

Abschlussbericht

zum Projekt

Entwicklung neuer architektonischer, tragwerks- und brandschutztechnischer Lösungen zur Realisierung von 10-12 geschossigen Wohngebäuden in Hybridbauweise mit dem Werkstoff Holz

Phase 1: Untersuchung der besonderen Planungsaspekte zur Erreichung der Genehmigungsfähigkeit eines Hochhauses in Holzbauweise



Antragsteller: Kaden Klingbeil Architekten / Kaden + Partner Architekten
Esmarchstraße 3, 10407 Berlin

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Autoren:

Architektur:
Tom Kaden
Markus Lager
Roland Busch
Fabio Verber

Bereich Tragwerksplanung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Andre Badsteiber
Melf Sutter

Bereich Brandschutz:
Dr. Dirk Kruse
Yvonne Reinmüller

Bereich Wärmeschutz
Kai Razinger
Thorsten Kober

Bereich Schallschutz
Enrico Ziegler
Thorsten Kober

Feuchtschutz
Thorsten Kober

Datum: 17.02.2014

Abschlussbericht

zum Projekt

Entwicklung neuer architektonischer, tragwerks- und brandschutztechnischer Lösungen zur Realisierung von 10-12 geschossigen Wohngebäuden in Hybridbauweise mit dem Werkstoff Holz

Phase 1: Untersuchung der besonderen Planungsaspekte zur Erreichung der Genehmigungsfähigkeit eines Hochhauses in Holzbauweise



Antragsteller: Kaden Klingbeil Architekten / Kaden + Partner Architekten
Esmarchstraße 3, 10407 Berlin

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Autoren:

Architektur:
Tom Kaden
Markus Lager
Roland Busch
Fabio Verber

Bereich Tragwerksplanung
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Andre Badsteiber
Melf Sutter

Bereich Brandschutz:
Dr. Dirk Kruse
Yvonne Reinmüller

Bereich Wärmeschutz
Kai Razinge
Thorsten Kober

Bereich Schallschutz
Enrico Ziegler
Thorsten Kober

Feuchtschutz
Thorsten Kober

Datum: 17.02.2014

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az **30969-25**

Referat

Fördersumme

125.000,-

Antragstitel **Technologische Umsetzung von zwei zehn- bis zwölfgeschossigen Gebäuden als Vollholztragwerke mit Neuentwicklung standardisierter modularer Bauelemente**

Stichworte

Laufzeit

16 Monate

Projektbeginn

19.12.2012

Projektende

30.04.2014

Projektphase(n)

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger Kaden+Partner
Esmarchstraße 3
10407 Berlin

Tel 030 4862 4662

Fax 030 4862 4661

Projektleitung

Herr Kaden / Herr Lager

Bearbeiter

Herr Busch,

Frau Böttger, Herr Verber

Kooperationspartner Konstruktions GmbH & Co. KG Tragwerksplanung
Dehne, Kruse Brandschutzingenieure GmbH & Co KG Brandschutz
Transsolar, techn. Gebäudeausrüstung

Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens

Die Pilotprojekte und Studien zu Hochhäusern in Holz werden weiterentwickelt mit dem Ziel einer mittelfristigen Etablierung des mehrgeschossigen urbanen Holzbaus als Stand der Technik und als marktfähiges Konstruktionsprinzip. Forschungs- und Entwicklungsarbeit zwischen Architekten, Ingenieuren und Forschungseinrichtungen sollen ausgeschöpft werden mit dem Ziel, einen integralen, modulbasierten Planungsprozess zu schaffen, um daraus dann ein ökologisch wie ökonomisch konkurrenzfähiges Produkt zu entwickeln.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Entwurf, Planung und Konstruktion der Module, rechnerische Analyse der Module, Beiträge und Ergebnisse Tragwerksplanung, Brandschutz und Feuchtesicherheit/ Holzschutz für die Bauvorhaben in Flensburg müssen entwickelt, ausgewertet, mit den zuständigen Genehmigungsbehörden diskutiert und schließlich in die Planung eingearbeitet werden.

Zunächst wird der aktuelle Stand der Technik ermittelt und in einem Kriterienkatalog bewertet. Dann wird eine praxisorientierte Bauteilsystematik für 10-12-stöckige Holzhochhäuser mit offenem Grundriss und flexibler Nutzung entwickelt. Eine geeignete Modellierung für eine effiziente, kostensparende und materialgerechte Planung, Analyse, Fertigung und Montage wird festgelegt, und Strategien für ein Planungstool auf Basis einer modulorientierten Bauteilsystematik, mit dem Ziel eines rationalisierten, vereinfachten Planungs- und Konstruktionsablaufs entwickelt. Auf dieser Basis soll ein Planungssystem entstehen, mit dem Ziel eines rationalisierten, vereinfachten Planungs- und Konstruktionsablaufs. Geeignete Module werden ausgewählt, existierende Module werden eingebunden und modifiziert. Die Module werden neuentwickelt, rechnerisch analysiert und Versuche durchgeführt.

Schließlich werden die Module im Planungstool integriert und zur Genehmigung vorgelegt.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Das Projekt erfährt durch großes Interesse der Fach- und allgemeinen Presse große Öffentlichkeit. Die Präsentation von Teil I, diesem Forschungsbericht, geschieht ausschließlich via diesen Bericht. Eine Planungs- und Baustellendokumentation in Form von Buch und Film ist für Teil II eingeplant.

Fazit

Holzkonstruktionen scheinen zum gegenwärtigen Planungsfortschritt des Projekts geeignet für den Einsatz im Bereich Sonderbau-Hochhaus.

Es bedarf frühzeitiger Entscheidungen und Festlegung der Konstruktionsweise, um allseits unnötigen Aufwand zu vermeiden.

Bauaufsichtsbehörden und die jeweils Projektbeteiligten betreten mit einem Genehmigungsverfahren für ein solches Gebäude baurechtliches „Neuland“, so dass es einer fundierten Bewertungs- und Entscheidungsgrundlage bedarf. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden dazu insbesondere die zentralen Fragen hinsichtlich der Standsicherheit, der Gebrauchstauglichkeit sowie des Brandschutzes bearbeitet, um die grundsätzliche Genehmigungsfähigkeit für Hochhaus in Holzbauweise sicherzustellen. Dabei sind auch Besonderheiten hinsichtlich des Holz- und Feuchteschutzes sowie schall- und wärmeschutztechnische Aspekte untersucht worden, um ein vollständiges Genehmigungsverfahren mit gesicherten technischen Erkenntnissen zu unterlegen.

Zusammenfassend wurden dabei folgende Grundsätze für die Konzeption und Planung eines Hochhauses Holzbauweise herausgearbeitet:

- Die Grundrissgestaltung ist im Rahmen eines gegebenen bzw. festgelegten Konstruktionsrasters flexibel, so dass ein Zuschnitt von attraktivem und bedarfsgerechtem Wohnraum gut möglich ist.
- Die offensichtlich optimale Konstruktionsform eines Hochhauses in Holzbauweise besteht in einem Skelettragwerk als Primärsystem, welches durch hochsteife Elemente aus Massivholzbauteilen ausgesteift wird.
- Die Schwingungsanfälligkeit des Gebäudes aufgrund von Windbeanspruchungen lässt sich durch verschiedene Parameter wie z.B. die Bauteildimensionierung sowie Anordnung und Anzahl von Verbindungsmittel gut beherrschen.
- Das wesentliche Schutzziel, der Personenschutz, und die daraus hervorgehenden spezifischen Anforderungen an den vorbeugenden Brandschutz können durch eine angepasste Anlagentechnik und bauliche Maßnahmen in Form weiterentwickelter Holzbauteile erfüllt werden.
- Die Realisierung eines Holz-Hochhauses als KfW-Effizienzhaus 55 kann auch mit der Anordnung von zahlreichen Loggien und der daraus folgenden Abweichung von der energetisch optimalen kubischen Gebäudestruktur, mit relativ geringem technischem Aufwand erreicht werden.
- Das schallschutztechnische Niveau des erhöhten Schallschutzes nach den Empfehlungen des Bbl. 2 der Din 4109 ist nur unter besonderer Berücksichtigung der verschiedenen Flankenübertragungswege und mit besonderen Lösungen zur Entkopplung von Bauteilanschlüssen zu erreichen.
- Die bauphysikalische Robustheit und in Verbindung damit der Holz- und Feuchteschutz können auch unter den anspruchsvollen klimatischen Bedingungen, die am Standort Flensburg grundsätzlich und insbesondere für die oberen Geschosse anzusetzen sind, nachgewiesen werden.

Insgesamt kann dargelegt werden, dass die Entwicklung eines Hochhauses in Holzbauweise unter Einhaltung aller technischen und schutzzielorientierten Anforderungskriterien an ein solches Gebäude und auch unter wirtschaftlichen Aspekten möglich ist. Ferner wird jedoch auch deutlich, dass bestimmte Detailfragen z.B. hinsichtlich des Brandschutzes, des Schallschutzes sowie des Feuchte- und Holzschutzes, stets mit Rückbezug zur Architektur, einer genaueren Betrachtung bedürfen und hier weiterer Forschungsbedarf besteht. Materialgerechtes Denken und Planen sind Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz besagter Konstruktionsweisen im Hochhausbau.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	11
2	Einleitung, Zielsetzung und Anlass des Vorhabens	13
2.1	Definition des Begriffes „Hochhaus“ aus der Literatur	13
2.2	Das Projekt E28	14
2.2.1	Aufstellung der Bauleitplanung zur Einrichtung des Planrechts.....	15
2.2.2	Entwicklung von Wohnungsgrundrissen, mit Eignung für Holzhochhäuser	15
2.2.3	Möglichkeiten von innen sichtbaren Holzoberflächen als zentrales Merkmal des Gebäudes.....	18
2.2.4	Entwicklung von Leitdetails zur frühzeitigen Klärung der Genehmigungsfähigkeit.	18
2.3	Mögliche Bauweisen unter Verwendung von Holz und Holzwerkstoffen Massivholzbau	19
2.3.1	Massivholzbauweise:	19
2.3.2	Skelettbauweise:	19
2.3.3	Kastenelemente:	20
2.3.4	Holzrahmenbauweise:.....	20
2.3.5	Hybrid-Systeme.....	20
2.3.5.1	Holzbau-Mischsysteme	20
2.3.5.2	Intermaterielle Mischsysteme.....	20
2.3.5.3	Holz-Stahl-Mischsysteme.....	21
2.4	Auswahl eines optimalen Systems.....	21
3	Allgemeine Besonderheiten des Hochhausbaus	23
3.1	Definition „Hochhaus“ im Bauordnungsrecht	23
3.2	Grundsätzliche Anforderungen an Hochhäuser	23
3.2.1	Anwendungsbereich.....	23
3.2.2	Erschließung für die Feuerwehr	23
3.2.3	Bauteile	23
4	Tragwerksplanung	26
4.1	Einleitung	26
4.2	Prinzipielle Tragwerkskonzepte	26
4.2.1	Vertikale Lastabtragung - prinzipielle Lösungen	26
4.2.2	horizontale Lastabtragung - prinzipielle Lösungen.....	27
4.2.3	Treppenhaus	28

4.3	Modellierung.....	29
4.3.1	Grundrissfestlegung	29
4.4	Geometrie (und Tragwerkskonzept).....	30
4.5	Lastannahmen	33
4.5.1	Eigenlasten(G)	33
4.5.2	Nutz- und Schneelasten (Q).....	34
4.5.3	Windlast (W_x und W_y).....	35
4.5.4	Einwirkungskombinationen	38
4.6	Bauteile	38
4.7	Berücksichtigung der Verbindungsmittel.....	39
4.8	Implementierung von Brettsperrholz in Finite Elemente	42
4.9	Schwingungs- und Verformungsverhalten	46
4.9.1	Verformungsverhalten.....	46
4.9.2	Schwingungsverhalten	46
4.9.2.1	Eigen- und Erregerfrequenzen.....	46
4.9.2.2	Schwingungsanfälligkeit.....	48
4.9.2.3	Behaglichkeit.....	50
5	Analyse der Einflussparameter.....	51
5.1	Ausgangsmodell.....	52
5.2	Stützen	53
5.2.1	Werkstoff	53
5.2.2	Querschnittsabmessungen	54
5.2.3	Stützenstoß	55
5.3	Wände.....	57
5.3.1	Wandstärken	57
5.3.2	Annahme Schubmodul.....	58
5.4	Verbindungsmittel	59
5.4.1	Anzahl der Verbindungsmittel	59
5.4.2	Detailausführung/ Modellierung	61
5.5	Analyse des Schwingungsverhaltens.....	62
5.5.1	Überprüfung Schwingungsanfälligkeit nach DIN EN 1991-1-4, NA.C.2.....	63
5.5.2	Überprüfung der Behaglichkeit.....	64
5.6	Zusammenfassung Tragwerksplanung	65
5.6.1	Einfluss der einzelnen Konstruktionselemente	65
5.6.2	Schwingungsverhalten	66

6	Brandschutz	67
6.1	Allgemeine Bemerkungen	67
6.2	Allgemeine Anforderungen an den Brandschutz im Hochhausbau.....	68
6.2.1	Definition der bauordnungsrechtlichen Schutzziele und des erforderlichen Schutzniveaus für Hochhäuser.	68
6.2.1.1	Grundkonzeption und Brandschutzsystematik der M-HFHolzR	68
6.2.1.2	Beurteilung des Brandrisikos in Verbindung mit Holzbauteilen.....	68
6.3	Grundsätzliche Risiken und Lösungsansätze	69
6.3.1	Spezifische Risiken aus der Bauweise Hochhaus	71
6.3.2	Grundsatzanforderungen versus geplanter Holzbauweise	72
6.4.4	Auswahl einer Anlage nach Bewertungskriterien.....	81
6.5	Weiterentwicklung von Holzbauteilen	84
6.5.1	Erweiterte Kapselung	85
6.5.2	Bauteile mit selbstverlöschenden Eigenschaften.....	85
6.6	Grundlagen eines Brandschutzkonzepts	86
6.7	Abgeleiteter Forschungsbedarf	87
7	Wärmeschutz.....	88
7.1	Einleitung	88
7.2	Anforderungen an den Wärmeschutz	88
7.3	Eingabeparameter und Ansätze der Wärmebedarfsberechnung nach EnEV 2009	90
7.3.1	Berechnungsverfahren.....	91
7.3.2	Berechnungsergebnisse	91
7.3.3	KfW-Ergebnisse	92
7.4	Zusammenfassung Wärmeschutz.....	92
8	Schallschutz	93
8.1	Entwicklung der Schallschutzprognose für den Holzbau	93
8.1.1	Stand der Forschung und Entwicklung als Grundlage zu Schallschutzprognose für den Holzbau.....	93
8.1.2	Ergebnisse des Forschungsvorhabens.....	94
8.1.3	Anwendung der Forschungsergebnisse.....	95
8.2	Anforderungen an den Schallschutz	96
8.3	Höreindruck im gestörten Raum	98
8.4	Schallschutztechnische Nachweise	99
8.4.1	Nachweis von Trennwänden in Massivholzbauweise	99

8.4.1.1	Nachweis von HBV-Decken mit Massivholzelement als Wohnungstrenndecke (Geschossdecke)	102
8.4.2	Fußboden	105
8.4.3	Wasserinstallationen und haustechnische Anlagen	105
8.5	Zusammenfassung Schallschutz	106
8.6	Nutzung von Entkopplungssystemen	107
9	Feuchteschutz	108
9.1	Äußerer Feuchteschutz	108
9.1.1	Anforderungen an den Witterungsschutz	109
9.1.1.1	Besondere Anforderungen an vorgehängte hinterlüftete Fassaden	110
9.1.1.2	Brandschutz für vorgehängte hinterlüftete Fassaden	111
9.1.1.3	Wärmedämm-Verbundsysteme	112
9.1.1.4	WDVS für den Hochhausbau	113
9.1.2	Auswahl geeigneter Fassadensysteme und –konstruktionen zur Sicherstellung des ausreichenden äußeren Feuchteschutzes	114
9.1.3	Zusammenfassung Fassadensysteme	116
9.2	Innerer Feuchteschutz	117
9.2.1	Einfluss des Windsogs auf die konvektive Feuchtebeanspruchung von Holzbauteilen	118
9.2.2	Methodik und Ansätze der hygrothermischen Berechnung	122
9.2.3	Feuchteeintrag	122
9.2.4	Berechnungsgrundlagen	123
9.2.4.1	Allgemeines	123
9.2.4.2	Klimadaten	124
9.2.5	Bautailaufbauten	126
9.2.5.1	Wandaufbauten	126
9.2.5.2	Dachaufbauten	128
9.2.5.3	Loggia-Decken	130
9.3	Beurteilung der Berechnungsergebnisse	132
9.4	Berechnungsergebnisse	133
9.4.1	Wandbauteile	133
9.4.2	Dachbauteile	138
9.4.3	Loggia-Decke	143
9.5	Zusammenfassung Feuchteschutz	148
10	Luftdichtheit	149
11	Leitdetails	152

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Bildverzeichnis

Bild 1	Relative Anordnung der Baukörper	14
Bild 2	Beispielhafte Leitdetails für Bauteilanschlüsse	19
Bild 3	schematische Grundrissdarstellung	27
Bild 4	Schematische Darstellung der horizontalen Gebäudeaussteifung in den Außenwänden	28
Bild 5	Vertikalschnitt des Gebäudekonzepts mit Höhenangaben	30
Bild 6	Isometrien des Gebäudekonzepts mit Markierung aussteifender Wände.....	30
Bild 7	Einteilung der Wandflächen in Windbereiche [EC4]	35
Bild 8	Modellierung des Windlasteintrags in x-Richtung (RFEM, Dlubal GmbH)	37
Bild 9	Modellierung des Windlasteintrags in y-Richtung (RFEM, Dlubal GmbH)	37
Bild 10	Skizze Detail Wand/Decke, a) Randträger aus BSH b) Randträger aus Walzstahlprofil (UPE)	39
Bild 11	Schubmechanismen I und II einer Brettsperrholz-Scheibe [55] (Hirschmann, B., 2011).....	44
Bild 12	Effektive Schubsteifigkeit nach [52]	45
Bild 13	Frequenzbereich der Wind- und Erdbebeneinwirkung [53].....	47
Bild 14	Dämpfungsverhalten unterschiedlicher Werkstoffe in Abhängigkeit ihrer Beanspruchung [PetersenDyn]110	48
Bild 15	Verformungsfiguren, erste und zweite Eigenform des Systems	52
Bild 16	Eingabemaske eines Liniengelenkes bei RFEM der Dlubal Software GmbH. 61	
Bild 17	Auslösetemperaturen von Sprinklern (Quelle: URL: http://www.fire- protectionsolutions.com/cms-produkte-brandschutz- feuerschutz/sprinkleranlagen , 26.01.2014)	78
Bild 18	Sprühbilder verschiedener Sprinkler nach [34]	79
Bild 19	Vergleich Sprühbild klassischer Sprinkler mit Niederdrucknebellöschanlage (Quelle: http://www.aling.hr/clanak/40/vodena-magla , 26.01.2014).....	81
Bild 20	Isometrie mit Markierung der in der Wärmebedarfsberechnung berücksichtigten Bauteilarten	90
Bild 21	Referenzregionen in D für mittlere Strahlungsintensitäten n. DIN 4108-6	125
Bild 22	Klimabedingungen innen und außen nach WTA im Verlauf von 10 Jahren..	125
Bild 23	Jahresprofil des Referenz-Klimadatensatzes „Bremerhaven“	125
Bild 24	Jahresbilanz für solare Strahlungsbilanz und Schlagregensumme des Referenz-Klimadatensatzes „Bremerhaven“	126
Bild 25	Grafische Darstellung der untersuchten Wandbauteilvarianten gemäß der Bauteil-Modellierung in der Software	128
Bild 26	In Grafische Darstellung der untersuchten Dachbauteilvarianten gemäß der Bauteil-Modellierung in der Software	130
Bild 27	Grafische Darstellung der untersuchten Bauteilvarianten der Loggiadecken gemäß der Bauteil-Modellierung in der Software	131
Bild 28	Gesamtwassergehalt V-W1	133
Bild 29	Feuchteverlauf in der Indikationsschicht V-W1	133

