dieser langen Ausschulfrist (vgl. auch 4.6.3) blieben Teile des Betons an der Holz- und Styroporschalung haften. Aufgrund des Einbaus der Bewehrung am vorherigen Tag war aus logistischen Gründen kein erneuter Auftrag des Trennmittels direkt vor dem Betoniervorgang möglich. Dies ist ein möglicher Erklärungsansatz für die großflächige Anhaftung des Betons an der saugenden Schalung.



Bild 117: Ausschalen Prototyp 1

Das Abnehmen des Styroporblocks erwies sich aufgrund seiner Geometrie (er war seitlich und oberhalb durch die Betonform gehalten und konnte nur horizontal vom Prototypen entfernt werden) und der wirkenden Adhäsionskraft als äußerst schwierig.

Nachdem der Prototyp ausgeschalt und lediglich die Konstruktion für die Aussparung zwischen den Stützen noch eingebaut war, wurde er an seinen Transportankern der Firma *Pfeifer* mit einem Kran in seine Endposition in der Halle gebracht und gegen Kippen gesichert.

Es ist anzumerken, dass es bisher aus ungeklärten Gründen lokal zum Aufschmelzen des Styropors kam. Es wird zwischen den beteiligten Partnern kontrovers besprochen, ob dies auf die Hydratationswärme und den stark gedämmten Beton zurückzuführen ist. Ebenfalls wäre eine chemische Reaktion zwischen den Komponenten Beton, Epoxydharz, Trennmittel und Styropor denkbar.

Parallel zur Betonage wurden Probekörper erstellt, an denen Prüfungen zur Feststellung der Rohdichte, der Festigkeit und des E-Moduls durchgeführt wurden.

Tabelle 21: Prüfergebnisse der modifizierten Rezeptur ILC 800 für den Transportbeton des Prototyps 1

Trockenrohichte kg/m <sup>3</sup>	Bruchfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	E-Modul N/mm <sup>2</sup>
662	4,12	3067

Die Ergebnisse lagen deutlich unter den für einen ILC 800 angestrebten Zielwerten. Dies ist auf die veränderten Eingangsstoffe wie auch den von Laborbedingungen abweichenden Mischprozess im Transportbetonwerk zurückzuführen. Hier besteht weiterer Entwicklungsbedarf, um die Rezeptur an die Bedingungen im Werk anzupassen.

## 4.2 Prototyp 2 (ILC 800, ILC 600) „Fensterelement“

Der Prototyp 2 wurde im Rahmen des Baus zweimal erstellt. Dies erfolgte einerseits, um den Beton in seinen Materialeigenschaften zu variieren, und andererseits, um ein Exemplar für weitergehende Untersuchungen verwenden zu können.

Die Unterschiede sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 22: Unterschiedliche Ausführungen von Prototyp 2

	Variante 1	Variante 2
Beton	ILC 800	ILC 600
Bewehrung	Schöck ComBAR®, ausschließlich gerade Stäbe	Schöck ComBAR®, Kombination von Bügeln und geraden Stäben
Betonage	stehend; Fallhöhe entspricht der Probekörperhöhe; Einfüllen mit Tuppen	stehend; Reduzierung der Fallhöhe durch Verwenden einer Regenrinne; Einfüllen mit Tuppen
Bestimmung der Wassereindringtiefe auf der Vorderseite	Messstabpaare auf der Vorderseite einbetoniert	Messstabpaare auf der Rückseite einbetoniert

### Variante 1 – ILC 800

Zunächst wurde das Fensterelement aus ILC 800 hergestellt. Durch die Verwendung von geraden Stäben ( $\varnothing$  8 und 12 mm), war es nötig, Übergreifungslängen an den Stößen zu beachten, um die Ränder ähnlich zu Bügel einzufassen. Aufgrund der hohen Anzahl an Verbindungen mit Kabelbindern und der kurzen Glasfaserstäbe entstand ein recht bewegliches Bewehrungsgerüst. Die komplizierte Geometrie erschwerte zudem den Einbau der Bewehrung, da diese innerhalb der Schalung zusammengesetzt und in Position gebracht werden musste. Auch das erneute Auftragen vom Schalungsöl vor dem Betonieren musste mit viel Geduld durchgeführt werden. Für die Seitenteile und die Rückwand wurde eine saugende und für die Vorderseite eine nichtsaugende Schalung verwendet.



Bild 118: Bewehrung Prototyp 2

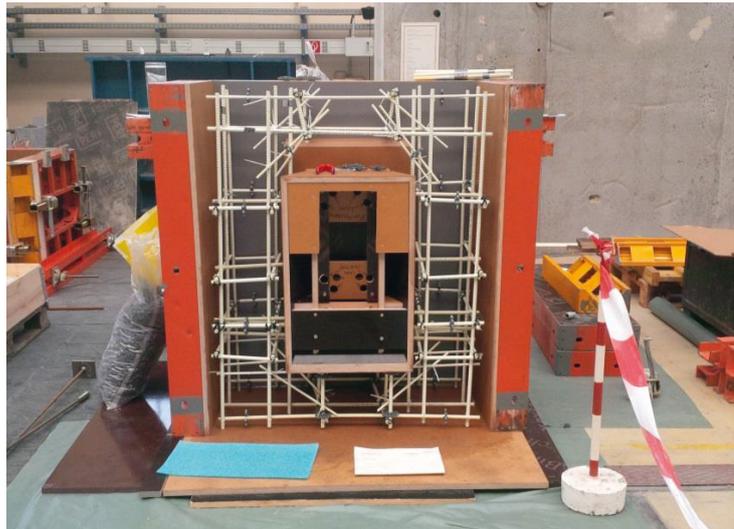


Bild 119: Gesamtansicht Bewehrung Prototyp 2

Unterhalb der Fensterausparung wurden je zwei Gewindestangen ( $\varnothing$  12 mm) bis zu den Tiefen 2, 4 und 8 cm als Messpaare eingebracht, um später über eine elektrische Widerstandsmessung die Eindringtiefe von Wasser bei Beregnung in einem Schlagregenstand zu messen (siehe unten).



Bild 120: Messstäbe Prototyp 2



Bild 121: Detail Messstäbe Prototyp 2

Bis zur gewünschten Messstelle wurden die Gewindestangen isoliert. Der Probekörper besitzt ein Volumen von ca.  $0,5\text{m}^3$  und es wurden insgesamt vier Mischungen mit je 160 l hergestellt. Beim Betonieren spritzte Beton an die Schalung und erhärtete, bevor die nächste Charge eingefüllt werden konnte, wodurch eine fleckige Betonoberfläche nach dem Ausschalen sichtbar wurde. Der Beton wurde zunächst einseitig eingefüllt, bis sich dieser aufgrund seiner selbstnivellierenden Eigenschaft hochdrückte. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass unterhalb der Fensteröffnung keine Lufteinschlüsse verblieben.



Bild 122: Betonage Prototyp 2



Bild 123: Betonage Prototyp 2

Da, wie oben beschrieben, zwischen den einzelnen Chargen eine Wartezeit von rund 60 min bestand, bildete sich eine sogenannte Elefantenhaut, die zwar eine Verbindung des Betons zulässt, jedoch eine sichtbare Schichtgrenze ausbildet. Das Ausschalen der Aussparung war aufgrund der Geometrie und des allseitig wirkenden Betondrucks sehr schwierig, gelang jedoch ohne die Schalung zu zerstören.

Die Betonoberfläche war - abgesehen von den zuvor beschriebenen Mängeln durch erhärtete Spritzer an der Schalung – als gut zu bewerten. Es gab relativ wenige Luftporeneinschlüsse und die Oberfläche war sehr glatt. Die scharfe Kantenausbildung stellte ebenfalls kein Problem dar, wobei die Kanten des Betons aufgrund der geringeren Festigkeit anfälliger sind als bei Bauteilen aus Normalbeton.



Bild 124 (oben): Kantenausbildung Prototyp 2

Bild 125 (links): Oberfläche Prototyp 2 mit sichtbaren Betonierhorizonten

Das Gewicht des Prototyps 2 aus ILC 800 lag 4 Monate nach dem Ausschalen bei ca. 538±4 kg und entsprach damit weitgehend den Vorhersagen.

### Variante 2 – ILC 600

Das zweite Fensterelement aus ILC 600 wurde in derselben Schalung betoniert und mit vorgefertigten Bügeln und geraden Stäben bewehrt. Anders als bei der ersten Variante wurden hier, aus optischen Gründen, die Messstäbe zur Bestimmung der Wassereindringtiefe auf der Rückseite eingebaut und bis 2, 4 und 8 cm an die Vorderseite herangeführt und auf der restlichen Länge isoliert.



Bild 126 (oben): Vorbereitung Betonage mit Rinne

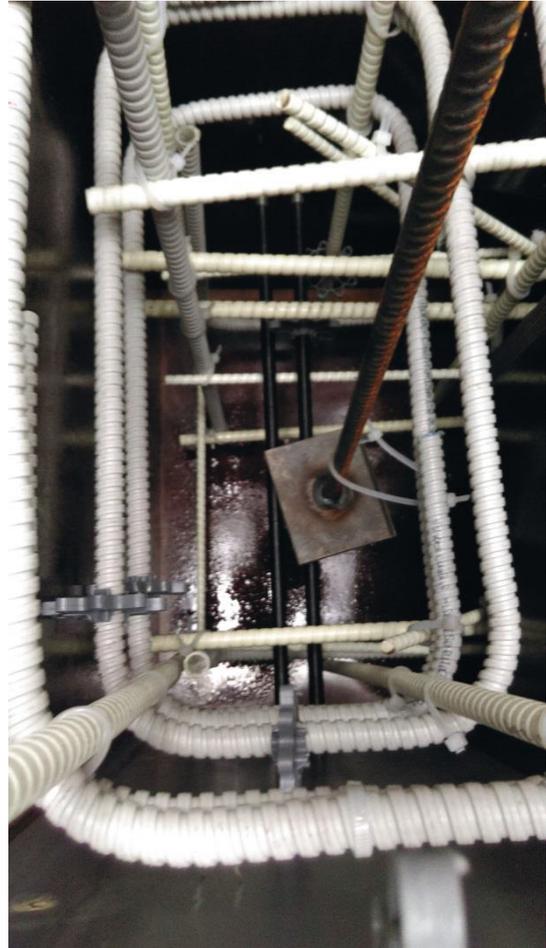


Bild 127 (rechts): Transportanker Bewehrung mit Bügeln

Durch die gezielte Verwendung einer Regenrinne konnten Spritzer an der Schalung verhindert werden, wodurch eine im Hinblick auf Flecken bessere Oberfläche entstand. Durch den Einsatz des Außenrüttlers wurde auch das optische Erscheinungsbild der Betonierhorizonte verbessert. Da es sich jedoch um eine Mischung aus ILC 600 handelte, war die Oberfläche des Betons sehr offenporig und im Vergleich zum ILC 800 als schlechtere Sichtbetonfläche zu bewerten.

### Schlagregenversuch

Im Januar/Februar 2016 wurde mit Prototyp 2 in der Variante ILC 600 ein Schlagregenversuch durchgeführt, bei dem die Aufnahme von Feuchtigkeit in die unbehandelte Oberfläche des Infraleichtbetons untersucht wurde.

Verwendet wurde für diesen Versuch ein Schlagregenstand, der für die Zertifizierung von Unterspannbahnen gemäß prEN 15601 genutzt wird. Als Regenereignis wurde ein für die Unterspannbahnen entwickeltes Ereignis mit einer Beregnungsdauer von 3h gewählt.

Da sich die Betrachtung hier auf das außenliegende Fensterbrett aus Sichtbeton und die Fassade konzentrierte, wurde das Fenster durch eine Multiplexplatte ersetzt, die in die bestehende Fensteröffnung mittels Epoxydharzklebern eingesetzt und eingedichtet wurde. Die äußere Fassade wurde dann dem Regenereignis direkt ausgesetzt. Die Rückseite (Innenseite der Außenwand) wurde nicht beregnet, war aber der erhöhten Luftfeuchtigkeit im Raum ausgesetzt. Die Sättigung durch Feuchtigkeitsaufnahme aus der Luft wurde mittels immer wieder gewogener Testkörper aus ILC 600, die auf der Rückseite des Versuchsaufbaus aufgestellt waren, überprüft.



Bild 128 (oben): Prototyp 2 im Schlagregenstand



Bild 129 (rechts): Prototyp 2 im Schlagregenstand (von hinten)

Der Prototyp stand nicht auf, sondern hing von der Decke herab. Mittels einer Kraftmessdose konnte die Gewichtszunahme durch das Regenereignis simultan zum Versuchsablauf dokumentiert werden.

Des Weiteren kamen die beim Bau des Prototyps eingebauten Messpunkte im Inneren des Prototypen zum Einsatz. In festgelegten Zeitintervallen wurde die rel. Feuchtigkeit im Inneren des Bauteiles mittels Widerstandsmessung überprüft.



Bild 130: Öffnung des Bauteiles im Bereich des Fenstersturzes



Bild 131: Eindringtiefe von Wasser

Sowohl die Aufzeichnung des Gewichts als auch die Feuchtigkeitsmessung im Inneren zeigten annähernd keine Veränderung während des Versuchsablaufs, das Bauteil schien damit im Inneren weitestgehend trocken zu bleiben. Im Anschluss an das Regenereignis wurde die Wand schließlich mittels Hammer und Meißel aufgestemmt, um die reale Tiefe des Eindringens von Wasser in das Bauteil feststellen zu können. Die Ergebnisse bestätigten den trockenen Zustand im Inneren. Lediglich die Außenhaut des Bauteiles war regendurchfeuchtet. Die Feuchtigkeit war ca. 1-2cm in die Oberfläche eingedrungen. Der ILC schien damit also recht resistent gegen Durchfeuchtung zu sein.

Weitere Öffnungen des Bauteiles, insbesondere im Bereich der stark belasteten Fensterbank ohne zusätzliche Abdichtung, zeigten ein ähnliches Bild, auch hier lag die Bewehrung noch komplett im trockenen Bereich des Bauteiles.



Bild 132: Eindringtiefe im Bereich des Fensterbrettes – dunkle Flächen sind durchfeuchtet



Bild 133: Situation nach 1 Tag, Oberfläche abgetrocknet, Feuchte im Inneren des Bauteiles

Einen Tag nach dem Regenereignis zeigte sich eine andere Situation. Die Oberfläche war fast vollständig abgetrocknet. Auch die bereits geöffneten Teile erschienen trocken. Tiefergehendes Aufstemmen wie auch die elektrischen Widerstandsmessungen anhand der Messstäbe zeigten dann aber, dass die Feuchtigkeit bis weit ins Innere des Wandquerschnitts durchgedrungen war. Nicht nur Bewehrungen lagen folglich im "nassen" bzw. feuchten Bereich der Wand.

Fazit des Schlagregenversuches:

Der vorliegende Versuch zeigte, dass Feuchtigkeit während eines Regenereignisses zunächst nur oberflächlich in den ILC eindringt, jedoch mit der Zeit in das Innere des Bauteils vordringt. Dies legt nahe, dass das Material gegen entsprechenden Feuchtigkeitseintritt geschützt werden sollte. Dieser Schutz sollte einerseits baulich/planerisch erfolgen (Dachüberstände, Abtropfkanten etc.) und andererseits durch technische additive Maßnahmen (wie Hydrophobierung bzw. Tiefenhydrophobierung). Da es sich hier nur um ein einzelnes Versuchsergebnis handelt, sollten weitere Prüfungen durchgeführt werden, um das Resultat statistisch zu untermauern. Dabei sollten auch andere Rezepturen oder z.B. eine Beschichtung der Oberfläche mit Hydrophobierung getestet werden.

#### 4.3 Prototyp 3 – „Balkonelement mit Wandstummel und Deckenanschluss“

Der Prototyp 3 wurde analog zum Prototyp 2 zweimal betoniert.

In der ersten Variante wurde er – analog zu einem Balkon-Fertigteil - stehend mit ILC 800 betoniert. Sowohl der Deckenanschluss als auch der auskragende Balkon wurden mit *Schöck-ComBAR®* bewehrt. Zunächst wurde die Bewehrung für den Balkon eingebaut und mit einer Anschlussbewehrung für die Deckenplatte versehen. Wie schon beim Bau der ersten Variante des Prototypen 2 wurden gerade GFK-Stäbe so verbunden, dass sie einen Ersatz für Bügel darstellen. Als temporäre Schalung wurde eine Schalttafel in die Anschlussbewehrung eingefädelt und anschließend mit Silikon abgedichtet.



Bild 134: Stehende Schalung Balkonelement



Bild 135: Einbringen der Bewehrung

Als Beton wurde ein ILC 800 verwendet, der mit Tuppen in die Schalung eingefüllt wurde. Da die Schalung nur ca. 80 cm hoch war, konnte in diesem Fall auf eine Regenrinne als Betonierhilfe verzichtet werden.



Bild 136 (oben): Ausschalen des Prototyps

Bild 137 (links): Bewehrung für Normalbetondecke

Nach 3 Tagen konnte die temporäre Schalung entfernt und der Baustahl-Bewehrungskorb für die Decke eingesetzt werden. Anschließend wurde eine Normalbetonmischung der Festigkeitsklasse C20/25 eingebracht und mittels konventioneller Rüttler verdichtet. Diese Rüttler kamen auch bei der Balkonplatte aus ILC zum Einsatz, hier zeigten sie aber keinerlei Wirkung.



Bild 138: Liegende Schalung für 2. Variante

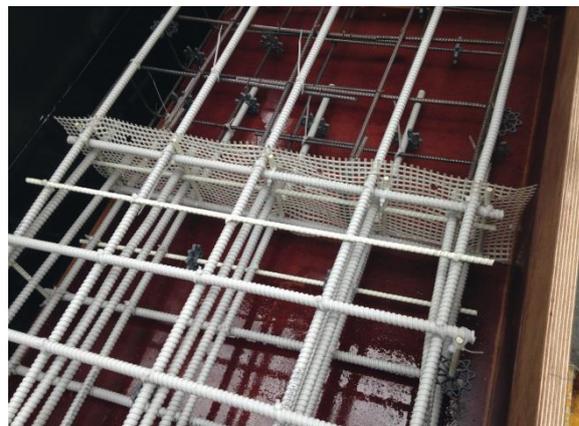


Bild 139: Bewehrung der 2. Variante

Nachdem der erste Balkon-Deckenanschluss fertiggestellt worden war, wurde die Systemschalung der Firma *Peri* so umgebaut, dass eine liegende Herstellung des Prototyps möglich war. Hierbei sollte untersucht werden ob eine schräge Ortbetonoberfläche mit dem ILC 800

hergestellt werden kann. Die Bewehrung des Balkons als auch die Anschlussbewehrung wurde aus GFK-Stäben und -Bügeln hergestellt. Im Übergangsbereich von Normalbeton zu Infraleichtbeton wurde eine Glasfasermatte in Kombination mit Tüchern als Schalung verwendet. Für die Decke wurde anschließend ein Bewehrungskorb aus Stahl hergestellt. Als erstes wurde der Normalbeton eingebaut und nach 3 Tagen folgte der ILC 800. Da es sich bei dem ILC 800 um einen selbstnivellierenden Beton handelt, wurde die Betonkonsistenz von sehr fließend auf fließend eingestellt, um die gewünschte Neigung zu erhalten.

Für den Prototypen 3 war zudem eine realitätsnahe Lagerung gewünscht, weshalb für beide Balkonplatten noch je ein Wandstummel als Auflagerpunkt betoniert wurde. Wandstummel 1 wurde mit einer Kombination aus Stahl- und GFK-Bewehrung bewehrt und aus ILC 800 hergestellt. Der zweite Wandstummel wurde hingegen nur mit GFK bewehrt und mit dem Transportbeton des Prototyps 1 betoniert.



Bild 140: Herstellung des 2. Wandstummels aus Transportbeton



Bild 141: Herstellung des 2. Wandstummels aus Transportbeton inkl. Temperaturfühler (schwarzes Kabel)

Im Rahmen der Herstellung des 2. Wandstummels wurden Temperatursensoren in die Mitte des Bauteiles eingebracht. Damit konnte die Hydratationswärmeentwicklung des ILC dokumentiert werden. Ca. 15 Stunden nach Messbeginn war die maximale Temperatur erreicht, die bei 61,5°C im Zentrum des Bauteiles lag. Nach ca. 4 Tagen lag die Temperatur im Inneren des Bauteiles wieder annähernd auf dem Niveau der Außentemperatur. Das Ergebnis ist positiv zu bewerten, da durch die geringe Wärmeleitfähigkeit des Materials eine höhere Temperatur im Bauteilinneren erwartet wurde.

### Biegeprüfung

Im Februar 2016 wurde mit dem Prototypen 3 in der Variante 2 ein Belastungstest durchgeführt, bei dem die Biegetragverhalten und das Rissverhalten durch die Belastung des Balkons bis zur Nutzlast und anschließend bis zum Bruch untersucht wurde.

Verwendet wurde für diesen Versuch eine Plattenbiegemaschine mit verschiebbaren Prüfportalen und insgesamt 4 Hydraulikzylindern. Davon wurde ein Zylinder zum Fixieren der

Normalbeton-Platte genutzt, indem die Verformung auf 0 gesetzt wurde. Ein zweiter Zylinder diente zur Belastung der ILC-Balkonplatte. Für die Lastverteilung wurden zwei Stahlträger unter den beiden Zylindern verwendet. Unebenheiten bzw. schiefe Ebenen wurden durch Moosgummi ausgeglichen.



Bild 142 (oben): Plattenbiegemaschine mit verschiebbaren Prüfportalen

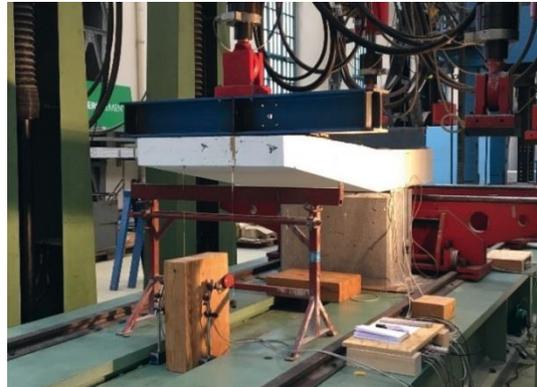


Bild 143 (rechts unten): Stahlträger zur Lastverteilung, Wegaufnehmer an Balkonspitze



Bild 144: Messfühler zur Messung von Spannungen auf der Bauteiloberfläche

Die Messvorrichtung beinhaltete Dehnmessstreifen neben der Fuge ILC/NB in der Druck- und Zugzone des ILC als auch des Normalbetons. Über Wegaufnehmer wurden die Öffnung der Fuge auf der Oberseite, die Absenkung der Balkonspitze sowie die Stauchung des Wandstummels gemessen (vgl. Bild 145).

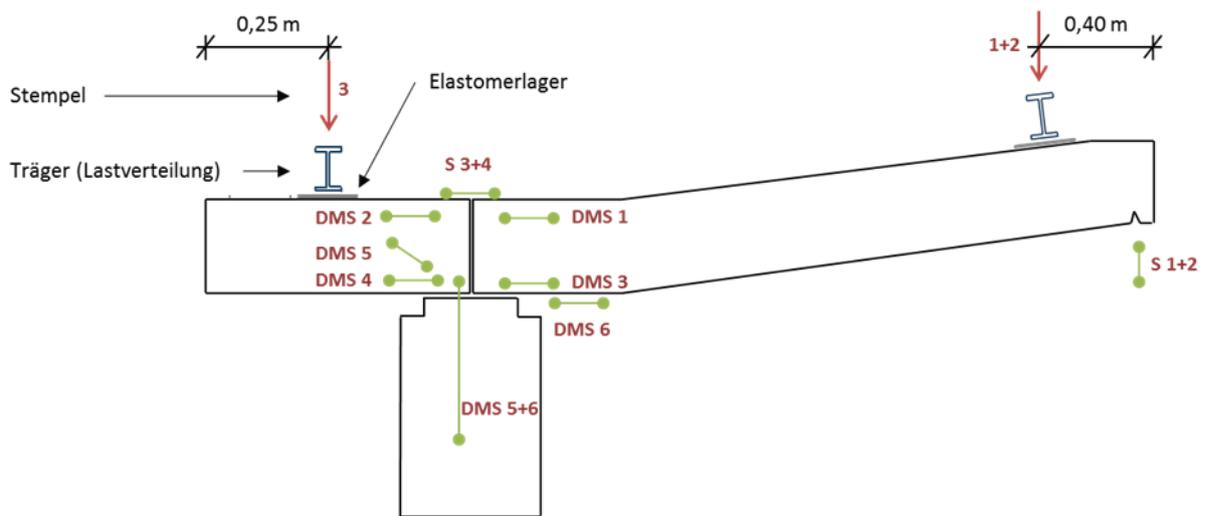


Bild 145: Versuchsaufbau

In der ersten Phase des Versuchsablaufs wurde das Bauteil schrittweise zunächst bis zur Grundlast (äquivalent dem Eigengewicht eines Balkonaufbaus) und zur Prüflast (Eigengewicht inkl. Nutzlast  $4 \text{ kN/m}^2$ ) belastet. Darauf folgten zyklische Entlastungen bis zur Grundlast und Belastungen bis zur Prüflast (vgl. Bild 146). Die auftretende Rissbildung entsprach einem betonüblichen Biegerissverhalten, wobei die Rissbreiten weniger als  $0,2 \text{ mm}$  betragen.

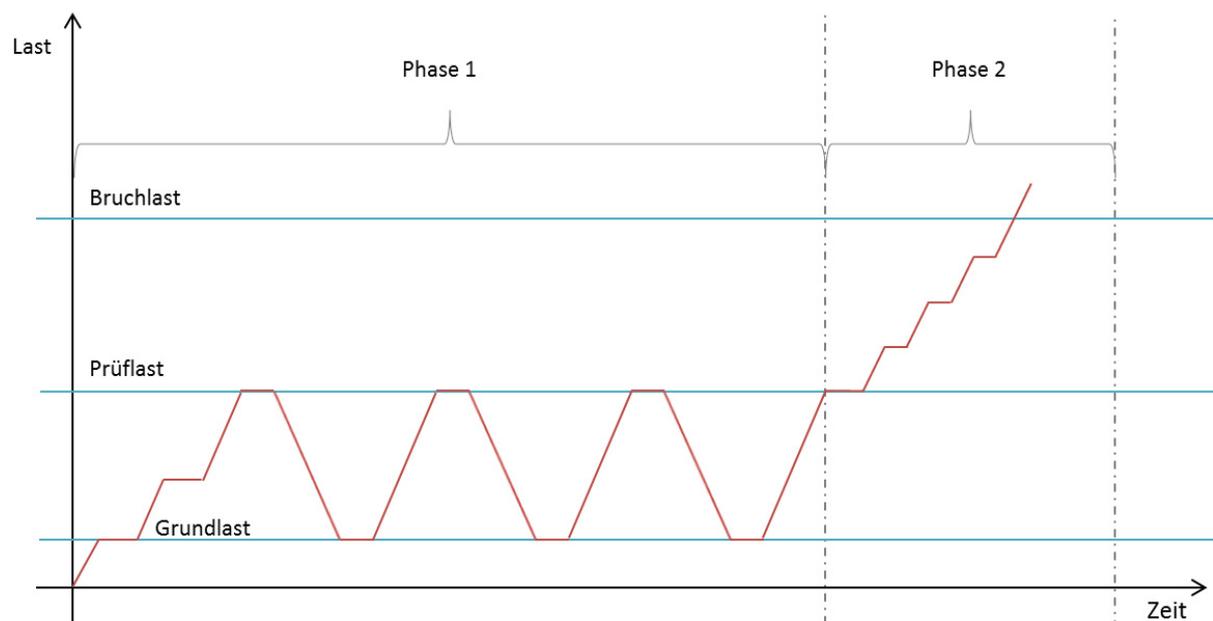


Bild 146: Versuchsablauf

In der zweiten Phase des Versuchs wurde die Belastung über die maximale Verkehrslast hinaus gesteigert. Diese Steigerung erfolgte in definierten Laststufen von je  $5 \text{ kN}$  bis zum Bruch. Wie vorab berechnet versagte das Bauteil bei einer Gesamtauflast von  $32,7 \text{ kN}$  (entspricht einer Verkehrslast von  $22 \text{ kN/m}^2$  und damit einem Faktor von  $5,5$  der maximalen Verkehrslastanforderung an das Bauteil) aufgrund von Querkraft.