Bild 30	Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwasserebene), V-W1	133
Bild 31	Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-W1	133
Bild 32	Gesamtwassergehalt V-W2	134
Bild 33	Feuchteverlauf in der Indikationsschicht V-W2	134
Bild 34	Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwasserebene), V-W2	134
Bild 35	Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-W2	134
Bild 36	Gesamtwassergehalt V-W3	135
Bild 37	Feuchteverlauf in der Indikationsschicht V-W3	135
Bild 38	Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwasserebene), V-W3	135
Bild 39	Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-W3	135
Bild 40	Gesamtwassergehalt V-W4	136
Bild 41	Feuchteverlauf in der Indikationsschicht V-W4	136
Bild 42	Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwasserebene), V-W4	136
Bild 43	Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-W3	136
Bild 44	Gesamtwassergehalt V-W5	137
Bild 45	Feuchteverlauf in der Indikationsschicht V-W5	137
Bild 46	Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwasserebene), V-W5	137
Bild 47	Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-W5	137
Bild 48	Gesamtwassergehalt V-D1	138
Bild 49	Feuchteverlauf in der Indikationsschicht V-D1	138
Bild 50	Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwasserebene), V-D1	138
Bild 51	Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-D1	138
Bild 52	Gesamtwassergehalt V-D2	139
Bild 53	Feuchteverlauf in der Indikationsschicht V-D2	139
Bild 54	Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwasserebene), V-D2	139
Bild 55	Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-D2	139
Bild 56	Gesamtwassergehalt V-D3	140
Bild 57	Feuchteverlauf in der Indikationsschicht V-D3	140
Bild 58	Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwasserebene), V-D3	140
Bild 59	Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-D3	140
Bild 60	Gesamtwassergehalt V-D4	141
Bild 61	Feuchteverlauf in der Indikationsschicht V-D4	141
Bild 62	Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwasserebene), V-D4	141
Bild 63	Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-D4	141
Bild 64	Gesamtwassergehalt V-L1	143
Bild 65	Feuchteverlauf in der Indikationsschicht V-L1	143
Bild 66	Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwasserebene), V-L1	143
Bild 67	Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-L1	143

Bild 68	Gesamtwassergehalt V-L2.....	144
Bild 69	Feuchteverlauf in der Indikationsschicht V-L2	144
Bild 70	Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschi- cht (Tauwasserebene), V-L2.....	144
Bild 71	Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-L2	144
Bild 72	Gesamtwassergehalt V-L3.....	145
Bild 73	Feuchteverlauf in der Indikationsschicht V-L3	145
Bild 74	Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschi- cht (Tauwasserebene), V-L3.....	145
Bild 75	Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-L3	145
Bild 76	Gesamtwassergehalt V-L4.....	146
Bild 77	Feuchteverlauf in der Indikationsschicht V-L4	146
Bild 78	Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschi- cht (Tauwasserebene), V-L4.....	146
Bild 79	Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-L4	146

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Entwurf für mögliche Grundrissformen.....	16
Tabelle 2	Übersicht aussteifender Wände nach Grundrissvarianten. Die Anzahl bezieht sich dabei auf das jeweilige Rastermaß der Betrachtungsrichtung (x:5,50 m; y:3,3 m)	29
Tabelle 3	Entwurf für mögliche Anordnung der aussteifenden Wände in den einzelnen Grundrissvarianten.....	31
Tabelle 4	Stützeinwirkung aus dem Eigengewicht der Decke	34
Tabelle 5	Stützeinwirkung aus dem Eigengewicht der Fassade.....	34
Tabelle 6	Lastaufbringung auf die Kopfen der Stützen unter Berücksichtigung der Lasteinzugsflächen.	35
Tabelle 7	Ermittlung der resultierenden Windlasten	36
Tabelle 8	Zusammenstellung der wesentlichen tragenden Bauteile.....	38
Tabelle 9	Ermittlung der erforderlichen Anzahl Verbindungsmittel sowie deren Steifigkeiten.....	41
Tabelle 10	Übersicht der für den Holzbau relevanten Dämpfungswerte aus [54].....	49
Tabelle 11	Empfohlene Grenzwerte für den Spitzenwert der Horizontalbeschleunigung [53]	50
Tabelle 12	Übersicht der angesetzten Materialkosten je Einheit	51
Tabelle 13	Untersuchung unterschiedlicher Stützenwerkstoffe	53
Tabelle 14	Untersuchung unterschiedlicher Stützenquerschnitte	54
Tabelle 15	Untersuchung unterschiedlicher Stützenstoß-Ausführungen	56
Tabelle 16	Untersuchung der monetären Auswirkungen der Stützenstoß-Varianten 2 und 3	56
Tabelle 17	Berechnung der Elemente der Scheiben-Steifigkeitsmatrix	57
Tabelle 18	Untersuchung unterschiedlicher Wandstärken	58
Tabelle 19	Untersuchung unterschiedlicher Schubsteifigkeitsberechnungen.....	59
Tabelle 20	Maximalanzahl der Verbindungsmittel (Variante 2)	60
Tabelle 21	Untersuchung unterschiedlicher Verbindungsmittelmengen	60
Tabelle 22	Anzahl der Verbindungsmittel	60
Tabelle 23	Untersuchung verschiedener Liniengelenk-Modellierungen	62
Tabelle 24	Untersuchung der Horizontalbeschleunigung	65
Tabelle 25	Gegenüberstellung der bauaufsichtlichen Anforderungen und der geplanten Ausführung wesentlicher Bauteile eines Hochhauses	73
Tabelle 26	Bewertungskriterien für Sprinkleranlagen [42]	83
Tabelle 27	Bewertungskriterien für Niederdruckwassernebellöschanlagen [42]	83
Tabelle 28	Bewertungskriterien für Hochdruckwassernebellöschanlagen [42].....	84
Tabelle 29	Einfluss des A/V_e -Kennwertes auf den max. zul. Primärenergiebedarf infolge der Loggia-Anordnung in der Gebäudefassade	89
Tabelle 30	Auszug aus DIN 4109 für normale Schallschutzanforderungen und Bbl. 2 zu DIN 4109 für erhöhte Schallschutzanforderungen	96
Tabelle 31	Auszug aus Tabelle 4 DIN 4109	97
Tabelle 32	Anforderungen an die Luft- und Trittschalldämmung zwischen „besonders lauten“ und schutzbedürftigen Räumen	98
Tabelle 33	Darstellung der Bauteilleistung zwischen Sende- und Empfangsraum.....	98

Tabelle 34	Anforderungen an die Baustoffklasse von Außenwandbekleidungen nach Bauordnung.....	114
Tabelle 35	Gegenüberstellung der in Frage kommenden Fassadensysteme	115
Tabelle 36	Druckbeiwerte $q_{p,i}$ aus DIN EN 1991-1-4, Tabelle 7.1 und Tabelle 7.2 — Empfohlene Außendruckbeiwerte - für die Windsog beanspruchten Bereiche des Gebäudes.....	120
Tabelle 37	Mittlere Windsogbelastungen für die durch Windsog beanspruchten Bauteile	121
Tabelle 38	Ansätze und Rechenwerte für die hygrothermische Berechnung	123
Tabelle 39	Varianten der untersuchten Wandbauteile.....	127
Tabelle 40	Varianten der untersuchten Dachbauteile.....	129
Tabelle 41	Varianten der untersuchten Loggiadecken	131

1 Zusammenfassung

Seit der Realisierung von ersten innerstädtischen mehrgeschossigen Holzkonstruktion lässt sich ein enormer Anstieg des Interesses von Seiten privater und öffentlicher Bauherrn, der Bauindustrie und der staatlichen Organe an der Verwendung von Holz für den mehrgeschossigen Wohnbau im urbanen Raum feststellen.

Gründe dafür sind unter anderem die Suche nach Bauweisen mit geringerem CO₂-Footprint in der Herstellung, dem Betrieb und dem Rückbau, also insgesamt die Lebenszyklusbetrachtungen mit Hinblick auf die Umweltfaktoren und die Kosten. Insbesondere die zunehmend favorisierten Niedrigenergie- und Passivhausbauweisen sorgen dafür, dass die Kosten für leichte und materialsparenden Holzbauten heute überaus wettbewerbsfähig sind im Vergleich zu den schweren konservativen Bauweisen in Beton oder Mauerwerk. Maßgebend unterstützt wird die Entwicklung hin zur Holzbauweise von den signifikanten technischen Neu- und Weiterentwicklungen im Bereich des Ingenieurholzbaus, der Verbindungstechnik, der Blockverleimung von Brettschichtholzträgern beliebiger Länge und vor allem der präfabrizierten flächigen Holzprodukte, wie beispielsweise hochfeste Furnierschichtholzplatten und große Massivholzscheiben aus Brettsperrholz. Diese neuen Werkstoffe sind insbesondere für den Einsatz im Holzhochhausbau von herausragender Bedeutung, wo ihre spezifischen Vorteile besonders gefordert sind.

Die technische Machbarkeit und die erfolgreiche Marktgängigkeit von Holzhochhäusern konnte in Europa mit einzelnen Pilotprojekten mit bis zu 9 Stockwerken bereits gezeigt werden.

Eine Analyse des laufenden Bau- und Forschungsgeschehens im Holzbau zeigt, dass für den Zeitraum der kommenden 5 Jahre es zunächst eine Weiterentwicklung der Pilotprojekte und Studien zu Hochhäusern in Holz unumgänglich ist, mit dem Ziel einer mittelfristigen Etablierung des mehrgeschossigen urbanen Holzbaus als Stand der Technik und als marktfähiges Konstruktionsprinzip. Die dazu notwendigen Entwicklungsarbeiten im Hinblick auf spezifische Fragen der Architektur, Tragwerksplanung sowie der bauphysikalischen Aspekte sollen sinnvoller Weise auf 10 bis 12 geschossige Hochhäuser beschränkt werden.

Die bisher am Markt befindlichen Standardlösungen für Decken, Fassaden, Stützen, Wände und Aussteifungssysteme sind für den Einsatz in Gebäuden mit 1-5 Stockwerken entwickelt worden. Aufgrund der deutlich höheren Anforderungen im Hochhausbau, z.B. hinsichtlich der tragwerks- und brandschutztechnischen Eigenschaften, übertragen werden. Umgekehrt werden Vorteile wie geringe Bauzeiten, Baustellen ohne Feuchteintrag durch Beton oder Mörtel, Vorfertigung und Modularität im Hochhausbau umso bedeutender und sind ebenfalls in Vergleichsbetrachtungen zu untersuchen.

Da jede Bauaufsichtsbehörde und die jeweils Projektbeteiligten mit einem Genehmigungsverfahren für ein solches Gebäude baurechtliches „Neuland“ betreten würden, bedarf es einer fundierten Bewertungs- und Entscheidungsgrundlage. Diese muss insbesondere die zentralen Fragen hinsichtlich der Standsicherheit, der Gebrauchstauglichkeit sowie des Brandschutzes beantworten, um die grundsätzliche Genehmigungsfähigkeit sicherzustellen. Ferner sind auch Besonderheiten hinsichtlich des Holz- und Feuchteschutzes sowie schall- und wärmeschutztechnische Untersuchungen anzustellen, um ein vollständiges Genehmigungsverfahren mit gesicherten technischen Erkenntnissen unterlegen zu können.

Im Zuge einer integralen Forschungs- und Entwicklungsarbeit zwischen Architekten, Ingenieuren und Forschungseinrichtungen wurden die offenen Fragen bezüglich der Überschreitung der Hochhausgrenze mit Holzkonstruktionen aufgedeckt und untersucht. In diesem Rahmen wurden durch umfangreiche Analysen und Berechnungen zunächst die wesentlichen Fragestellungen mit der Zielsetzung beleuchtet, die grundsätzliche Genehmigungsfähigkeit eines Hochhauses in Holzbauweise darzustellen. Zusammenfassend wurden dabei folgende Grundsätze für die Konzeption und Planung eines Hochhauses Holzbauweise herausgearbeitet:

- Die Grundrissgestaltung ist im Rahmen eines gegebenen bzw. festgelegten Konstruktionsrasters flexibel, so dass ein Zuschnitt von attraktivem und bedarfsgerechtem Wohnraum gut möglich ist.
- Die offensichtlich optimale Konstruktionsform eines Hochhauses in Holzbauweise besteht in einem Skeletttragwerk als Primärsystem, welches durch hochsteife Elemente aus Massivholzbauteilen ausgesteift wird.
- Die Schwingungsanfälligkeit des Gebäudes aufgrund von Windbeanspruchungen lässt sich durch verschiedene Parameter wie z.B. die Bauteildimensionierung sowie Anordnung und Anzahl von Verbindungsmitteln gut beherrschen.
- Das wesentliche Schutzziel, der Personenschutz, und die daraus hervorgehenden spezifischen Anforderungen an den vorbeugenden Brandschutz können durch eine angepasste Anlagentechnik und bauliche Maßnahmen in Form weiterentwickelter Holzbauteile erfüllt werden.
- Die Realisierung eines Holz-Hochhauses als KfW-Effizienzhaus 55 kann auch mit der Anordnung von zahlreichen Loggien und der daraus folgenden Abweichung von der energetisch optimalen kubischen Gebäudestruktur, mit relativ geringem technischem Aufwand erreicht werden.
- Das schallschutztechnische Niveau des erhöhten Schallschutzes nach den Empfehlungen des Bbl. 2 der Din 4109 ist nur unter besonderer Berücksichtigung der verschiedenen Flankenübertragungswege und mit besonderen Lösungen zur Entkopplung von Bauteilanschlüssen zu erreichen.
- Die bauphysikalische Robustheit und in Verbindung damit der Holz- und Feuchte-schutz können auch unter den anspruchsvollen klimatischen Bedingungen, die am Standort Flensburg grundsätzlich und insbesondere für die oberen Geschosse anzusetzen sind, nachgewiesen werden.

Insgesamt kann mit diesem Forschungsbericht dargelegt werden, dass die Entwicklung eines Hochhauses in Holzbauweise unter Einhaltung aller technischen und schutzzielorientierten Anforderungskriterien an ein solches Gebäude und auch unter wirtschaftlichen Aspekten möglich ist. Ferner wird jedoch auch deutlich, dass bestimmte Detailfragen z.B. hinsichtlich des Brandschutzes, des Schallschutzes sowie des Feuchte- und Holzschutzes, stets mit Rückbezug zur Architektur, einer genaueren Betrachtung bedürfen und hier weiterer Forschungsbedarf besteht.

2 Einleitung, Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

2.1 Definition des Begriffes „Hochhaus“ aus der Literatur

Der Begriff „Hochhaus“ wird in der einschlägigen Literatur mit folgenden wesentlichen Merkmalen definiert und beschrieben:

„Hochhaus: Der Bautyp Hochhaus umfasst Bauwerke, die sich über die Form definieren. Es handelt sich dabei um vielgeschossige, vertikal organisierte Bauten, die häufig Wohn-, Büro- und Geschäftsfunktionen aufnehmen.“[1]

„Hochhaus: Vielgeschossiges, vertikal erschlossenes Gebäude erste moderne Bauten als ‚Wolkenkratzer‘ seit Ende des 19. Jh. In den USA infolge rapide steigender Bodenpreise entstanden. Nach dem 2. Weltkrieg spontane Zunahme aus Gründen stärkerer Konzentration der Bebauung auf innerstädtische Räume und als Element städtebaulicher Ordnung. Verwendung für Wohngebäude, Hotels, Verwaltungs-, Kultur, Bildungseinrichtungen. Voraussetzung für die Errichtung sind moderne, industrielle Bauweisen (Skelettbauweise, Stahlbeton u.a.)“.[2]

„Hochhaus: Die Typologie des Hochhauses entwickelte sich bis auf wenige Ausnahmen zwischen etwa 1870 und 1950 in den USA mit den Schwerpunkten in den konkurrierenden Städten New York und Chicago. Die ersten mehrstöckigen Gebäude mit Aufzügen entstanden um 1870 in New York, während die brandsichere Skelletbauweise von der 1. Schule von Chicago nach dem Brand der Stadt im Jahr 1871 entwickelt und für Verwaltungs- und Bürohäuser angewandt wurde“ [3]

Im Zuge dieser Grundlagenstudie soll nicht weiter auf die Geschichte des Hochhausbaus im Allgemeinen eingegangen werden. Dennoch soll an dieser Stelle verwiesen werden auf die hohe Zahl an aktuellen Forschungsprojekten, die momentan zum vielgeschossigen Holzbau bearbeitet werden. Die Konzentration von Wohnraum bzw. Nutzfläche auf möglichst wenig Grundfläche ist eine der wesentlichen Besonderheiten des Hochhausbaus. Je mehr Geschosse das Hochhaus aufweist, desto besser wird das Verhältnis Wohn- zu Grundfläche aus ökonomischer Sicht. Insbesondere im Hinblick auf ökonomische Betrachtungen stellt sich jedoch die zentrale Frage, ab welcher Gebäudehöhe bzw. Geschossanzahl die technischen und damit auch die finanziellen Mehraufwendungen, die für die Errichtung eines Hochhauses im Vergleich zu Gebäuden unterhalb der Hochhausgrenze notwendig, sinnvoll und gerechtfertigt sind.

2.2 Das Projekt E28

Entscheidend für die „Wahl“ des Typus Hochhaus sind im Falle E28 (Ecknerstraße 28, Flensburg) die Geometrie des Grundstücks im Zusammenhang mit den stadtplanerischen Vorgaben der Stadtverwaltung Flensburg. Die Anbindung des benachbarten Jugendaufbauwerks östlich des Grundstücks sowie des Jens-Due-Wegs sind städtische Voraussetzungen für den Entwurf. Hierfür wird der Öffentlichkeit ein Geh-, Fahr- und Leitungsrecht über das Privatgrundstück gewährt. Da das Grundstück im Süden (zum Sportplatz hin) begrenzt wird durch einen ansteigenden, bewachsenen Hang in Höhe von etwa sieben Metern, ist ein nicht unwesentlicher Teil des Grundstücks natürlich verschattet. Daher rührt der Wunsch der Bauherrn, die Gebäudekörper (gleich welchen Typs) möglichst weit nach Norden zu rücken. Da die Anbindung des JAW (Jugendaufbauwerk) bereits am nördlich gelegenen Hang angelegt ist, kommt für den Verlauf des Weges nur die Nordseite des Grundstücks in Frage. Es gilt also, die Gebäudekörper in Nord-Süd-Ausrichtung möglichst kurz auszubilden. Hinzu kommt die seitens der Stadt angestrebte Signalwirkung, die von E28 als Vorreiterprojekt für die Entwicklung des nördlich angrenzenden „Sanierungsgebiet Neustadt“ gewünscht wird. Es soll die südlich gelegenen, etablierten Stadtteile Flensburgs mit dem „Sanierungsgebiet Neustadt“ verbinden.

Besagte notwendige Wegeverbindung, qualitätsvoller Außenraum und Signalwirkung kombiniert mit dem Wunsch der Bauherrn, möglichst viel Ausblick auf Förde und Umgebung zu erzielen, führen der Anspruch der Architekten nach Maximierung von Ausblick und natürlicher Belichtung zu der logischen Konsequenz: Sinnvoll sind ungerichtete Baukörper, die so weit wie möglich an den nördlichen Hang positioniert werden. Die Stellung der Gebäude zueinander ergibt sich aus den Untersuchungen zu visueller Durchlässigkeit und Ausblick, wie in Bild 1 dargestellt.

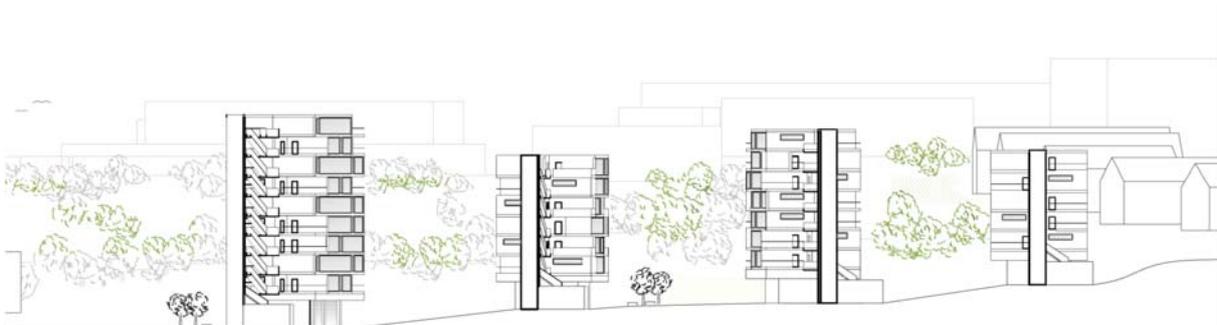


Bild 1 Relative Anordnung der Baukörper

Die Höhe der Baukörper folgt dem Ziel, das innerstädtische Grundstück ökonomisch angemessen auszunutzen. Dies entspricht auch dem Bedarf an Wohnraum, der in Flensburg vorliegt (siehe auch [4]).

An dieser Stelle erfolgt der Verweis auf die „Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern“ [5]. Hier wird unterschieden in Bauten mit weniger als 60 Metern Höhe und solchen, die höher sind. Aufgrund der beschriebenen städtebaulichen Parameter und den Vorgaben des Stadtplanungsamtes wird E28 mit gut 33 Metern Höhe in die Kategorie der Gebäude unter 60 Metern Höhe eingestuft.

Damit gilt zunächst:

- Das Gebäude muss über ein Sicherheitstreppenhaus verfügen.
- Automatische Feuerlöscher-, Brandmelde- und Alarmierungsanlagen sind nicht erforderlich.

Die unterschiedlichen Notwendigkeiten beim Bau von Hochhäusern mit weniger bzw. mehr als 60 Metern Höhe sind insbesondere im Hinblick auf Effizienz und Ökonomie immens. Der Mehraufwand, der für die prototypische Anwendung der Holzbauweise notwendig wird, dürfte mit steigender Höhe exponentiell zunehmen. Dieser mit der Höhe steigende Mehraufwand steht im Widerspruch zu der mit zunehmender Geschossanzahl steigenden Effizienz des Hochhauses. Trotz der eingeschränkten Ausnutzung des Typus Hochhaus stellt dieser die richtige architektonische Antwort auf die vorliegende Entwurfsaufgabe dar.

Die Tatsache, dass es sich bei E28 um ein zu realisierendes Projekt handelt, das partizipativ entwickelt wird, garantiert die wirtschaftliche Konkurrenzfähigkeit der hier untersuchten Konstruktionen. Bislang ist das Bauen von massiven Konstruktionen zu geringeren Kosten möglich als das Konstruieren mit Holz. Stellt man allerdings im Sinne des Energiestandards und der Ausstattung sowie vor allem hinsichtlich des CO₂-Footprint gleichwertige Gebäude her, gleichen sich auch die Kosten an. Ein Großteil der höheren Kosten für den Holzbau entstehen durch die ihm noch immer anhaftende Sonderrolle und die damit verbundene Notwendigkeit aufwendiger Einzelfall-Regelungen. Dies gilt insbesondere im Falle von Gebäuden der Gebäudeklasse 5 und für Sonderbau. Durch umfangreiche Forschungsarbeit und vielschichtiges Engagement seitens Bauherren und Architekten/Ingenieuren etablieren sich Konstruktionen und Bauweisen, die dem Holzbau zunehmend den Weg in eine breitere Verwendbarkeit ebnen.

2.2.1 Aufstellung der Bauleitplanung zur Einrichtung des Planrechts

Zur Schaffung eines Planrechts für das Hochhausprojekt bedarf es im Fall E28 der Aufstellung eines Vorhabenbezogenen Bebauungsplanes. Bereits in diesem Verfahren können vorsorglich Möglichkeiten für, evtl. notwendige, Kompensationsmaßnahmen eingeräumt werden [zum Beispiel einfache Führung von Zuwegungen für Feuerwehr und Rettungsdienst]. Weiter eignet sich die Bauleitplanung zur frühzeitigen Absprache mit beteiligten Behörden. Ein Entwurf der Bauleitung ist diesem Abschluss in Anlage 3 beigelegt.

2.2.2 Entwicklung von Wohnungsgrundrissen, mit Eignung für Holzhochhäuser

Neben der städtebaulichen Dimension ist für den Erfolg des Projekts die architektonische Qualität von Häusern und Wohnungen entscheidend. Gründend auf den im Förderantrag vom 08.12.2012 beschriebenen Aspekten der gegenwärtigen Wohnungsmarktsituation sowie dem allgemeinen Wunsch nach Individualität in der (Wohn-)Architektur wird das Projekt mit partizipierenden Bauherrn (Bauherren sind Nutzer des Hauses) entwickelt. Demzufolge ist eine möglichst große Gestaltungsflexibilität in Form unterschiedlicher Grundrisslösungen unabdingbar.

Vor den Hintergründen dieser Konzeption sowie Erfahrungen aus realisierten Projekten wurden die Grundrisse für E28 auf Basis eines Rasters von ca. 3,30 x 5,50 Metern entwickelt.

Damit werden zum Beispiel wirtschaftliche Spannweiten sowie funktionale und gleichzeitig flexible Grundrisse erreicht. Innerhalb dieses Rasters kann geschossweise zwischen Ein-, Zwei- und Dreispännern gewechselt werden. Aus diesen Überlegungen wurden die in Tabelle 1 schematisch dargestellten möglichen Grundrissformen entwickelt.

Tabelle 1 Entwurf für mögliche Grundrissformen





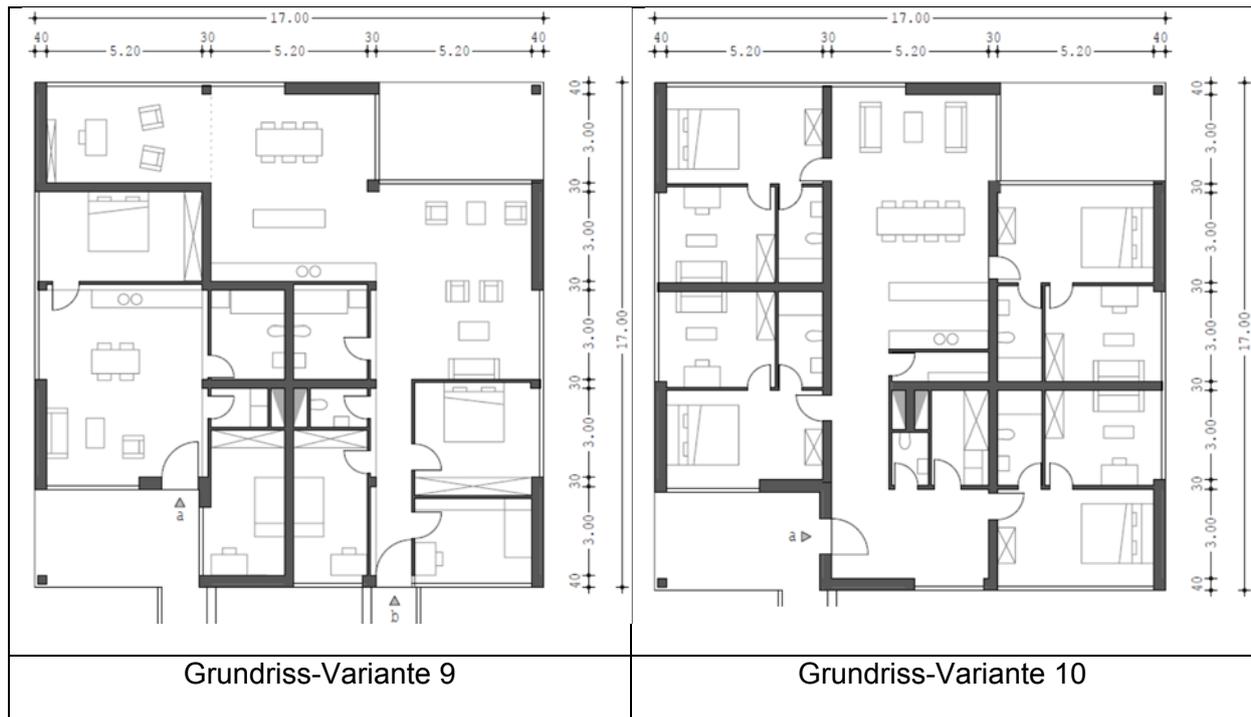
Grundriss-Variante 5

Grundriss-Variante 6



Grundriss-Variante 7

Grundriss-Variante 8



Die Erschließung ist außerhalb des Gebäudekörpers geplant. Das Gebäude selbst (ohne Erschließung) hat Außenmaße von ca. 17 x 17 Metern. Innerhalb dieser Fläche kann – abgesehen von den zur Gebäudeaussteifung notwendigen Wände und den Schächten für die Gebäudetechnik - frei gestaltet werden. Die notwendigen Wände sind in den Abbildungen markiert.

2.2.3 Möglichkeiten von innen sichtbaren Holzoberflächen als zentrales Merkmal des Gebäudes

Die Wohnungen werden partizipativ entwickelt, d.h. die Nutzerinteressen erhalten direkten Einzug die Planung. Vor dem Hintergrund allgemein steigenden Interesses am Holzbau steigt auch das Interesse an sichtbaren Holzoberflächen im Wohnbereich. Da es sich bei E28 um die erste Realisierung eines Holz-Hochhauses in Deutschland handelt, wird die Möglichkeit sichtbarer Holzoberflächen tragender Bauteile hier auf die Untersichten der Holz-Beton-Verbunddecken beschränkt. In geringeren Gebäudeklassen ist die Sichtbarkeit weiterer Bauteile möglich. Hierauf wird im Kapitel Brandschutz genauer eingegangen.

2.2.4 Entwicklung von Leitdetails zur frühzeitigen Klärung der Genehmigungsfähigkeit.

Die Leitdetails für E28 werden bereits in der Vorentwurfsphase gemeinsam mit den Fachplanern entworfen und sind für die Genehmigungsfähigkeit und die Kommunikation mit den zuständigen Behörden von hoher Bedeutung. Gerade für die Schnittstelle Architektur - Tragwerksplanung – Brandschutz werden frühzeitig Lösungen in Form von Regeldetails benötigt.

Abspraken zur Kapselung von Holzbauteilen und deren Verbindungen sollten früh mit Behörden und Prüfengeuren kommuniziert werden, um langwierige Änderungen bei fortgeschrittener Planung zu vermeiden. Repräsentativ für E28 werden in Bild 2 beispielhafte Schnitte durch Anschlüsse zwischen Außenwänden und Decken dargestellt.

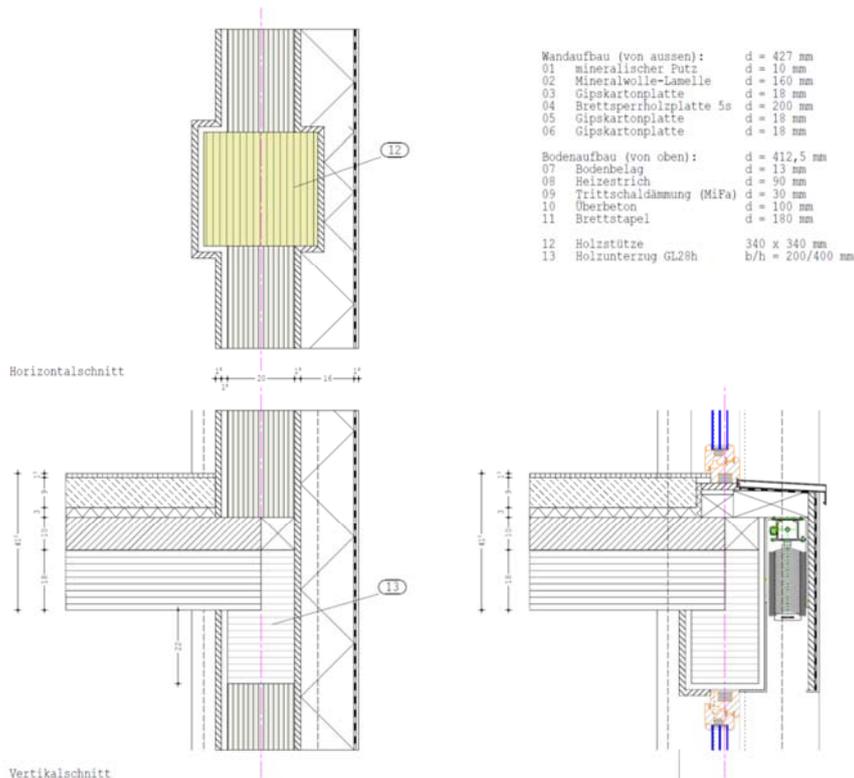


Bild 2 Beispielhafte Leitdetails für Bauteilanschlüsse

2.3 Mögliche Bauweisen unter Verwendung von Holz und Holzwerkstoffen Massivholzbau

2.3.1 Massivholzbauweise:

Die Verwendung von Massivholzbauteilen ist vornehmlich zur Ausfachung der Außenwände und zur horizontalen Aussteifung des Gebäudes geplant. Als reines Tragsystem ergeben sich jedoch bei der hier vorliegenden Gebäudehöhe erhebliche Problemstellungen insbesondere hinsichtlich der vertikalen Lastabtragung in den unteren Geschossen. Andererseits bestehen die Vorteile dieses Systems neben der hohen Scheibentragfähigkeit in der bauphysikalischen Robustheit durch einen relativ einfachen Schichtenaufbau.

2.3.2 Skelettbauweise:

Die Skelettbauweise zeichnet sich dadurch aus, dass insbesondere die vertikale Lastabtragung bei durchlaufender Stützenanordnung an genau definierbaren Stellen des Gebäudes ermöglicht wird. Dies korrespondiert auch mit der architektonischen und konstruktiven Rasteranordnung, welche E28 zugrunde liegt.

Die Skelettbauweise in Kombination mit geeigneten Aussteifungselementen hat sich im Vergleich mit Systemen aus flächigen Bauteilen auch in der Stahl- bzw. Stahlbetonbautechnik für die Errichtung hoher Gebäude als effizient und sinnvoll durchgesetzt. Dieser Ansatz wird auch hier – unter Einbeziehung unten beschriebener hybrider Systeme - favorisiert.

2.3.3 Kastenelemente:

Die Verwendung von Kastenelementen birgt die Gefahr von Brandentwicklung bzw. Brandweiterleitung in den bauweisenspezifischen Hohlräumen. Zudem ist die Verwendung etwaiger Spezialprodukte und geschlossener Systemlösungen tendenziell kostenintensiv. Die Verwendung von Kastenelementen als primäres Tragsystem wird im Falle E28 als nicht sinnvoll angesehen. Allenfalls bestehen Überlegungen, Kastenelemente als Deckensystem im Bereich von Loggien zu verwenden, um den thermischen Anforderungen entsprechen zu können, ohne beispielsweise einen Niveauunterschied mit dem Fußboden im darüber liegenden Geschoss zu erzeugen.

2.3.4 Holzrahmenbauweise:

Der Schwachpunkt der Holzrahmenbauweise liegt in der Begrenzung der vertikalen Lastabtragung, da es im Kontaktbereich zwischen den Stielen und den Schwell- bzw. Rähmhölzern zur Belastung des Holzes quer zu Faser kommt. Ohne andere lastabtragende Elemente ist die Tragfähigkeitsgrenze der Bauteile somit nach wenigen Geschossen bereits erreicht. Des Weiteren besteht durch den vielschichtigen Aufbau mit großem Hohlraumanteil die Gefahr von Brandentwicklung bzw. Brandweiterleitung in den Bauteilen, auf welche brandschutztechnisch reagiert werden müsste. Aus diesen Gründen ist der Holzrahmenbau für die Aufgabe Hochhaus nicht geeignet und wird in diesem Zusammenhang nicht in Betracht gezogen.