Durch die beiden Messfühler an der Spitze des Balkons wurde die Verformung des Prototyps gemessen. Bei der Prüflast von 8,4 kN wurde eine Absenkung von 11mm ermittelt, beim Bruch von 55mm. Nach dem Entlasten lag die plastische Verformung des Prototyps bei ca. 10mm.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Bauteil ein den Erwartungen entsprechendes Verhalten und eine gute Tragfähigkeit zeigte.

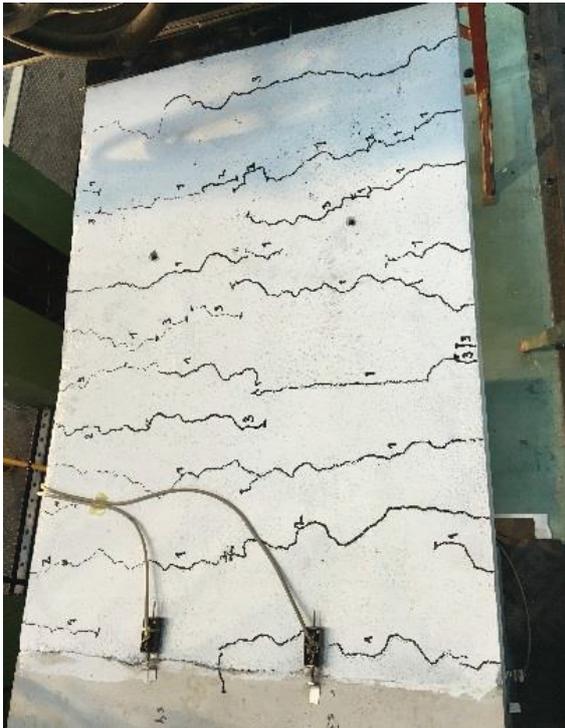


Bild 147: Dokumentation der Risse



Bild 148: Abbruch des Versuches, Querkraftversagen

#### 4.4 Prototyp 4 - "Fassadenelement mit gewellter Oberflächenstruktur"

Prototyp 4 wurde zu einer sehr späten Planungsphase in das INBIG-Projekt mit einbezogen. Dieser Prototyp leitet sich nicht aus einem der Typenentwürfe ab, sondern soll exemplarisch die Potentiale der Oberflächengestaltung von nicht-planaren Objekten aus ILC verdeutlichen. Es handelt sich um ein Fassadenelement als monolithische Vorhangfassade. Das Originalteil wäre ca. 3,6m x 2m groß mit einer Stärke von 50cm. Aus Gründen der Transportierbarkeit wurde die Hälfte eines Teiles mit einer Wandstärke von ca. 40cm gebaut.

Die Oberfläche besteht aus einer Wellenstruktur aus zweifach gekrümmten Flächen. Neben der generellen Frage der Baubarkeit ging es hier um die Oberflächenqualität in Anbetracht der Krümmungen sowie die Frage der Beschichtung des Schalungsmaterialies. Da es sich bei dem Bauteil um ein Fertigteil handelt, erfolgte die Herstellung im Liegen. Dazu wurde eine Holzschalung gebaut, in die ein konventioneller Stahl-Bewehrungskorb eingehängt wurde (korrosionsbeständige Bewehrung wurde hier bewusst nicht verwendet, um das Bauteil ggf. später zur Untersuchung von Langzeitauswirkungen der Carbonatisierung nutzen zu können).



Bild 149: Schalung mit eingehängtem Bewehrungskorb



Bild 150: Bearbeitung der Oberfläche des Schalungskörpers

Die Form der Oberfläche wurde mit einem Schalungskörper aus Styrodur erzeugt. In mehreren Versuchen wurde im Vorfeld die Eignung von verschiedenen Oberflächenmaterialien als Schalung getestet. Schlussendlich wurde entschieden, Epoxydharz als Beschichtungsmittel zu verwenden. Dieses erfordert eine relativ aufwendige manuelle Nachbehandlung, da das Material geschliffen und in mehreren Vorgängen aufgetragen werden muss.

Nachdem der Schalungskörper fertiggestellt war, wurde er in den Schalkasten eingesetzt und Halte- und Transportanker montiert. Aufgrund der Größe des Prototyps (Volumen ca.  $1\text{m}^3$  ILC) mussten für die Betonage ca. 9 Mischungen à 160l hergestellt werden. Die Betonage dauerte damit ca. 9 Stunden.



Bild 151: Zusammenbau der Schalung



Bild 152: Mofi-Ankerteil zum späteren Aufstellen

Der Prototyp wurde nach 6 Tagen ausgeschalt. Die Oberfläche war qualitativ sehr gut, es zeigten sich wenig Lunker oder Poren. Das schubweise Einfüllen durch die Tuppen ist durch linienförmige Verläufe an der Oberfläche zu erkennen. An zwei Stellen blieb die oberste Schicht des Styrodurs am Beton haften, was auf eine lokale, unzureichende Beschichtung mit Epoxydharz schließen lässt. Insgesamt konnte an diesem Prototyp gezeigt werden, dass

eine hochwertige Sichtbetonqualität mit ILC auch bei komplexen Formen eindeutig herstellbar ist.

#### 4.5 Begleitversuche zum ILC

##### a) Wasserdampfdiffusion

Die Werte zur Wasserdampfdiffusion von ILC 800 lagen bereits vor und können der Arbeit [62] entnommen werden. Ergebnis war eine Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  (ILC 800) von 26/34.

Im Rahmen der Bauphase wurden analoge Versuche für ILC 600 durchgeführt. Das Vorgehen ist im Bericht [63] beschrieben. Die Versuchsreihe ergab eine Wasserdampf-Diffusionswiderstandszahl  $\mu$  (ILC 600) von 10/11.

##### b) Wassereindringtiefe und

##### c) Frost-Tau Wechsel

Diese beiden Eigenschaften wurden für die Rezepturen ILC 800 und 600 im Rahmen einer Masterarbeit untersucht. Die Prüfungen sind annähernd abgeschlossen und werden aktuell ausgewertet. Die Auswertung der Ergebnisse wird voraussichtlich Ende April erwartet und ist [64] zu entnehmen.

##### d) Schwindversuche

Aufgabe war es, für ILC Schwindmaße zu bestimmen. Für ILC 800 lagen diese bereits vor. Dementsprechend wurden Versuche für ILC 600 durchgeführt, um anschließend die Schwindmaße für die Rezepturen 650-750 zu interpolieren. Die Ergebnisse der Versuche für ILC 600 sind in 2.3.3.3 geschildert.

##### e) frühestmöglicher Ausschaltzeitpunkt

Dieser Aspekt wurde im Vorfeld der Bauphase untersucht. Die Ergebnisse sind im Abschnitt 4.6.3 zusammengefasst.

##### f) Schlagregentest

Der Versuch wurde am Prototyp 2, ILC 600 vorgenommen. Der Verlauf und die Ergebnisse sind in 4.2 geschildert.

Des Weiteren galt es, geeignete Schaltafeln, Trennmittel, maximale Fallhöhen sowie das Vermeiden von Betonierhorizonten zu untersuchen. Dies wurde im Rahmen einer Studienarbeit [65] abgedeckt. Verschiedene Gestaltungsvarianten wurden durch [66] in einer Bachelorarbeit untersucht. Zum Thema Oberflächennachbehandlung und Betonkosmetik liegen Ergebnisse aus [67] vor. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse findet sich im Abschnitt 0.

Zum Thema der verschiedenen Bewehrungsmaterialien wurde zunächst die Carbonatisierung von ILC betrachtet (siehe 2.3.2). Darauf aufbauend wurde beim Bau der Prototypen hauptsächlich GFK-Bewehrung verwendet, jedoch auch Stahlbewehrung, um ggf. zu einem späteren Zeitpunkt Rückschlüsse auf den Korrosionsprozess im Infralichtbeton ziehen zu können.

## **4.6 Baupraktische Aspekte beim Umgang mit ILC**

### **4.6.1 Mischregime zur Herstellung von ILC**

Im Folgenden wird stichpunktartig die Herstellung von ILC in einem Zwangsmischer (Typ, ILC-Mischvolumen: 160 l) beschrieben.

- 1) Zuschläge von grob nach fein in den ruhenden Mischer geben
- 2) Wasser für die Gesteinskörnung (Anmachwasser) in den laufenden Mischer hinzugeben (Beginn der Zeitmessung, auslaufendes Wasser mit einem Eimer oder einer Tuppe unter dem Mischer auffangen)
- 3) 1 min mischen
- 4) 9 min Saugpause (Mischer ruhen lassen)
- 5) Zement und Microsilica in den Mischer geben
- 6) Mischer anmachen
- 7) Wasser hinzugeben (einen kleinen Rest zum Ausspülen des Fließmittelgefäßes übrig lassen), Punkte 5) – 7) ca. 5 min
- 8) Fließmittel hinzugeben und ab jetzt 5 min mischen
- 9) 5 min ruhen lassen + Verklebungen am Mischer und den Paddeln mit einer Kelle lösen
- 10) Stabilisierer auf dem Beton verteilen (Mischer ruht)
- 11) 5 min mischen
- 12) Konsistenz prüfen und gegebenenfalls Fließmittel und Wasser nachdosieren (z.B. bei hohen Raumtemperaturen), ca. 3 min
- 13) 3 min mischen
- 14) 5 min ruhen lassen
- 15) 1 min mischen

Insgesamt entsteht so eine Mischzeit von ca. 45 min, die nicht unterschritten werden sollte.

### **4.6.2 Geeignete Schalungen**

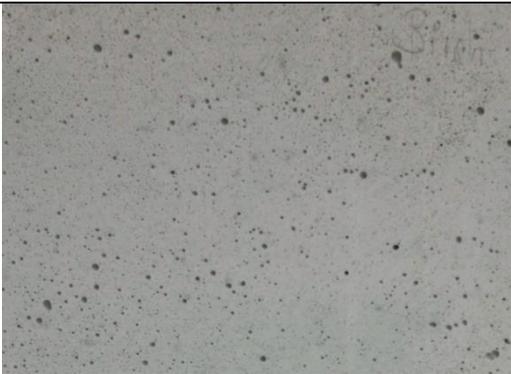
Im Rahmen einer Studienarbeit an der TU Berlin [65] wurden fünf verschiedene Schalungen der Firma *PERI* in Kombination mit baubetrieblichen Aspekten wie Fallhöhen und Vermeidung von Betonierhorizonten (vgl. Kap. 4.6.6) untersucht.

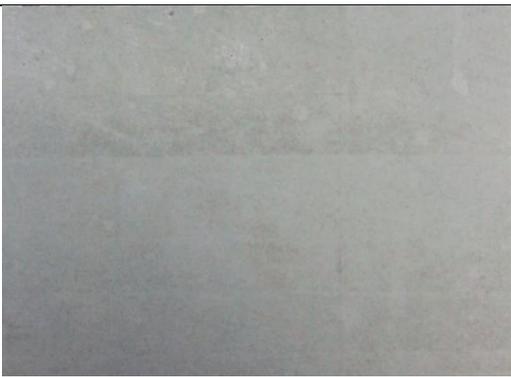
Tabelle 23: Verwendete Schaltafeln

Produktbezeichnung	Eigenschaften und Verwendung	Schalung
<i>Elliotti Pine C+/C BFU 100</i>	brasilianisches Kiefernholz; Bau-Furniersperrholz (BFU, 7-lagig); unbeschichtet; einseitig geschlossen und leicht angeschliffen; z.B. untergeordnete Schalungsplatte	 <p data-bbox="885 656 1417 712"><i>Bild 153: Elliotti Pine C+/C BFU 100 [http://www.peri.com/de]</i></p>
<i>Bras</i>	brasilianisches Kiefernholz; Bau-Furniersperrholz (15-lagig); beidseitig filmbeschichtet (Phenolharz, 125 g/m <sup>2</sup> )	(nicht mehr verfügbar)
<i>PERI Birch</i>	russisches Birkenholz; Bau-Furniersperrholz (15-lagig); beidseitig filmbeschichtet (Phenolharz, 120 g/m <sup>2</sup> ); z.B. Decken- und Wandschalung mit höheren Anforderungen	 <p data-bbox="885 1227 1417 1261"><i>Bild 154: PERI Birch [http://www.peri.com/de]</i></p>
<i>FinPly Pro</i>	finnisches Birkenholz; Bau-Furniersperrholz (15-lagig); betonierseitig mit grauer Kunststoff-Beschichtung und rückseitig filmbeschichtet (Phenolharz, 220 g/m <sup>2</sup> ); z.B. Sichtbeton	 <p data-bbox="885 1603 1417 1637"><i>Bild 155: FinPly Pro [http://www.peri.com/de]</i></p>
<i>PERI Beto-S</i>	russisches Birkenholz; Bau-Furniersperrholz (15-lagig); einseitig leicht saugende Spezialfilmbeschichtung und rückseitig Filmbeschichtet (Phenolharz, 120 g/m <sup>2</sup> ); z.B. matte, lunkerarme Betonoberflächen	 <p data-bbox="885 1977 1417 2011"><i>Bild 156: PERI Beto-S [http://www.peri.com/de]</i></p>

Als Betontrennmittel wurde *PERI Clean* verwendet, das sich sowohl für saugende als auch nichtsaugende Schalplatten eignet. Für *Elliotti Pine C+/C BFU 100* wurde ein Zementleim als Trennschicht aufgetragen.

Tabelle 24: Resultierende Betonoberflächen

Produktbezeichnung	Betonoberfläche	Resultat
<i>Elliotti Pine C+/C BFU 100</i>	Zementleim bleibt großflächig am Beton kleben; Struktur der Sperrholzplatte wird übertragen	
<i>Bras</i>	gleichmäßige Oberfläche; wenig Luftporen; keine Fehlstellen	
<i>PERI Birch</i>	ebene Oberfläche; viele Luftporen und größere Fehlstellen	

<i>FinPly Pro</i>	glatte Oberfläche; viele Luftporen und größere Fehlstellen	
<i>PERI Beto-S</i>	raue Oberfläche; sehr wenige Luftporen; keine Fehlstellen	

Fazit:

Die besten Oberflächen lieferten die *Bras* (nichtsaugend) und die *PERI Beto-S* (saugend), wobei die beinahe porenfreie Oberfläche der saugenden Schalung überzeugte. Lediglich die sichtbaren Betoniergrenzen können eine Beeinträchtigung darstellen. Bei einer guten Planung kann dieser Effekt jedoch auch zur Gestaltung des Sichtbetons verwendet werden.

Für die Herstellung des Prototyps 2 wurde die *PERI Beto-S* gewählt. Es stellte sich heraus, dass Betonspritzer auf der Schalung, die während des Einbringens des Betons entstehen, ebenfalls nach dem Ausschalen sichtbar blieben (Bild 157, links). Daher wurde für den zweiten PT2 eine Regenrinne zum Befüllen verwendet. Die Betonierhorizonte konnten anders als bei den kleinformatischen Probekörpern in [65] nicht durch die Verwendung eines Außenrüttlers vollständig vermieden werden.



Bild 157: links: PT2-1 aus ILC 800 ohne Einfüllhilfe; rechts: PT2-2 aus ILC 600 mit Einfüllhilfe

#### 4.6.3 Ausschalzeiten

Zur Untersuchung der frühestmöglichen Ausschalzeitpunkte wurden der ILC 600 und der ILC 800 in eine saugende und eine nichtsaugende Würfelschalung ( $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}^3$ ) gefüllt und zu festgelegten Zeitpunkten ausgeschalt. Als saugende Schalung diente die in 4.6.2 getestete *PERI Beto-S* Schalung in Verbindung mit *PERI Clean*. Die Schalung wurde vor dem Verwenden dreimal eingeölt. Bei der nichtsaugenden Schalung handelte es sich um eine Stahl-schalung für Prüfwürfel, diese wurden einmal, matt glänzend, mit einem normalen Trennmit-tel behandelt. Für jeden Zeitpunkt wurden jeweils drei Würfel ausgeschalt und hinsichtlich ihrer Oberfläche untersucht.

Tabelle 25: Untersuchung Ausschalfzeiten bei unterschiedlichem Schalmaterial

		12 h	18 h	24 h	36 h	48 h
saugend	ILC 600	klebt stark an der Schalung, Ecken bleiben haften	klebt stark an der Schalung	klebt teilweise an der Schalung (ca. 20 %)	vereinzelt klebt etwas an der Schalung (nicht an allen Würfeln)	klebt nicht an der Schalung, weitestgehend lunckerfrei
	ILC 800	klebt teilweise am Rand der Schalung (ca. 10 %)	klebt nicht an der Schalung, lunckerfrei und matt	siehe 18 h	siehe 18 h	siehe 18 h
nicht saugend	ILC 600	klebt teilweise am Rand der Schalung (ca. 10 %)	klebt nicht an der Schalung, Ecken brechen noch leicht ab	klebt nicht an der Schalung, viele Luncker	siehe 24 h	siehe 24 h
	ILC 800	klebt nicht an der Schalung, viele Luncker im Randbereich	siehe 12 h	siehe 12 h	siehe 12 h	siehe 12 h

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die beste Oberfläche durch die saugende Schalung erzielt wird und der ILC 800 wenige bis keine Luncker besitzt. Der ILC 600 kann bei der saugenden Schalung frühestens nach 48 h ausgeschalt werden, bei der Stahlschalung nach 24 h. Der ILC 800 kann bei der saugenden Schalung frühestens nach 18 h ausgeschalt werden, bei der Stahlschalung nach 12h.

#### 4.6.4 Oberflächengestaltungen

Zur Oberflächengestaltung wurden im Rahmen einer Bachelorarbeit [66] drei Möglichkeiten zur Veränderungen der glatten und grauen Betonoberfläche von ILC getestet. Im ersten Schritt wurden **nichtsaugende Strukturmatrizen** der Firma *RECKLI* an Probekörpern mit den Maßen 50x50x10 cm<sup>3</sup> getestet. Als Trennmittel wurde *RECKLI-Trennwachs* verwendet. Der Einbau erfolgte mittels Eimern und die Verdichtung durch Stochern in der Nähe der Matrizen. Die Oberflächen der glatten Strukturen (Rippen, Wellen und Noppen) waren annähernd fehlerfrei, lediglich die anspruchsvollen Reliefs (Brettholz, Fotogravur) wiesen Ansammlungen von Poren in strukturreichen Bereichen auf.



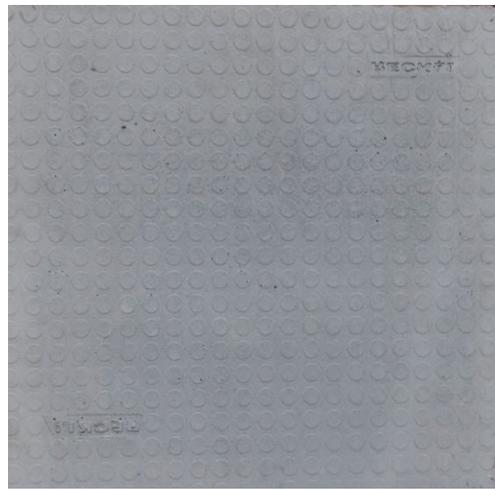
*Bild 158: Ergebnis der Brettholzstruktur [66]*



*Bild 159: Ergebnis der Rippenstruktur [66]*



*Bild 160: Ergebnis der Wellenstruktur [66]*



*Bild 161: Ergebnis der Noppenstruktur [66]*



*Bild 162: Ergebnis der Fotogravur (links: entgegen dem Lichteinfall; rechts: mit dem Lichteinfall) [66]*

Im zweiten Schritt wurden verschiedene **saugende Schalungen** untersucht. Hierfür wurden eine OSB-Platte, Brettholz mit Nut-Feder-Spundung sowie ein Filtervlies verwendet. Da das Saugverhalten der Holzwerkstoffe unterschiedlich war und die Menge des aufzutragenden Trennmittels (*PERI Clean*) nicht richtig eingeschätzt wurde, entstanden Farbunterschiede sowie erhöhte Ansammlungen von Poren. Durch die geringe Holzqualität blieben vereinzelt Holzreste auf der Betonoberfläche haften, da diese durch einen starken Wasserentzug eine geringe Festigkeit erreichte, blieb umgekehrt auch Beton am Holz haften. Das weichere Filtervlies konnte ohne Rückstände entfernt werden und hinterließ eine optisch als auch haptisch ansprechende, stoffähnliche Struktur.



Bild 163: Ergebnis der OSB-Schalung [66]



Bild 164: Ergebnis der Brettholzschalung [66]



Bild 165: Ergebnis der Schalung mit Filtervlies [66]

Nachdem die Oberflächengestaltung durch Einsatz von verschiedenen Schalungen untersucht wurde, wurden die **Zugabe von Pigmenten** und die **nachträgliche Oberflächenbehandlung** erprobt. Für die Einfärbung des Betons wurden *Bayferrox rot 110*, *schwarz 360* und *Colortherm® grün GN-M* verwendet. Für Rot und Grün genügte eine Pigmentmenge von 5 bzw. 6 M-% des Zementgehaltes für eine ausreichende Farbsättigung. Schwarz erreichte mit 5 M-% nicht die gewünschte Farbtintensivität. Jedoch wurde nachgewiesen, dass sich ILC trotz der enthaltenen Bestandteile (Microsilica, Blähton, Blättonsand) zum Einfärben eignet.



Bild 166: Ergebnisse der Grünfärbung (links: 4 M-%; mitte: 5 M-%; rechts: 5 M-%) [66]

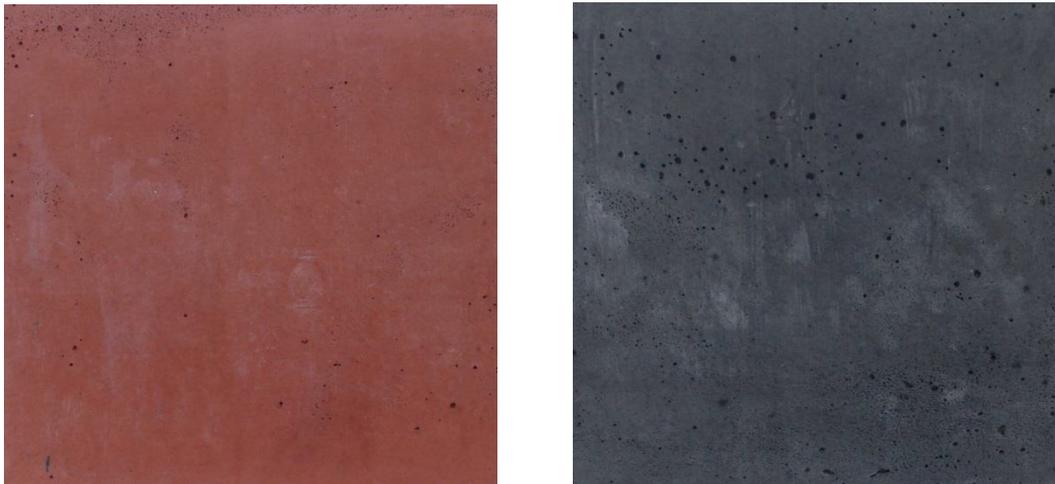


Bild 167: Ergebnis der Rotfärbung (5 M-%)(links), Ergebnis der Schwarzfärbung (5 M-%) (rechts) [66]

Anschließend wurde die Oberflächengestaltung durch Abschleifen und Auftragen von Parkettversiegelung, Leinöl, Steinöl, Hartwachs und aufgeschmolzenen Wachs getestet (vgl. exemplarische Bilder für Öl und Hartwachs). Durch das Schleifen wurden die Zuschläge des ILC sichtbar und geöffnet. Durch drei der vier Methoden wurde die Oberfläche des Betons verdunkelt. Durch die Parkettversiegelung und das Hartwachs entstand eine Kontrasterhöhung, wodurch die Betonstruktur verdeutlicht wird. Das Leinöl und das Steinöl färbten den Beton hingegen beinahe schwarz. Durch das Auftragen von aufgeschmolzenem Wachs blieb die matte Betonoberfläche bestehen, jedoch blieben ähnlich zum Hartwachs Wachsreste in den Vertiefungen übrig. Durch alle Methoden wurde eine glatte Oberfläche erreicht, die sich lediglich bei der Versiegelung künstlich anfühlte.

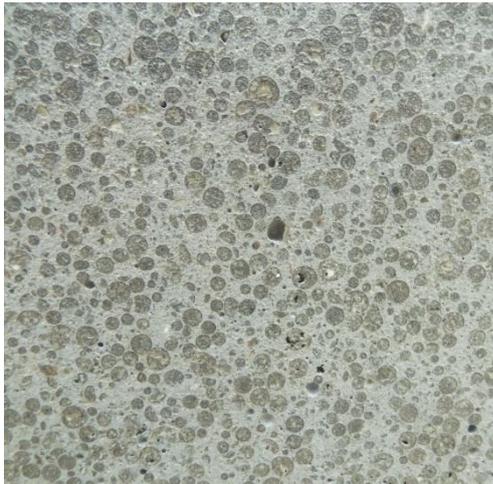


Bild 168: Oberfläche mit Hartwachs [66]

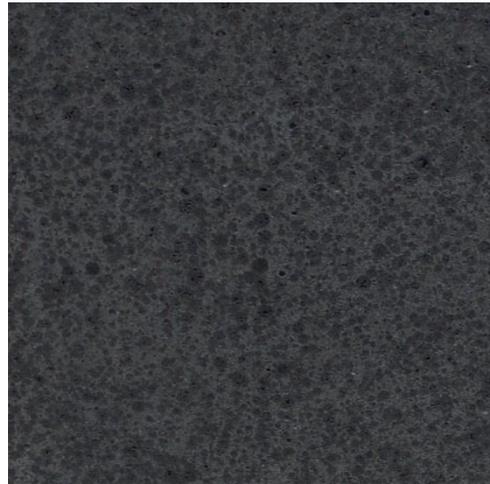


Bild 169: Oberfläche mit Steinöl [66]



Bild 170: Oberfläche mit Leinöl [66]

#### 4.6.5 Nachbearbeitung und Betonkosmetik

Im Rahmen einer Bachelorarbeit [67] wurden **Nachbearbeitungsverfahren** in Bezug auf deren Anwendungsmöglichkeiten auf den Infraleichtbeton untersucht. Gängige Methoden sind das Auswaschen, Strahlen mit festem Strahlmittel, Flammstrahlen, steinmetzmäßige Bearbeitung, **Schleifen** und Polieren sowie **Absäuern**. Das Schleifen erzeugte eine gleichmäßige und glatte Oberfläche. Für die vorliegenden Ergebnisse wurden ein Schwingschleifer und eine Schleifpapierkörnung von 100 gewählt. Nach [67] musste für eine 0,25 m<sup>2</sup> große Fläche das Schleifpapier dreimal gewechselt werden, um eine Abtragtiefe von 1 – 2 mm zu erreichen. Durch Absäuern konnte [67] zeigen, dass Farbunterschiede, die durch Rostfahnen oder verdreckte Schalung entstanden sind, behoben werden können. Hierbei ist darauf zu achten, dass der Beton gründlich vorgegast wird, da die Säure andernfalls in den Beton einzieht und die Wirkung auf der Betonoberfläche verfehlt wird.



*Bild 171: Schleifgerät (links) und Oberfläche nach dem Schleifen (rechts) [67]*



*Bild 172: Abgesäuerte (links) und unbearbeitete Oberfläche (rechts) [67]*

Neben der Nachbearbeitung wurden Betonkosmetikverfahren untersucht. Um große Poren und Fehler beim Verdichten zu behandeln, verwendet man spezielle **Spachtelmassen**. Eine fertige Mischung eignet sich beim Infraleichtbeton nicht, da dieser durch seine Bestandteile einen deutlich dunkleren Farbton erreicht. In [67] wurde daher eine eigene Spachtelmasse hergestellt, die den Anforderungen der Betonkosmetik für Sichtbeton genügt.

Tabelle 26 Spachtelmasse für den ILC 800 [67]

Komponente (Fabrikat)	Menge [g]
CEM III-A 32,5	100
Elkem Microsilica (BASF)	17,7
Leichtsand d = 1 mm (Liapor)	70
Wasser	49
Fließmittel (Grace)	1
$\Sigma$	237,7

Die Verkleidung von Ankerlöchern ist ebenso ein wichtiges Thema bei der Erstellung von Sichtbetonoberflächen. Hierfür wurden Negativformen von den schräg verlaufenden Ankerlöchern erstellt und anschließend passende Konen betoniert. In Kombination mit der zuvor hergestellten Spachtelmasse konnten diese durch leichtes Abschleifen der Betonschlacke eingesetzt werden.



Bild 173: Hergestellte Stopfen aus Beton (links) und eingesetzt (rechts) [67]



Bild 174: In den Probekörper eingesetzter Betonstopfen mit Spachtelmasse [67]

#### 4.6.6 Vermeidung von Betonierhorizonten, Fallhöhen

Da die maximal kontinuierlich einbringbare Frischbetonmenge durch das Fassungsvermögen von Betonmischern und Transportbehältern bzw. –fahrzeugen eingeschränkt ist, wird Beton in mehreren Lagen eingebracht. Bei Unterbrechungen des Betonierprozesses von nur wenigen Minuten kann es zur **Bildung von Betonierhorizonten** kommen [65]. ILC ist ein selbstverdichtender Beton (SVB), dessen Stabilität durch Einbringen von zusätzlicher Energie aus dem Gleichgewicht geraten könnte. Nachdem in vorhergehenden Arbeiten manuelles Nachverdichten des ILC durch Rütteln und Stochern erfolgreich praktiziert wurde, untersuchte [65] daher die Anwendung von Außenrüttlern an einer Holzschalung eines Probekörpers mit den Maßen 35cmx50cmx60cm. Durch den Außenrüttler (Wacker Neuson AR 36) konnte der Betonierhorizont fast völlig vermieden und die Befürchtungen einer Entmischung widerlegt werden.



Bild 175: links: Betonierhorizont mit Außenrüttler vermieden (Horizont mit Bleistift markiert); recht: aufgeschnittener Probekörper [65]

Um dieses Ergebnis zu verifizieren, wurde derselbe Außenrüttler für die Herstellung des Prototyps 2 angewendet. Jedoch konnten die Betonierhorizonte, anders als bei [65], nicht vollständig vermieden werden. Dies ist jedoch durch den Betonierprozess zu erklären, da zwischen den jeweiligen Chargen 45 min (entspricht der Mischzeit im Labormischer) lagen, wodurch sich eine zähe Zementleimschicht an der Betonoberfläche (Elefantenhaut)<sup>6</sup> bildete und die lückenlose Vermischung des Betons verhindert wurde. Grobe Fehler auf der Oberfläche konnten durch den Einsatz des Rüttlers jedoch vermieden werden.

<sup>6</sup> Betonmerkblatt B29 – Selbstverdichtender Beton – Eigenschaften und Prüfung: „Wird der Beton nicht kontinuierlich eingebracht, kann sich eine zähe, zusammenhängende Zementleimschicht an der Betonoberfläche bilden – die so genannte Elefantenhaut. Dadurch wird eine Vermischung unterschiedlicher Betonchargen verhindert; diese Trennschicht kann sich später auf der Bauteiloberfläche abzeichnen. Zusätzlich kann der Beton bereits durch geringe Standzeiten in der Schalung seine selbstverdichtenden Eigenschaften teilweise oder sogar gänzlich verlieren.“ [68]

Die Untersuchungen der **Fallhöhen** in [65] (60 cm, 100 cm, 150 cm) zeigten, dass der Beton durch die zusätzliche Verdichtungsenergie nicht entmischt wird, jedoch wich die tatsächliche Rohdichte von der Zielrohichte um rund  $50 \text{ kg/m}^3$  ab. Eine von der Fallhöhe beeinflusste Rohdichte konnte nicht ausgemacht werden. Die Kompaktierung des Materials muss beim Einfüllen in den Betonkübel stattgefunden haben (Fallhöhe vom Rand zum Boden des Kübels ca. 150 cm), wodurch sich die Menge der Luftporen reduzierte. Um einen negativen Einfluss auf die Wärmedämmeigenschaften des ILC zu vermeiden, sollte der Beton daher über den Rand laufend in den Kübel gefüllt werden.



*Bild 176: Befüllen der Probekörper von [65] mit einem Betonkübel*

## 5 Arbeitspakt 5: Zusammenfassung und weiterer Forschungsbedarf

### Zusammenfassung

Neben dem erfolgreichen Bau von insgesamt 6 großformatigen exemplarischen Prototypen lieferte das Forschungsprojekt INBIG umfangreiche Kenntnisse über die gestalterischen und technisch-baukonstruktiven Potentiale des Baumaterials Infraleichtbeton.

Das Projekt konnte aufzeigen, dass Geschossbauten mit tragenden monolithischen Außenwänden aus Infraleichtbeton realisierbar sind. Das gestalterische Potential liegt dabei um ein vielfaches höher als bei konventionellen Bauten aus Wärmedämmverbundsystem mit mehrschichtigen Wandaufbauten. Das Material ermöglicht einfache technische Lösungsansätze und reduziert dadurch deutlich die Komplexität und damit Dauerhaftigkeit, Nachhaltigkeit und Robustheit von Gebäuden.



*Bild 177: Übersicht der realisierten Prototypen*

Es wurde nachgewiesen, dass die Herstellung komplexer architektonischer Formen bei gleichzeitig hoher Oberflächenqualität der Bauteile möglich ist. Insbesondere die Rezeptur ILC 800 zeigte bei unterschiedlichsten Schalungsmustern und Schalarten durchgehend überzeugende Oberflächenqualitäten [66].

Grundsätzlich scheinen sich alle aus dem normalen Betonbau bekannten Schalungsmethoden auch auf den Infraleichtbeton übertragen zu lassen. Die Einsetzbarkeit des Materials als geeigneter Baustoff für anspruchsvolle Formgebung scheint eher durch die Schwierigkeiten und den Aufwand bei der Herstellung von komplexen Schalungsformen, als durch das Material selbst bestimmt zu sein.



*Bild 178: Prototyp 1 ca. 4 Wochen nach Fertigstellung*

Das Material ermöglicht architektonisch neue Möglichkeiten der Gestaltung von Fassaden bei monolithischem Aufbau.

Sowohl im Hinblick auf Auskragungen und Vorsprünge, als auch im Hinblick auf die Ausformulierung von Fenstern und Öffnungen bietet das Material einen großen gestalterischen und baukonstruktiven Spielraum. Auch konventionelle Lösungen wie Fensteranschlüsse oder stumpf in die glatte Öffnung gestellte Fenster sind möglich und bereits mehrfach mit vergleichbaren Dämmbetonen realisiert (vgl. 1.3).

Selbst minimale Lösungen mit direkt regenexponierten Flächen (vgl. Fensterbank Bild 179) zeigten eine vertretbare erhöhte Aufnahme von Wasser im Vergleich zu vertikalen Flächen.



*Bild 179: Prototyp 2 in ILC 800 (links) und ILC 600 (rechts)*

Das Arbeiten mit Infraleichtbeton als Baustoff wird im Hinblick auf das Zusammenspiel von Fenster und Außenwand besonders interessant, wenn man die im Vergleich zu anderen Wandaufbauten hohen Wandstärken als architektonisches Thema nutzt, um neuartige räumliche Situationen zu erzeugen oder neue technische Lösungsansätze zu finden. Exemplarisch zu nennen ist hier z.B. die Lösung des Kastenfensters für den Wohnturm aus Infraleichtbeton (siehe 3.2.3).



Bild 180: Prototyp 4 – Fassadenelement aus Infralichtbeton

Beim Infralichtbeton handelt es sich um ein Material, das klar als tragender Baustoff entwickelt worden ist. Dennoch eignet sich das Material auch für die Herstellung von vorgefertigten Elementen bei Vorhangfassaden. Durch das geringe Gewicht können Bauteile mit großen Abmessungen und mit großer Formenvielfalt hergestellt werden. So ist es möglich, ein Gebäude mit sehr einfachem Fassadenaufbau zu realisieren.

Gerade durch die Kombination mit den Vorteilen der Fertigteilbauweise, wie z.B. hohe Qualität in der Herstellung, kurze Bauzeiten etc., bietet sich aus Sicht der Projektteilnehmer die Chance, das Material als lastabtragendes und wärmedämmendes Fertigteil in völlig neuer Weise am Markt zu etablieren.

Die Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete sind umfangreich und wurden der Übersichtlichkeit halber direkt in den Kapiteln zum jeweiligen Arbeitspaket beschrieben. In aller Kürze stichpunktartig genannt liegen folgende Ergebnisse vor:

- Arbeitspaket 1: Zusammenstellung des Stands der Forschung zum ILC; Untersuchung signifikanter Referenzgebäude, die darlegen, dass die verwendeten Betone eine im Vergleich zu ILC schlechtere Leistungsfähigkeit aufweisen.
- Arbeitspaket 2: Aufzeigen des architektonischen Potentials anhand typologischer Entwürfe für ILC Gebäude für Baulücke, Zeilenbau und Punkthaus; Grundlagen zur Planung und Bemessung inkl. ökologischer und ökonomischer Analysen; Parametertabelle zur entwurflichen und statischen Vorbemessung.
- Arbeitspaket 3: Leitdetails für Fenster-, Decken-, Balkonanschluss, Attika und Fußpunkt; Ausführungsplanung der Prototypen; Beurteilung von Wärmebrücken sowie des positiven Einflusses von ILC auf thermischen Komfort und hygrisches Verhalten; Aufzeigen des Potentials einer aktiven Dämmung.
- Arbeitspaket 4: Nachweis der Baubarkeit der ausgewählten Prototypen; Zusammenstellung von Erkenntnissen und Erfahrungen aus dem Bauprozess und der Untersuchung baupraktischer Aspekte; Erkenntnisse aus Begleitversuchen zu diversen Materialeigenschaften; Erkenntnisse aus Prüfungen im Schlagregenstand und Biegeprüfung.

### Weiterer Forschungsbedarf

In den verschiedenen Themenbereichen der Arbeitspakete 2 bis 4 wurden viele Aspekte untersucht und Erkenntnisse erlangt, die wiederum weiterführende Fragen aufgeworfen haben. Diese sind in den jeweiligen Kapiteln erläutert. An dieser Stelle sollen hier erneut stichpunktartig die wesentlichen Punkte des weiteren Forschungsbedarfs zusammengefasst werden:

- Dauerhaftigkeit: die Bewehrung von ILC mit korrosionsbeständigen Bewehrungsmaterialien ist technisch problemlos umsetzbar. Weiterführende Untersuchungen zur Carbonatisierung von ILC sind jedoch wünschenswert, um den Prozess und dessen Auswirkungen besser einschätzen und ggf. aus Gründen der Wirtschaftlichkeit doch auf konventionelle Stahlbewehrung zurückgreifen zu können.
- Optimierung der Betonrezeptur im Hinblick auf den Mischprozess im Transportbetonwerk, die Festigkeit und Wärmeleitfähigkeit sowie die ökologische Verträglichkeit
- Weiterführende experimentelle Untersuchungen zum Verhalten bei Schlagregen (u.a. mit hydrophobierten Bauteilen) und zu den Prüfungen am Prototyp 3 (Balkonan-schluss), um statistisch relevante Ergebnisse zu erhalten.
- Querkraftverhalten: Eine vereinfachte Abschätzung zum Querkraftverhalten von ILC kann nach Faust (vgl. 2.3.3.2) durchgeführt werden. Um genauere Berechnungsmethoden entwickeln zu können, wären jedoch explizite Untersuchungen erforderlich.
- Kriechen und Schwinden: durch den aktuellen Kenntnisstand kann das Kriech- und Schwindverhalten und resultierende Verformungen konservativ abgeschätzt und konstruktiv berücksichtigt werden. Um wirtschaftliche Berechnungsansätze anwenden zu können, sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden.
- Brandschutz: Weiterführende Untersuchungen, u.a. zu Abplatzungen und thermischer Ausdehnungen bei bewehrten ILC-Bauteilen.
- Schallschutz: das Schalldämm-Maß kann aktuell normkonform anhand der Masse ermittelt werden. Eine experimentelle Ermittlung ist jedoch wünschenswert, um eventuell vorliegende, bessere Schalldämm-Maße (ähnlich dem Porenbeton [69]) nachweisen zu können.
- Ökobilanz/ Lebenszykluskosten: die durchgeführten Analysen resultierten für das Fallbeispiel in einer ähnlichen Bewertung von ILC und konventioneller Bauweise. Verbesserungspotential bietet sich u.a. in einer ökologischen Optimierung der Betonrezeptur sowie der Verifikation und Modifikation von Bilanzierungsannahmen und –ansätzen.
- Aktive Dämmung: Weiterführende Untersuchungen des Potentials, insbesondere bzgl. der Lage der Kapillarrohrmatten, dem detaillierten Zusammenspiel zwischen Wassermassenstrom und Vorlauftemperatur sowie der Ermittlung von Investitions- und Betriebskosten.
- Entwicklung und Herstellung von Infraleichtbeton-Fertigteilen  
ILC ist zur Herstellung von Ortbetonbauten eindeutig geeignet. Die Vorfertigung als Fertigteile bietet weitere Vorteile, die sich mit dem Potential von ILC verknüpfen lassen. Daher sollte der Entwurf und die Herstellung von ILC-Fertigteilen näher erforscht werden, u.a. zum Beispiel
  - o die Thematik der Fugenausbildung und Fertigteileanschlüsse

- Ausarbeitung und experimentelle Prüfungen zum Einsatz von Einbauteilen und nachträglichen Befestigungen (z. B. Holzbalkenanschluss) und von Transportankern
- Fertigungs-, Transport- und Montageprozesse

Das umfangliche Wissen über das Anwendungsspektrum von ILC soll nun zur Unterstützung von Bauherren, Planern und Unternehmen in Form eines Leitfadens in Buchform publiziert werden, die Voraussetzungen hierfür werden zur Zeit geklärt.

## Literatur

### Literatur

- [1] Filipaj, P.: Architektonisches Potenzial von Dämmbeton. Zürich: vdf-Hochschulverl 2010.
- [2] Schlaich, M., Zareef, M. E.: Infraleichtbeton. Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), S. 175–182.
- [3] Schlaich, M., Hückler, A.: Infraleichtbeton 2.0. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), S. 757–766.
- [4] Barkow Leibinger: Smart Material House. [http://www.barkowleibinger.com/archive/view/smart\\_material\\_house#](http://www.barkowleibinger.com/archive/view/smart_material_house#), 24.02.2015.
- [5] Team Barkow Leibinger: Wettbewerb Urban Living.
- [6] Leibinger, R., Schlaich, M., Lösch, C., Rieseberg, P., Ballestrem, M.: Forschungsvorhaben Infraleichtbeton im Geschosswohnungsbau (INBIG). Bestandsbericht zum Arbeitspaket 1. Referenzprojekte, Forschungsarbeiten 24.11.2014.
- [7] Hochwärmedämmende, monolithische Sichtbetonaußenteile aus Architekturleichtbeton. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag 2014.
- [8] Quast, M., Hummeltensberg, A., Curbach, M.: Hochleistungsleichtbeton unter Impact. Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), S. 15–22.
- [9] Garrecht, H., Klatt, A.: Potenziale und Grenzen gefügedichter Leichtbetone aus nachwachsenden Rohstoffen. Mineralisch ummantelte Holzspäne als Leichtzuschlag für Beton. BFT International 78 (2012), S. 115–117.
- [10] Hub, A., Knippers, J.: Leichtbeton mit Aerogelen als Konstruktionswerkstoff – Herstellung und Eigenschaften.
- [11] Meggers, F., Baldini, L., Leibundgut, H.: An Innovative Use of Renewable Ground Heat for Insulation in Low Exergy Building Systems. Energies 5 (2012), S. 3149–3166.
- [12] Müller, H. S., Haist, M.: Hochleistungs-Leichtbeton - Vergessenes Potenzial des Betonbaus? BFT International 78 (2012), S. 115–117.
- [13] Rübner, K., Schnell, A., Haamkens, F., Jakubcová, P., Müller, A.: Leichtbeton aus Aufbaukörnungen. Chemie Ingenieur Technik 84 (2012), S. 1792–1797.
- [14] Herrmann, M., Haase, W.: Tragverhalten biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile aus funktional gradiertem Beton. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), S. 382–394.
- [15] Herrmann, M., Sobek, W.: Gradientenbeton - Numerische Entwurfsmethoden und experimentelle Untersuchung gewichtsoptimierter Bauteile. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), S. 672–686.
- [16] Thienel, C.: Veröffentlichungen. <https://www.unibw.de/werkstoffe/forschung/veroeffentlichungen>, 05.11.2014.

- [17] Liapor Schweiz Vertriebs GmbH: Liapor Isolationsbeton. Technisches Merkblatt.
- [18] Amt der Steiermärkischen Landesregierung: TECHNOlith - Dämmbeton. Österreichische Technische Zulassung 25.06.2013.
- [19] TECHNOpor Dämmbeton GmbH: Technolith Dämmbeton. Technisches Datenblatt April 2013.
- [20] MATTHIAS BAUER ASSOCIATES STUTTGART: Haus H36.
- [21] Liapor GmbH: Monolith mit Zentrumsfunktion. Volta-Zentrum Basel. Pressemitteilung. <http://www.liapor.com/de/presse/pressemitteilung/107.html>, 07.11.2014.
- [22] Faust, T.: Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau. Berlin: Ernst 2003.
- [23] Horschler, S.: Der aktuelle Stand zur neuen EnEV. Konsequenzen für die Umsetzung in der Baupraxis 2014.
- [24] Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung. EnEV 2014 18.11.2013.
- [25] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. EnEV 2014 2014.
- [26] EnEV 2013 und EnEV easy. Konsequenzen für Fenster, Fassaden, Türen und Glas 13.09.2012.
- [27] DIN Deutsches Institut für Normung e.V: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010. Berlin: Beuth Verlag (31.01.2011).
- [28] Reiter, P.: Korrosionsschutz der Stahlbewehrung bei Bauteilen aus Infraleichtbeton. Studienarbeit. Berlin 21.10.2014.
- [29] Grube, H., Krell, J.: Zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe von Mörtel und Beton 1986.
- [30] Stark, J.: Dauerhaftigkeit von Beton. Berlin: Springer 2013.
- [31] Zareef, Mohamed Ahmed Mohamed El: Conceptual and structural design of buildings made of lightweight and infra-lightweight concrete.
- [32] Rehm, G.: Korrosionsschutz von Stahl in Beton. In: Forschungsinstitut der Zementindustrie (Hg.): Betontechnische Berichte 1969. Berichte und Mitteilungen der beton-technischen Abteilung der Zementindustrie: Bau Verlag u. Technik, S. 57–65.
- [33] Hückler, A.: Trag- und Verformungsverhalten von biegebeanspruchten Bauteilen aus Infraleichtbeton (ILC). Dissertation. Berlin 2016.
- [34] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung. Bewehrungsstab Schöck ComBAR aus glasfaserverstärktem Kunststoff Nenndurchmesser: 8, 12, 16, 20 und 25 mm. Zulassungsnummer Z-1.6-238 05.06.2014.

- [35] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung: Bewehrungsstab Schöck ComBAR aus glasfaserverstärktem Kunststoff Nenndurchmesser: 8, 12, 16, 20 und 25 mm 05.06.2014.
- [36] Schneider, K.-J., Goris, A., Albert, A.: Schneider Bautabellen // Bautabellen für Ingenieure: Mit Berechnungshinweisen und Beispielen. Köln: Werner 2012.
- [37] Kordina, K.: Bemessungshilfsmittel zu Eurocode 2 Teil 1. (DIN V ENV 1992 Teil 1-1, Ausgabe 06.92) ; Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Berlin: Beuth 1992.
- [38] Dornburg, S.: Kriechen und Schwinden von Infraleichtbeton. Bachelorarbeit. Berlin 04.02.2013.
- [39] Jünke, D.: Einfluss des Feuchtegehalts im Infraleichtbeton auf die Festigkeit und den E-Modul. Bachelorarbeit. Berlin 14. Oktober 2015.
- [40] Dornburg, S.: Untersuchung des Kriech- und Schwindverhaltens von Infraleichtbetonbauteilen. Masterarbeit. Berlin erwartet 2016.
- [41] König, G.: Grundlagen und Bemessungshilfen für die Rissbreitenbeschränkung im Stahlbeton und Spannbeton. Sowie Kommentare, Hintergrundinformationen und Anwendungsbeispiele zu den Regelungen nach DIN 1045, EC2 Und Model Code 90. Berlin: Beuth 1996.
- [42] Schöck: Schöck ComBAR. Technische Information Juni 2014.
- [43] Fingerloos, F.: Eurocode 2 für Deutschland. DIN EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1 Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit Nationalem Anhang ; kommentierte Fassung ; [Kommentar]. Berlin: Ernst 2012.
- [44] Bauordnung für Berlin (BauO Bln) 10. Juli 2011.
- [45] Musterbauordnung. MBO.
- [46] Einbrodt, C.: Das Verhalten von Infraleichtbeton bei hohen Temperaturen. Masterarbeit. Berlin 10.02.2014.
- [47] DIN Deutsches Institut für Normung e.V: Schallschutz im Hochbau: Anforderungen und Nachweise. Berlin: Beuth Verlag (1989-11).
- [48] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Schallschutz im Hochbau, Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren (November 1989).
- [49] DIN Deutsches Institut für Normung e.V: Schallschutz im Städtebau - Teil 1: Grundlagen und Hinweise für die Planung. Berlin: Beuth Verlag (2002-07).
- [50] Strategische Lärmkarten (Ausgabe 2013).
- [51] Dobrzynska, S.: Erstellung einer Ökobilanz zur ökonomischen und ökologischen Bewertung eines Infraleichtbetonbauwerks. Masterarbeit. Berlin 16. Februar 2016.

- [52] Schlosser, J.: Erstellung einer Ökobilanz zur ökologischen und ökonomischen Bewertung eines Bauwerks aus Infraleichtbetonfertigteilen. Masterarbeit. Berlin 17. Februar 2016.
- [53] ÖKOBAUDAT: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB).
- [54] GaBi: thinkstep.
- [55] DIN Deutsches Institut für Normung e.V: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Wärmebrücken - Planungs- und Ausführungsbeispiele. Berlin: Beuth Verlag (01.03.2006).
- [56] Transsolar: TRNSYS 2016.
- [57] DIN Deutsches Institut für Normung e.V: DIN 4108 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz: Beuth Verlag (2013).
- [58] Fraunhofer IBP: wufi.de 2016.
- [59] ISOVER Saint-Gobain: Wärmebrücken. <http://www.isover.at/vorteile-eigenschaften/bauphysik/waermebruecken>, 10.02.2016.
- [60] THERM 2015.
- [61] DIN Deutsches Institut für Normung e.V: DIN 4108 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs: Beuth Verlag (2003).
- [62] Brecht, K.: Wasserdampfdurchlässigkeit von Infraleichtbeton. Bachelorarbeit 18. November 2013.
- [63] Brecht, K.: Wasserdampfdurchlässigkeit von ILC 600. Bericht zum Modul 30. Oktober 2015.
- [64] Brecht, K.: Wassereindringtiefe und Frost/ Frost-Tausalz-Widerstand von Infraleichtbeton. Masterarbeit. Berlin erwartet April 2016.
- [65] Neß, L.: Untersuchung von Infraleichtbeton zu baubetrieblichen und ökonomischen Aspekten. Studienarbeit 23. September 2015.
- [66] Pham, M. D.: Untersuchung verschiedener Gestaltungsmöglichkeiten der Sichtbetonoberfläche von Infraleichtbeton. Bachelorarbeit 30. September 2015.
- [67] Loebel, J.: Oberflächennachbehandlung und Betonkosmetik von Infraleichtbeton. Bachelorarbeit. Berlin 19.04.2013.
- [68] Dickamp, M. J.: Zement-Merkblatt Betontechnik B 29. Selbstverdichtender Beton – Eigenschaften und Prüfung 7.2006.
- [69] Weber, H., Hullmann, H.: Porenbeton-Handbuch. Planen und bauen mit System. Wiesbaden: Bauverl. 2002.