2.3.5 Hybrid-Systeme

Im Hinblick auf die im Antrag beschriebenen Erfahrungen mit hybriden Systemen aus Holz- und Stahlbetonbau mit partiell verwendeten Stahlbauteilen stellt die Verwendung dieser verschiedenen Materialien in der jeweils funktionsoptimierten Verwendung die optimale Lösung für das hier beschriebene Bauaufgabe dar.

2.3.5.1 Holzbau-Mischsysteme

Stützen und Unterzüge aus Holz bzw. Brettschichtholz bilden zunächst das Traggerüst für die vertikale Lastabtragung. Als Sekundärtragwerk werden Brettsperrholzelemente als horizontal aussteifende Innen- und Außenwände angeordnet. In Anbetracht des Primärsystems kann das Gesamtsystem grundsätzlich als Holz-Skelettbau bezeichnet werden. Der hybride Anteil der Konstruktion ergibt sich durch den Einsatz von Holz-Beton-Verbundbauteilen als Geschossdecken.

2.3.5.2 Intermaterielle Mischsysteme

Wie oben beschrieben kommen sowohl reine Holzkonstruktionen aus Stützen, Unterzügen aussteifenden Wänden sowie auch hybride Elemente in Form von Holz-Beton-Verbunddecken zum Einsatz.

Dieses Gesamtsystem nutzt die Vorteile der jeweiligen Komponenten im Hinblick auf alle bautechnischen Aspekte, die für die vorliegende Bauaufgabe von zentraler Bedeutung sind. Dabei ist eine funktionsoptimierte Anordnung der Systemkomponenten insbesondere

Dies sind hier vor allem tragwerksplanerische Lösungen, brandschutztechnische sowie bauphysikalische den Schallschutz sowie auf die thermische Speichermasse des Gebäudes.

2.3.5.3 Holz-Stahl-Mischsysteme

Die Verwendung von Stahl ist vor allem im Bereich der Verbindungen geplant. Dies gewährleistet eine präzise Ein- und Weiterleitung großer Kräfte aus dem Lastabtrag und Windlasten in einzubindende Bauteile. Bei der Überlegung, ob beispielsweise Stahlunterzüge zur Anwendung kommen, gilt es abzuwägen zwischen kleineren Querschnitten des Stahlbaus und der gestalterisch wie brandschutztechnisch werthaltigeren Verwendung von Holzunterzügen. Bevorzugt werden hier Holzunterzüge, was jedoch weiteren Forschungsbedarf im Sinne genauerer Untersuchungen des Tragverhaltens beinhaltet.

2.4 Auswahl eines optimalen Systems

Eine Kerneigenschaft des geplanten Gebäudetyps ist die Verwendung von Holz als wesentlichem Baustoff für die tragenden und raumbildenden Teile. Ein wesentlicher Vorteil des Baustoffs Holz ist das relativ geringe spezifische Gewicht, das die Vorfertigung von großen Bauteilen im Werk und deren Montage auf der Baustelle erleichtert.

Ein hoher Vorfertigungsgrad bedeutet vor allem, dass Bauteile unter optimalen Arbeits- und Herstellungsbedingungen im Werk hergestellt werden können, so dass mögliche Fehler, die ansonsten üblicherweise auf der Baustelle auftreten können, deutlich reduziert werden. Zudem wird die Arbeitszeit auf der Baustelle auf ein Minimum reduziert, so dass ein Gebäude in Holzbauweise innerhalb weniger Wochen errichtet werden kann. Das Gebäude bildet somit in kürzester Zeit eine geschlossene, witterungsgeschützte Hülle, in der anschließend nur noch der Innenausbau unter idealen Bedingungen erfolgt.

Die üblicherweise im Holzbau eingesetzten Holztafelelemente weisen den Nachteil auf, dass sie nur in begrenztem Maße tragfähig sind. Für mehrgeschossige Gebäude sind daher an vielen Stellen zusätzliche lastabtragende Bauteile wie Stützen, Balken, Unter- oder Überzüge erforderlich. Neben zusätzlichen Kosten führt dies wiederum zu hohen Lastkonzentrationen an den Zusatzbauteilen, bei denen wiederum die Lastein- und -weiterleitung in die Holztafelbauteile problematisch ist. Aufwändige Verbindungslösungen sind hier die Folge.

Des Weiteren ergibt aus dem Bauteilaufbau der Holztafelbauweise eine zusätzliche Problematik, welche die Einsatzmöglichkeiten im Hochhausbau für tragende oder raumabschließende Bauteile wesentlich einschränkt.

Im Rahmen von großmaßstäblichen Normbrandversuchen konnte gezeigt werden, dass die Entzündung der Holztragkonstruktion von Holztafelelementen durch geeignete Bekleidungen verhindert werden kann. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass Anschlüsse im Holzbau bei Einhaltung von konstruktiven Mindestanforderungen eine gute Rauchdichtigkeit aufweisen. So wird die Übertragung von Rauch und Brandgasen in benachbarte oder darüber liegende Nutzungseinheiten wirkungsvoll behindert. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die Feuerwehr bei ihrem Eintreffen ein beherrschbares Szenario vorfindet.

Mit dem Nachweis, das brandschutztechnische Sicherheitsniveau bei mehrgeschossigen Holzbauten in moderner Bauweise erreichen zu können, waren die Voraussetzungen erfüllt, die M-HFHolzR 2004 zu formulieren und ihre Inhalte in Ergänzung zur MBO 2002 festzulegen.

Für Gebäude ab der Gebäudeklasse 5 muss jedoch gewährleistet sein, dass die Gefahr von schwer bekämpfbaren Hohlraumbränden absolut ausgeschlossen ist. Selbst wenn die systembedingten Hohlräume von Holztafelementen mit nicht brennbaren Dämmstoffen vollständig ausgefüllt sind, kann das Eindringen von Feuer und Rauch in die Bauteile, spätestens nach dem planmäßigen Versagen der Brandschutzbekleidung, nicht vollständig ausgeschlossen werden.

Die begrenzte Tragfähigkeit sowie die Gefahr des unentdeckten Holzraumbrandes sind somit die wesentlichen Aspekte, die die Anwendung der Holztafelbauweise im Hochhausbau in den tragenden und raumabschließenden Bauteilen grundsätzlich ausschließt.

Es wird daher ein Bausystem gewählt, das die nötige Tragfähigkeit aufweist und gleichzeitig ohne übermäßigen Aufwand die brandschutztechnischen Anforderungen erfüllen kann. Des Weiteren soll zu Verbesserung der Vermarktungsmöglichkeiten der Wohnungen die Grundrissgestaltung an möglichst wenige strukturelle Zwangspunkte gebunden ist.

Aus diesen Erwägungen wird ein System aus Stützen und Riegeln entwickelt, die zunächst auf Grundlage entsprechender Bemessung die vertikale Lastabtragung gewährleisten. Die horizontale Lastabtragung erfolgt über Decken und Wände aus Brettsperrholz, wobei die Decken in Holz-Beton-Verbundbauweise hergestellt werden. Durch die klare strukturelle Zuordnung der vertikalen und horizontalen Lastabtragung zu den jeweiligen Bauteilarten werden kombinierte Belastungen der Bauteile weitestgehend reduziert, was die Kalkulierbarkeit des Gesamtsystems im Rahmen der Tragwerksplanung deutlich erleichtert. Des Weiteren wird die generelle Vorgabe der Hohlraumfreiheit aller wesentlichen Bauteile uneingeschränkt gewährleistet. Je nach Anwendungsfall muss eine brandschutztechnisch erforderliche Bekleidung aus nicht brennbaren Baustoffen angebracht werden. Diese bietet raumseitig zusätzlich den Vorteil, dass die Renovierbarkeit der Oberflächen bei Beschädigungen und Verschmutzungen erleichtert wird.

Die Dämmung der Außenwände wird außenseitig auf die Massivholzbauteile aufgebracht und umschließt das gesamte Gebäude in einer geschlossenen Schicht, so dass die Dämmwirkung optimiert werden kann. Als Material ist ein Wärmedämmverbundsystem aus mineralischem Dämmstoff und Putz vorgesehen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Eignung bewährter, kostengünstiger Systeme für den Bereich Hochhaus.

Bei den Decken soll die unterseitige Holzoberfläche sichtbar bleiben, um den wesentlichen Baustoff des Gebäudes für die Nutzer auch optisch erlebbar zu machen.

Auch im Hinblick auf den Schallschutz ist die Wahl möglichst massiver Decken- und Wandbauteile sinnvoll. Im Abschnitt 8 „Schallschutz“ sind zu den möglichen Wand und Deckenaufbauten in schallschutztechnischer Hinsicht nähere Erläuterungen zu finden.

Die Dachelemente können je nach Vorgaben der Tragwerksplanung und der Nutzung mit oder ohne zusätzliche Betonauflage ausgeführt werden. Nach der Bauteilmontage wird hier umgehend eine erste Dachabdichtung aufgelegt, um einen unmittelbaren, witterungsgeschützten und störungsfreien Ausbau zu ermöglichen.

Auf diesen technischen und planerischen Grundparametern basieren die Untersuchungen und Ausarbeitungen dieser Forschungsarbeit in den nachfolgenden Abschnitten.

3 Allgemeine Besonderheiten des Hochhausbaus

3.1 Definition „Hochhaus“ im Bauordnungsrecht

In § 2 Abs. 4 Nr. 1 der Musterbauordnung (MBO 2002) werden Hochhäuser nach § 2 Absatz 3 Satz 2 MBO als „Gebäude mit einer Höhe von mehr als 22 m“ definiert. Die Höhe ist dabei nach Absatz 3 Satz 5 „das Maß der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, über der Geländeoberfläche im Mittel“. Liegt also der Fußboden des obersten Geschosses mit Aufenthaltsräumen mehr als 22 m über der gemittelten Geländeoberfläche, handelt es sich um ein Hochhaus.

3.2 Grundsätzliche Anforderungen an Hochhäuser

Die grundsätzlichen bautechnischen Anforderungen an Hochhäuser ergeben sich aus der Hochhaus-Richtlinie – HHR für Schleswig-Holstein – in Verbindung mit der Landesbauordnung für das Land Schleswig-Holstein (LBO-SH)

3.2.1 Anwendungsbereich

Die Richtlinie HHR für Schleswig-Holstein regelt besondere Anforderungen und Erleichterungen im Sinne von § 51 Abs. 1 LBO für den Bau und Betrieb von Hochhäusern.

3.2.2 Erschließung für die Feuerwehr

Für den Löschangriff durch die Feuerwehr im Brandfall sind entsprechende Zufahrten, Durchfahrten, Bewegungsflächen und Eingänge bereitzustellen. Dies betrifft

- ausreichende Zu- oder Durchfahrten und Bewegungsflächen
- unmittelbar erreichbare Eingänge, Zugänge zu notwendigen Treppenräumen und Feuerwehraufzüge

3.2.3 Bauteile

Tragende und aussteifende Bauteile

Tragende und aussteifende Bauteile müssen feuerbeständig sein und aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen.

Raumabschließende Bauteile

Raumabschließende Bauteile müssen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen.

Raumabschließend mit der Feuerwiderstandsfähigkeit der tragenden Bauteile müssen sein

- Geschossdecken,
- Wände von notwendigen Treppenräumen und deren Vorräumen,
- Wände der Fahrschächte von Feuerwehraufzügen und deren Vorräumen.

Raumabschließend und feuerbeständig müssen sein

- Brandwände
- Wände von Installationsschächten,
- Wände von Fahrschächten und deren Vorräumen,
- Trennwände von Räumen mit erhöhter Brandgefahr,
- Trennwände zwischen Aufenthaltsräumen und anders genutzten Räumen im Keller,
- Wände und Brüstungen offener Gänge.

Raumabschließend und feuerhemmend müssen sein

- Trennwände zwischen Nutzungseinheiten,
- Trennwände zwischen Nutzungseinheiten und anders genutzten Räumen,
- Wände notwendiger Flure,
- durchgehende Systemböden,
- durchgehende Unterdecken.

Abschlüsse von Öffnungen in raumabschließenden Bauteilen müssen

- rauchdicht und selbstschließend sein,
- die Feuerwiderstandsfähigkeit der durchdrungenen Bauteile ausweisen.
- Für Bauteile mit bestimmten Funktionen können anforderungsreduzierende Ausnahmen in Anspruch genommen werden.

Außenwände

Nichttragende Außenwände, nichttragende Teile tragender Außenwände, Außenwandbekleidungen, Balkonbekleidungen und Umwehrungen müssen in allen ihren Teilen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen.

Ausnahmen:

- Fensterprofile,
- Dämmstoffe in nichtbrennbaren geschlossenen Profilen,
- Dichtstoffe zur Abdichtung der Fugen zwischen Verglasungen und Traggerippen,
- Kleinteile ohne tragende Funktion, die nicht zur Brandausbreitung beitragen.

Dächer

Die Bauteile der Dächer müssen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Die Dachhaut darf aus brennbaren Baustoffen bestehen, wenn sie mit einer mindestens 5 cm dicken Schicht aus mineralischen Baustoffen oder Bauprodukten dauerhaft bedeckt ist. Dies gilt nicht für Dämmstoffe in nichtbrennbaren geschlossenen Profilen.

Bodenbeläge, Bekleidungen, Putze, Einbauten

Bodenbeläge, Bekleidungen, Putze und Einbauten müssen nichtbrennbar sein in

- notwendigen Treppenräumen,
- Vorräumen von notwendigen Treppenräumen,
- Vorräumen von Feuerwehraufzugsschächten,
- Räumen zwischen dem notwendigen Treppenraum und dem Ausgang ins Freie.

Bodenbeläge in notwendigen Fluren müssen schwerentflammbar sein.

Estriche, Dämmschichten, Sperrschichten, Dehnungsfugen

Estriche, Dämmschichten und Sperrschichten müssen aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen. Sperrschichten aus brennbaren Baustoffen sind zulässig, wenn sie durch nichtbrennbare Baustoffe oder Bauprodukte gegen Entflammen geschützt sind.

Dehnungsfugen dürfen mit Ausnahme der Abdeckung nur mit nichtbrennbaren Baustoffen ausgefüllt sein.

4 Tragwerksplanung

4.1 Einleitung

Die bisher am Markt erhältlichen Standardlösungen für Decken, Stützen, Wände und Aussteifungssysteme sind für den Einsatz in Gebäuden bis einschließlich zur Gebäudeklasse 4 entwickelt worden und können nicht direkt auf den Hochhausbau übertragen werden, da hier deutlich höhere Anforderungen z. B. an die tragwerkstechnischen Eigenschaften und den Brandschutz einzuhalten sind.

Das betrachtete Gebäude soll höchst flexibel, jedoch in erster Linie für Wohnzwecke, und mit nachrangiger Bedeutung für Büros und Gewerbe nutzbar sein. Deshalb sollen Nutzlasten bis maximal 5 kN/m^2 berücksichtigt werden. Dies entspricht dem 2- bis 3-fachen Beanspruchungswert heute üblicher Wohnbauten, was jedoch mit der konkurrierenden, konventionellen Massivbauweise heute bereits problemlos realisiert wird.

Hinsichtlich der Deckenspannweiten sollen die maximalen Möglichkeiten ermittelt werden, zur Erhaltung einer möglichst großen Vielfalt der Nutzungsmöglichkeit. Avisiert ist eine Flachdecken- Stützen-Konstruktion, bei der die Notwendigkeit von Unterzügen und anderen Hilfstraggliedern auf ein Minimum reduziert werden soll. Viele bisher übliche Konstruktionsprinzipien scheiden unter den gegebenen Gesichtspunkten bereits aus und es müssen neue, innovative architektonische und tragwerkstechnische Lösungen entwickelt werden. Die brandschutztechnischen Anforderungen sollen bei den vertikalen Bauteilen grundsätzlich über ausreichende Brandschutzbekleidungen realisiert werden. Lediglich die Untersichten der Geschosdecken bzw. der Dachdecke sollen eine sichtbare Holzoberfläche aufweisen, was bei der Dimensionierung dieser Bauteile zusätzlich zu berücksichtigen ist.

4.2 Prinzipielle Tragwerkskonzepte

Bei der Entwicklung des Gebäudetragerwerks wurden im ersten Schritt einige Grundsätze formuliert, die zunächst einen groben konzeptionellen Rahmen aus Anforderungen und erfahrungsbasierten technischen Möglichkeiten bilden. Dabei wurden die nachfolgenden Prinzipien herausgearbeitet.

4.2.1 Vertikale Lastabtragung - prinzipielle Lösungen

Um in der Grundrissgestaltung eine möglichst hohe Flexibilität gewährleisten zu können, wird als primäre Tragstruktur eine Skelettkonstruktion zugrunde gelegt. Dabei sollen Unterzüge und Stützen – sofern möglich – komplett in Holz bzw. Brettschichtholz ausgeführt werden. Die Holzstützen verlaufen jeweils ungestoßen über drei Geschosse, dadurch sinkt der Aufwand für die Stoßausbildung erheblich. Die Geschosdecken sollen aus vorgefertigten Holz-Beton-Verbund-Elementen hergestellt werden.

Der Stützenachsabstand sollte ca. 5,50 m nicht wesentlich überschreiten, und - sofern möglich - möglichst einheitlich sein. Im Gebäudeinneren sind vorzugsweise zwei Stützenreihen anzuordnen. Die Balkone bzw. Loggien sind entsprechend der nachfolgenden Skizze anzuordnen.