## Abbildungsverzeichnis

BILD 1: ZEILENBau ALTE JAKOBSTRASSE .....	2
BILD 2: PROTOTYP 1, FASSADENELEMENT .....	3
BILD 3: PROTOTYP 3, BALKONANSCHLUSS .....	3
BILD 4: ZEITPLAN (STAND JANUAR 2016).....	10
BILD 5: PROJEKT BETEILIGTE.....	11
BILD 6: PRINZIP DER GESTEUERTEN POROSITÄT IM INFRALEICHTBETON; PROBEKÖRPER MIT KAPILLARROHRMATTEN FÜR WANDAKTIVIERUNG .....	14
BILD 7: FUNKTIONSWEISE DER KNICKSTABILISIERTEN DRUCKBEWEHRUNG .....	14
BILD 8: ENTWURF ABERTSHOFER/ TRATZ/ WINKLER .....	15
BILD 9: ENTWURF HAGSPIEL/ TANNENBERGER/ KOWALSKY .....	16
BILD 10: SMART MATERIAL HOUSE [3] .....	16
BILD 11: AUFBAU DES SMART MATERIAL HOUSE [4] .....	17
BILD 12: WANDELEMENT DES SMART MATERIAL HOUSE [4] .....	17
BILD 13: ENTWURF URBAN LIVING [5] .....	17
BILD 14: VERLAUF VON DRUCKFESTIGKEIT ÜBER ROHDICHTE VERSCHIEDENER DÄMMBETONE .....	19
BILD 15: EINFAMILIENHAUS BERLIN (FOTOS: W. DECHAU) .....	20
BILD 16: AMTSGERICHT FRANKFURT/ODER (ANSICHT 1; FOTO: P. RIESEBERG).....	21
BILD 17: DAVID CHIPPERFIELD ARCHITECTS (ANSICHT 1, INNENTREPPE; FOTOS: DAVID CHIPPERFIELD ARCHITECTS).....	22
BILD 18: EINFAMILIENHAUS H36, STUTTGART (ANSICHT 1) [20] .....	23
BILD 19: MONOHAUS, CHRISTINENSTRASSE (ANSICHT 1 UND 2; FOTO: J. KUNZE).....	24
BILD 20: VOLTA-ZENTRUM, BASEL (ANSICHT 1) [21].....	25
BILD 21: ENTWICKLUNG DER GESETZGEBUNG IN DEUTSCHLAND .....	27
BILD 22: ENEV – NACHWEISGRÖßEN – HT' GEMÄß ENEV 2009/2014/2016 [26] .....	28
BILD 23: VERGLEICH VERSCHIEDENER WANDAUFBAUTEN UNTER ANNAHME DES REFERENZWERTES U=0,28W/M²K .....	28
BILD 24: VERGLEICH VERSCHIEDENER WANDAUFBAUTEN UNTER DEM FIKTIVEN ANSATZ UM 20% VERSCHÄRFTER ANFORDERUNGEN .....	29
BILD 25: TYPOLOGIEN .....	32
BILD 26: SCHEMATISCHER AUFBAU EINES MEHRGESCHOSSIGEN WOHNHAUSES AUS ILC .....	35
BILD 27: MÖGLICHE GEBÄUDEHÖHEN BEI UNTERSCHIEDLICHEN FESTIGKEITSKLASSEN.....	36
BILD 28: SCHEMATISCHER GEBÄUDEAUFBAU MIT TRAGENDER AUßENWAND AUS ILC (ROT) .....	37
BILD 29: ANSCHLUSSDETAIL BALKON MIT FERTIGTEIL AUS ILC UND RÜCKVERANKERUNG (SCHEMATISCH) IN DER DECKENPLATTE .....	37
BILD 30: BAUTEILAUFBAU UND ISOTHERMENVERLAUF BEIM ANSCHLUSSDETAIL BALKON .....	37
BILD 31: SCHEMATISCHER GEBÄUDEAUFBAU KANTSTRASSE 126 MIT TRAGENDER AUßENWAND AUS ILC (ROT) .....	38
BILD 32: SCHEMATISCHER GEBÄUDEAUFBAU KANTSTRASSE 128 MIT TRAGENDER AUßENWAND AUS ILC (ROT) .....	38
BILD 33: SÜDFASSADE KANTSTRASSE 126 .....	39
BILD 34: SÜDFASSADE KANTSTRASSE 128 .....	39
BILD 35: BALKON KANTSTRASSE 126.....	39
BILD 36: BALKON KANTSTRASSE 126.....	39
BILD 37: URBAN LIVING ANSICHT [5].....	40
BILD 38: URBAN LIVING TRAGWERKSPRINZIP [5].....	40

BILD 39: URBAN LIVING LOGGIAFENSTER .....	41
BILD 40: ALTE JAKOBSTRAÙE VISUALISIERUNG.....	41
BILD 41: ALTE JAKOBSTRAÙE GRUNDRISS.....	42
BILD 42: ALTE JAKOBSTRAÙE DETAIL DECKENANSCHLUSS – LINKS BETONDECKE, RECHTS HOLZBALKENDECKE .....	42
BILD 43: KRACAUER PLATZ - LAGEPLAN.....	43
BILD 44: KRACAUER PLATZ – VISUALISIERUNG NORDFASSADE.....	43
BILD 45: KRACAUER PLATZ – AUSSCHNITT GRUNDRISS.....	43
BILD 46: KRACAUER PLATZ – FENSTERVERTEILUNG UND SCHALMUSTER.....	44
BILD 47: KRACAUER PLATZ – KONSTRUKTIONSSCHEMA MIT ILC (ROT), NORMALBETON (SCHWARZ) UND HOLZKONSTRUKTION (GE-STRICHELT).....	44
BILD 48: STADTVILLA – GRUNDRISS EG.....	45
BILD 49: STADTVILLA – GRUNDRISSE.....	46
BILD 50: STADTVILLA – ANSICHT/VISUALISIERUNG.....	46
BILD 51: MEISTERHÄUSER DESSAU, BRUNO/ FIORETTI/ MARQUEZ, FOTO: CHRISTOPH ROKITTA, BERLIN.....	46
BILD 52: STADTVILLA – DETAIL DACH.....	47
BILD 53: MÖGLICHE GESCHOSSZAHLEN IN ABHÄNGIGKEIT DER WANDSTÄRKE UND REZEPTUR.....	49
BILD 54: KORROSION IN ABHÄNGIGKEIT DES PH-WERTES [29].....	50
BILD 55: BOHRKERNENTNAHME (D = 150 MM; L = 135 MM) [29].....	50
BILD 56: MESSUNG DER CARBONATISIERUNGSTIEFE AM ILC 2.0 [3] IN [29].....	51
BILD 57: SPANNUNGS-DEHNUNGS-LINIE FÜR ILC 800; DRUCKFESTIGKEITEN $F_{ILCK}$ UND $F_{ILCD}$ (BASIEREND AUF [28]).....	52
BILD 58: KARTENAUSSCHNITT AUS STRATEGISCHER LÄRMKARTE (AUSGABE 2013) BEI TAG [49].....	62
BILD 59: KARTENAUSSCHNITT AUS STRATEGISCHER LÄRMKARTE (AUSGABE 2013) BEI NACHT [49].....	62
BILD 60: DARSTELLUNG FÜR DEN NACHWEIS DER GLEICHWERTIGKEIT FÜR MONOLITHISCHES MAUERWERK: GESCHOSSDECKE [54].....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
BILD 61: DARSTELLUNG FÜR DEN NACHWEIS DER GLEICHWERTIGKEIT FÜR MONOLITHISCHES MAUERWERK: FENSTERLAUBUNG UND FENSTERBRÜSTUNG [54].....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
BILD 62 : PROTOTYP 1 .....	69
BILD 63: PROTOTYP 2 .....	70
BILD 64: PROTOTYP 3 .....	71
BILD 65: PROTOTYP 4 .....	72
BILD 66: ANSCHLUSSDETAIL FÜR RÜCKVERANKERTE BALKONELEMENTE AUS INFRALEICHTBETON.....	75
BILD 67: AUS DER FASSADE ENTWICKELTES BALKONELEMENT AUS INFRALEICHTBETON.....	76
<i>BILD 68: DECKENANSCHLUSS NORMALBETONDECKE IN AUßENWAND AUS INFRALEICHTBETON.....</i>	<i>77</i>
<i>BILD 69: FENSTERANSCHLUSSDETAIL – FENSTER MITTIG MIT KONVENTIONELLEM FENSTERANSCHLAG.....</i>	<i>78</i>
<i>BILD 70: FUßPUNKTDETAIL – KELLER AUS WU-BETON MIT VORLAUFENDER SCHALE AUS ILC.....</i>	<i>79</i>
<i>BILD 71: ATTIKADETAIL – KELLER AUS WU-BETON MIT VORLAUFENDER SCHALE AUS ILC.....</i>	<i>80</i>
BILD 70: MODELLIERTER RAUM WELCHER IN DER SIMULATIONSUMGEBUNG TRNSYS ABGEBILDET WURDE ..	82
BILD 71: TEMPERATURVERLAUF EINES JAHRES .....	84
BILD 72: TEMPERATURVERLAUF EINER SOMMERWOCHE: .....	85
BILD 73: AUFTRETENDE HÄUFIGKEITEN DER OPERATIVEN TEMPERATUREN.....	86
BILD 74: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER OPERATIVEN TEMPERATUR IM SOMMER.....	87
BILD 75: HÄUFIGKEITSVERTEILUNG DER OPERATIVEN TEMPERATUR IM SOMMER BEI EINER NACHTLUFTSPÜLUNG .....	88
BILD 76: VARIANTE 1 MONOLITHISCH SOWIE VARIANTE 2 MIT AKTIVER DÄMMUNG.....	92
BILD 77: WASSERMASSENSTROM DER AKTIVEN DÄMMUNG VOM 15.02. BIS 21.02.....	92
BILD 78: OBERFLÄCHENTEMPERATUREN AUF DER INNENSEITE DER AUßENWAND FÜR DIE MONOLITHISCHE VARIANTE SOWIE DIE VARIANTE MIT AKTIVER DÄMMUNG .....	94

BILD 79: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER EINBINDUNG DER GRAUWASSERNUTZUNG IN DIE AKTIVE DÄMMUNG .....	96
BILD 80: OPTIMIERUNG DER MONOLITHISCHEN ILC-AUßENWAND MIT EINER AKTIVEN DÄMMUNG .....	97
BILD 81: WUFI® SIMULATIONSMODELL .....	100
BILD 82: MATERIALEIGENSCHAFTEN INKLUSIV ERMITTELTEN SORPTIONSISOTHERMENSTEIGUNG ILC .....	101
BILD 83: MATERIALEIGENSCHAFTEN DAMPFSPERRE .....	102
BILD 84: MATERIALEIGENSCHAFTEN LEHMPUTZ.....	102
BILD 85: MATERIALEIGENSCHAFTEN BETON .....	103
BILD 86: MATERIALEIGENSCHAFTEN GIPSPUTZ.....	103
BILD 87: RELATIVE FEUCHTE IM RAUM FÜR VERSCHIEDENE ILC WANDAUFBAUTEN VOM 17. JUNI BIS 07. JULI .....	104
BILD 88: ABSOLUTE FEUCHTE IM RAUM FÜR VERSCHIEDENE ILC WANDAUFBAUTEN VOM 17. JUNI BIS 07. JULI.....	105
BILD 89: TEMPERATUR IM RAUM FÜR VERSCHIEDENE ILC WANDAUFBAUTEN VOM 17. JUNI BIS 07. JULI.....	105
BILD 90: RELATIVE LUFTFEUCHTIGKEIT IM RAUM FÜR VERSCHIEDENE ILC WANDAUFBAUTEN ÜBER EIN JAHR .....	106
BILD 91: HÄUFIGKEIT DER RAUMLUFTFEUCHTE AUßERHALB 30-60% RELATIVER FEUCHTE IM RAUM FÜR VERSCHIEDENE ILC WANDAUFBAUTEN.....	107
BILD 92: TEMPERATUR IM RAUM FÜR VERSCHIEDENE WANDAUFBAUTEN VOM 17. JUNI BIS 07. JULI .....	108
BILD 93: RELATIVE FEUCHTE IM RAUM FÜR VERSCHIEDENE WANDAUFBAUTEN VOM 17. JUNI BIS 07. JULI ..	109
BILD 94: ABSOLUTE FEUCHTE IM RAUM FÜR VERSCHIEDENE WANDAUFBAUTEN VOM 17. JUNI BIS 07. JULI ..	110
BILD 95: RELATIVE LUFTFEUCHTIGKEIT IM RAUM FÜR VERSCHIEDENE WANDAUFBAUTEN ÜBER EIN JAHR....	111
BILD 96: HÄUFIGKEIT DER RAUMLUFTFEUCHTE AUßERHALB 30-60% RELATIVER FEUCHTE IM RAUM FÜR VERSCHIEDENE WANDAUFBAUTEN .....	112
BILD 97: MÖGLICHE WÄRMEBRÜCKEN IN EINEM GEBÄUDE [58] .....	114
BILD 98: ZWEI ANALYSIERTE WÄRMEBRÜCKENDETAILED EINES BALKONANSCHLUSSES.....	115
BILD 99: ZUORDNUNG DER MATERIALIEN BEZOGEN AUF DIE ZWEI UNTERSUCHTEN BALKONANSCHLUSSDETAILS .....	116
BILD 100: U-WERTE HOMOGENE WAND SOWIE VERGLASUNG .....	117
BILD 101: OBERER FENSTERANSCHLUSS MIT UND OHNE TEMPERATURVERLAUF .....	118
BILD 102: UNTERER FENSTERANSCHLUSS MIT UND OHNE TEMPERATURVERLAUF.....	119
BILD 103: OBERER UND UNTERER FENSTERANSCHLUSS MIT DEN BERECHNETEN $\Psi$ -WERTEN .....	120
BILD 104: ZULÄSSIGER $\Psi$ -WERT FÜR EINEN FENSTERANSCHLUSS AN EINEM MONOLITHISCHEN MAUERWERK [54].....	120
BILD 105: FENSTERANSCHLUSS AN EINEM MONOLITHISCHEN MAUERWERK [54] .....	122
BILD 106: BALKONPLATTE AN EINEM AUßEN GEDÄMMTEN MAUERWERK [54].....	123
BILD 107: ANKÜNDIGUNG BAUPRAKTIKUM IN DER UNIVERSITÄT .....	125
BILD 108: SKIZZE SCHALUNGSKÖRPER AUS STYROPOR.....	126
BILD 109: SCHALPLAN PROTOTYP 1 .....	126
BILD 110: AUFBAU SCHALUNG PROTOTYP 1.....	126
BILD 111: BEWEHRUNG PROTOTYP 1.....	126
BILD 112: BEWEHRUNG PROTOTYP 1.....	127
BILD 113: FRISCHBETONPRÜFUNG NACH ANKUNFT .....	127
BILD 114: BETONIEREN VON PRÜFKÖRPERN .....	127
BILD 115: BETONAGE PROTOTYP 1.....	128
BILD 116: BETONAGE PROTOTYP 1.....	128
BILD 117: AUSSCHALEN PROTOTYP 1 .....	129
BILD 118: BEWEHRUNG PROTOTYP 2.....	131
BILD 119: GESAMTANSICHT BEWEHRUNG PROTOTYP 2 .....	131
BILD 120: MESSSTÄBE PROTOTYP 2.....	131

BILD 121: DETAIL MESSSTÄBE PROTOTYP 2 .....	131
BILD 122: BETONAGE PROTOTYP 2.....	132
BILD 123: BETONAGE PROTOTYP 2.....	132
BILD 124 (OBEN): KANTENAUSBILDUNG PROTOTYP 2.....	132
BILD 125 (LINKS): OBERFLÄCHE PROTOTYP 2 MIT SICHTBAREN BETONIERHORIZONTEN .....	132
BILD 126 (OBEN): VORBEREITUNG BETONAGE MIT RINNE.....	133
BILD 127 (RECHTS): TRANSPORTANKER BEWEHRUNG MIT BÜGELN .....	133
BILD 128 (OBEN): PROTOTYP 2 IM SCHLAGREGENSTAND .....	134
BILD 129 (RECHTS): PROTOTYP 2 IM SCHLAGREGENSTAND (VON HINTEN) .....	134
BILD 130: ÖFFNUNG DES BAUTEILES IM BEREICH DES FENSTERSTURZES .....	135
BILD 131: EINDRINGTIEFE VON WASSER .....	135
BILD 132: EINDRINGTIEFE IM BEREICH DES FENSTERBRETTES – DUNKLE FLÄCHEN SIND DURCHFUCHTET. ....	135
BILD 133: SITUATION NACH 1 TAG, OBERFLÄCHE ABGETROCKNET, FEUCHTE IM INNEREN DES BAUTEILES . ....	135
BILD 134: STEHENDE SCHALUNG BALKONELEMENT .....	136
BILD 135: EINBRINGEN DER BEWEHRUNG .....	136
BILD 136 (OBEN): AUSSCHALEN DES PROTOTYPS.....	137
BILD 137 (LINKS): BEWEHRUNG FÜR NORMALBETONDECKE.....	137
BILD 138: LIEGENDE SCHALUNG FÜR 2. VARIANTE .....	137
BILD 139: BEWEHRUNG DER 2. VARIANTE .....	137
BILD 140: HERSTELLUNG DES 2. WANDSTUMMELS AUS TRANSPORTBETON .....	138
BILD 141: HERSTELLUNG DES 2. WANDSTUMMELS AUS TRANSPORTBETON INKL. TEMPERATURFÜHLER (SCHWARZES KABEL) .....	138
BILD 142 (OBEN): PLATTENBIEGEMASCHINE MIT VERSCHIEBBAREN PRÜFPORTALEN .....	139
BILD 143 (RECHTS UNTEN): STAHLTRÄGER ZUR LASTVERTEILUNG, WEGAUFNEHMER AN BALKONSPITZE ...	139
BILD 144: MESSFÜHLER ZUR MESSUNG VON SPANNUNGEN AUF DER BAUTEILOBERFLÄCHE.....	139
BILD 145: VERSUCHSAUFBAU .....	140
BILD 146: VERSUCHSABLAUF .....	140
BILD 147: DOKUMENTATION DER RISSE .....	141
BILD 148: ABRUCH DES VERSUCHES, QUERKRAFTVERSAGEN .....	141
BILD 149: SCHALUNG MIT EINGEHÄNGTEM BEWEHRUNGSKORB .....	142
BILD 150: BEARBEITUNG DER OBERFLÄCHE DES SCHALUNGSKÖRPERS .....	142
BILD 151: ZUSAMMENBAU DER SCHALUNG .....	142
BILD 152: MOFI-ANKERTEIL ZUM SPÄTEREN AUFSTELLEN .....	142
BILD 153: ELLIOTTI PINE C+/C BFU 100 [HTTP://WWW.PERI.COM/DE].....	145
BILD 154: PERI BIRCH [HTTP://WWW.PERI.COM/DE] .....	145
BILD 155: FINPLY PRO [HTTP://WWW.PERI.COM/DE] .....	145
BILD 156: PERI BETO-S [HTTP://WWW.PERI.COM/DE].....	145
BILD 157: LINKS: PT2-1 AUS ILC 800 OHNE EINFÜLLHILFE; RECHTS: PT2-2 AUS ILC 600 MIT EINFÜLLHILFE .....	148
BILD 158: ERGEBNIS DER BRETHOLZSTRUKTUR [65].....	150
BILD 159: ERGEBNIS DER RIPPENSTRUKTUR [65] .....	150
BILD 160: ERGEBNIS DER WELLENSTRUKTUR [65].....	150
BILD 161: ERGEBNIS DER NOPPENSTRUKTUR [65].....	150
BILD 162: ERGEBNIS DER FOTOGRAVUR (LINKS: ENTGEGEN DEM LICHTEIFALL; RECHTS: MIT DEM LICHTEIFALL) [65] .....	150
BILD 163: ERGEBNIS DER OSB-SCHALUNG [65].....	151
BILD 164: ERGEBNIS DER BRETHOLZSCHALUNG [65] .....	151
BILD 165: ERGEBNIS DER SCHALUNG MIT FILTERVLIES [65] .....	151
BILD 166: ERGEBNISSE DER GRÜNFÄRBUNG (LINKS: 4 M-%; MITTE: 5 M-%; RECHTS: 5 M-%) [65].....	152

BILD 167: ERGEBNIS DER ROTFÄRBUNG (5 M-%)(LINKS), ERGEBNIS DER SCHWARZFÄRBUNG (5 M-%) (RECHTS) [65].....	152
BILD 169: OBERFLÄCHE MIT HARTWACHS [65] .....	153
BILD 170: OBERFLÄCHE MIT STEINÖL [65].....	153
BILD 171: OBERFLÄCHE MIT LEINÖL [65].....	153
BILD 172: SCHLEIFGERÄT (LINKS) UND OBERFLÄCHE NACH DEM SCHLEIFEN (RECHTS) [66].....	154
BILD 173: ABGESÄUERTE (LINKS) UND UNBEARBEITETE OBERFLÄCHE (RECHTS) [66] .....	154
BILD 174: HERGESTELLTE STOPFEN AUS BETON (LINKS) UND EINGESETZT (RECHTS) [66] .....	155
BILD 175: IN DEN PROBEKÖRPER EINGESETZTER BETONSTOPFEN MIT SPACHELMASSSE [66] .....	155
BILD 176: LINKS: BETONIERHORIZONT MIT AUßENRÜTLER VERMIEDEN (HORIZONT MIT BLEISTIFT MARKIERT); RECHT: AUFGESCHNITTENER PROBEKÖRPER [64] .....	156
BILD 177: BEFÜLLEN DER PROBEKÖRPER VON [64] MIT EINEM BETONKÜBEL.....	157
BILD 178: ÜBERSICHT DER REALISIERTEN PROTOTYPEN .....	158
BILD 179: PROTOTYP 1 CA. 4 WOCHEN NACH FERTIGSTELLUNG .....	159
BILD 180: PROTOTYP 2 IN ILC 800 (LINKS) UND ILC 600 (RECHTS).....	160
BILD 181: PROTOTYP 4 – FASSADENELEMENT AUS INFRALEICHTBETON.....	161
BILD 182: OBERER UND UNTERE FENSTERANSCHLUSS FÜR EINE 50CM DICKE ILC-WAND.....	187
BILD 183: OBERER UND UNTERE FENSTERANSCHLUSS MIT ZWISCHENDECKE FÜR EINE 50CM DICKE ILC-WAND .....	188
BILD 184: OBERER UND UNTERE FENSTERANSCHLUSSES MIT ZWISCHENDECKE UND BALKONANSCHLUSS FÜR EINE 50CM DICKE ILC-WAND .....	189
BILD 185: OBERER UND UNTERE FENSTERANSCHLUSSES MIT ZWISCHENDECKE UND BALKONANSCHLUSS FÜR EINE 50CM DICKE ILC-WAND MIT KONSTRUKTIONSTECHNISCH ANGEPASSTEM ANSCHLUSS.....	190
BILD 186: FENSTEREBENE IN DER MITTE DES BAUTEILS FÜR EINE 50CM DICKE ILC-WAND .....	191
BILD 187: BALKONANSCHLUSS MIT GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF FÜR EINE 50CM DICKE ILC-WAND	192
BILD 188: BALKONANSCHLUSS MIT ABGESCHRÄGTEM UND GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF FÜR EINE 50CM DICKE ILC-WAND.....	193
BILD 189: BALKONANSCHLUSS MIT MITTIGER ANORDNUNG DES FENSTERS SOWIE ABGESCHRÄGTEM UND GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF FÜR EINE 50CM DICKE ILC-WAND .....	194
BILD 190: BALKONANSCHLUSS MIT ÄUßERER ANORDNUNG DES FENSTERS SOWIE ABGESCHRÄGTEM UND GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF FÜR EINE 50CM DICKE ILC-WAND .....	195
BILD 191: OBERER UND UNTERE FENSTERANSCHLUSSES MIT ZWISCHENDECKE UND BALKONANSCHLUSS FÜR EINE 62CM DICKE ILC-WAND .....	196
BILD 192: BALKONANSCHLUSS MIT ABGESCHRÄGTEM ZWISCHENBODENKOPF FÜR EINE 62CM DICKE ILC-WAND .....	197
BILD 193: BALKONANSCHLUSS MIT GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF FÜR EINE 62CM DICKE ILC-WAND	198
BILD 194: BALKONANSCHLUSS MIT ABGESCHRÄGTEM UND GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF FÜR EINE 62CM DICKE ILC-WAND.....	199
BILD 195: BALKONANSCHLUSS MIT MITTIGER ANORDNUNG DES FENSTERS SOWIE ABGESCHRÄGTEM UND GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF FÜR EINE 62CM DICKE ILC-WAND .....	200
BILD 196: BALKONANSCHLUSS MIT MITTIGER ANORDNUNG DES FENSTERS SOWIE ABGESCHRÄGTEM UND GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF FÜR EINE 62CM DICKE ILC-WAND .....	201

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 1: DÄMMBETONE VON LEICHTZUSCHLAGHERSTELLERN IM VERGLEICH ZUM INFRALEICHTBETON .....	19
TABELLE 2: VERGLEICH DER BETONREZEPTUREN DER REFERENZGEBÄUDE .....	26
TABELLE 3: ÜBERSICHT TYPENENTWÜRFE .....	32
TABELLE 4: PARAMETERTABELLE ZUR ENTWURFLICHEN UND STATISCHEN VORBEMESSUNG .....	48
TABELLE 5: PARAMETER ILC GEMÄß REFERENZGEBÄUDE (SITE-0) .....	48
TABELLE 6: ZUSAMMENFASSUNG DER ILC-EIGENSCHAFTEN [28, KAP. 3.3.6] .....	52
TABELLE 7: SCHWINDMAßE AUS STABZUGVERSUCHEN [28] .....	54
TABELLE 8: BESTIMMUNG DER ENDKRIECHZAHL FÜR ILC 800 AUS VERSUCHSERGEBNISSEN .....	55
TABELLE 9: ANNAHME ZU DEN GRUNDKRIECHZAHLEN DER ILC FAMILIE .....	56
TABELLE 10: BEMESSUNGSWERT DER VERBUNDSPANNUNG FÜR ILC .....	59
TABELLE 11: SCHALLDÄMMMAß VON INFRALEICHTBETON, GEMÄß DIN 4109, BEIBLATT 1 [47], EINSCHALIGE, BIEGESTEIFE WAND .....	61
TABELLE 12: ..... GEPLANTE PROTOTYPEN GEMÄß FORSCHUNGSANTRAG .....	<b>ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.</b>
TABELLE 13: ..... VOLUMEN DER PROTOTYPEN .....	73
TABELLE 14: VERGLASUNGSGÜTE DER 3-FACH WÄRMESCHUTZVERGLASUNG .....	82
TABELLE 15: ALS VARIANTEN VERWENDETE BAUWEISEN, AUSGELEGT AUF DENSELBE U-WERT: 1 LEICHTE BAUWEISE 2 ILC 3 SCHWERE BAUWEISE 4 ILC MIT KAPILLARROHREN (AKTIVE DÄMMUNG) .....	83
TABELLE 16: ALS VARIANTEN VERWENDETE BAUWEISEN: .....	91
TABELLE 17: ENERGIEBEDARFE FÜR VARIANTE 1 MONOLITHISCH UND VARIANTE 2 MIT AKTIVER DÄMMUNG ..	93
TABELLE 18: GERICHTETE NORMTEMPERATUREN UND WÄRMEÜBERGANGSWIDERSTÄNDE FÜR INNEN UND AUßEN .....	115
TABELLE 19: WÄRMELEITFÄHIGKEITEN DER MATERIALIEN .....	116
TABELLE 20: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTES FÜR DEN OBEREN FENSTERANSCHLUSS .....	118
TABELLE 21: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTES FÜR DEN UNTEREN FENSTERANSCHLUSS .....	119
TABELLE 22: PRÜFERGEBNISSE DER MODIFIZIERTEN REZEPTUR ILC 800 FÜR DEN TRANSPORTBETON DES PROTOTYPS 1 .....	129
TABELLE 23: UNTERSCHIEDLICHE AUSFÜHRUNGEN VON PROTOTYP 2 .....	130
TABELLE 24: VERWENDETE SCHALTAFFELN .....	145
TABELLE 25: RESULTIERENDE BETONOBERFLÄCHEN .....	146
TABELLE 25: UNTERSUCHUNG AUSSCHALFRISTEN BEI UNTERSCHIEDLICHEM SCHALMATERIAL .....	149
TABELLE 26 SPACHTELMASSE FÜR DEN ILC 800 [66] .....	155
TABELLE 27: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTES FÜR DEN OBEREN UND UNTEREN FENSTERANSCHLUSS .....	187
TABELLE 28: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS FÜR DEN OBEREN UND UNTEREN FENSTERANSCHLUSS MIT ZWISCHENDECKE .....	188
TABELLE 29: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS FÜR DEN OBEREN UND UNTEREN FENSTERANSCHLUSS MIT ZWISCHENDECKE UND BALKONANSCHLUSS (50CM ILC-WAND) .....	189
TABELLE 30: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS FÜR DEN OBEREN UND UNTEREN FENSTERANSCHLUSS MIT ZWISCHENDECKE UND BALKONANSCHLUSS UND KONSTRUKTIONSTECHNISCH ANGEPASTEM ANSCHLUSS (50CM ILC-WAND) .....	190
TABELLE 31: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS MIT FENSTEREBENE IN DER MITTE DES BAUTEILS (50CM ILC- WAND) .....	191
TABELLE 32: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS MIT GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF (50CM ILC-WAND) ...	192

TABELLE 33: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS MIT ABGESCHRÄGTEM UND GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF (50CM ILC-WAND).....	193
TABELLE 34: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS MIT MITTIGER ANORDNUNG DES FENSTERS SOWIE ABGESCHRÄGTEM UND GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF (50CM ILC-WAND) .....	194
TABELLE 35: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS MIT ÄUßERER ANORDNUNG DES FENSTERS SOWIE ABGESCHRÄGTEM UND GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF (50CM ILC-WAND) .....	195
TABELLE 36: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS FÜR DEN OBEREN UND UNTEREN FENSTERANSCHLUSS MIT ZWISCHENDECKE UND BALKONANSCHLUSS (62CM ILC-WAND) .....	196
TABELLE 37: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS MIT ABGESCHRÄGTEM ZWISCHENBODENKOPF (62CM ILC-WAND) .....	197
TABELLE 38: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS MIT GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF (62CM ILC-WAND) ...	198
TABELLE 39: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS MIT ABGESCHRÄGTEM UND GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF (62CM ILC-WAND).....	199
TABELLE 40: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS MIT MITTIGER ANORDNUNG DES FENSTERS SOWIE ABGESCHRÄGTEM UND GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF (62CM ILC-WAND) .....	200
TABELLE 41: BERECHNUNG DES $\Psi$ -WERTS MIT MITTIGER ANORDNUNG DES FENSTERS SOWIE ABGESCHRÄGTEM UND GEDÄMMTEM ZWISCHENBODENKOPF (62CM ILC-WAND) .....	201

**Anhang: Bemessung Bauteile Referenzgebäude**

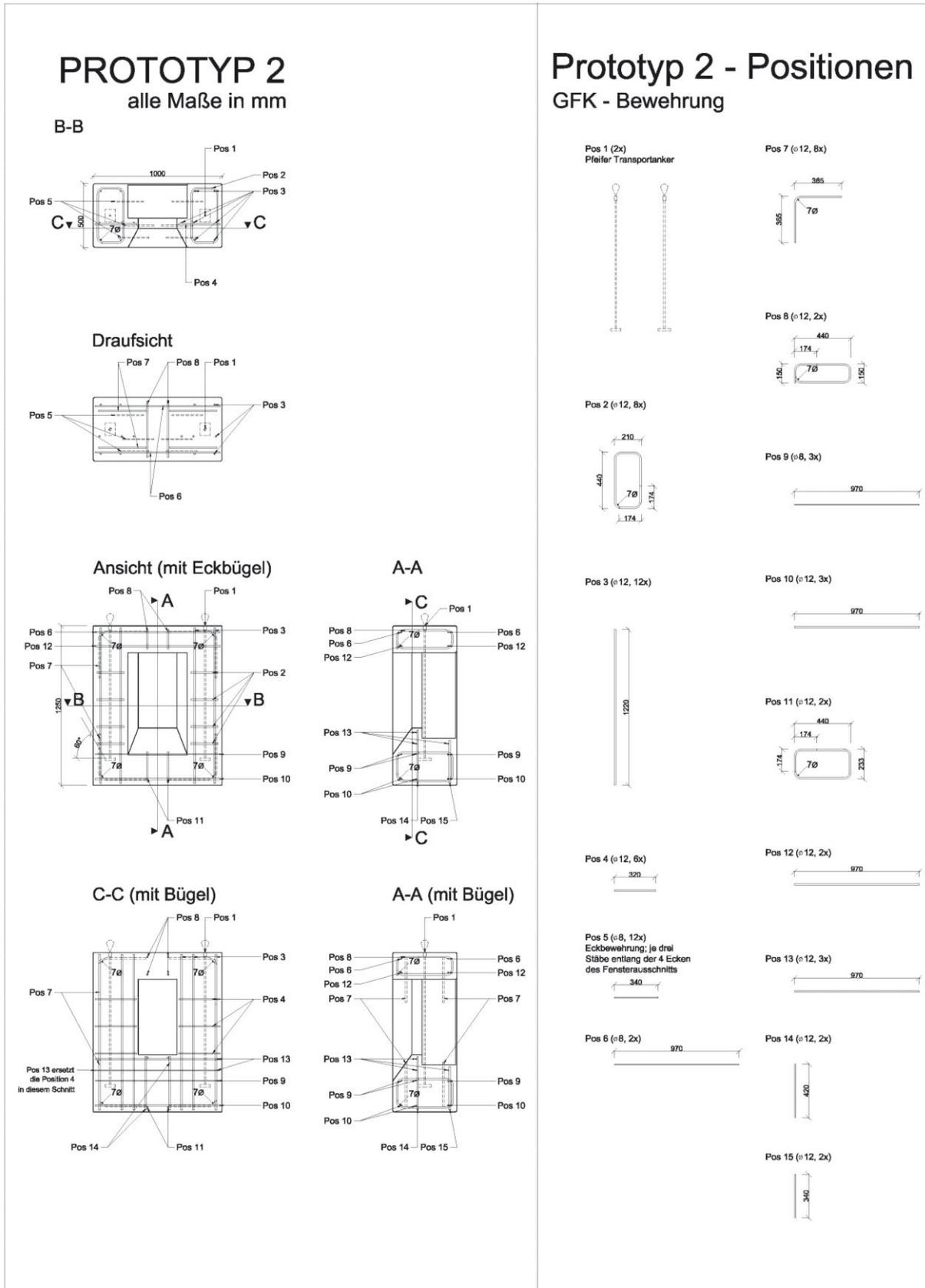
<b>Bemessung Bauteile Referenzgebäude</b>				
grau hinterlegt: manuell ausfüllen				
			Anteil ständige Lasten: g,char	Anteil Nutz- lasten: q,char
				Bemerkung
Geschosszahl	7			
Geschosshöhe EG	4 m			
Geschosshöhe OGS	3 m			
Gesamthöhe	22 m			
Dicke ILB-Außenwand	0,58 m			
<b>Lastannahmen:</b>				
<b>Lasten aus Geschossdecken</b>				
g k,Decken =	9,2 kN/m <sup>2</sup>	9,2		
q k,Decken =	2,7 kN/m <sup>2</sup>		2,7	
p d,Decken = 1,35*gk+1,5*qk =	16,5 kN/m <sup>2</sup>	9,2	2,7	
Spannweite Decke ca. l =	7,4 m			Spannweite zw. NB-Kern und hinterer Fassade
Auflagerlinienlast auf Außenwand je Etage:				
A d,Decken=0,5*l*pd=	61,1 kN/m	34,1	10,0	je Etage (Bem.: Auflagerlinienlast könnte nach Schneider 5.54, 5b, dreiseitig eingespannt, mit 0,366*Fd*l angesetzt werden - 0,5 auf sicherer Seite)
Abminderung Nutzlasten für Bemessung vertikaler Tragglieder				
Stockwerkzahl n =	6,0			(Geschosszahl - Dachdecke)
alpha = 0,7 + 0,6/n =	0,8			
-> q k, Decken abg.	2,2 kN/m <sup>2</sup>		2,2	
p d,Decken abg. = 1,35*gk+1,5*qk =	15,7 kN/m <sup>2</sup>	9,2	2,2	
A d,Decken, abg.=	58,1 kN/m	34,1	8,0	je Etage, abgemindert
<b>Lasten aus Dachdecke</b>				
g k,Dach =	9,4 kN/m <sup>2</sup>			
q k,Dach =	4,0 kN/m <sup>2</sup>			
p d,Dach = 1,35*gk+1,5*qk =	18,6 kN/m <sup>2</sup>	9,4	4,0	
Spannweite Dach ca. l =	7,4 m			Spannweite zw. NB-Kern und hinterer Fassade
Auflagerlinienlast auf Außenwand Dach:				
A d,Dach =0,5*l*pd=	68,9 kN/m	34,6	14,8	aus Dach
Gesamtlast im EG:				
A d,Decken,ges = A Dach + A Decken, abg.* (Geschosszahl-1) =				
A d,Decken,ges =	417,4 kN/m	239,4	62,8	über alle Etagen im EG
<b>Lasten aus Balkonen</b>				
g k,Balkon =	5,6 kN/m <sup>2</sup>			
q k,Balkon =	4,0 kN/m <sup>2</sup>			
p d,Balkon = 1,35*gk+1,5*qk =	13,5 kN/m <sup>2</sup>	5,6	4,0	
Einzugsbreite =	1,5 m			
A d,Balkon=	20,3 kN/m	8,4	6,0	je Etage
<b>Winddruck auf Fassaden</b>				
Windzone 2				
Bauwerk über 25m Höhe				
we = qp (ze) * cpe				
b =	20,8 m			hier: Wind auf Längsseite
d =	14,2 m			
h =	22,0 m			
h/d =	1,5			
A>10m <sup>2</sup> -> cpe=cpe10				
cpe,10 (Druck) =	0,80			
cpe,10 (Sog) =	-0,50			
qb =	0,39 kN/m <sup>2</sup>			Windzone II für 7m < z <= 50m Summe aus Druck und Sog (Rückseite, nicht Innen)
Innendruck vernachlässigbar, Fenster u. Türen dürfen als geschlossen angesetzt werden				
<b>Materialkennwerte:</b>				
Trockenrohdichte	800 kg/m <sup>3</sup>			
Druckfestigkeit fck=	11,0 MN/m <sup>2</sup>			
fcd=0,75*fck/1,5=	5,5 MN/m <sup>2</sup>			
fctm =	0,87 MN/m <sup>2</sup>			
E-Modul Ecm =	3900 MN/m <sup>2</sup>			
Wichte Stahl-ILB	10,00 MN/m <sup>3</sup>			
Endkriechzahl	3,20			
gewählt: GFK- Bewehrung:				
E <sub>GFK,ZUG</sub> =	60000 N/mm <sup>2</sup>			
f <sub>yk</sub> =	445 N/mm <sup>2</sup>			
f <sub>yk</sub> =	580 N/mm <sup>2</sup>			

<b>Fenstersturz:</b>				auf sicherer Seite als Einfeldträger betrachtet
maßgebend: Sturz aus Rückfront mit Balkonlasten				
Sturzlänge l <sub>st</sub> =	1,8 m			
Sturzhöhe h <sub>st</sub> =	0,6 m			Abstand zw. Fenstern 0,9m -> abzüglich Decke ca. 30cm
Sturzbreite b <sub>st</sub> =	0,58 m			
d <sub>1</sub> =	0,071			Annahme: c <sub>nom</sub> = 6,5cm für R90
d =	0,529 m			
Höhe Wandabschnitt oberhalb Fenstersturz:				
Belastung:				
Eigengewicht Sturz g <sub>k,St</sub> =	3,5 kN/m	3,5		(je nach Gebäude ggf. EG des Wandabschnitts oberhalb des Sturzes bis zum nächsten Fenster ergänzen)
aus Decke: A <sub>d</sub> ,Decken =	61 kN/m	34,1	10,0	
aus Balkon: A <sub>d</sub> ,Balkon =	20,3 kN/m	8,4	6,0	
Gesamtlast p <sub>d,St,ges</sub> =	86,1 kN/m	46,0	16,0	
<b>Biegung</b>				
Med = q <sup>l</sup> <sup>2</sup> /8 =	34,9 kNm			
μ <sub>ed</sub> = Med/(b*d <sup>2</sup> *f <sub>cd</sub> )	0,039			
ω <sub>1</sub> =	0,0411			gem. Dissertation A. Hücker
A <sub>f</sub> = (ω <sub>1</sub> *b*d*f <sub>cd</sub> )/f <sub>td</sub> =	1,56 cm <sup>2</sup>			
A <sub>fu</sub> gewählt =	2,01 cm <sup>2</sup>			4xd=8
A <sub>fo</sub> gewählt =	1,01 cm <sup>2</sup>			2xd=8
				Mindestbügelbewehrung mit ds=10mm; s <sub>max</sub> ≤ 0,25*h bzw. 200mm
<b>Querkraft</b>				
Einwirkung Ved :				direkte Lagerung, Ved im Abstand d
d =	0,529 m			
Gesamtlast p <sub>d,St,ges</sub> =	86 kN/m	0,0	0,0	
Ved =	77,5 kN			
Ved <sub>red</sub> =	31,9 kN			
b/h =	0,97			wenn b/h < 5 --> Querkraftbewehrung anordnen
Querkraftwiderstands V <sub>rd,c</sub> für Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung				
				gemäß Schöck ComBAR Zulassung
				Das Verhalten von ILC ist noch nicht explizit untersucht! (siehe auch INBIG Bericht Kap. 3.3.3
$V_{rd,ct} = (0,138/\gamma_c \cdot \kappa \cdot \eta_1 \cdot \left(100 \cdot \rho_l \cdot \frac{E_f}{E_g \cdot f_{lck}}\right)^{\frac{1}{3}}) \cdot b_w \cdot d$				
mit				
η <sub>1</sub> = 0,4+0,6*(ρ/2200) =	0,618			
κ = 1+(200/d) <sup>0,5</sup> =	1,61			
ρ <sub>l</sub> = A <sub>sl</sub> /(b*d) =	0,0010			
V <sub>rd,ct</sub> =	19,06 kN			
-> Erhöhung des Längsbewehrungsgrades oder Berechnung nach Näherungsverfahren aus Bemessungskonzept Schöck ComBAR				
hier: Erhöhung der Längsbewehrung:				
A <sub>fu</sub> gewählt =	7,92 cm <sup>2</sup>			6xd=12
A <sub>fo</sub> gewählt =	6,79 cm <sup>2</sup>			3xd=12
ρ <sub>l</sub> = A <sub>sl</sub> /(b*d) =	0,0048			
V <sub>rd,ct</sub> =	32,31 kN			
Hinweis: aus wirtschaftlichen Gründen sollte der Einsatz rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung gemäß ComBAR bemessungskonzept geprüft werden				Hinweis: ggf. ist ein Nachweis für Torsion durch ausmittige Auflagerung der Decken auf Sturz zu führen
A <sub>fu</sub> gewählt =	7,92 cm <sup>2</sup>			
A <sub>fo</sub> gewählt =	6,79 cm <sup>2</sup>			
<b>Gebrauchstauglichkeit:</b>				
Querschnittswerte:				
φ <sub>∞</sub> =	3,2			
E <sub>GfK,ZUG</sub> =	60000 N/mm <sup>2</sup>			
E <sub>c,eff</sub> = E <sub>lcm</sub> / (1+ φ <sub>∞</sub> ) =	929 N/mm <sup>2</sup>			
α <sub>e,∞</sub> =	65			
ξ <sub>∞</sub> = (α <sub>e,∞</sub> *ρ <sub>1</sub> *(2+α <sub>e,∞</sub> *ρ <sub>1</sub> )) <sup>0,5</sup> - α <sub>e,∞</sub> *ρ <sub>1</sub>				
ρ <sub>1</sub> = A <sub>s,u,gew</sub> / (b*d) =	0,00258			
ξ <sub>∞</sub> =	0,434			
x <sub>∞</sub> = ξ <sub>∞</sub> * d =	0,230 m			
z <sub>∞</sub> =	0,452 m			
<b>Spannungsnachweis:</b>				
Betondruckspannung σ <sub>mac</sub> <= 0,45 f <sub>ck</sub> (wenn Kriechen relevant, unter quasi-ständiger Lastkombination)				
ψ <sub>2l</sub> =	0,3			für Nutzlasten Kat. A/B
perm. Gesamtlast p <sub>k,St,ges</sub> =	50,8			quasi-ständige Einwirkungskombination
M <sub>Ed,ständig</sub> = q <sup>l</sup> <sup>2</sup> /8 =	21 kNm			quasi-ständige Einwirkungskombination
σ <sub>mac</sub> = 2*M <sub>Ed,ständig</sub> /(b*x <sub>∞</sub> *z <sub>∞</sub> ) =	0,7 MN/m <sup>2</sup>			
0,45*f <sub>ck</sub> =	5,0 MN/m <sup>2</sup>			gemäß Faust keine Änderung für LB notwendig (dementsprechend Berechnung Querschnittswerte hier analog SBT)
<b>Bewehrungsspannung σ<sub>f</sub> &lt;= 0,8 f<sub>fk</sub> (unter charakt. Kombination bei Last)</b>				
charak. Gesamtlast p <sub>k,St,ges</sub> =	62 kN/m			charakteristische (seltene) Einwirkungskombination
σ <sub>f</sub> = M <sub>Ed,char</sub> /(z <sub>∞</sub> *A <sub>f</sub> ) =	70,1 MN/m <sup>2</sup>			charakteristische (seltene) Einwirkungskombination
0,8*f <sub>fk</sub> =	464,0 MN/m <sup>2</sup>			
<b>Verformungsnachweis ohne Kriechen u. Schwinden: w<sub>max</sub> &lt;= l/250</b>				
perm. Gesamtlast p <sub>k,St,ges</sub> =	51 kN/m			quasi-ständige Einwirkungskombination
l = bh <sup>3</sup> /12 =	0,01044 m <sup>4</sup>			
w <sub>max</sub> = q <sup>l</sup> <sup>4</sup> /(76,8*E <sub>cm</sub> *I) =	0,171 mm			
w zulässig = l/250 =	7 mm			
<b>Verformungsnachweis mit Last, Kriechen + Schwinden:</b>				
Zustand I (ungerissen), Last und Kriechen:				
s <sup>l</sup> <sub>∞</sub> = $\frac{b \cdot h \cdot \frac{h}{2} + \alpha_{e,\infty} \cdot A_{s1} \cdot d}{b \cdot h + \alpha_{e,\infty} \cdot A_{s1}}$ =	0,329 m			Schwerpunkt im Zeitpunkt t = ∞
I <sup>l</sup> <sub>∞</sub> = $\frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \cdot (s^l_{\infty} - \frac{h}{2})^2 + \alpha_{e,\infty} \cdot A_{s1} \cdot (d - s^l_{\infty})^2 =$				Flächenträgheitsmoment des ideillen Betonquerschnitts
I <sup>l</sup> <sub>∞</sub> =	0,01278 m <sup>4</sup>			
M <sub>Ed,ständig</sub> = q <sup>l</sup> <sup>2</sup> /8 =	21 kNm			quasi-ständige Einwirkungskombination
κ <sup>l</sup> <sub>∞</sub> = $\frac{M_{Ed,ständig}}{E_{eff} \cdot I^l_{\infty}}$ =	0,0017 m <sup>-1</sup>			

Zustand II (gerissen), Last und Kriechen:				
$I_{II\infty} = \frac{b \cdot x_{II\infty}^3}{12} + b \cdot x_{II\infty} \cdot \left(\frac{x_{II\infty}}{2}\right)^2 + \alpha e_{s,II\infty} \cdot A s_1 \cdot (d - x_{II\infty})^2 =$				
$I_{II\infty} =$		0,007 m <sup>4</sup>		
$\kappa_{II\infty} = \frac{M_{Ed,ständig}}{E_{c,eff} \cdot I_{II\infty}} =$		0,0032 m <sup>-1</sup>		
Zustand I (ungerissen), Schwinden:				
$\varepsilon_{cs}(\infty) =$		1,200 mm/m		
$S^I_{\infty} = A s_1 \cdot (d - s^I_{\infty}) =$		0,000158 m <sup>3</sup>		
$\kappa^I_{cs,\infty} = \varepsilon_{cs,\infty} \cdot \alpha_{e,II\infty} \cdot \frac{S^I_{\infty}}{I^I_{\infty}} =$		0,000959 m <sup>-1</sup>		
Zustand II (gerissen), Schwinden:				
$S^{II}_{\infty} = A s_1 \cdot (d - x_{II\infty}) =$		0,000237 m <sup>3</sup>		Statisches Moment der Bew. As1 um Schwerachse des verbleibenden ideellen Querschnitts (s=x)
$\kappa^{II}_{cs,\infty} = \varepsilon_{cs,\infty} \cdot \alpha_{e,II\infty} \cdot \frac{S^{II}_{\infty}}{I^{II}_{\infty}} =$		0,002652 m <sup>-1</sup>		
Durchbiegung:				
Mcr =		30 kNm		
Mcr/MEd,ständig =		1,47		falls >1: nicht gerissen!
$\beta =$		0,5		mit $\beta = 0,5$ für Dauerlast (nach EC2 entfällt $\beta_1$ )
Verteilungsbeiwert $\zeta =$		0,000		Wert = 0 falls nicht gerissen
$\kappa_{\infty} =$		0,00269 m <sup>-1</sup>		
$k =$		0,104		
$f =$		0,9 mm		
w zulässig = l/250 =		7 mm		
<b>Begrenzung Rissbreiten - Fenstersturz, Last</b>				
Anforderung wmax =		0,4 mm		gemäß Schöck ComBAR Zulassung
fct,eff = fctm =		0,87 MN/m <sup>2</sup>		
$\sigma_f = M_{Ed,ständig} / (z_{\infty} \cdot A_{f,gew}) =$		57,4 MN/m <sup>2</sup>		Stahlspannung Zustand II
df vorh =		12,0 mm		
wk = sr,max*(efm-ecm)				Berechnung Rissbreite, siehe SBT S. 5.98
h/d1 =		8,5		
heff = 0,05*h+2*d1 =		0,17 m		Formel abhängig von Verhältnis h/d1
Ac,eff =		0,100 m <sup>2</sup>		
Afu =		7,92 cm <sup>2</sup>		
peff = Af/Ac,eff =		0,00794		
sr,max:				
df/(2,8*peff) =		539,8 mm		Faktor 2,8 statt 3,6 gem. ComBAR Bemessungskonzept Abschnitt 9.2.1
$\sigma_f \cdot df / (2,8 \cdot f_{ct,eff}) =$		59,1 mm		
sr,max =		59,1 mm		
(efm-ecm):				
Ef =		60000,0		
E ilc =		3900,0		
$\alpha_e = E_f/E_{cm} =$		15,4		
$(\sigma_f \cdot k_t \cdot (f_{ct,eff}/peff) \cdot (1 + \alpha_e \cdot peff)) / E_f =$		0,000137		kt=0,4 bei langzeitiger Lasteinwirkung
0,6* $\sigma_f$ /Ef =		0,000574		
(efm-ecm) =		0,000574		
wk = sr,max*(efm-ecm) =		0,03 mm		
wmax =		0,4 mm		
<b>Begrenzung Rissbreiten/Mindestbewehrung - Fenstersturz, Zwang</b>				
Ansatz: zentrischer Zwang aus Schwinden				
Anforderung wmax =		0,4 mm		
fct,eff = fctm =		0,87 MN/m <sup>2</sup>		
h =		0,60 m		
b =		0,58 m		
d1 =		0,035 m		
Ac =		0,35 m <sup>2</sup>		
Af gewählt (eine Seite) =		6,04 cm <sup>2</sup>		Bewehrung einer Seite, d = 8mm alle 5cm
heff =		0,13 m		Als Scheibe betrachtet; Formel abhängig von Verhältnis h/d1
Ac,eff (eine Seite) =		0,08 m <sup>2</sup>		eine Seite
peff = Af/Ac,eff =		0,00786		
$\sigma_f =$		110,6 MN/m <sup>2</sup>		Bewehrungsspannung beim Riss: $f_{ct,eff} \cdot A_{c,eff} / A_s$
df vorh =		8,0 mm		
wk = sr,max*(efm-ecm)				Berechnung Rissbreite, siehe SBT S. 5.98
sr,max:				
df/(2,8*peff) =		363,3 mm		Faktor 2,8 statt 3,6 gem. ComBAR Bemessungskonzept Abschnitt 9.2.1
$\sigma_f \cdot df / (2,8 \cdot f_{ct,eff}) =$		363,3 mm		
sr,max =		363,3 mm		
(efm-ecm):				
Ef =		60000,0		
E ilc =		3900,0		
$\alpha_e = E_f/E_{cm} =$		15,4		
$(\sigma_f \cdot k_t \cdot (f_{ct,eff}/peff) \cdot (1 + \alpha_e \cdot peff)) / E_f =$		0,001017		kt=0,4 bei langzeitiger Lasteinwirkung
0,6* $\sigma_f$ /Ef =		0,001106		
(efm-ecm) =		0,001106		
wk = sr,max*(efm-ecm) =		0,40 mm		
wmax =		0,4 mm		
resultierende Auflagerkräfte:				
V d,St = p <sub>d,St,ges</sub> *l/2 =		74,8 kN	41	13