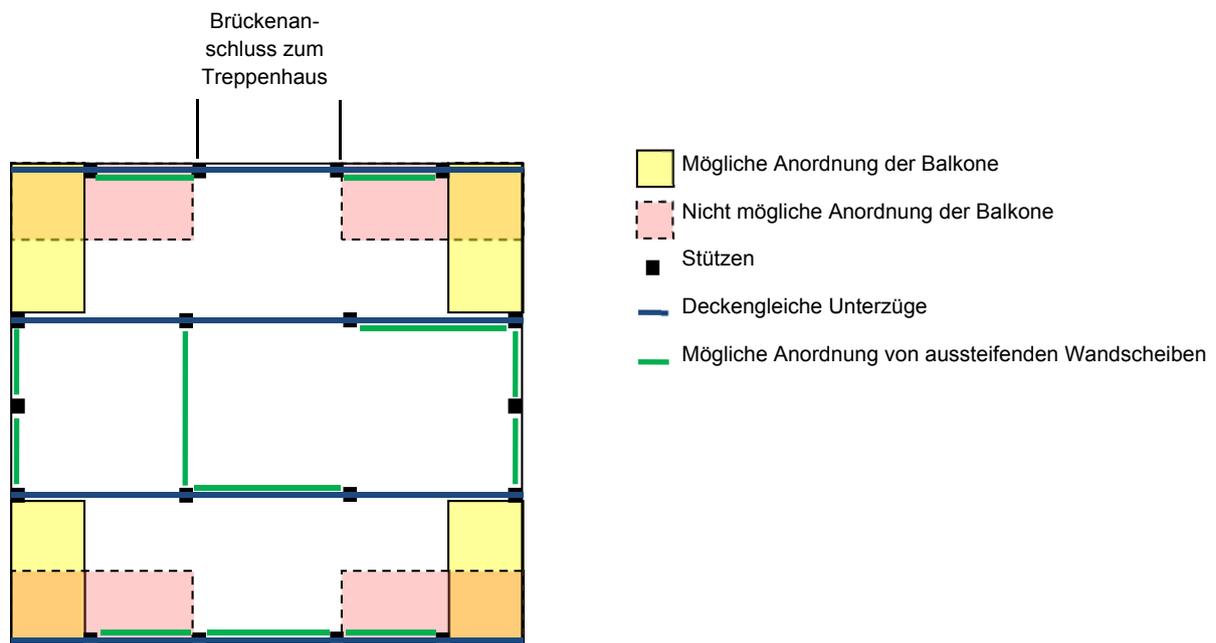


Bild 3 schematische Grundrissdarstellung

Das Erdgeschoss wird komplett in Stahlbeton geplant. Das außenliegende Treppenhaus wird komplett in Stahlbeton mit Sichtbetonoberflächen hergestellt und als eigenständiges Bauwerk vollständig vom eigentlichen Baukörper entkoppelt. Die Erschließung bzw. Anbindung zwischen Treppenhaus und Gebäude erfolgt geschossweise über Brücken aus Stahlbeton.

4.2.2 horizontale Lastabtragung - prinzipielle Lösungen

Die horizontale Aussteifung des Gebäudes erfolgt über Wandscheiben aus Brettsperrholz. Die aussteifenden Wandscheiben werden als Ausfachung in die vertikalen Ebenen des Skelettsystems eingebunden. In jedem Geschoss und jeder Fassadenseite ist ein Feld des Skelettsystems mit einer ungestörten Wandscheibe vorzusehen. Um möglichst gleichmäßige Stützenbeanspruchungen zu erhalten, ist es sinnvoll die aussteifenden Wandscheiben über die Gebäudehöhe hinweg versetzt anzuordnen (vgl. Bild 4).

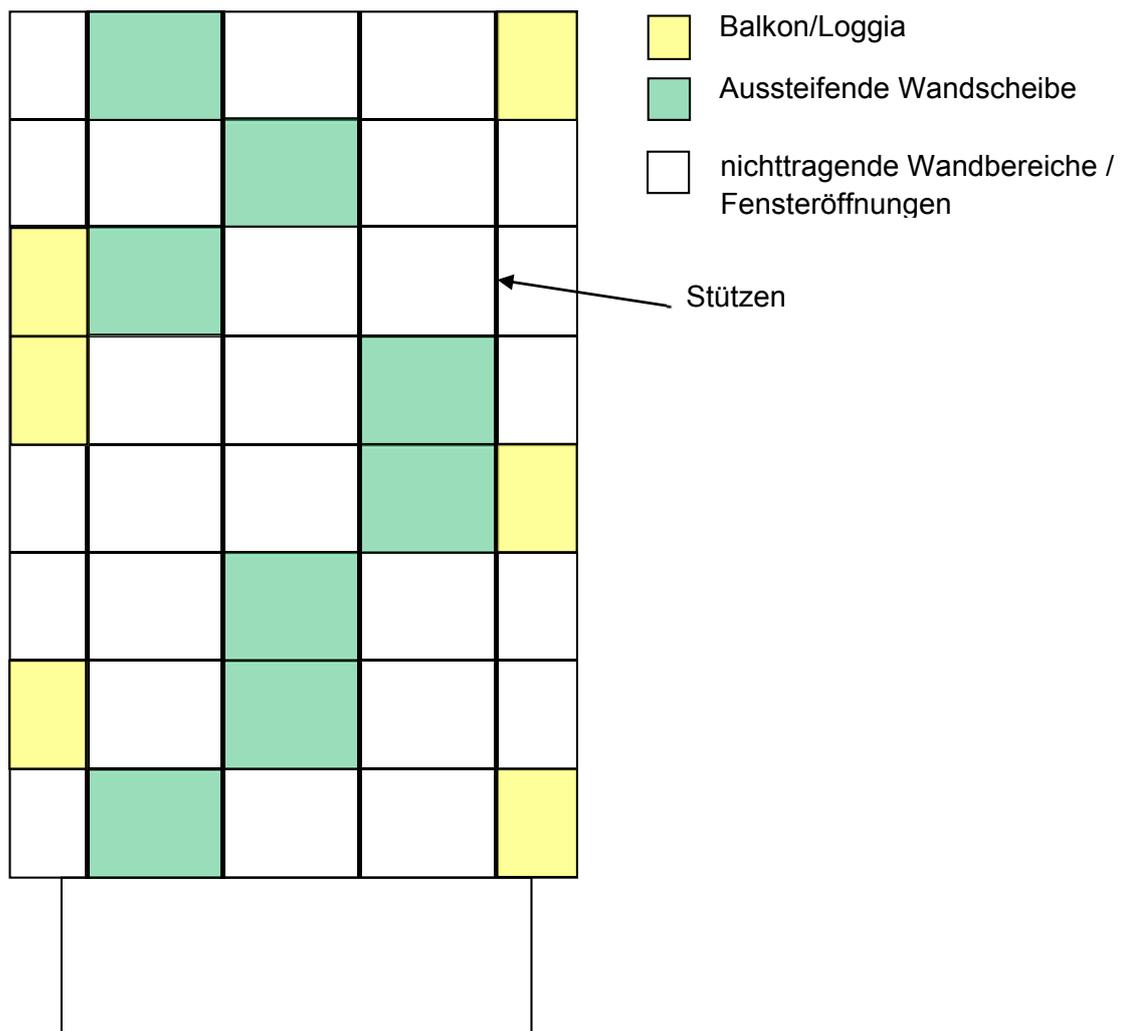


Bild 4 Schematische Darstellung der horizontalen Gebäudeaussteifung in den Außenwänden

4.2.3 Treppenhaus

Das Treppenhaus wird um 3 – 4 m vom Gebäude abgesetzt und als eigenständiges Bauwerk vom eigentlichen Baukörper entkoppelt. Dieses wird komplett in Stahlbeton mit Sichtbetonoberflächen hergestellt. Die Erschließung bzw. Anbindung zwischen Treppenhaus und Gebäude erfolgt geschossweise über Brücken aus Stahlbeton (siehe Bild 5 in Abschnitt 4.4). Hierbei ist noch herauszuarbeiten, ob die Brücken als Kragträger ausgebildet werden oder geschossweise auf Konsolen an der Außenwand des Gebäudes aufgelagert werden.

4.3 Modellierung

Die rechnergestützte Untersuchung der Konstruktion erfolgte mit der Software RFEM der Dlubal GmbH. Im Folgenden wird die genaue Eingabe des Ausgangsmodells beschrieben.

4.3.1 Grundrissfestlegung

Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, soll das Tragwerkskonzept einen möglichst großen Spielraum der Grundrissgestaltung ermöglichen. Die planmäßigen Grundrissvarianten (vgl. Tabelle 1 und Tabelle 4) sind so ausgebildet, dass sie beliebig übereinander angeordnet werden können. Dabei ist im Sinne der sinnvollen Tragwerksplanung eine zu den unteren Geschossen zunehmende Anzahl aussteifender Wände zu berücksichtigen.

Die vorliegenden zehn Grundrissvarianten gliedern sich im Wesentlichen in drei Kategorien, sortiert über die zur Verfügung stehenden Aussteifungswände. Dabei wird die Summe der Wände in x-Richtung zugrunde gelegt, da in dieser Orientierung grundsätzlich weniger Wände angeordnet sind. Dies ist in Tabelle 2 abzulesen.

Tabelle 2 Übersicht aussteifender Wände nach Grundrissvarianten. Die Anzahl bezieht sich dabei auf das jeweilige Rastermaß der Betrachtungsrichtung (x:5,50 m; y:3,3 m)

Grundriss-varianten	x-Richtung			y-Richtung		
	Anzahl der Innenwände	Anzahl der Außenwände	Summe aussteifender Wände	Anzahl der Innenwände	Anzahl der Außenwände	Summe aussteifender Wände
Nr.	$n_{IW,x}$	$n_{AW,x}$	lfdm.	$n_{IW,y}$	$n_{AW,y}$	lfdm.
1	1,5	1	13,75	7	4	36,30
2	0,5	1	8,25	6	4	33,00
3	1,5	1	13,75	5	4	19,25
4	1	1	11,00	4	4	26,40
5	1,5	1	13,75	5	4	19,25
6	1,5	1	13,75	5	4	19,25
7	1	1	11,00	3	4	23,10
8	2,5	1	19,25	3	4	23,10
9	2,5	1	19,25	4	4	26,40
10	2,5	1	19,25	4	4	26,40

Es wird abgeleitet, dass die Grundrissvarianten 2, 4 und 7 ideal im oberen Gebäudeabschnitt angeordnet werden, die Varianten 1, 3, 5 und 6 im mittleren Bereich sowie im unteren Abschnitt die Grundrisse 8, 9 und 10.

Nach dieser Systematik wurde eine exemplarische Reihenfolge für die nachfolgend erläuterte Modellierung und die daran in Abschnitt 5 durchgeführte Parameteranalyse festgelegt:

Vom oberen 10. Obergeschoss bis zum untersten 1. Obergeschoss

Varianten 4 7 1 6 5 3 10 9 8

4.4 Geometrie (und Tragwerkskonzept)

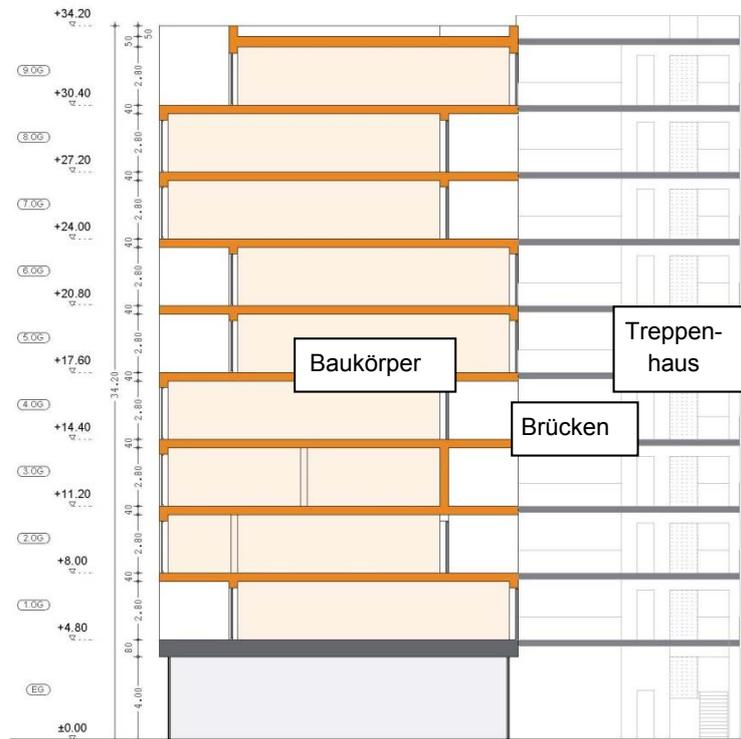


Bild 5 Vertikalschnitt des Gebäudekonzepts mit Höhenangaben

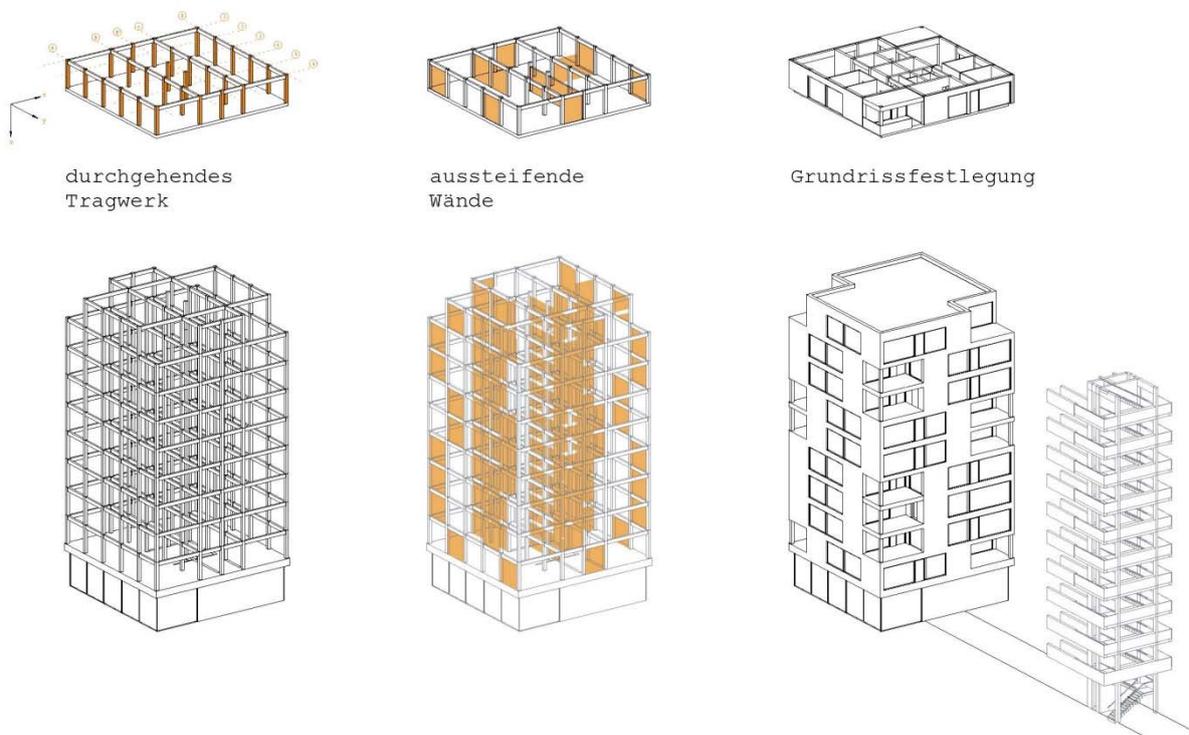
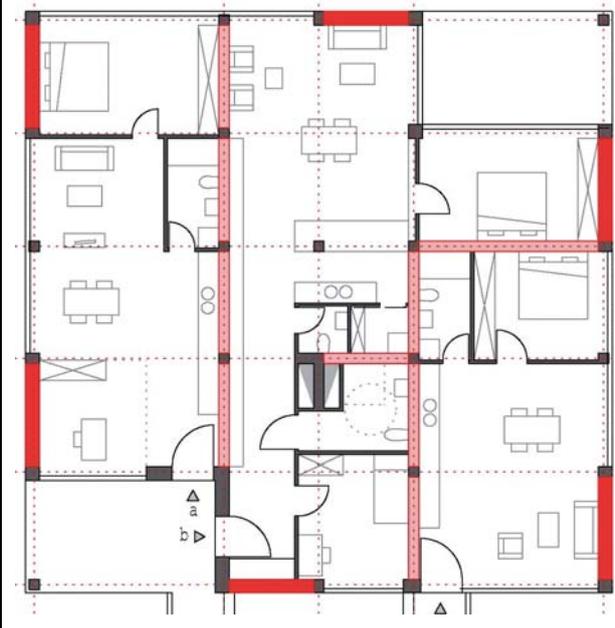
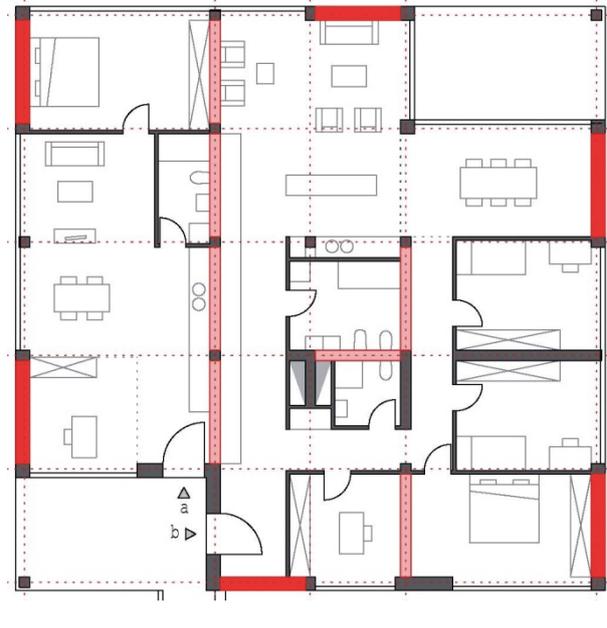
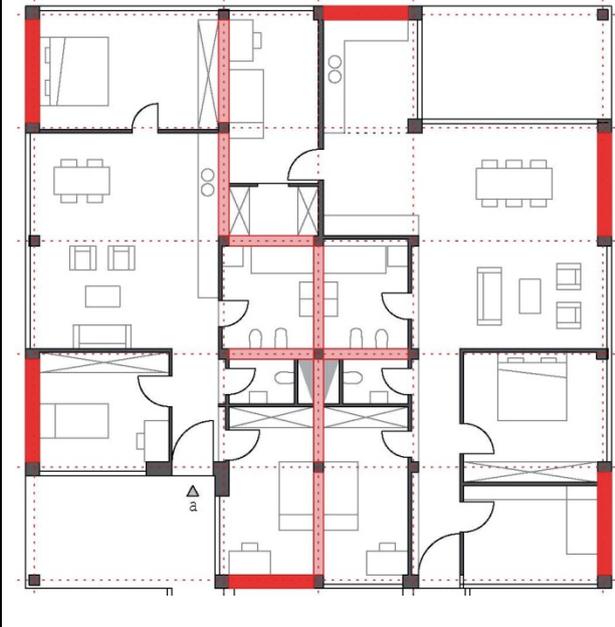
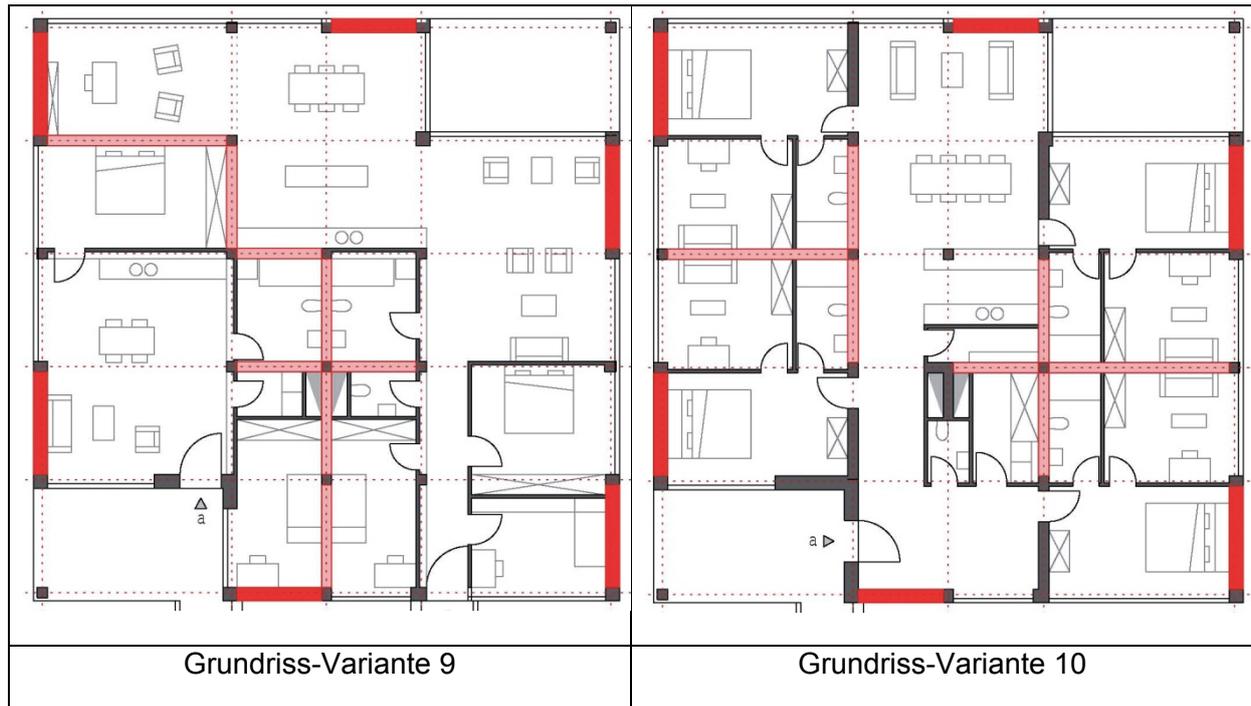