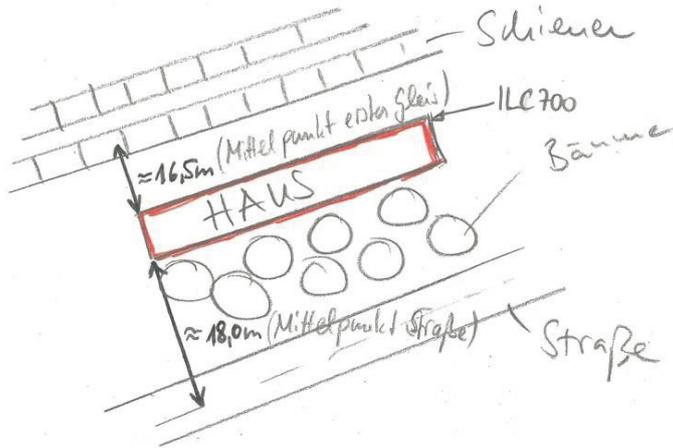
<b>Bemessung Wandabschnitt auf Druck</b>			
<b>Stütze im EG, beidseitige Lasten aus Fensterstürzen, Decken und Balkone</b>			
Stützenlänge l <sub>Stü</sub> =	1,5 m		
Stützenbreite b <sub>Stü</sub> =	0,58 m		
d <sub>1</sub> =	0,035 m		
Breite unter NB Auflager:	0,25 m		Annahme: aufgrund erhöhter Steifigkeit NB der Geschosdecke zieht diese Lasten an; bei b <sub>Stü</sub> = 60cm: 25cm; bei b <sub>Stü</sub> = 50cm: 22cm
Stützenhöhe =	3,8 m		Annahme: Höhe EG - 20cm NB-Decke
Belastung:			
Eigengewicht Stützen g <sub>k,St,ges</sub> =	191,4 kN	191,4	über alle Etagen im EG
A <sub>d,Decken,ges</sub> =	417,4 kN/m	239,4	über alle Etagen im EG
A <sub>d,Balkon,ges</sub> =	121,9 kN/m	50,3	über alle Etagen im EG
Lasten aus Fensterstürzen			
V <sub>d,St,ges</sub> = 2*((Geschoszahl-1)*V <sub>d,St</sub> + (1,35*g <sub>k,St</sub> + A <sub>d,Dach</sub> )*l <sub>St/2</sub> )			
	1029,9 kN	565,4	177,8
A <sub>Stü,ges</sub> =	2097,3 kN	1191,4	325,9
Ermittlung Betonpressung für volle Lasten:			
Anteil im Verhältnis der Steifigkeiten unter NB:			
E <sub>nb</sub> =	30000 MN/m <sup>2</sup>		
A <sub>nb</sub> =	0,25 m <sup>2</sup> /m		
E <sub>ilc</sub> =	3900 MN/m <sup>2</sup>		
A <sub>ilc</sub> =	0,33 m <sup>2</sup> /m		
Lastanteil unter NB:	85%		
Sigma <sub>c,d</sub> =	4,77 MN/m <sup>2</sup>		
f <sub>cd</sub> =	5,50 MN/m <sup>2</sup>		
Schlankheit:			
l <sub>col</sub> =	3,8 m		
β =	1,0		
l <sub>o</sub> = β*l <sub>col</sub> =	3,8 m		
λ = l <sub>o</sub> /i =	23 < 25		
-> Stütze mit kleiner Schlankheit, Einfluss der Stabverformung vernachlässigbar			
<b>Gebrauchstauglichkeit:</b>			
<b>Spannungsnachweis:</b>			
Betondruckspannung Sigma <sub>cm</sub> <= 0,45 f <sub>ck</sub> (wenn Kriechen relevant, unter quasi-ständiger Lastkombination)			
ψ <sub>2i</sub> =	0,3		für Nutzlasten Kat. A/B
A <sub>Stü,ges,perm</sub> =	1289,2 kN		
sigma <sub>c, char</sub> = (A <sub>Stü,g,char</sub> + ψ <sub>2i</sub> *A <sub>Stü,q,char</sub> )/l <sub>Stü</sub> *b <sub>Stü</sub> =			quasi-ständige Einwirkungskombination (-> kein Wind); maßgebende Stütze EG
sigma <sub>c,char</sub> =	1,5 MN/m <sup>2</sup>		
0,45*f <sub>ck</sub> =	5,0 MN/m <sup>2</sup>		
<b>Begrenzung Rissbreiten GFK unter Zwang</b>			
Anforderung w <sub>max</sub> =	0,4 mm		
f <sub>ct,eff</sub> = f <sub>ctm</sub> =	0,87 MN/m <sup>2</sup>		
A <sub>f,vorh</sub> (eine Seite) =	10,05 cm <sup>2</sup> /m		einseitige Bewehrung
h <sub>eff</sub> =	0,13 m		Formel abhängig von Verhältnis h/d <sub>1</sub>
A <sub>c,eff</sub> (eine Seite) =	0,13 m <sup>2</sup> /m		eine Wandseite
ρ <sub>eff</sub> = A <sub>f</sub> /A <sub>c,eff</sub> =	0,00785		
sigma <sub>f</sub> =	110,8 MN/m <sup>2</sup>		Bewehrungsspannung beim Riss: f <sub>ct,eff</sub> *A <sub>c,eff</sub> / A <sub>s</sub>
df <sub>vorh</sub> =	8,0 mm		
w <sub>k</sub> = s <sub>r,max</sub> *(ε <sub>fm</sub> -ε <sub>cm</sub> )			Berechnung Rissbreite, siehe SBT S. 5.98
s <sub>r,max</sub> :			
df/(2,8*ρ <sub>eff</sub> ) =	363,9 mm		Faktor 2,8 statt 3,6 gem. ComBAR Bemessungskonzept Abschnitt 9.2.1
sigma <sub>f</sub> * df/(2,8*f <sub>ct,eff</sub> ) =	363,9 mm		
s <sub>r,max</sub> =	363,9 mm		
(ε <sub>fm</sub> -ε <sub>cm</sub> ):			
E <sub>f</sub> =	60000,0		
E <sub>ilc</sub> =	3900,0		
α <sub>e</sub> = E <sub>f</sub> /E <sub>cm</sub> =	15,4		
(sigma <sub>f</sub> *kt*(f <sub>ct,eff</sub> /ρ <sub>eff</sub> )*(1+α <sub>e</sub> *ρ <sub>eff</sub> ))/E <sub>f</sub> =	0,001019		kt=0,4 bei langzeitiger Lasteinwirkung
0,6*sigma <sub>f</sub> /E <sub>f</sub> =	0,001108		
(ε <sub>fm</sub> -ε <sub>cm</sub> ) =	0,001108		
w <sub>k</sub> = s <sub>r,max</sub> *(ε <sub>fm</sub> -ε <sub>cm</sub> ) =	0,40 mm		
w <sub>max</sub> =	0,4 mm		
<b>Verformung Stütze im EG:</b>			
<i>Ohne Ansatz einer Spannungsumlagerung auf die Bewehrung:</i>			
Gesamtstauchung e <sub>ges</sub> = e <sub>el</sub> + e <sub>s</sub> + e <sub>cr</sub>			
Länge l der Stütze:	3,80 m		
A <sub>Stü,ges,perm</sub> =	1289,2 kN		s.o., quasi-ständige Einwirkungskombination
A <sub>c</sub> =	0,9 m <sup>2</sup>		
sigma <sub>c</sub> =	1,5 N/mm <sup>2</sup>		s.o., quasi-ständige Einwirkungskombination
φ <sub>∞</sub> =	3,2		
e <sub>cr</sub> = φ <sub>∞</sub> *σ <sub>c</sub> /E <sub>c</sub> =	1,22 mm/m		
e <sub>cs</sub> =	1,2 mm/m		siehe INBIG Abschlussbericht Kapitel 3.3.3.2, Schwindmaße
e <sub>el</sub> = sigma <sub>c</sub> /E =	0,380 mm/m		
e <sub>ges</sub> = e <sub>el</sub> + e <sub>s</sub> + e <sub>cr</sub> =	2,80 mm/m		
delta l = e <sub>ges</sub> * l =	10,62 mm		
delta l aus Kriechen =	4,62 mm		
delta l aus Kriechen über alle Etagen überschlägig abgeschätzt:			
<b>grobe Abschätzung</b> der mittleren Last über alle Etagen mit ca. 50% der Last im EG			
A <sub>m,ges,perm</sub> =	644,6 kN		
sigma <sub>c</sub> =	0,7 N/mm <sup>2</sup>		
H =	22 m		
delta l <sub>cr,ges</sub> =	15,2 mm		
delta l <sub>gesamt</sub> = l <sub>ges</sub> *(e <sub>el</sub> + e <sub>s</sub> + e <sub>cr</sub> ) =	41,60 mm		Schwindmaße können sich aufgrund der größeren Bauteilabmessungen in der Realität geringer auswirken (siehe INBIG Bericht Kap. 3.3.3)

Anhang: Bewehrungsplan Prototyp 2



Anhang: Grundlagen der Planung – Schallschutznachweis Kracauer Platz

Schallschutz: Kracauer Platz



→ Seite mit Schienenverkehr aus ILC700

Außenlärmpegel nach DIN 18005-1:2002-07 (A3)

Annahme: max. Anzahl der Züge/h → 30

Abstand 15m < 16,5m ✓ sichere Seite

Nahverkehr mit Güterzügen,  $v_{max} = 160 \frac{km}{h}$

Diagramm →  $L_{a,res,d} = 75 \text{ dB(A)}$  (Tags)

$L_{a,res,n} = 75 \text{ dB(A)}$  (Nachts)

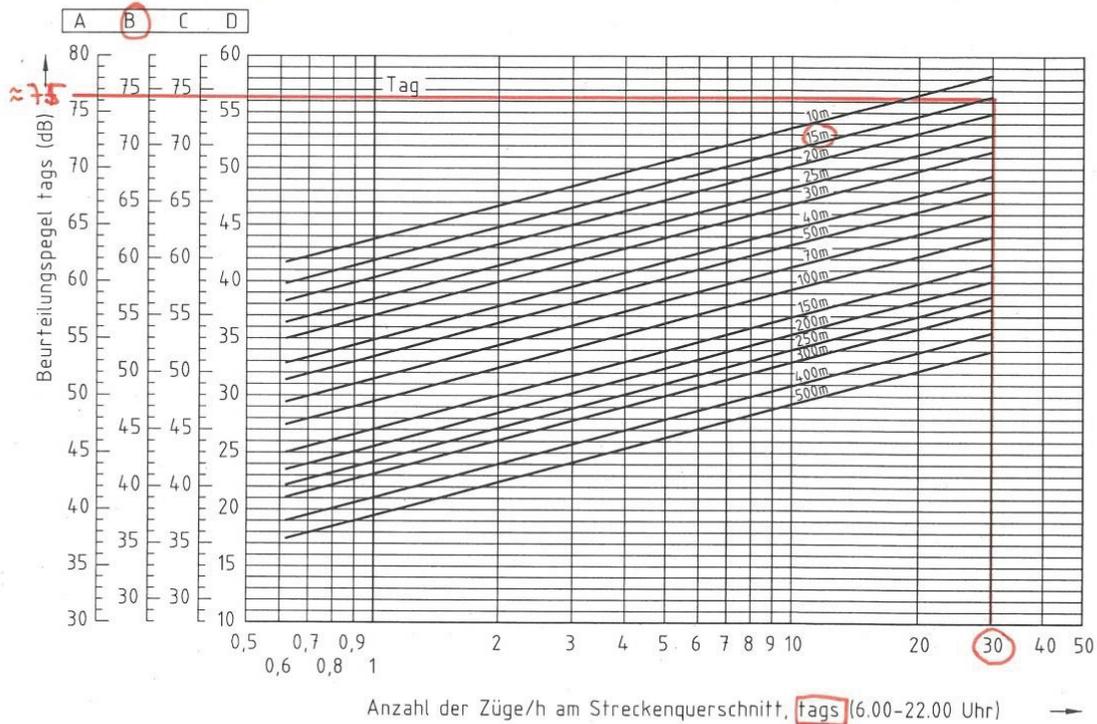
Außenlärmpegel nach Lärmkarte ([www.stadtentwicklung.berlin.de/Umwelt/](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/Umwelt/)  
Umweltatlas/14705.htm)

$L_{a,res,d} = 70-75 \text{ dB(A)}$

$L_{a,res,n} = 65-70 \text{ dB(A)}$

DIN 18005-1:2002-07

**A.3 Schienenverkehr**

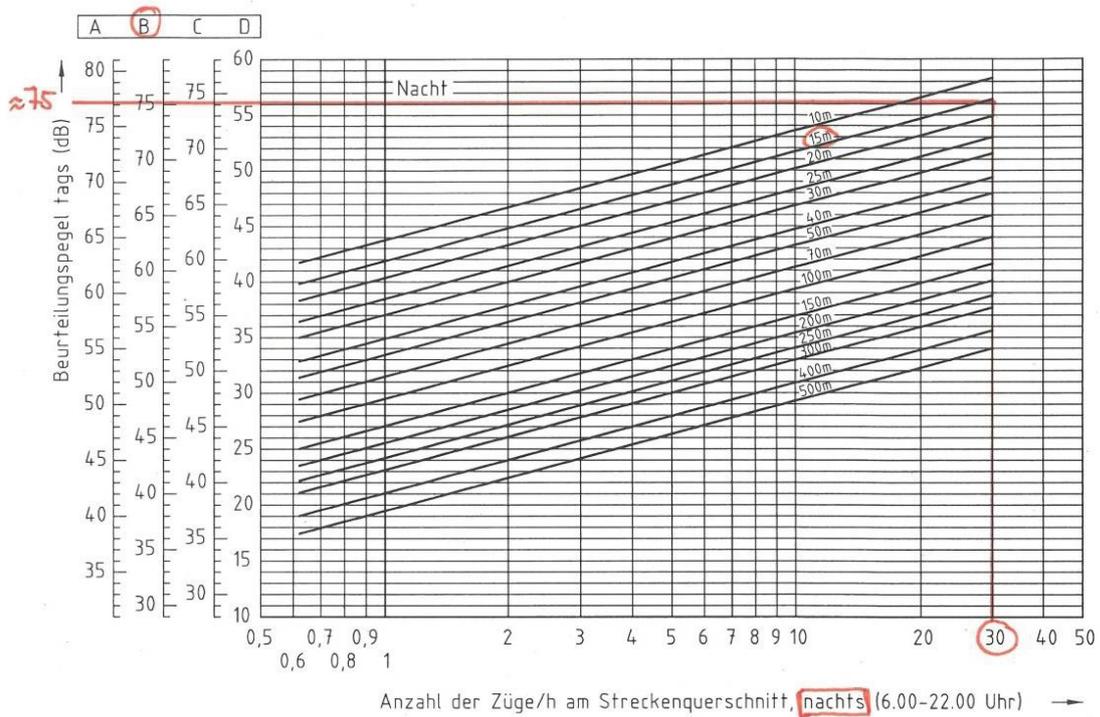


Fernverkehr	Nahverkehr mit Güterzügen	Nahverkehr ohne Güterzüge	Straßenbahn
A	B	C	D

- A Fernverkehr:  $V_{max} = 200 \text{ km/h}$ ; Güterverkehrsanteil tags etwa 10%
- B Nahverkehr mit Güterzügen:  $V_{max} = 160 \text{ km/h}$ ; Güterverkehrsanteil tags etwa 15%
- C Nahverkehr ohne Güterzüge:  $V_{max} = 120 \text{ km/h}$ ; Güterverkehrsanteil tags etwa 0%
- D Straßenbahn:  $V_{max} = 60 \text{ km/h}$

Im Beurteilungspegel ist die geringe Störwirkung des Schienenverkehrs mit einem Abschlag von 5 dB(A) berücksichtigt.

**Bild A.3 – Diagramm zur Abschätzung des Beurteilungspegels von Schienenverkehr für verschiedene Abstände als Parameter, Tag**



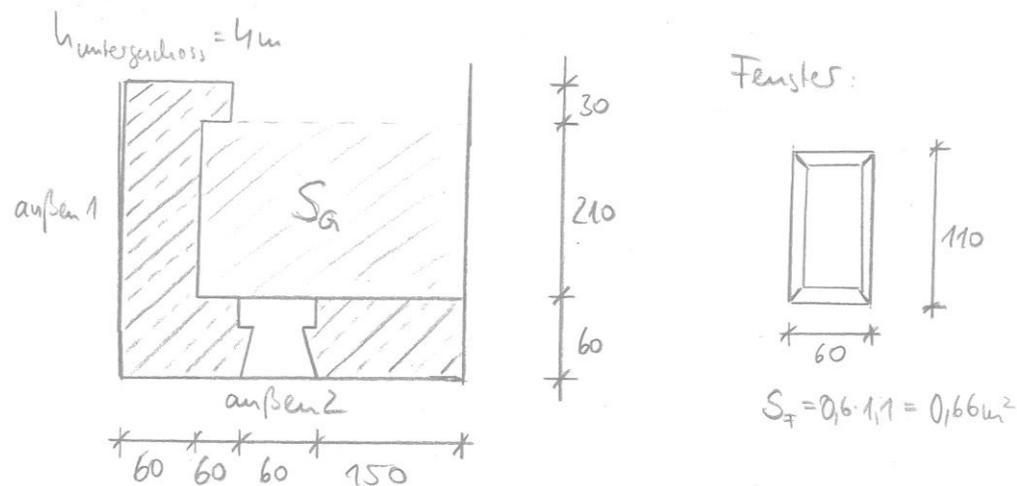
Fernverkehr	Nahverkehr mit Güterzügen	Nahverkehr ohne Güterzüge	Straßenbahn
A	B	C	D

- A Fernverkehr:  $V_{\max} = 200 \text{ km/h}$ ; Güterverkehrsanteil tags etwa 80%
- B** Nahverkehr mit Güterzügen:  $V_{\max} = 160 \text{ km/h}$ ; Güterverkehrsanteil tags etwa 60%
- C Nahverkehr ohne Güterzüge:  $V_{\max} = 120 \text{ km/h}$ ; Güterverkehrsanteil tags etwa 0%
- D Straßenbahn:  $V_{\max} = 60 \text{ km/h}$

Im Beurteilungspegel ist die geringe Störwirkung des Schienenverkehrs mit einem Abschlag von 5 dB(A) berücksichtigt.

Bild A.4 – Diagramm zur Abschätzung des Beurteilungspegels von Schienenverkehr für verschiedene Abstände als Parameter, Nacht

## maßgebendes Raum



$$S_G = 2,1\text{m} \cdot 2,7\text{m} = 5,67\text{m}^2$$

$$S_{(w+f)1} = 4\text{m} \cdot (2,1\text{m} + 0,3\text{m} + 0,6\text{m}) = 12\text{m}^2$$

$$S_{(w+f)2} = 4\text{m} \cdot (0,6\text{m} + 0,6\text{m} + 0,6\text{m} + 1,5\text{m}) = 13,2\text{m}^2$$

▽ DIN 4109: Tab. 8, Z. 5, S. 4:

$$\text{erf. } R'_{w, \text{res}} = 45\text{dB(A)}$$

▽ Korrekturwert: DIN 4109: Tab. 9, Z. 2, S. 2+3

$$\frac{S_{(w+f)1}}{S_G} = 2,12 \quad \rightarrow \quad 4 + \left( \frac{5-4}{2,5-2} \cdot 0,12 \right) = 4,24 \sim 4$$

$$\frac{S_{(w+f)2}}{S_G} = 2,33 \quad \rightarrow \quad 4 + \left( \frac{5-4}{2,5-2} \cdot 0,33 \right) = 4,66 \sim 5$$

→ maßgebend außen 2, da dort Fenster + größerer Korrekturwert

$$\Rightarrow \underline{\underline{\text{erf. } R'_{w, \text{res}} = 45\text{dB(A)} + 5\text{dB(A)} = 50\text{dB(A)}}}$$

Tabelle 8. Anforderungen an die Luftschalldämmung von Außenbauteilen

Spalte	1	2	3	4	5
Zeile	Lärmpegelbereich	„Maßgeblicher Außenlärmpegel“  dB(A)	Raumarten		
			Bettenräume in Krankenanstalten und Santorien	Aufenthaltsräume in Wohnungen, Übernachtungsräume in Beherbergungsstätten, Unterrichtsräume und ähnliches	Büroräume <sup>1)</sup> und ähnliches
			erf. $R'_{w,res}$ des Außenbauteils in dB		
1	I	bis 55	35	30	-
2	II	56 bis 60	35	30	30
3	III	61 bis 65	40	35	30
4	IV	66 bis 70	45	40	35
5	V	71 bis 75	50	45	40
6	VI	76 bis 80	2)	50	45
7	VII	> 80	2)	2)	50

1) An Außenbauteile von Räumen, bei denen der eindringende Außenlärm aufgrund der in den Räumen ausgeübten Tätigkeiten nur einen untergeordneten Beitrag zum Innenraumpegel leistet, werden keine Anforderungen gestellt.  
2) Die Anforderungen sind hier aufgrund der örtlichen Gegebenheiten festzulegen.

Tabelle 9. Korrekturwerte für das erforderliche resultierende Schalldämm-Maß nach Tabelle 8 in Abhängigkeit vom Verhältnis  $S_{(W+F)}/S_G$

Spalte/Zeile	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	$S_{(W+F)}/S_G$	2,5	2,0	1,6	1,3	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4
2	Korrektur	+5	+4	+3	+2	+1	0	-1	-2	-3

$S_{(W+F)}$ : Gesamtfläche des Außenbauteils eines Aufenthaltsraumes in m<sup>2</sup>  
 $S_G$ : Grundfläche eines Aufenthaltsraumes in m<sup>2</sup>.

*→ nicht anwendbar, da Raumtiefe < 4,5m*

Tabelle 10. Erforderliche Schalldämm-Maße erf.  $R'_{w,res}$  von Kombinationen von Außenwänden und Fenstern

Spalte	1	2	3	4	5	6	7
Zeile	erf. $R'_{w,res}$ in dB nach Tabelle 8	Schalldämm-Maße für Wand/Fenster in ... dB/... dB bei folgenden Fensterflächenanteilen in %					
		10%	20%	30%	40%	50%	60%
		1	30	30/25	30/25	35/25	35/25
2	35	35/30 40/25	35/30	35/32 40/30	40/30	40/32 50/30	45/32
3	40	40/32 45/30	40/35	45/35	45/35	40/37 60/35	40/37
4	45	45/37 50/35	45/40 50/37	50/40	50/40	50/42 60/40	60/42
5	50	55/40	55/42	55/45	55/45	60/45	-

Diese Tabelle gilt nur für Wohngebäude mit üblicher Raumhöhe von etwa 2,5 m und Raumtiefe von etwa 4,5 m oder mehr, unter Berücksichtigung der Anforderungen an das resultierende Schalldämm-Maß erf.  $R'_{w,res}$  des Außenbauteils nach Tabelle 8 und der Korrektur von -2 dB nach Tabelle 9, Zeile 2.

### Bestimmung des Schalldämm-Maßes von einschaligen, biegesteifen Wänden (DIN 4109 Tab. 1)

ILC 700  $\rightarrow g = 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$  (in Stahl-Beton-Bauweise; auf sicherer Seite Trochenvordichte angesetzt)

für  $g \leq 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$  muss  $g$  um  $\Delta g = 50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$  abgemindert werden (Tab. 2, DIN 4109 Beiblatt 1)

$$t = 60 \text{ cm}$$

$$\rightarrow m' = \left( 700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} - 50 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right) \cdot 0,6 \text{ m} = 390 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Interaktion: (DIN 4109, Bbl. 1 Tab. 1)

$$\text{vorh. } R'_{w,R} = 52 + \left( \frac{53-52}{410-380} \cdot (390-380) \right)$$

$$\Rightarrow \text{vorh. } R'_{w,R} = 52,3 \text{ dB(A)}$$

### Schalldämm-Maß vom Fenster

$$\Rightarrow \text{vorh. } R'_{w,R,\text{Fenster}} = \boxed{\phantom{00}} \text{ dB(A)}$$

### Bestimmung des gesamten Schalldämm-Maßes (DIN 4109 Bbl. 1 Abs. 11)

$$R'_{w,R,\text{ges}} = -10 \lg \left( \frac{1}{S_{\text{ges}}} \cdot \sum_{i=1}^4 S_i \cdot 10^{-\frac{R'_{w,R,i}}{10}} \right) \text{ dB(A)}$$

$$= -10 \lg \left[ \frac{1}{13,2 \text{ m}^2} \cdot \left( \underbrace{(13,2 - 0,66) \text{ m}^2}_{12,54} \cdot 10^{-\frac{52,3}{10}} + 0,66 \text{ m}^2 \cdot 10^{-\frac{\boxed{\phantom{00}}}{10}} \right) \right]$$

## Bestimmung des erforderlichen Schalldämm-Maßes des Fensters

$$\text{erf. } R_{w, \text{res}} = 50 \text{ dB(A)} = -10 \log \left( \frac{12,54 \text{ m}^2}{132 \text{ m}^2} \cdot 10^{-\frac{57,3}{10}} + \frac{0,66 \text{ m}^2}{132 \text{ m}^2} \cdot 10^{-\frac{x}{10}} \right) \quad | : -10$$

$$-5 = \log (5,594 \cdot 10^{-6} + 0,05 \cdot 10^{-\frac{x}{10}})$$

$$\left( \begin{array}{l} \text{mit: } u = \log(v) \\ v = 10^u \end{array} \right)$$

$$-5 = \log(v)$$

$$v = 10^{-5}$$

$$5,594 \cdot 10^{-6} + 0,05 \cdot 10^{-\frac{x}{10}} = 10^{-5}$$

$$10^{-\frac{x}{10}} = 1,888 \cdot 10^{-3}$$

$$\left( \begin{array}{l} \text{mit: } b^x = c \\ \log_b c = x \end{array} \right)$$

$$\log_{10} (1,888 \cdot 10^{-3}) = -\frac{x}{10} \quad | \cdot (-10)$$

$$\rightarrow \underline{\underline{x = -10 \log (1,888 \cdot 10^{-3}) = 27,24 \text{ dB(A)}}}$$

## Anhang: Energietechnische Analysen –Variantenbetrachtung Wärmebrücken

### Referenzwert 1

Für die Betrachtung der Balkonanschlüsse erfolgt zunächst die Simulation einer Wand mit unterem und oberem Fensteranschluss. Dabei wird auf eine Zwischendecke sowie die Balkonauskragung verzichtet. Es werden dabei Simulationen zu verschiedenen Wanddicken (50cm und 62cm) angesetzt. Hintergrund ist, dass die Wanddicken für die beiden Balkonanschlussdetails ebenfalls variieren.