Bild 6 Isometrien des Gebäudekonzepts mit Markierung aussteifender Wände

Tabelle 3 Entwurf für mögliche Anordnung der aussteifenden Wände in den einzelnen Grundrissvarianten

	
Grundriss-Variante 1	Grundriss-Variante 2
	
Grundriss-Variante 3	Grundriss-Variante 4





4.5 Lastannahmen

Die Lastannahmen beruhen auf Angaben und Ansätzen der Normenreihe DIN EN 1991-1 (Eurocode 1) bzw. den jeweiligen Nationalen Anhängen (NA).

4.5.1 Eigenlasten(G)

Das Eigengewicht der Decken und der Fassade werden im Folgenden dargestellt. Die Last aus Eigengewicht der Stützen, Unterzüge und Wände wird programmintern berücksichtigt.

Deckenaufbau

Fußbodenbelag			0,25 kN/m ²
Estrich	6 cm	22 kN/m ³	1,32 kN/m ²
Trittschaldämmung			0,08 kN/m ²
HBV: Betonschicht	10 cm	25 kN/m ³	2,50 kN/m ²
HBV: Brettschichtholz	20 cm	5 kN/m ³	1,00 kN/m ²
Summe Eigengewicht Geschossdecke		Σ	5,15 kN/m²
Eigengewicht der obersten Decke wird angenommen zu			2,50 kN/m²

Die Decken lagern auf den Unterzügen in den Achsen A, B, C und D. Bei einer Spannweite von 5,50 m ergibt sich die Auflagerlast zu $(5,15 \text{ kN/m}^2 \times 5,50 \text{ m})/2 = 14,16 \text{ kN/m}$. In Abhängigkeit der jeweiligen Lasteinzugsängen der Unterzüge ergeben sich die in Tabelle 4 dargestellten Auflagerlasten, angesetzt an den Stützenköpfenden der Obergeschosse 1 bis 8. Die Ermittlung der Stützenlasten des 9. Obergeschosses erfolgt analog mit der Streckenlast 2,50 kN/m².

Tabelle 4 Stützeinwirkung aus dem Eigengewicht der Decke

Stützen	Lasteinzug	Belastung	Kopflast
	[m]	[kN/m]	[kN]
A1, A6, D1, D6 (Eckstützen)	3,3/2	14,16	23,36
B1, B6, C1, C6 (Gebäuderand, Außenauflager)	3,3/2	28,32	46,73
A2 bis A5 & D2 bis D5 (Gbd.rand, Innenaflager)	3,3	14,16	46,73
B2 bis B5 & C2 bis C5 (Innenstützen)	3,3	28,32	23,36

Fassade

Annahme pauschal 1,00 kN/m²

Die Fassadenlast wird als Streckenlast auf die Stützen am Gebäuderand (Achsen 1, 6, A, D) anteilig der Lasteinzugsflächen angesetzt.

Tabelle 5 Stützeinwirkung aus dem Eigengewicht der Fassade

Stützen	Lasteinzug	Belastung	Kopflast
	[m]	[kN/m ²]	[kN/m]
A1, A6, D1, D6 (Eckstützen)	5,5/2 + 3,3/2	1,00	4,40
A2 bis A5 & D2 bis D5 (Rand, Achsen A & D)	2 · 3,3/2	1,00	3,30
B1, B6, C1, C6 (Rand, Achsen B & C)	5,5/2 + 2,75/2	1,00	4,13
B'1 & B'6 (Mittelstütze, Achse A & D)	2 · 2,75/2	1,00	2,75

4.5.2 Nutz- und Schneelasten (Q)

Aufgrund der Zielsetzung, die Einflüsse einzelner Konstruktionsparameter zu analysieren, ist es sinnvoll, die Zahl der möglichen Lastfälle gering zu halten. Aus diesem Grund wird die Schneelast auf der obersten Geschossdecke mit in den Lastfall der Nutzlasten integriert.

Nutzlast

Kategorie A: Wohn- und Aufenthaltsräume	1,50 kN/m ²
Trennwandzuschlag	0,8 kN/m ²
Summe je Geschossdecke	Σ 2,30 kN/m²

Schneelast

Schneelastzone 2:

$$s_K = 0,25 + 1,91 \cdot ((A+140)/760)^2 \geq 0,85 \text{ kN/m}^2$$

$$s_K (A = 25) = 0,32$$

$$s_K = \mathbf{0,85 \text{ kN/m}^2}$$

Die Lastaufbringung erfolgt analog zu den Eigenlasten aus der Deckenkonstruktion jeweils unter Berücksichtigung der Lastezugsflächen auf die Kopfen der Stützen.

Tabelle 6 Lastaufbringung auf die Kopfen der Stützen unter Berücksichtigung der Lastezugsflächen.

Stützen	Nutzlast 1. bis 8 Oberge- schoss	Schneelast 9. Obergeschoss
	[kN/m]	[kN]
A1, A6, D1, D6 (Eckstützen)	10,43	3,10
B1, B6, C1, C6 (Gebäuderand, Außenaufleger)	20,87	6,20
A2 bis A5 & D2 bis D5 (Gebäuderand, Innenaufleger)	20,87	6,20
B2 bis B5 & C2 bis C5 (Innenstützen)	41,74	12,34

4.5.3 Windlast (W_x und W_y)

Die Ermittlung der einwirkenden Windlasten beruht auf die Vorgehensweise nach DIN EN 1991-1-4:2010:12. Um den außenstehenden Treppenturm und eventuelle Windschutzmaßnahmen im Bereich der Brücken zu berücksichtigen, wurde die Gebäudegeometrie ungünstig mit $17 \times 20 \text{ m}^2$ angenommen.

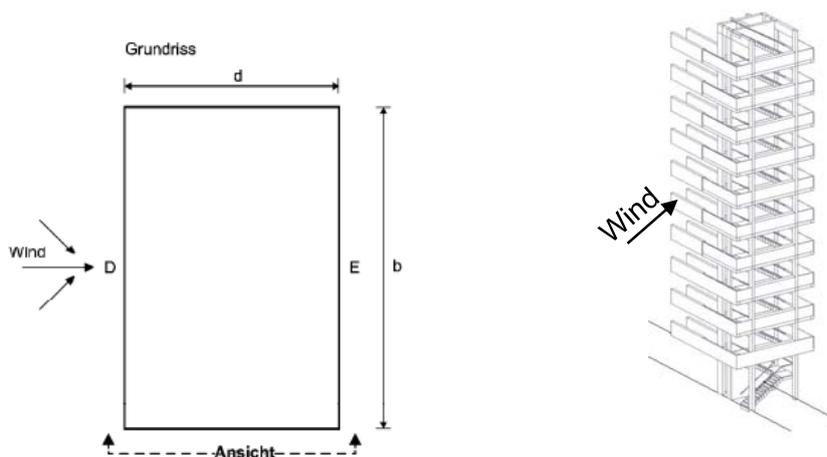


Bild 7 Einteilung der Wandflächen in Windbereiche [EC4]

Basisgeschwindigkeit nach Anhang NA.A, DIN EN 1991-1-4/NA

Windzone 4 nach Bild NA.A.1,

Basiswindgeschwindigkeit $v_{b,0} = 30 \text{ m/s}$

Geschwindigkeitsdruck $q_{b,0} = 0,56 \text{ kN/m}^2$

Geländekategorie I nach Tabelle NA.B.1

Böengeschwindigkeitsdruck $q_p(z) = 2,6 \cdot q_{b,0} \cdot (z/10)^{0,19}$

Tabelle 7 Ermittlung der resultierenden Windlasten

		x-Richtung	y-Richtung
Gebäudegeometrie nach Bild 7			
Gebäudehöhe h	m	34,20 m	34,20 m
Gebäudebreite b	m	29,00 m	17,00 m
Gebäudetiefe d	m	17,00 m	29,00 m
Außendruckbeiwerte nach Tabelle 7.1, EC1-1-4			
Verhältnis h/d	-	2,0	1,2
$C_{pe,10,D}$	-	+0,8	+0,8
$C_{pe,10,E}$	-	-0,55	-0,5
Winddruckverteilung nach Bild 7.4, EC1-1-4			
$q_p(z_e=b)$	kN/m ²	1,78	1,61
$q_p(z_e=h)$	kN/m ²	1,84	1,84
Resultierender Winddruck w_e			
$w_e(z_e=b)$	kN/m ²	1,43	1,29
$w_e(z_e=h)$	kN/m ²	1,47	1,47
Resultierender Windsog w_e			
$w_e(z_e=b)$	kN/m ²	-0,89	-0,81
$w_e(z_e=h)$	kN/m ²	-0,92	-0,92

Aus den resultierenden Winddruck- und –soglasten ergeben sich unter Berücksichtigung der Lasteinzugsflächen und einem Umrechnungsfaktor 17/16,5 (Gebäudebreite/Konstruktionsbreite) folgende geschossweise aufgetragene Linienlasten (vgl. Bild 8 und Bild 9):

x-Richtung:

9.OG 6,68 kN/m
8. bis 1. OG 7,92 kN/m

y-Richtung:

9.OG 6,68 kN/m
8. bis 5.OG 7,92 kN/m
4.OG 7,43 kN/m
3. bis 1.OG 6,93 kN/m

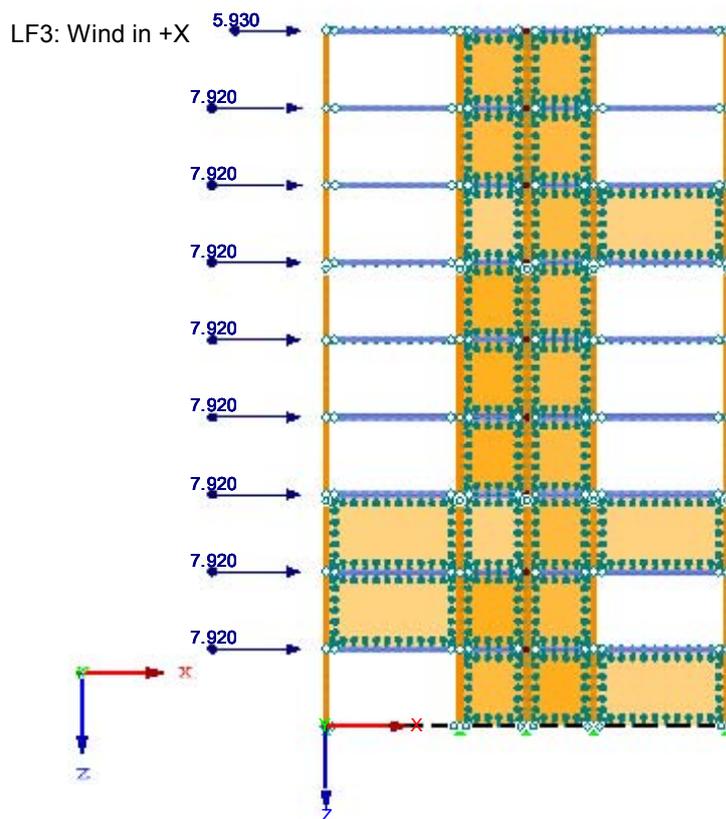


Bild 8 Modellierung des Windlasteintrags in x-Richtung (RFEM, Dlubal GmbH)

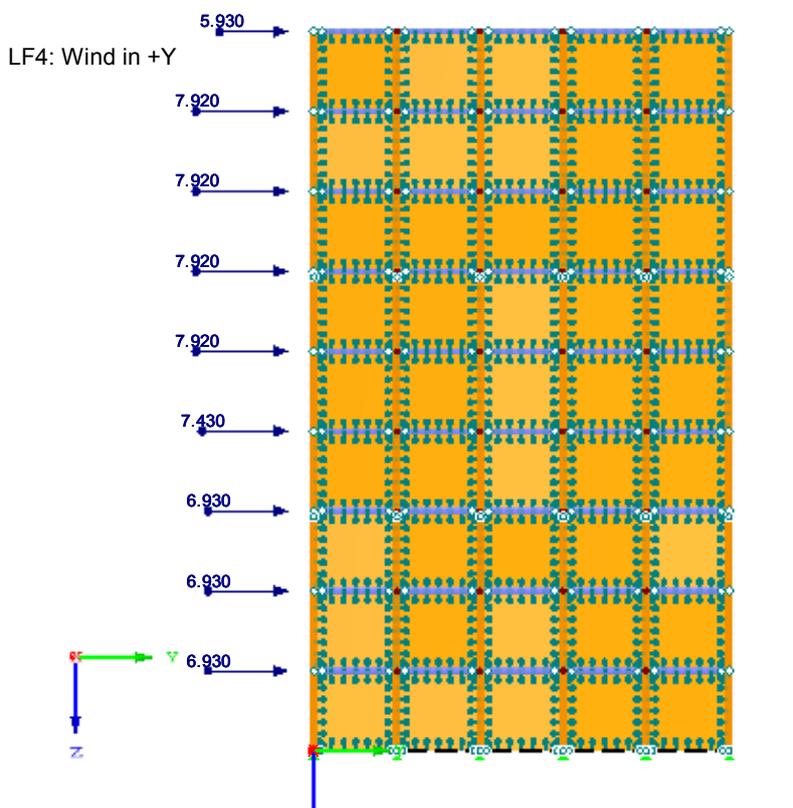


Bild 9 Modellierung des Windlasteintrags in y-Richtung (RFEM, Dlubal GmbH)

4.5.4 Einwirkungskombinationen

Für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wurden die Lastkombinationen LK10 bis LK15 betrachtet.

$$\begin{aligned} \text{LK10: } G + Q + \psi_0 \cdot W_x &= G + Q + 0,6 \cdot W_x \\ \text{LK11: } G + Q + \psi_0 \cdot W_y &= G + Q + 0,6 \cdot W_y \\ \text{LK12: } G + W_x + \psi_0 \cdot Q &= G + W_x + 0,7 \cdot Q \\ \text{LK13: } G + W_y + \psi_0 \cdot Q &= G + W_y + 0,7 \cdot Q \\ \text{LK14: } \gamma_{G,\text{inf}} \cdot G + W_x &= 0,9 \cdot G + W_x \\ \text{LK15: } \gamma_{G,\text{inf}} \cdot G + W_y &= 0,9 \cdot G + W_y \end{aligned}$$

Die Lastkombinationen LK14 und LK15 sind maßgebend für die Kopfauslenkung. Im Abschnitt 5 werden sie zur Analyse der Einflussparameter herangezogen.

4.6 Bauteile

Die Berechnungen erfolgen mit den in Tabelle 8 aufgeführten Bauteil- und Baustoffeigenschaften.

Tabelle 8 Zusammenstellung der wesentlichen tragenden Bauteile

Bauteil	Werkstoff/ Güte	Querschnitt	Statisches System
Stützen	BSH GL28h	30/30 cm ²	durchgehend über drei Geschosse; Stützenstoß zunächst nicht berücksichtigt
Wände	BSP 5-lagig	20 cm	durch Liniengelenke an Stützen und Decken nachgiebig angeschlossen
Unterzüge	Stahl, S235	UPE270	Randträger als Balken mit Stabendgelenken; nachgiebig in globaler z-Richtung an Stützen angeschlossen
		HEA260	Innenliegend, als Äquivalent für geschweißte Profile: Balken mit Stabendgelenken; nachgiebig in globaler z-Richtung an Stützen angeschlossen
Decken	C25/30	10 cm	Zur Berücksichtigung der Scheibenwirkung; gelenkig auf den Unterzügen gelagert.

4.7 Berücksichtigung der Verbindungsmittel

Die Anschlüsse der Wandelemente an die anliegenden Bauteile werden durch Liniengelenke im Modell berücksichtigt. Dabei werden die Verbindungsmittel als ideale Federn modelliert. Die Berechnung der Steifigkeiten wird nachfolgend erläutert und die Ergebnisse in Tabelle 9 dargestellt.