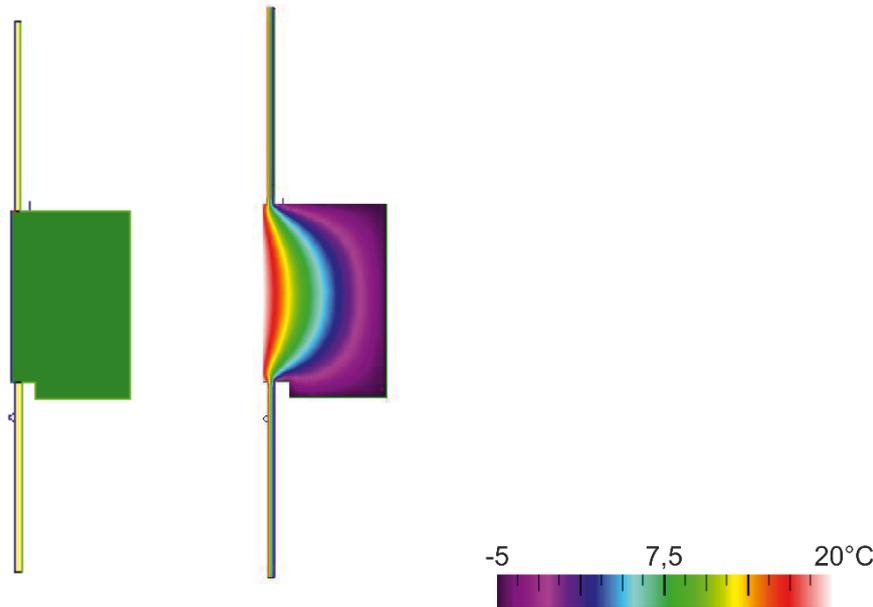


Bild 181: Oberer und unterer Fensteranschluss für eine 50cm dicke ILC-Wand

Tabelle 27: Berechnung des  $\Psi$ -Wertes für den oberen und unteren Fensteranschluss

### 50 cm ILC

Bauteil 1:	Außenwand
U <sub>1</sub> -Wert:	0,405 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>1</sub> :	0,90 m
F <sub>1</sub> =	1
U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> =	0,365 W/(m*K)

Bauteil 2:	Fenster
U <sub>2</sub> -Wert:	1,001 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>2</sub> :	2,0 m
F <sub>2</sub> =	1
U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> =	2,001 W/(m*K)

Therm 1:	
U <sub>Therm1</sub> -Wert:	0,947 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>Therm1</sub> :	2,90 m
F <sub>Therm1</sub> =	1
(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )=	2,746 W/(m*K)

$\psi\text{-Wert} = (U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$ $\psi\text{-Wert} = 0,380 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$
---

Der Wärmebrückenverlustkoeffizient  $\psi$  beträgt  
0,380 W/m<sup>2</sup>\*K

### 62 cm ILC

Bauteil 1:	Außenwand
U <sub>1</sub> -Wert:	0,334 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>1</sub> :	0,90 m
F <sub>1</sub> =	1
U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> =	0,301 W/(m*K)

Bauteil 2:	Fenster
U <sub>2</sub> -Wert:	1,001 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>2</sub> :	2,0 m
F <sub>2</sub> =	1
U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> =	2,001 W/(m*K)

Therm 1:	
U <sub>Therm1</sub> -Wert:	0,940 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>Therm1</sub> :	2,90 m
F <sub>Therm1</sub> =	1
(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )=	2,726 W/(m*K)

$\psi\text{-Wert} = (U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$ $\psi\text{-Wert} = 0,424 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$
---

Der Wärmebrückenverlustkoeffizient  $\psi$  beträgt  
0,424 W/m<sup>2</sup>\*K

Das Ergebnis der Simulation zeigt, dass der  $\Psi$ -Wert für die Variante mit 62cm dicker ILC Wand größer ist als mit geringerer Dicke. Dies ist durch das bessere Dämmverhalten der dickeren Wand zu begründen. Dadurch fällt die Wärmebrücke schlechter aus.

Diese Betrachtung kann für die weiteren Simulationen als Referenz genutzt werden um nachvollziehen zu können welchen Einfluss eine Zwischendecke sowie die unterschiedlichen Balkonauskragungen auf den jeweiligen  $\Psi$ -Wert haben.

### Referenzwert 2

Wird zusätzlich eine Zwischendecke im Detail mit simuliert so verschlechtert sich der  $\Psi$ -Wert für beide Wanddicken. Dabei verschlechtert sich der  $\Psi$ -Wert für die Variante mit 62cm ILC weniger stark, da die Zwischendecke zur Außenseite hin mit mehr ILC überdeckt ist und dadurch eine bessere Dämmung gewährleistet werden kann.



Bild 182: Oberer und untere Fensteranschluss mit Zwischendecke für eine 50cm dicke ILC-Wand

Tabelle 28: Berechnung des  $\Psi$ -Werts für den oberen und unteren Fensteranschluss mit Zwischendecke

50 cm ILC		62 cm ILC	
<b>Bauteil 1:</b>	Außenwand	<b>Bauteil 1:</b>	Außenwand
U <sub>1</sub> -Wert:	0,405 W/(m <sup>2</sup> *K)	U <sub>1</sub> -Wert:	0,334 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>1</sub> :	0,90 m	Länge L <sub>1</sub> :	0,90 m
F <sub>1</sub> =	1	F <sub>1</sub> =	1
U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> =	0,365 W/(m*K)	U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> =	0,301 W/(m*K)
<b>Bauteil 2:</b>	Fenster	<b>Bauteil 2:</b>	Fenster
U <sub>2</sub> -Wert:	1,001 W/(m <sup>2</sup> *K)	U <sub>2</sub> -Wert:	1,001 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>2</sub> :	2,0 m	Länge L <sub>2</sub> :	2,0 m
F <sub>2</sub> =	1	F <sub>2</sub> =	1
U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> =	2,001 W/(m*K)	U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> =	2,001 W/(m*K)
<b>Therm 1:</b>		<b>Therm 1:</b>	
U <sub>Therm1</sub> -Wert:	0,987 W/(m <sup>2</sup> *K)	U <sub>Therm1</sub> -Wert:	0,970 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>Therm1</sub> :	2,90 m	Länge L <sub>Therm1</sub> :	2,90 m
F <sub>Therm1</sub> =	1	F <sub>Therm1</sub> =	1
(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )=	2,862 W/(m*K)	(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )=	2,813 W/(m*K)
$\psi$ -Wert=(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )-( U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> +U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> )		$\psi$ -Wert=(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )-( U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> +U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> )	
<b><math>\psi</math>-Wert=</b>	<b>0,496 W/(m*K)</b>	<b><math>\psi</math>-Wert=</b>	<b>0,511 W/(m*K)</b>
<b>Verbesserung zu Referenzwert 1 (50 cm)</b>		<b>Verbesserung zu Referenzwert 1 (62 cm)</b>	
<b><math>\Psi_{\text{Referenz1}} - \Psi_{\text{Variante2}} =</math></b>	<b>-0,116W/(m*K)</b>	<b><math>\Psi_{\text{Referenz1}} - \Psi_{\text{Variante2}} =</math></b>	<b>-0,087 W/(m*K)</b>

Der Zwischendeckenanschluss verschlechtert die Wärmebrücke um 0,116 W/m\*K

Der Zwischendeckenanschluss verschlechtert die Wärmebrücke um 0,087 W/m\*K

### Variante 1.1

Die Betrachtung der Variante 1 mit 50cm ILC und der Balkonauskragung zeigt, dass sich der  $\Psi$ -Wert im Vergleich mit dem Referenzwert 2 verbessert. Im Vergleich zu Referenzwert 1 ergibt sich hingegen ein schlechterer  $\Psi$ -Wert.

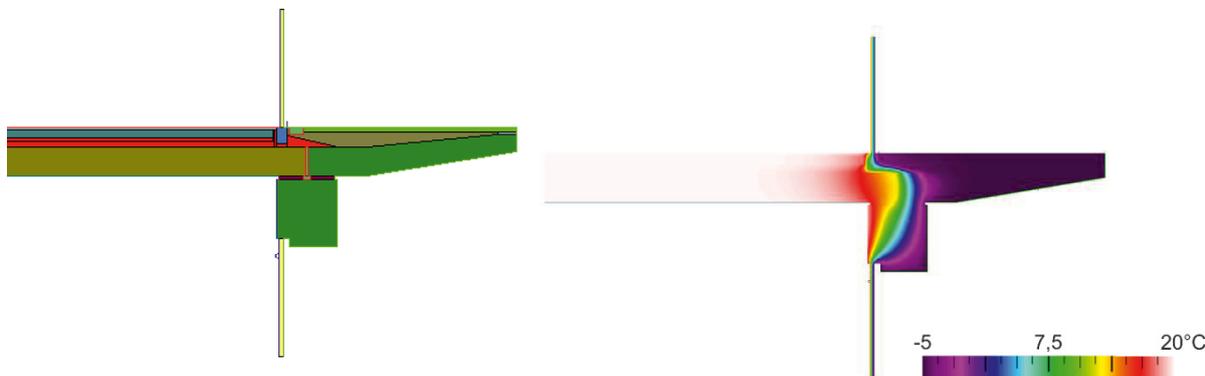


Bild 183: Oberer und unterer Fensteranschlusses mit Zwischendecke und Balkonanschluss für eine 50cm dicke ILC-Wand

Tabelle 29: Berechnung des  $\Psi$ -Werts für den oberen und unteren Fensteranschluss mit Zwischendecke und Balkonanschluss (50cm ILC-Wand)

Bauteil 1:	Außenwand
U <sub>1</sub> -Wert:	0,405 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>1</sub> :	0,94 m
F <sub>1</sub> =	1
U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> =	0,381 W/(m*K)

Bauteil 2:	Fenster
U <sub>2</sub> -Wert:	1,0005 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>2</sub> :	2,0 m
F <sub>2</sub> =	1
U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> =	2,001 W/(m*K)

Therm 1:	
U <sub>Therm1</sub> -Wert:	0,968 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>Therm1</sub> :	2,94 m
F <sub>Therm1</sub> =	1
(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )=	2,847 W/(m*K)

$$\psi\text{-Wert} = (U_{\text{Therm1}} * L_{\text{Therm1}} * F_{\text{Therm1}}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$$

$$\psi\text{-Wert} = 0,465 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$$

Differenz zu Referenz 1 (50 cm)
$\Psi_{\text{Referenz1}} - \Psi_{\text{Variante1.1}} = -0,085 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$

Zwischendeckenanschluss und Balkon verschlechtert die Wärmebrücke um 0,085 W/m<sup>2</sup>\*K

Differenz zu Referenz 2 (50 cm)
$\Psi_{\text{Referenz2}} - \Psi_{\text{Variante1.1}} = +0,031 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$

Der Balkon verbessert die Wärmebrücke allerdings um 0,031 W/m<sup>2</sup>\*K

Die Verschlechterung zum Referenzwert 1 ist dadurch zu begründen, dass durch die Zwischendecke und den Balkonanschluss eine zusätzliche Schwachstelle im homogenen Bauteil der Wand generiert wird. Der verbesserte Wert im Vergleich zum Referenzwert 2 kann

durch die zusätzliche Überdeckung der Schwachstelle, welche durch die Zwischendecke mittels des Balkonanschlusses entsteht, generiert werden.

**Variante 1.2 (überarbeitet)**

Eine Änderung des Anschlusses zwischen Wand, Zwischendecke und Balkonanschluss wurde aus konstruktionstechnischer Sicht durchgeführt. Wie die Simulation zeigt ist der Einfluss auf den  $\Psi$ -Wert jedoch nur sehr gering.

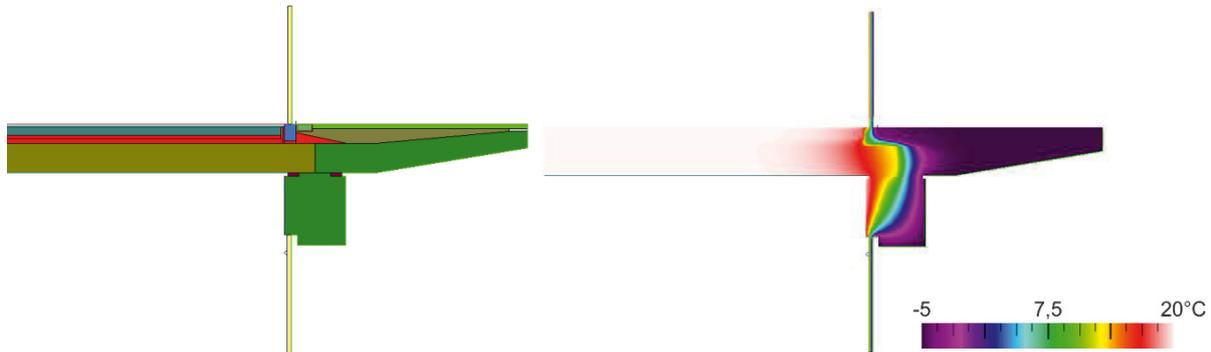


Bild 184: Oberer und unterer Fensteranschlusses mit Zwischendecke und Balkonanschluss für eine 50cm dicke ILC-Wand mit konstruktionstechnisch angepasstem Anschluss

Tabelle 30: Berechnung des  $\Psi$ -Werts für den oberen und unteren Fensteranschluss mit Zwischendecke und Balkonanschluss und konstruktionstechnisch angepasstem Anschluss (50cm ILC-Wand)

Bauteil 1:	Außenwand
U <sub>1</sub> -Wert:	0,405 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>1</sub> :	0,94 m
F <sub>1</sub> =	1
U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> =	0,381 W/(m*K)

Bauteil 2:	Fenster
U <sub>2</sub> -Wert:	1,0005 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>2</sub> :	2,0 m
F <sub>2</sub> =	1
U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> =	2,001 W/(m*K)

Therm 1:	
U <sub>Therm1</sub> -Wert:	0,968 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>Therm1</sub> :	2,94 m
F <sub>Therm1</sub> =	1
(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )=	2,845 W/(m*K)

$\psi$ -Wert= (U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> ) - ( U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> +U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> )
$\psi$ -Wert= 0,463 W/(m*K)

<b>Differenz zu Variante 1.1</b>
$\Psi_{\text{Variante 1.1}} - \Psi_{\text{Variante 1.2}} = +0,002 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Das überarbeitete Detail verbessert die Wärmebrücke der Variante 1.1 um 0,002 W/m<sup>2</sup>\*K

Der Einfluss der Änderungen welcher aus konstruktionstechnischer Sicht eventuell gewisse Vorteile mit sich bringen, verbessert den  $\Psi$ -Wert nahezu nicht.

Nachfolgend sind verschiedene Untersuchungen zu Variante 1 aufgeführt bei welchen betrachtet wird inwieweit der  $\Psi$ -Wert beeinflusst wird. Am Ende dieses Kapitels ist eine Zusammenfassung und ein Fazit aufgeführt in welchem die Vor- und Nachteile bestimmter Varianten aufgeführt sind.

### Variante 1.2 mittig

Bei dieser Variante ist die Fensterebene in die Mitte des Bauteils verschoben.

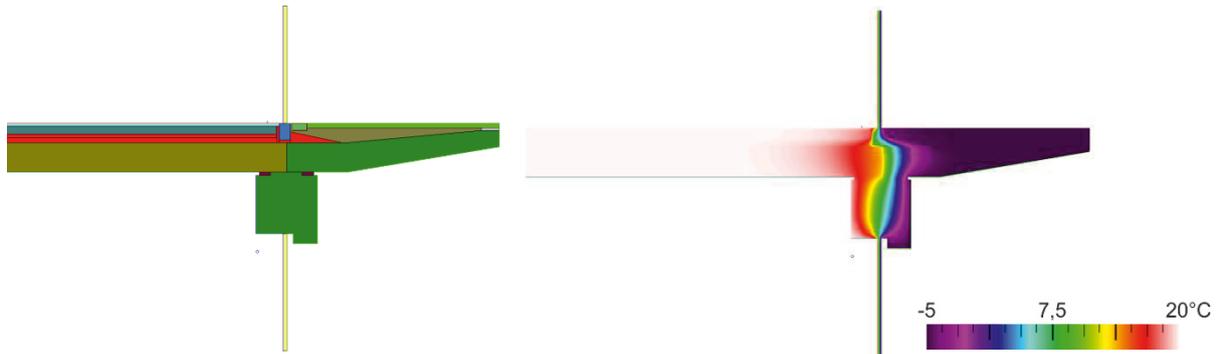


Bild 185: Fensterebene in der Mitte des Bauteils für eine 50cm dicke ILC-Wand

Tabelle 31: Berechnung des  $\Psi$ -Werts mit Fensterebene in der Mitte des Bauteils (50cm ILC-Wand)

Bauteil 1:	Außenwand
$U_1$ -Wert:	0,405 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_1$ :	0,94 m
$F_1$ =	1
$U_1 * L_1 * F_1$ =	0,381 W/(m*K)

Bauteil 2:	Fenster
$U_2$ -Wert:	1,0005 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_2$ :	2,0 m
$F_2$ =	1
$U_2 * L_2 * F_2$ =	2,001 W/(m*K)

Therm 1:	
$U_{Therm1}$ -Wert:	0,919 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_{Therm1}$ :	2,94 m
$F_{Therm1}$ =	1
$(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1})$ =	2,702 W/(m*K)

$\psi$ -Wert=	$(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$
$\psi$ -Wert=	0,320 W/(m*K)

Differenz zu Variante 1.2	
$\Psi_{\text{Variante 1.2}} - \Psi_{\text{Variante 1.2m}} =$	+0,143 W/(m*K)

Das Fenster mittig im ILC-Bauteil verbessert die Wärmebrücke der Variante 1.2 um 0,143 W/m\*K

Die Simulation veranschaulicht, dass anhand der Verschiebung der Fensterebene eine Verbesserung des  $\Psi$ -Wertes erzielt werden kann.

### Variante 1.3

Um den  $\Psi$ -Wert weiter zu verbessern ist der Zwischenbodenkopf zusätzlich gedämmt. Die Überdämmung beträgt dabei 10cm (Polyurethan).

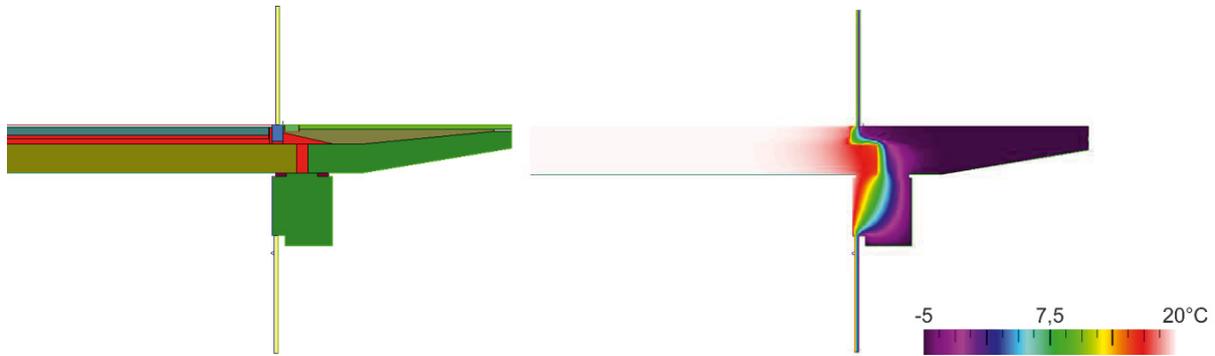


Bild 186: Balkonanschluss mit gedämmtem Zwischenbodenkopf für eine 50cm dicke ILC-Wand

Tabelle 32: Berechnung des  $\Psi$ -Werts mit gedämmtem Zwischenbodenkopf (50cm ILC-Wand)

Bauteil 1: Außenwand	
U <sub>1</sub> -Wert:	0,405 W/(m²*K)
Länge L <sub>1</sub> :	0,94 m
F <sub>1</sub> =	1
U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> =	0,381 W/(m²*K)

Bauteil 2: Fenster	
U <sub>2</sub> -Wert:	1,0005 W/(m²*K)
Länge L <sub>2</sub> :	2,0 m
F <sub>2</sub> =	1
U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> =	2,001 W/(m²*K)

Therm 1:	
U <sub>Therm1</sub> -Wert:	0,928 W/(m²*K)
Länge L <sub>Therm1</sub> :	2,94 m
F <sub>Therm1</sub> =	1
(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )=	2,728 W/(m²*K)

$\Psi$ -Wert= (U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )-( U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> +U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> )
$\Psi$ -Wert= 0,346 W/(m²*K)

#### Differenz zu Variante 1.2

$$\Psi_{\text{Variante 1.2}} - \Psi_{\text{Variante 1.3}} = +0,117 \text{ W/(m}^2\text{K)}$$

Der gedämmte Zwischenbodenkopf verbessert die Wärmebrücke der Variante 1.2 um 0,117 W/m²K

Wie zu erwarten kann anhand der zusätzlichen Dämmung des Kopfes der Zwischendecke der  $\Psi$ -Wert gegenüber der Variante 1.2 verbessert werden. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Dämmebene verbessert wird.

### Variante 1.4

Wie die bisherigen Wärmebrückenberechnungen zeigen liegt die Schwachstelle der Wärmebrücke insbesondere in dem Bereich, wo der untere Fensteranschluss, der Balkonanschluss und der Zwischenbodenkopf aufeinander treffen. Mit der in Variante 1.3 aufgeführten Dämmung des Zwischenbodenkopfes kann der  $\Psi$ -Wert bereits verbessert werden. Eine zusätzliche Absträgung des Zwischenbodenkopfes und Dämmung Anhand eines Dämmkeils wird nachfolgend untersucht.

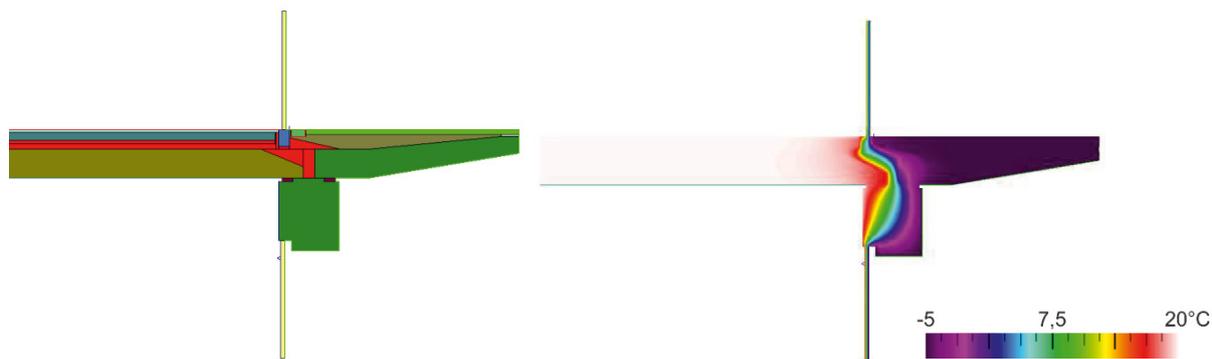


Bild 187: Balkonanschluss mit abgeschrägtem und gedämmtem Zwischenbodenkopf für eine 50cm dicke ILC-Wand

Tabelle 33: Berechnung des  $\Psi$ -Werts mit abgeschrägtem und gedämmtem Zwischenbodenkopf (50cm ILC-Wand)

Bauteil 1:	Außenwand
$U_1$ -Wert:	0,405 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_1$ :	0,94 m
$F_1$ =	1
$U_1 * L_1 * F_1$ =	0,381 W/(m <sup>2</sup> *K)

Bauteil 2:	Fenster
$U_2$ -Wert:	1,0005 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_2$ :	2,0 m
$F_2$ =	1
$U_2 * L_2 * F_2$ =	2,001 W/(m <sup>2</sup> *K)

Therm 1:	
$U_{Therm1}$ -Wert:	0,907 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_{Therm1}$ :	2,94 m
$F_{Therm1}$ =	1
$(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1})$ =	2,667 W/(m <sup>2</sup> *K)

$\Psi$ -Wert= $(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$	
$\Psi$ -Wert=	0,285 W/(m <sup>2</sup> *K)

Differenz zu Variante 1.2	
$\Psi_{Variante1.2} - \Psi_{Variante1.4} =$	+0,178 W/(m <sup>2</sup> *K)

Der abgeschrägte und gedämmte Zwischenbodenkopf verbessert die Wärmebrücke der Variante 1.2 um 0,178 W/m<sup>2</sup>\*K

Die Berechnungen zeigen, dass durch die weitere Verringerung und gleichzeitige Dämmung der Schwachstelle der  $\Psi$ -Wert weiter verbessert werden kann.

An dieser Stelle muss aufgeführt werden, dass bei den Simulationen in erster Linie die Verbesserung der Wärmebrücke angestrebt wurde. Inwieweit die Verbesserungen aus bautechnischer Sicht und dem damit verbundenen Aufwand und den Kosten als sinnvoll erscheinen sollte an einer anderen Stelle diskutiert werden.

### Variante 1.5

Neben der Verbesserung der Wärmebrücke über zusätzliche Dämmung wird der Einfluss der Verschiebung des Fensters ermittelt. Mit dieser Untersuchung soll abgeschätzt werden welche Platzierung des Fensters aus Wärmebrückentechnischer Sicht am sinnvollsten erscheint.

In einer ersten Untersuchung wird das Fenster mittig zum ILC-Bauteil angeordnet.

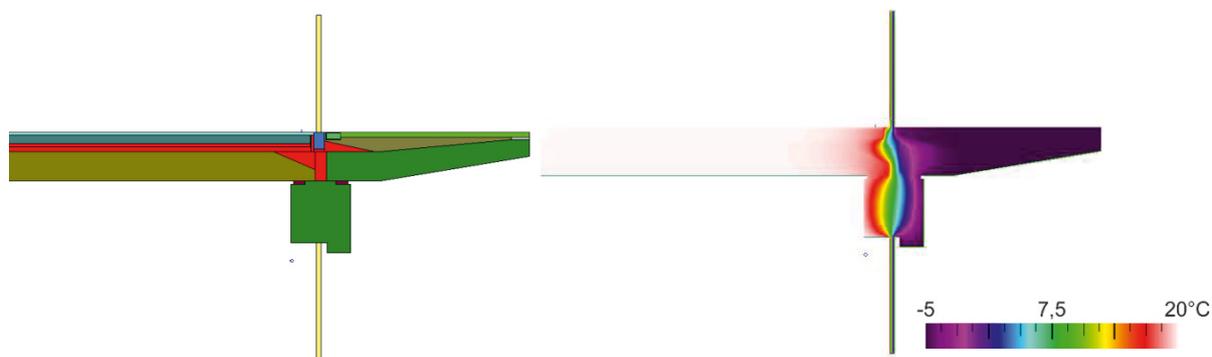


Bild 188: Balkonanschluss mit mittiger Anordnung des Fensters sowie abgeschrägtem und gedämmtem Zwischenbodenkopf für eine 50cm dicke ILC-Wand

Tabelle 34: Berechnung des  $\Psi$ -Werts mit mittiger Anordnung des Fensters sowie abgeschrägtem und gedämmtem Zwischenbodenkopf (50cm ILC-Wand)

Bauteil 1:	Außenwand
$U_1$ -Wert:	0,405 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_1$ :	0,94 m
$F_1$ =	1
$U_1 * L_1 * F_1$ =	0,381 W/(m <sup>2</sup> *K)

Bauteil 2:	Fenster
$U_2$ -Wert:	1,0005 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_2$ :	2,0 m
$F_2$ =	1
$U_2 * L_2 * F_2$ =	2,001 W/(m <sup>2</sup> *K)

Therm 1:	
$U_{Therm1}$ -Wert:	0,875 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_{Therm1}$ :	2,94 m
$F_{Therm1}$ =	1
$(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1})$ =	2,573 W/(m <sup>2</sup> *K)

$\Psi$ -Wert=	$(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$
$\Psi$ -Wert=	0,191 W/(m <sup>2</sup> *K)

Differenz zu Variante 1.2	
$\Psi_{Variante1.2} - \Psi_{Variante1.5} =$	+0,272 W/(m <sup>2</sup> *K)

Der abgeschrägte und gedämmte Zwischenbodenkopf und das Fenster mittig im ILC-Bauteil verbessert die Wärmebrücke der Variante 1.2 um 0,272 W/m<sup>2</sup>\*K

Die Untersuchung zeigt, dass mit der Verschiebung des Fensters der  $\Psi$ -Wert zum einen hinsichtlich Variante 1.2 aber auch hinsichtlich Variante 1.4 verbessert werden kann. Dies ist dadurch zu begründen, dass mit der mittigen Anordnung des Fensters die Dämmebene nicht so sehr verspringt wie bei Variante 1.4, bei welcher das Fenster auf der Innenseite liegt. Je homogener die Dämmebene verläuft umso besser ist die Dämmwirkung. Wird diese Ebene durch ungedämmte Bauteile beeinflusst so ergibt sich ein größerer  $\Psi$ -Wert.