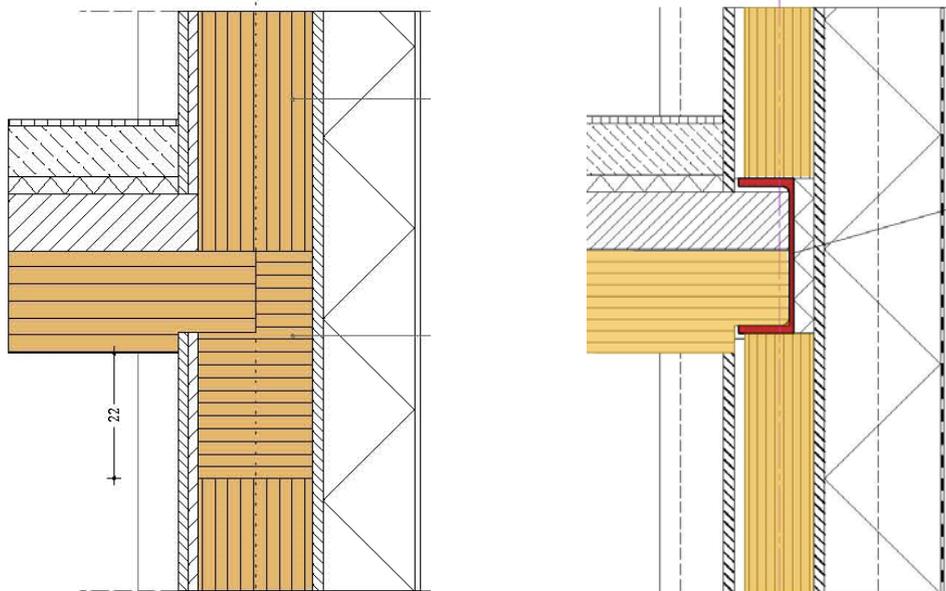


Bild 10 Skizze Detail Wand/Decke,
a) Randträger aus BSH

b) Randträger aus Walzstahlprofil (UPE)

Unter Annahme einer starren Deckenscheibe und Aussteifungswänden, die nur in ihrer Längsrichtung lastabtragend sowie proportional zu ihrer Länge linear elastisch wirken, wurde die Beanspruchung aus Windlast je Wand in einer Handrechnung ermittelt. In Tabelle 9 ist der je Geschoss und Orientierung jeweils größte Schubfluss dargestellt und der weiteren Bemessung zugrunde gelegt.

Der Anschluss Wand/Decke soll über ein aufgeschweißtes Schlitzblech am Stahlunterzug in Deckenebene gelöst werden. Das Schlitzblech wird mittig in die Wand eingelassen und durch selbstbohrende Dübel mit einem Durchmesser von 7 mm befestigt. Für einen einzelnen Dübel ergeben sich folgende Kennwerte:

Selbstbohrende Stabdübel SFS WS-T-7,0:

$$\begin{aligned} F_{V,Rd} &= 8,1 \text{ kN} \\ K_{ser,7} &= 2 \cdot 2 \cdot 350^{1,5} \cdot 7/23 = 9.018 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Die Steifigkeit pro laufenden Meter Fuge ergibt sich durch das einfache Produkt aus Anzahl der Dübel und der Einzelsteifigkeit $K_{ser,7}$.

Der Anschluss zwischen Wand und Stütze wird ebenfalls über ein Schlitzblech hergestellt. Dabei wird das Schlitzblech mit Stabdübeln $\varnothing 12$ an der Stütze befestigt. Der Anschluss der Wand an das Detail wird dann über selbstbohrende Dübel, Durchmesser 7 mm, gelöst.

Stabdübel $\varnothing 12$:

$$\begin{aligned} F_{V,Rd} &= 17,6 \text{ kN} \\ K_{ser,12} &= 2 \cdot 2 \cdot 410^{1,5} \cdot 12/23 = 17.325 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Die Gesamtsteifigkeit der Wand/Stützen-Fuge ermittelt sich dann mit

$$K_{ser,S/W} = \frac{1}{\frac{1}{n_{\varnothing 7} \cdot K_{ser,\varnothing 7}} + \frac{1}{n_{\varnothing 12} \cdot K_{ser,\varnothing 12}}}$$

Die nach diesem Vorgehen ermittelten Verbindungssteifigkeiten sind der Tabelle 9 zu entnehmen.

Tabelle 9 Ermittlung der erforderlichen Anzahl Verbindungsmittel sowie deren Steifigkeiten

Dübelvariante 1		TRAGFÄHIGKEIT										STEIFIGKEIT				
erforderliche Anzahl		DECKE - WAND						STUETZE - WAND				Decke-Wand		Stütze - Wand		
Geschoss	Schubfluss		Dübel WS-T-7,0				Stabdübel S235, Ø12x210				x	y	x	y		
	x	y	x-Richtung		y-Richtung		x-Richtung		y-Richtung						[kN/m]	[kN/m]
			erforderlich	gewählt	erforderlich	gewählt	erforderlich	gewählt	erforderlich	gewählt	erforderlich	gewählt				
9	17	7,1	[Stck.]	2,10	3,33	0,88	3,33	[Stck.]	0,97	3,33	0,40	3,33	30.060	30.060	19.770	19.770
			[cm]	47,53	30	113,80	30	[cm]	103,59	30	248,03	30				
8	36,6	16,7	[Stck.]	4,53	5,00	2,07	3,33	[Stck.]	2,08	3,33	0,95	3,33	45.090	30.060	25.320	19.770
			[cm]	22,08	20	48,38	30	[cm]	48,11	30	105,45	30				
7	43,2	17,1	[Stck.]	5,35	6,67	2,12	3,33	[Stck.]	2,45	3,33	0,97	3,33	60.120	30.060	29.456	19.770
			[cm]	18,70	15	47,25	30	[cm]	40,76	30	102,98	30				
6	60,7	29,8	[Stck.]	7,51	10,00	3,69	5,00	[Stck.]	3,45	5,00	1,69	3,33	90.180	45.090	44.183	25.320
			[cm]	13,31	10	27,11	20	[cm]	29,01	20	59,09	30				
5	74,2	36,7	[Stck.]	9,18	10,00	4,54	5,00	[Stck.]	4,21	5,00	2,08	3,33	90.180	45.090	44.183	25.320
			[cm]	10,89	10	22,02	20	[cm]	23,73	20	47,98	30				
4	88,7	43,2	[Stck.]	10,98	12,50	5,35	6,67	[Stck.]	5,04	6,67	2,45	3,33	112.725	60.120	57.048	29.456
			[cm]	9,11	8	18,70	15	[cm]	19,85	15	40,76	30				
3	73,7	54,8	[Stck.]	9,12	12,50	6,78	10,00	[Stck.]	4,19	6,67	3,11	5,00	112.725	90.180	57.048	44.183
			[cm]	10,96	8	14,74	10	[cm]	23,89	15	32,14	20				
2	99,4	60,5	[Stck.]	12,30	16,67	7,49	10,00	[Stck.]	5,64	6,67	3,44	5,00	150.300	90.180	65.311	44.183
			[cm]	8,13	6	13,36	10	[cm]	17,72	15	29,11	20				
1	99	77,9	[Stck.]	12,25	16,67	9,64	12,50	[Stck.]	5,62	6,67	4,42	6,67	150.300	112.725	65.311	57.048
			[cm]	8,16	6	10,37	8	[cm]	17,79	15	22,61	15				

4.8 Implementierung von Brettsperrholz in Finite Elemente

Zur Untersuchung der Schwingungs- und Verformungseigenschaften von komplexen unregelmäßigen Systemen ist es notwendig die eingesetzten Werkstoffe möglichst realitätsnah in den Berechnungen zur Gebrauchstauglichkeit abzubilden. Auf der sicheren Seite liegende Vereinfachungen führen zu einem unnötig hohen Materialeinsatz, der insbesondere aus ökonomischer Sicht nicht wünschenswert ist.

Vor der Verbreitung von Massivholzelementen genühten zur Berechnung von Holzkonstruktionen Stabwerksprogramme, da die Tragwerkssysteme in der Regel zu einfachen Stabwerken diskretisiert werden konnten. Zur Betrachtung von Flächenelementen mit mehr als einer Tragrichtung sind inzwischen Programme verbreitet, die mit der Methode der Finiten Elemente (FE oder FEM) arbeiten. Deren Ergebnisse sind wesentlich von den eingegebenen Parametern abhängig und lassen sich meist nur grob qualitativ mit manuellen Kontrollberechnungen prüfen. Aus diesem Grund ist eine möglichst genaue Abbildung der Steifigkeits-eigenschaften von Brettsperrholzelementen notwendig.

Eine rein unter Schub beanspruchten Scheibe kann über eine quadratische 3x3 Matrix beschrieben werden. Diese lässt sich auf die Einträge der Diagonalen reduzieren, da Effekte aus der Dehnung quer zur Faser vernachlässigt werden können (vgl. DIN EN 1995-1-1, NCI NA 5.6.1, (NA.2) [EC5]). Somit gilt $C_{xy} = C_{yx} = 0$.

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_x & C_{yx} & 0 \\ C_{xy} & D_y & 0 \\ 0 & 0 & D_{xy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}$$

Damit reduziert sich die Eingabe auf die Dehnsteifigkeiten D_x und D_y der jeweiligen Lamellenrichtung und des Scheibenschubmoduls D_{xy} . Während die Ermittlung der Dehnsteifigkeiten eindeutig ist, gibt es zur Erfassung des Zusammenwirkens der Brettlamellen einer Lage bzw. deren Interaktion mit den sie umgebenden gekreuzt verlaufenden Lamellen unterschiedliche Erkenntnisse und Herangehensweisen.

So befinden sich bereits im Anhang D der DIN 1052:2008-12 Regeln zur Ermittlung der maßgeblichen Steifigkeitskennwerte unter Scheibenbeanspruchung für Flächen aus zusammengeklebten Schichten. Diese wurden im Wesentlichen unverändert in den Nationalen Anhang des Eurocodes 5 integriert (vgl. DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, NCI NA.5.6.2).

Die beiden Dehnsteifigkeiten in x- und y-Richtung ergeben sich dabei aus dem Produkt des Elastizitätsmoduls in Faserlängsrichtung und der Summe der Dicken der in die jeweilige Richtung orientierten Brettlagen.

$$D_x = \sum(E_{x,i} \cdot d_i)$$

$$D_y = \sum(E_{y,i} \cdot d_i)$$

Die Berechnung des Scheibenschubmoduls ist davon abhängig, ob die Schmalseiten der Bretter einer Lage miteinander verklebt sind. Ist dies der Fall, kann der Schubmodul entsprechend der verwendeten Holzgüte der Einzelbretter voll angesetzt werden.

$$D_{xy} = \sum(G_{xy,i} \cdot d_i)$$

Sind die einzelnen Bretter einer Lage nicht an den Schmalseiten verklebt oder sogar mit Zwischenräumen angeordnet, wird mit einem effektiven Scheibenschubmodul gerechnet. Dieses ergibt sich durch die Reduzierung des Schubmoduls der verwendeten Holzgüte um 75%:

$$D_{xy} = \frac{1}{4} \cdot \sum(G_{xy,i} \cdot d_i)$$

Bei der Ermittlung der Scheibenschubsteifigkeit D_{xy} von Brettsperrholzelementen unter Scheibenbeanspruchung wird deutlich, dass es sich um ein junges Produkt handelt. Die vorausgehend erläuterte Herangehensweise ist als Gegenstand der aktuellen DIN EN 1995 (Eurodoce 5) zum Stand der Technik deklariert und auch Inhalt einiger Veröffentlichungen aus der Wissenschaft, zum Beispiel [47] (Winter, S., 2009) und [48] (Mestek, P.; Winter, S., 2010). Dabei wird in [47] darauf verwiesen, dass in Untersuchungen von Traetta, G., 2006 [49] durch Versuche an Dreischichtplatten eine Abminderung des Schubmoduls von 30% in Abhängigkeit von der verwendeten Holzgüte ergaben, um auf das effektive Scheibenschubmodul zu kommen. Insofern, und insbesondere aufgrund zu der Zeit fehlender vergleichbarer Untersuchungen an mehr als dreilagigen Elementen, sei die Annahme der Normvorgehensweise gerechtfertigt. Zudem seien die Steifigkeiten in der Regel ausreichend, um die Aussteifungslasten aufzunehmen.

Vor dem Hintergrund der Entwicklung zu immer größer werdenden Gebäudehöhen im Holzbau und den damit verbunden wachsenden Aussteifungslasten kann es sinnvoll sein das vorhandene Potential bzgl. der Steifigkeitseigenschaften der Brettsperrholzelemente auszureizen. Insbesondere bei der in Abschnitt 4.2 herausgestellten Konstruktionsweise mit Brettsperrholzausfachungen, die aus konstruktiver Sicht ausschließlich der Schubkraftübertragung dienen.

Aus diesem Grund wird im Leitfaden der *pro:Holz Austria* zur Bemessung von Brettsperrholz [50] ein neues Verfahren zur Ermittlung der Scheibenschubsteifigkeit empfohlen, dass auf numerischen Untersuchungen der TU Graz [51] (Silly, G., 2010) in Anlehnung an [52] (BSPhandbuch, 2010) beruht.

Wesentlich ist, dass dabei keine Unterscheidung getroffen wird, ob die Schmalflächen der Brettlamellen verklebt sind oder nicht. Es wird angenommen, dass Längsrisse einzelner Lamellen nicht vermeidbar sind und daher den gleichen Effekt wie nicht verklebte Schmalflächen haben.

Zur Herleitung wird ein Modell zugrunde gelegt, dass die Schubverzerrung in zwei Anteile aufteilt: Mechanismus I - Schub der ideal ungerissenen Scheibe und Mechanismus II – Torsionsbeanspruchung der Verklebung zwei übereinander und gegenläufig orientierter Einzelamellen [52].

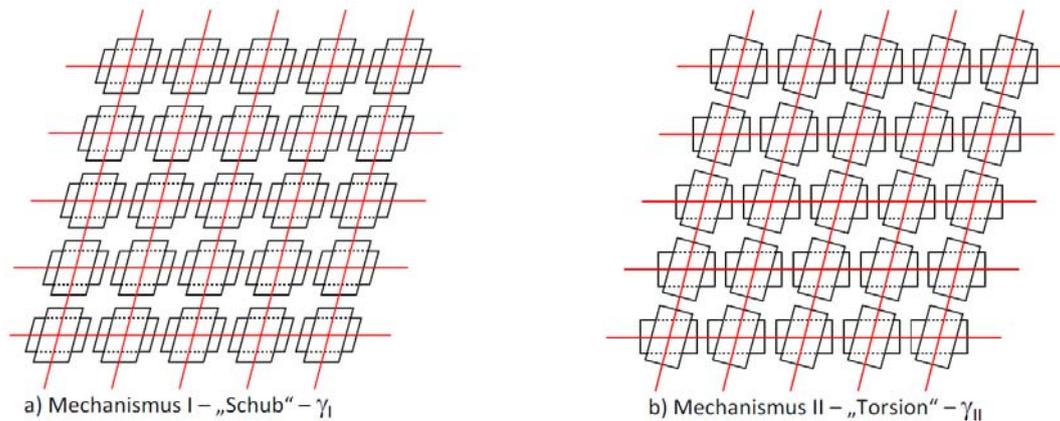


Bild 11 Schubmechanismen I und II einer Brettsperrholz-Scheibe [55]
(Hirschmann, B., 2011)

Dies ergibt eine Funktion zur Abminderung des Schubmoduls der verwendeten Holzgüte in Abhängigkeit der durchschnittlichen Brettstärke d_{mean} der Einzellen und der angenommenen Brettbreite a .

$$G_{s,\text{mean}} = \frac{1}{1 + 6 \cdot \alpha_{FE} \cdot \left(\frac{d_{\text{mean}}}{a}\right)^2} \cdot G_{0,\text{mean}} \approx 0,75 \cdot G_{0,\text{mean}}$$

mit $\alpha_{FE} = 0,32 \cdot \left(\frac{d_{\text{mean}}}{a}\right)^{-0,77}$

d_{mean} Durchschnittliche Brettstärke des betrachteten Querschnitts

a angenommene Brettbreite (empfohlen wird 150 mm)

Die Schubsteifigkeit einer Scheibe ergibt sich zu

$$G \cdot A_s = G_{s,\text{mean}} \cdot A_{\text{brutto}}$$

[Quelle: [52]]

Die Auswertung der Gleichung für den baupraktischen Bereich in Bild 12 und Gegenüberstellung zur Variante der DIN 1052 und damit auch der DIN EN 1995-1-1 (EC5) zeigt deutlich, dass die Steifigkeit eines Brettsperrholzelements mit den Berechnungsregeln der Norm unterschätzt wird. Den Angaben aus [50], [51], [52] zufolge müsste sich der Abminderungsfaktor von derzeit 25% auf 75% erhöhen.

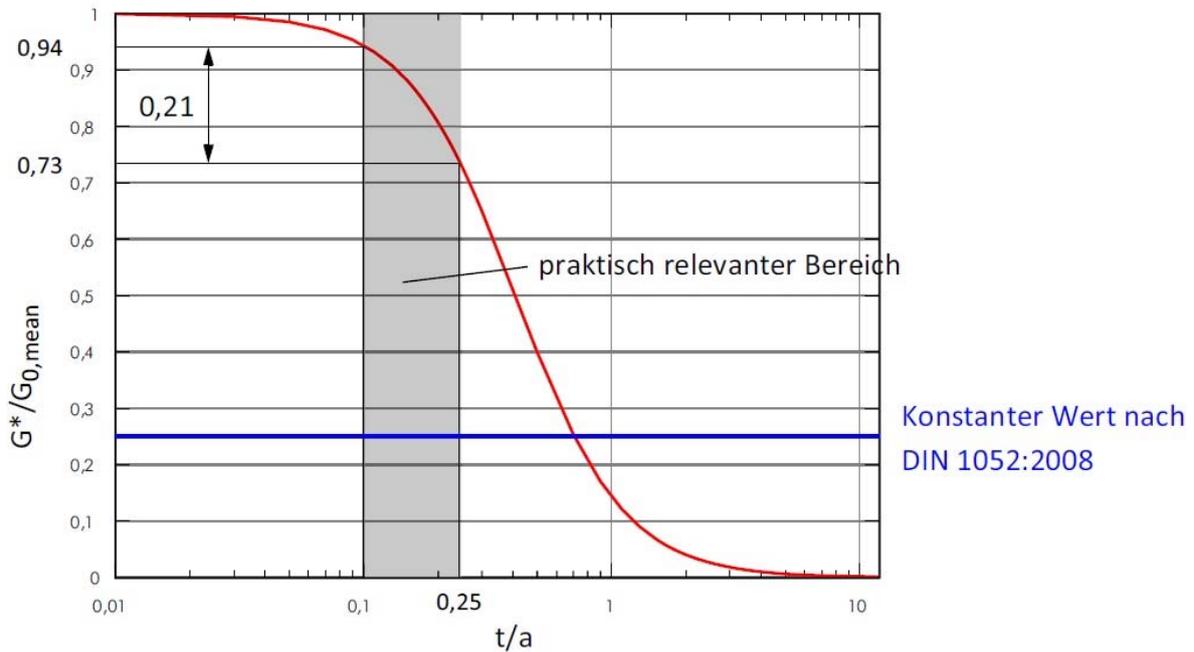


Bild 12 Effektive Schubsteifigkeit nach [52]

Der Abminderungsfaktor wächst mit der Größe der angesetzten Brettbreite. Zum Beispiel steigt bei festgelegter Dicke $t = 40 \text{ mm}$ der Faktor $G^*/G_{0,\text{mean}}$ bei Brettbreiten von $a = 40$ bis 300 mm von 34% auf bis zu 86% . Diese starke Streuung in Abhängigkeit der Brettbreite wird beschränkt durch das von den Herstellern festgelegte Verhältnis Brettbreite zu –dicke von mindestens $4:1$ (vgl. Zulassungen ETA-08/0271 und ETA 06/0138). Da in der Regel keine genaueren Aussagen zu den Abmessungen der verwendeten Brettlamellen getroffen werden können, sollte für den Ansatz der Brettbreite dieses Mindestverhältnis zugrunde gelegt werden.