### Variante 1.6

Eine weitere Variante ist die Anordnung des Fensters auf der Außenseite der ILC-Wand.

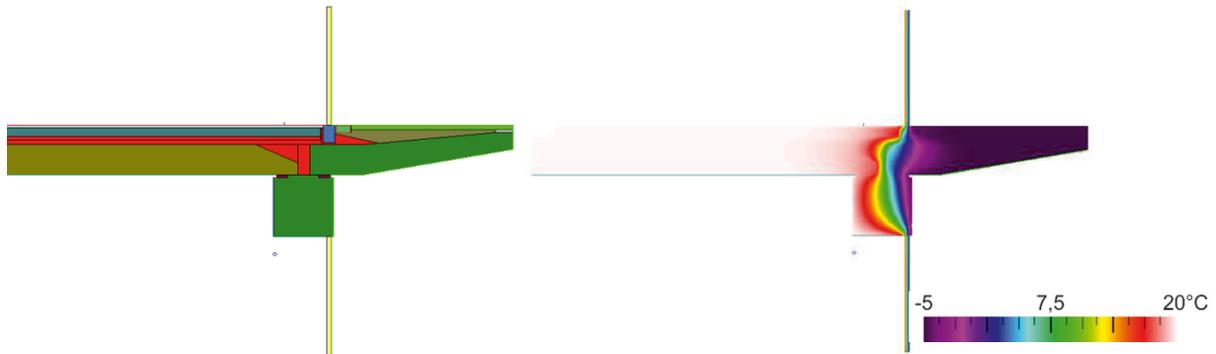


Bild 189: Balkonanschluss mit äußerer Anordnung des Fensters sowie abgeschrägtem und gedämmtem Zwischenbodenkopf für eine 50cm dicke ILC-Wand

Tabelle 35: Berechnung des  $\Psi$ -Werts mit äußerer Anordnung des Fensters sowie abgeschrägtem und gedämmtem Zwischenbodenkopf (50cm ILC-Wand)

Bauteil 1:	Außenwand
$U_1$ -Wert:	0,405 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_1$ :	0,94 m
$F_1$ =	1
$U_1 * L_1 * F_1$ =	0,381 W/(m <sup>2</sup> *K)

Bauteil 2:	Fenster
$U_2$ -Wert:	1,0005 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_2$ :	2,0 m
$F_2$ =	1
$U_2 * L_2 * F_2$ =	2,001 W/(m <sup>2</sup> *K)

Therm 1:	
$U_{Therm1}$ -Wert:	0,903 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_{Therm1}$ :	2,94 m
$F_{Therm1}$ =	1
$(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1})$ =	2,655 W/(m <sup>2</sup> *K)

$\psi$ -Wert=	$(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$
$\psi$ -Wert=	0,273 W/(m <sup>2</sup> *K)

Differenz zu Variante 1.2	
$\Psi_{Variante1.2} - \Psi_{Variante1.6} =$	+0,190 W/(m <sup>2</sup> *K)

Der abgeschrägte und gedämmte Zwischenbodenkopf und das Fenster außen im ILC-Bauteil verbessert die Wärmebrücke der Variante 1.2 um 0,190 W/m<sup>2</sup>\*K

Die Untersuchung zeigt, dass der  $\Psi$ -Wert mit außenliegendem Fenster für diese Ausführung des Anschlussdetails besser ist als mit innenliegendem Fenster (siehe Variante 1.4). Im Vergleich zu Variante 1.5 bei welcher das Fenster in der Mitte der ILC-Wand angebracht ist schneidet die Variante 1.6 mit außenliegendem Fenster jedoch schlechter ab.

An dieser Stelle muss jedoch erwähnt werden, dass es sich dabei nicht um eine pauschale Antwort handelt welche auf alle Bauteildetails bezogen werden kann. Diese Ergebnisse gelten konkret für das simulierte Bauteil mit dem entsprechenden Aufbau.

Als weitere Varianten wird der Balkonanschluss mit 62cm ILC-Wand und Rundbogen untersucht. Es wird dabei gleich vorgegangen wie bei den Varianten 1 mit 50cm ILC-Wand. Zunächst wird eine Standard Variante untersucht und aufbauend auf dieser werden verschiedene weitere Varianten generiert und untersucht wie sich dabei der  $\Psi$ -Wert verhält.

### Variante 2.1

Als erstes wird die Standardvariante untersucht.

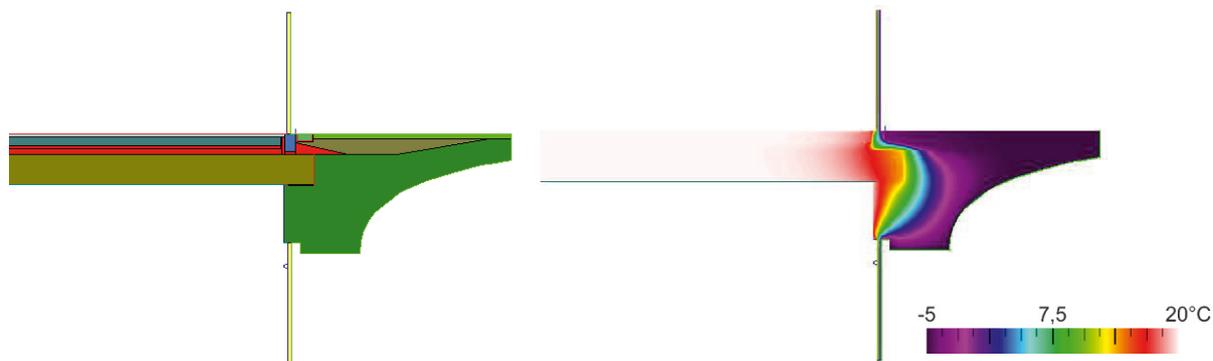


Bild 190: Oberer und unterer Fensteranschlusses mit Zwischendecke und Balkonanschluss für eine 62cm dicke ILC-Wand

Tabelle 36: Berechnung des  $\Psi$ -Werts für den oberen und unteren Fensteranschluss mit Zwischendecke und Balkonanschluss (62cm ILC-Wand)

<b>Bauteil 1:</b>	<b>Außenwand</b>
U <sub>1</sub> -Wert:	0,334 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>1</sub> :	0,90 m
F <sub>1</sub> =	1
<b>U<sub>1</sub>*L<sub>1</sub>*F<sub>1</sub>=</b>	<b>0,301 W/(m<sup>2</sup>*K)</b>
<b>Bauteil 2:</b>	<b>Fenster</b>
U <sub>2</sub> -Wert:	1,0005 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>2</sub> :	2,0 m
F <sub>2</sub> =	1
<b>U<sub>2</sub>*L<sub>2</sub>*F<sub>2</sub>=</b>	<b>2,001 W/(m<sup>2</sup>*K)</b>
<b>Therm 1:</b>	
U <sub>Therm1</sub> -Wert:	0,944 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>Therm1</sub> :	2,90 m
F <sub>Therm1</sub> =	1
<b>(U<sub>Therm1</sub>*L<sub>Therm1</sub>*F<sub>Therm1</sub>)=</b>	<b>2,738 W/(m<sup>2</sup>*K)</b>
<b><math>\Psi</math>-Wert = (U<sub>Therm1</sub>*L<sub>Therm1</sub>*F<sub>Therm1</sub>) - (U<sub>1</sub>*L<sub>1</sub>*F<sub>1</sub> + U<sub>2</sub>*L<sub>2</sub>*F<sub>2</sub>)</b>	
<b><math>\Psi</math> -Wert=</b>	<b>0,436 W/(m<sup>2</sup>*K)</b>

<b>Differenz zu Referenz 1 (62 cm)</b>
<b><math>\Psi_{\text{Referenz1}} - \Psi_{\text{Variante2.1}} = -0,012 \text{ W/(m}^2\text{*K)}</math></b>

Zwischendeckenanschluss und Balkon verschlechtert die Wärmebrücke um 0,012 W/m<sup>2</sup>\*K

<b>Differenz zu Referenz 2 (62 cm)</b>
<b><math>\Psi_{\text{Referenz2}} - \Psi_{\text{Variante2.1}} = +0,075 \text{ W/(m}^2\text{*K)}</math></b>

Der Balkon verbessert die Wärmebrücke um 0,075 W/m<sup>2</sup>\*K

Gleich wie beim Bauteil mit 50cm ILC-Wand ist zu erkennen, dass der  $\Psi$ -Wert sich mit Zwischendecke verschlechtert und mit zusätzlichem Balkonanschluss verbessert. Die Begründung dafür ist bereits unter Variante 1.1 aufgeführt.

Wie die Betrachtung von Variante 2.1 zeigt, liegt der Wärmeverlust für die Variante 1 höher da in der zweiten Variante mit einer höheren Betonüberdeckung in der an den Rundbogen angrenzenden Wand gearbeitet wird. Die Wärmeverluste bezogen auf einen laufenden Meter Wärmebrücke und pro Kelvin Temperaturdifferenz betragen somit für Variante 1 0,463W/mK und für Variante 2 0,436W/mK.

### Variante 2.2

Zunächst wird der Effekt des abgeschrägten Zwischenbodens untersucht.

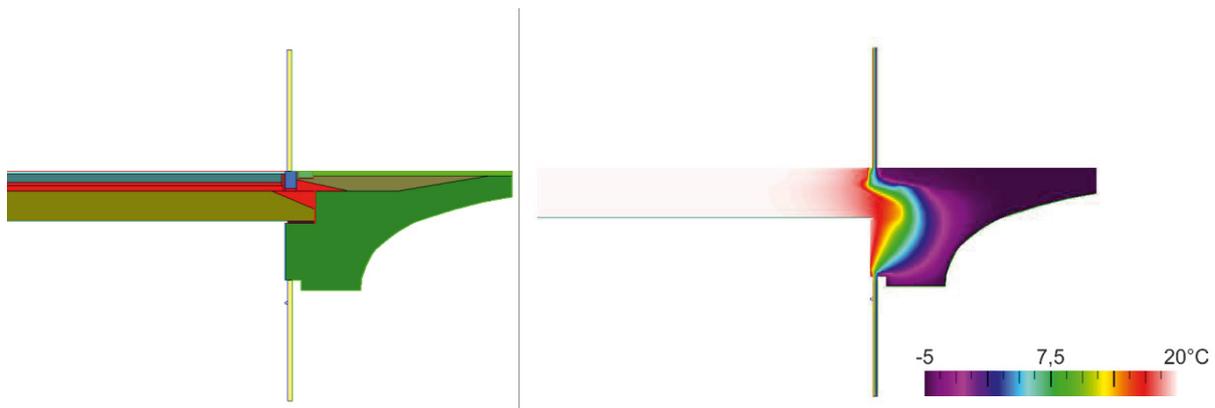


Bild 191: Balkonanschluss mit abgeschrägtem Zwischenbodenkopf für eine 62cm dicke ILC-Wand

Tabelle 37: Berechnung des  $\Psi$ -Werts mit abgeschrägtem Zwischenbodenkopf (62cm ILC-Wand)

Bauteil 1:	Außenwand
U <sub>1</sub> -Wert:	0,334 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>1</sub> :	0,90 m
F <sub>1</sub> =	1
U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> =	0,301 W/(m <sup>2</sup> *K)

Bauteil 2:	Fenster
U <sub>2</sub> -Wert:	1,0005 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>2</sub> :	2,0 m
F <sub>2</sub> =	1
U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> =	2,001 W/(m <sup>2</sup> *K)

Therm 1:	
U <sub>Therm1</sub> -Wert:	0,923 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>Therm1</sub> :	2,90 m
F <sub>Therm1</sub> =	1
(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )=	2,677 W/(m <sup>2</sup> *K)

$$\Psi\text{-Wert} = (U_{\text{Therm1}} * L_{\text{Therm1}} * F_{\text{Therm1}}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$$

$$\Psi\text{-Wert} = 0,375 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$$

#### Differenz zu Variante 2.1

$$\Psi_{\text{Variante2}} - \Psi_{\text{Variante2.1}} = +0,061 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$$

Der abgeschrägte Zwischenbodenkopf verbessert die Wärmebrücke der Variante 2.1 um 0,061 W/m<sup>2</sup>\*K

Die Berechnungen verdeutlichen, dass die Abschrägung des Zwischenbodenkopfes nur eine geringe Verbesserung des  $\Psi$ -Wertes bewirkt.

### Variante 2.3

In einem ersten Schritt wird wiederum der Einfluss eines gedämmten Zwischenbodenkopfes untersucht. Die Überdämmung beträgt dabei 10cm (Polyurethan).

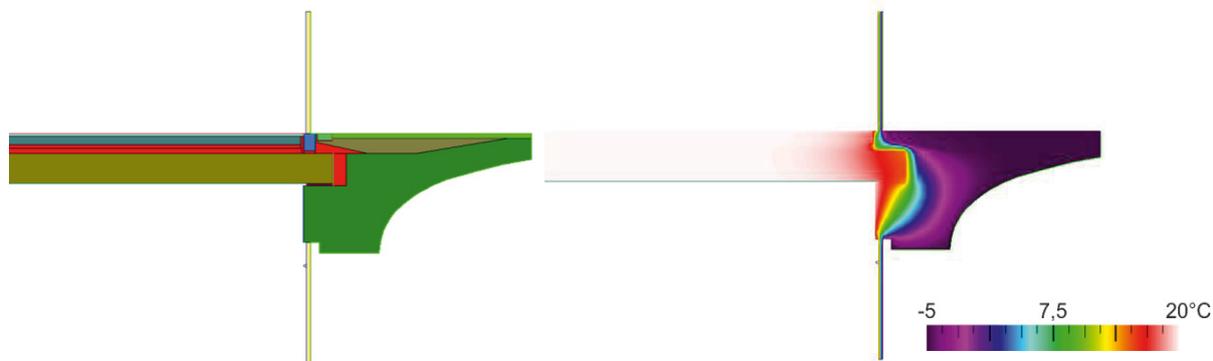


Bild 192: Balkonanschluss mit gedämmtem Zwischenbodenkopf für eine 62cm dicke ILC-Wand

Tabelle 38: Berechnung des  $\Psi$ -Werts mit gedämmtem Zwischenbodenkopf (62cm ILC-Wand)

<b>Bauteil 1:</b>	<b>Außenwand</b>
U <sub>1</sub> -Wert:	0,334 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>1</sub> :	0,90 m
F <sub>1</sub> =	1
U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> =	0,301 W/(m <sup>2</sup> *K)

<b>Bauteil 2:</b>	<b>Fenster</b>
U <sub>2</sub> -Wert:	1,0005 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>2</sub> :	2,0 m
F <sub>2</sub> =	1
U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> =	2,001 W/(m <sup>2</sup> *K)

<b>Therm 1:</b>	
U <sub>Therm1</sub> -Wert:	0,907 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>Therm1</sub> :	2,90 m
F <sub>Therm1</sub> =	1
(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )=	2,630 W/(m <sup>2</sup> *K)

$$\Psi\text{-Wert} = (U_{\text{Therm1}} * L_{\text{Therm1}} * F_{\text{Therm1}}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$$

$$\Psi\text{-Wert} = 0,328 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$$

**Differenz zu Variante 2.1**

$$\Psi_{\text{Variante2}} - \Psi_{\text{Variante2.3}} = +0,108 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$$

Der gedämmte Zwischenbodenkopf verbessert die Wärmebrücke der Variante 2.1 um 0,108 W/m<sup>2</sup>\*K

Durch die Dämmung des Zwischenbodenkopfes kann eine Reduzierung der Wärmeverluste erzielt werden. Wie die  $\Psi$ -Werte verdeutlichen kann durch die Dämmung des Zwischenbodenkopfes der Wärmeverlust im Vergleich zur Variante 2.2 mit abgeschrägtem Zwischenkopf effektiver verbessert werden.

Im Vergleich zu Variante 1.3 mit 50cm ILC-Wand ist die Verbesserung jedoch geringer. Dies ist dadurch zu begründen, dass bei Variante 2.3 durch den dicken Rundbogen des Balkons bereits eine gute Überdämmung geschaffen wird.

### Variante 2.4

Bei der Kombination der Abschrägung mit gedämmtem Zwischenbodenkopf wird aufgrund der Simulationen der vorherigen Varianten eine Reduzierung der Wärmeverluste erwartet.

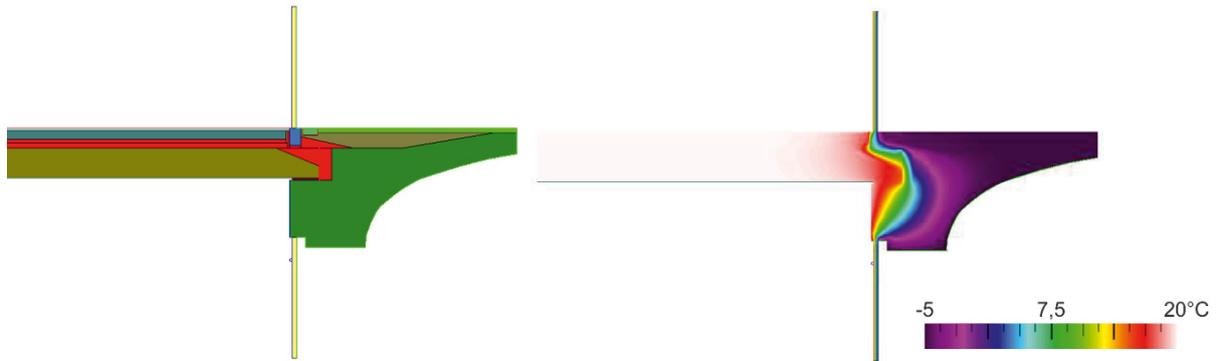


Bild 193: Balkonanschluss mit abgeschrägtem und gedämmtem Zwischenbodenkopf für eine 62cm dicke ILC-Wand

Tabelle 39: Berechnung des  $\Psi$ -Werts mit abgeschrägtem und gedämmtem Zwischenbodenkopf (62cm ILC-Wand)

Bauteil 1:	Außenwand
$U_1$ -Wert:	0,334 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_1$ :	0,90 m
$F_1$ =	1
$U_1 * L_1 * F_1$ =	0,301 W/(m*K)

Bauteil 2:	Fenster
$U_2$ -Wert:	1,0005 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_2$ :	2,0 m
$F_2$ =	1
$U_2 * L_2 * F_2$ =	2,001 W/(m*K)

Therm 1:	
$U_{Therm1}$ -Wert:	0,904 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_{Therm1}$ :	2,90 m
$F_{Therm1}$ =	1
$(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1})$ =	2,622 W/(m*K)

$\psi$ -Wert= $(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$
$\psi$ -Wert= 0,320 W/(m*K)

Differenz zu Variante 2.1
$\Psi_{Variante2} - \Psi_{Variante2.4} = +0,116 \text{ W/(m*K)}$

Der abgeschrägte und gedämmte Zwischenbodenkopf verbessert die Wärmebrücke der Variante 2.1 um 0,116 W/m\*K

Die Berechnung zeigt, dass eine Verbesserung erzielt werden kann. Die Verbesserung ist allerdings wiederum niedriger als bei der Variante ohne Rundbogen.

Nachfolgend ist eine Auflistung der Berechnungen für die Verschiebung des Fensters aufgeführt.

### Variante 2.5

Die mittige Anordnung des Fensters ist nachfolgend dargestellt.

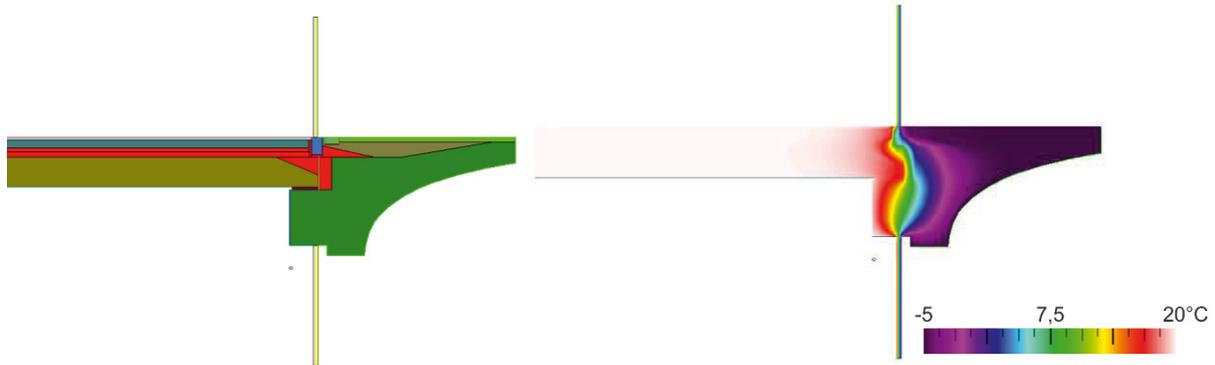


Bild 194: Balkonanschluss mit mittiger Anordnung des Fensters sowie abgeschrägtem und gedämmtem Zwischenbodenkopf für eine 62cm dicke ILC-Wand

Tabelle 40: Berechnung des  $\Psi$ -Werts mit mittiger Anordnung des Fensters sowie abgeschrägtem und gedämmtem Zwischenbodenkopf (62cm ILC-Wand)

Bauteil 1:	Außenwand
U <sub>1</sub> -Wert:	0,334 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>1</sub> :	0,90 m
F <sub>1</sub> =	1
U <sub>1</sub> *L <sub>1</sub> *F <sub>1</sub> =	0,301 W/(m*K)

Bauteil 2:	Fenster
U <sub>2</sub> -Wert:	1,0005 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>2</sub> :	2,0 m
F <sub>2</sub> =	1
U <sub>2</sub> *L <sub>2</sub> *F <sub>2</sub> =	2,001 W/(m*K)

Therm 1:	
U <sub>Therm1</sub> -Wert:	0,860 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge L <sub>Therm1</sub> :	2,90 m
F <sub>Therm1</sub> =	1
(U <sub>Therm1</sub> *L <sub>Therm1</sub> *F <sub>Therm1</sub> )=	2,494 W/(m*K)

$\psi$ -Wert=	$(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$
$\psi$ -Wert=	0,192 W/(m*K)

Differenz zu Variante 2.1
$\Psi_{Variante2} - \Psi_{Variante2.5} = +0,244 \text{ W/(m}^2\text{K)}$

Der abgeschrägte und gedämmte Zwischenbodenkopf und das Fenster mittig im ILC-Bauteil verbessert die Wärmebrücke der Variante 2.1 um 0,244 W/m<sup>2</sup>\*K

Auch bei diesem Bauteil schneidet die Variante mit Fenster in der Mitte der Außenwand besser ab als die Variante mit dem Fenster auf der Innenseite der Außenwand.

## Variante 2.6

Die äußere Anordnung des Fensters ist nachfolgend dargestellt.

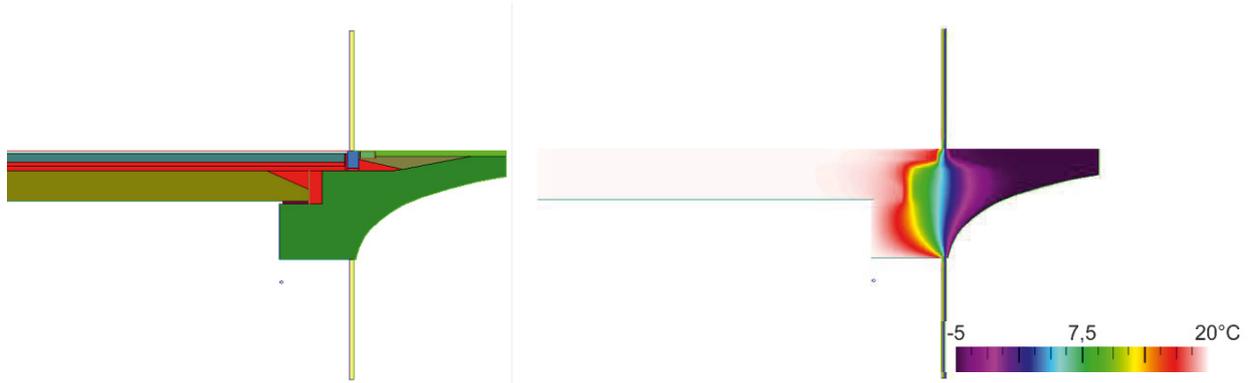


Bild 195: Balkonanschluss mit mittiger Anordnung des Fensters sowie abgeschrägtem und gedämmtem Zwischenbodenkopf für eine 62cm dicke ILC-Wand

Tabelle 41: Berechnung des  $\Psi$ -Werts mit mittiger Anordnung des Fensters sowie abgeschrägtem und gedämmtem Zwischenbodenkopf (62cm ILC-Wand)

Bauteil 1:	Außenwand
$U_1$ -Wert:	0,334 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_1$ :	0,90 m
$F_1$ =	1
$U_1 * L_1 * F_1$ =	0,301 W/(m <sup>2</sup> *K)

Bauteil 2:	Fenster
$U_2$ -Wert:	1,0005 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_2$ :	2,0 m
$F_2$ =	1
$U_2 * L_2 * F_2$ =	2,001 W/(m <sup>2</sup> *K)

Therm 1:	
$U_{Therm1}$ -Wert:	0,869 W/(m <sup>2</sup> *K)
Länge $L_{Therm1}$ :	2,90 m
$F_{Therm1}$ =	1
$(U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1})$ =	2,520 W/(m <sup>2</sup> *K)

$$\Psi\text{-Wert} = (U_{Therm1} * L_{Therm1} * F_{Therm1}) - (U_1 * L_1 * F_1 + U_2 * L_2 * F_2)$$

$$\Psi\text{-Wert} = 0,218 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$$

### Differenz zu Variante 2.1

$$\Psi_{\text{Variante 2}} - \Psi_{\text{Variante 2.6}} = +0,218 \text{ W/(m}^2\text{*K)}$$

Der abgeschrägte und gedämmte Zwischenbodenkopf und das Fenster außen im ILC-Bauteil verbessert die Wärmebrücke der Variante 2.1 um 0,218 W/m<sup>2</sup>\*K

Es kann dieselbe Einordnung wie bei der Variante mit 50cm ILC und ohne Rundbogen Balkon erfolgen: Die Wärmeabgabe bei der Variante mit außenliegendem Fenster ist geringer als bei der Variante mit Fenster auf der Innenseite, aber größer als bei der Variante mit der Anordnung des Fensters in der Mitte.