Beispielsweise gibt die KLH Massivholz GmbH direkt in der Europäischen Technischen Zulassung (ETA 06/0138) einen Wert für das Schubmodul unter Scheibenbeanspruchung mit $G_{\text{mean}} = 25 \text{ kN/cm}^2$ an. Dies berücksichtigt einen Faktor von circa 36% gegenüber dem Schubmodul einer Lamelle der Güte C24. Damit liegt der Ansatz zwischen dem in der Norm verankerten und dem Ansatz der TU Graz. Da er in einer Europäischen Technischen Zulassung festgeschrieben ist, wird er im Folgenden für die Modellierung angesetzt.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Ansätze auf die Gesamtverformung werden in Abs. 5.3.2 betrachtet. In der realitätsnahen Abbildung der Steifigkeitseigenschaften von Brettsperrholz scheint noch weiterer Forschungsbedarf vorhanden zu sein, um den Gesichtspunkten der Ressourceneinsparung bei der Planung von Holzkonstruktionen gerecht zu werden.

Für das Ausgangsmodell wurden folgende Werte berücksichtigt:

Brettsperrholzplatte 200 mm; 5 Lagen à 4 cm

Dehnsteifigkeit in x-Richtung: $D_x = 3 \cdot 4 \text{ cm} \cdot 1200 \text{ kN/cm}^2 = 1.440.000 \text{ kN/m}$

Dehnsteifigkeit in y-Richtung: $D_y = 2 \cdot 4 \text{ cm} \cdot 1200 \text{ kN/cm}^2 = 960.000 \text{ kN/m}$

Schubsteifigkeit $D_{xy} = 5 \cdot 4 \text{ cm} \cdot 25 \text{ kN/cm}^2 = 50.000 \text{ kN/m}$

4.9 Schwingungs- und Verformungsverhalten

4.9.1 Verformungsverhalten

Die Begrenzung der Verformungen unter Gebrauchslast dient der Aufrechterhaltung der Nutzbarkeit eines Gebäudes. Bei Überschreiten der festgelegten Grenzwerte können gewisse Funktionen nicht mehr gewährleistet werden. Dies kann zum Beispiel das Überschreiten gewisser Verformungen sein, die ggf. die Nutzung eines Fensters einschränken. Oder beispielsweise Rissbildungen in nicht tragenden Bauteilen, die optische Einschränkungen mit sich ziehen, oder bei der Fassade sogar den Witterungsschutz aufheben.

In Deutschland gibt es keine verbindlich einzuhaltenden Grenzwerte der Verformung des Gesamtgebäudes. Diese sind in der Regel mit dem Bauherr bzw. späteren Nutzer der Gebäude abzustimmen. Es haben sich jedoch Richtwerte etabliert, die im Regelfall eingehalten werden. Im Massivbau existiert das Abgrenzungskriterium der sogenannten Labilitätszahl, bei deren Einhaltung die Berücksichtigung von Verformungen (Theorie II. Ordnung) bei der Bemessung nicht notwendig ist. Ist dies gegeben, sind in der Regel Verformungen unterhalb von $l/500$ gewährleistet.

In den Vereinigten Staaten ist im Hochhausbau eine Verformungsbegrenzung von $l/500$ unter Gebrauchslast vorgeschrieben. In China liegen die Grenzwerte sogar bei $1/650$ bis zu $1/850$ [53].

4.9.2 Schwingungsverhalten

4.9.2.1 Eigen- und Erregerfrequenzen

Die maßgebenden Faktoren für das Schwingungsverhalten eines Tragwerkes sind die Massenbelegung, die Steifigkeit und die Dämpfung. Ersteres wird durch die Materialwahl und den Konstruktionsaufbau bestimmt. Die Steifigkeit ebenfalls durch die Werkstoffwahl und zusätzlich durch das Tragsystem und seiner konstruktiven Durchbildung. Das Dämpfungsvermögen setzt sich aus den materialspezifischen Eigenschaften, der Art der Bauteile und Verbindungsmittel sowie der Gründungsart zusammen.

Jeder Körper besitzt sogenannte Eigenformen, in denen er durch Anregung der zugehörigen Eigenfrequenzen (Resonanz) große Schwingungsamplituden erreicht. Die Eigenfrequenzen eines Systems sind zunächst unabhängig von ihren Dämpfungseigenschaften. Sie bestimmen sich, vereinfacht dargestellt, aus der Differenz von Steifigkeit zur Masse. Daraus folgt, dass bei steigender Steifigkeit auch die Eigenfrequenz zunimmt und eine Zunahme der Masse für eine Verringerung der Eigenfrequenz sorgt. Auf den Werkstoff Holz bezogen bedeutet es, dass die geringe Wichte des Werkstoffs zunächst zu größeren Eigenfrequenzen gegenüber Stahl oder Beton führt. Jedoch ist zu beachten, dass der Holzbau, gerade in Hinblick auf die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel, ebenfalls geringere Steifigkeiten aufweist und folglich mit seinem Einfluss im Zähler niedrigere Eigenfrequenzen bewirkt. Um das Zusammenspiel der gegenläufigen Tendenzen aus geringerer Masse mit geringerer Steifigkeit zu veranschaulichen sei auf die in Abschnitt 5 durchgeführte Parameterstudie verwiesen. Insbesondere auf die Untersuchung der Parameter der Massenbelegung in Abschnitt 5.5.

Die im Allgemeinen als statisch wirkend angenommenen Einwirkungen auf eine Tragkonstruktion wirken in Wirklichkeit dynamisch und mit einer bestimmten Erregerfrequenz. Erreicht diese eine Eigenfrequenz der Konstruktion, so reagiert das System mit großen Auslenkungen in der zugehörigen Eigenform, der sogenannte Resonanzfall. Für große Bauwerke, wie Brücken oder Hochhäuser, können in der Regel Wind- und Erdbebenanregungen kritisch werden, bei Fußgängerbrücken hingegen die rhythmische Anregung durch Menschen.

Die Anregungsfrequenzen liegen beispielsweise bei Fuß- und Radwegbrücken für Fußgänger im Schrittempo im Bereich von 1,6 bis 2,4 Hz [54] (Petersen, C., 2000). Die für Gebäude relevanten dynamischen Einwirkungen sind Wind- und Erdbeben. Nach Bild 13 liegt der maßgebliche Frequenzgehalt aus Windbeanspruchung unter 0,5 Hz, der für Erdbeben hingegen beginnt oberhalb von 2 Hz. Liegen beide Einwirkungen vor, so ist eine Abstimmung des Tragwerks zwischen den beiden Bereichen notwendig. In Bezug auf den Wind wäre eine sogenannte Hochabstimmung (Erregung bleibt unterkritisch) vorzunehmen und für die Erdbebenlast eine Tiefabstimmung (Erregung bleibt überkritisch).

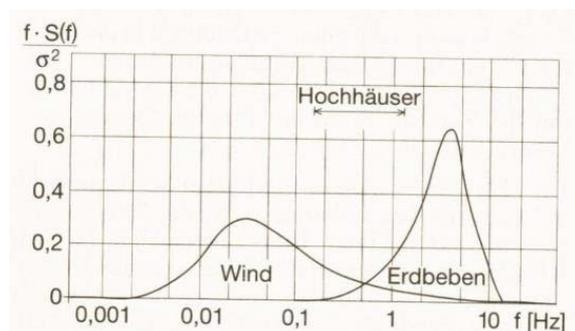


Bild 13 Frequenzbereich der Wind- und Erdbebeneinwirkung [53]

4.9.2.2 Schwingungsanfälligkeit

Der Auslenkung eines Systems wirkt seine Dämpfung entgegen. Die aus der Einwirkung zugeführte Energie wird durch Dämpfungsmechanismen dissipiert. Dabei handelt es sich vorrangig um Reibmechanismen, bei denen mechanische Energie in Wärme umgewandelt wird. Im Resonanzfall kann so ein „Aufschaukeln“ der Schwingungen bis zum Systemkollaps, der Resonanzkatastrophe, verhindert werden. Die eingangs in diesem Abschnitt erwähnten Dämpfungsmechanismen Baustoff-, Bauteil- sowie Baugrunddissipation werden als innere Dämpfung bzw. Dissipation bezeichnet. Generell ist der Wirkungsgrad, also die Höhe der dissipierten Energie, von der Höhe der Spannungsauslastung im Bauteil abhängig. Dies lässt sich auf Baustoffebene zum Beispiel dadurch erklären, dass mit größeren Belastungen zum Beispiel plastische Verzerrungen im Werkstoff dämpfende Wirkung haben. Zudem provozieren größere Verformung beispielsweise zusätzliche Reibstellen in Verbindungsmitteln, die vorher infolge Haftung blockiert waren. Für den Werkstoff Holz gilt generell, dass er als organisches Material im Verhältnis zu Beton und Stahl eine relativ hohe und weitestgehend von der Belastung unabhängige Dämpfung aufweist (vgl. Bild 14) [53] [54].

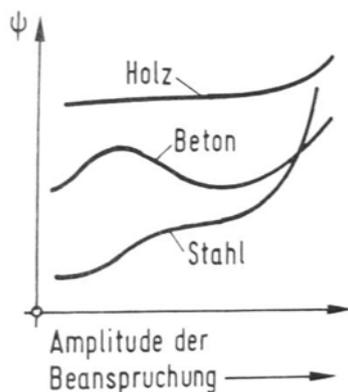


Bild 14 Dämpfungsverhalten unterschiedlicher Werkstoffe
in Abhängigkeit ihrer Beanspruchung [PetersenDyn]110

Beim Ansatz der Windlast nach DIN EN 1991-1-4 (EC1) ist ein Gebäude zunächst auf seine Schwingungsanfälligkeit zu überprüfen (DIN EN 1991-1-4/NA, NA.C.2). Es gilt dabei als nicht schwingungsanfällig, wenn die Verformungen unter Windeinwirkungen durch Böenresonanz um nicht mehr als 10 % vergrößert werden. Andernfalls ist die statische Ersatzlast um einen Böenresonanzfaktor zu erhöhen. Bei als Kragträger wirkenden Konstruktionen wird die Schwingungsanfälligkeit nach NA.C.2 folgendermaßen überprüft:

$$\frac{x_s}{h} \leq \frac{\delta}{\left(\sqrt{\frac{h_{ref}}{h} \cdot \frac{h+b}{b}} + 0,125 \cdot \sqrt{\frac{h}{h_{ref}}} \right)^2}$$

mit $h_{ref} = 25 \text{ m}$

x_s Kopfpunktverschiebung unter Eigenlast in Windrichtung wirkend, in m;

δ das logarithmische Dämpfungsdekrement, nach Anhang F;

- b die Breite des Bauwerks, in m;
- h die Höhe des Bauwerks, in m.

Dieser Nachweis ist erst ab Gebäudehöhen über 25 m zu führen. Daraus lässt sich erklären, dass im zugehörigen Anhang F keine Dämpfungswerte für Gebäude aus Holz angegeben sind. Holzbauten im Hochhausbereich (oberste Geschossdecke über 22 m) entsprechen aufgrund der Brennbarkeit des Baustoffes Holz bis dato nicht ohne Weiteres den bauordnungsrechtlichen Anforderungen. An dieser Stelle zeigt sich weiterer Forschungsbedarf auf. Zur Verbreitung der Holzbauweise im Hochhausbau sollten in den gültigen Normen Werte zum Dämpfungsverhalten von Holztragwerken zur Verfügung stehen. Hinweise bietet eine umfangreiche Sammlung verschiedenster Dämpfungswerte von Petersen in [54]. Dort setzt sich das logarithmische Dämpfungsdekrement δ aus drei Summanden δ_1 bis δ_3 für Dämpfung im Baustoff, in den Bauteilen und Verbindungsmitteln sowie durch Lagerung und Gründung zusammen. Es sind jeweils drei Werte angegeben, die der aktivierten Dämpfung in Abhängigkeit der Größe der Schwingungsbewegung unter Gebrauchslast entspricht. Der niedrige Wert steht dabei für eine geringe Auslastung des Systems und der hohe hingegen für ein nahezu ausgelastetes System. Die für den Holzbau relevanten Werte sind in Tabelle 10 angegeben.

Tabelle 10 Übersicht der für den Holzbau relevanten Dämpfungswerte aus [54]

Art der Dämpfung		niedrig	mittel	hoch
δ_1: Dämpfung im Baustoff				
	Bauholz: Nadelholz	0,04	0,045	0,05
	Bauholz: Laubholz	0,03	0,035	0,04
	Brettschichtholz	0,025	0,03	0,035
δ_2: Dämpfung in Bauteilen und Verbindungsmitteln				
	Bauten mit Bauholz mit Dübel-, Bolzen- und Nagelverbindungen	0,035	0,04	0,05
	Leimbauweise (Brettschichträger- und rahmen)	0,015	0,02	0,025
δ_3: Dämpfung durch Lagerung und Baugrund				
	Turmartige, frei auskragende Konstruktionen			
	...auf Stahlkonstruktionen	0,008	0,010	0,012
	...auf Betonkonstruktionen	0,004	0,005	0,006
	...auf Fundamenten: Fels	0,004	0,005	0,006
	...auf Fundamenten: Kies	0,006	0,008	0,010
	...auf Fundamenten: Sand	0,008	0,010	0,012
	...auf Fundamenten: Pfahlrost	0,012	0,015	0,018

4.9.2.3 Behaglichkeit

Neben der Abstimmung der Eigen- und Erregerfrequenzen und der Überprüfung der Schwingungsanfälligkeit ist die subjektive Wahrnehmung der Nutzer ein weiterer wichtiger Faktor zur Beurteilung des Schwingungs- und Verformungsverhaltens. Deren Behaglichkeit wird durch zu starkes Schwingungsverhaltens gerade in den obersten Geschossen stark eingeschränkt. Aus diesem Grund wurden in einer Studie des ASCE und CTBUH an über vierzig Hochhäusern unter Einbeziehung visueller sowie akustischer Beobachtungen Kriterien zur Beurteilung der Behaglichkeit erarbeitet [53]. Zur Beurteilung wird der Spitzenwert der resultierenden Horizontalbeschleunigung herangezogen und diesbezügliche Grenzwerte definiert (vgl. Tabelle 11). Die Berechnung der Horizontalbeschleunigung ist abhängig von der Eigenfrequenz f , der Wiederkehrperiode des angesetzten Windes R sowie einem zeitlichen Mittlungsintervall T , welches mit $T=600$ sec angenommen werden kann (nach [König, 2003]):

$$\ddot{x} = \sqrt{2 \cdot \ln(f_0 \cdot T)} \cdot \left(0,68 + \frac{\ln R}{5}\right) \cdot e^{(-3,65 - 0,41 \cdot \ln f_0)}$$

In [53] wird bezüglich der Grenzwerte in Tabelle 11 angegeben, dass es derzeitiger Stand der Praxis sei einen Grenzwert von $\ddot{x} = 20$ cm/sec² (mit $R=10$) einzuhalten.

Tabelle 11 Empfohlene Grenzwerte für den Spitzenwert der Horizontalbeschleunigung [53]

Nutzung	Tolerierbare stündliche Spitzenwerte der Horizontalbeschleunigung \ddot{x}	
	R = 1	R = 10
Wohngebäude	5 – 7	10 – 15
Hotel	7 – 9	15 – 20
Büro	9 – 12	20 – 25

5 Analyse der Einflussparameter

In der folgenden Untersuchung ist die Zielsetzung den Einfluss der einzelnen Konstruktionselemente hinsichtlich des Verformungs- und Schwingungsverhaltens des Gesamtgebäudes zu analysieren. Die üblichen Bauweisen und Verbindungstechniken des konventionellen Holzwohnungsbaus erfüllen nicht die Anforderungen des Holzbaus über der Hochhausgrenze, insbesondere hinsichtlich der Tragfähigkeit und der Verformungsbegrenzung. Die erhöhten vertikalen und horizontalen Einwirkungen, vor allem an küstennahen Standorten, erfordern genaue Kenntnis über den Einfluss der zahlreichen Konstruktionsparameter auf den Lastabtrag. Eine daraus resultierende materialgerechte Tragwerksplanung verhindert unnötigen Materialeinsatz um den Zielen der Nachhaltigkeit in Ökonomie und Ökologie gerecht zu werden. Diese Studie soll über den Einfluss auf das Tragverhalten hinaus die mit den betrachteten „Stellschrauben“ einher gehenden Vor- und Nachteile beleuchten.

Darüber hinaus werden an dieser Stelle bereits in den vorigen Abschnitten erwähnte Problemstellungen der Modellierung oder Veranschaulichung zum Bereich der Schwingungen behandelt.

Die Untersuchungen werden jeweils in Bezug zum Ausgangsmodell (Abschnitt 5.1) dargestellt. Dieses liegt immer der Variante 1 zugrunde.

Für die Kostenermittlung wurden die in Tabelle 12 dargestellten Annahmen getroffen.

Tabelle 12 Übersicht der angesetzten Materialkosten je Einheit

Bauteil	Einheit	Kosten
Nettokosten der Holzwerkstoffe		
Brettschichtholz GL 28 h	€/m ³	640
Brettsperrholz	€/m ³	570
Nettokosten der Verbindungsmittel, inkl. Montage		
Dübel WS-T-7,0	€/Stck.	5
Stabdübel Ø12	€/Stck.	3

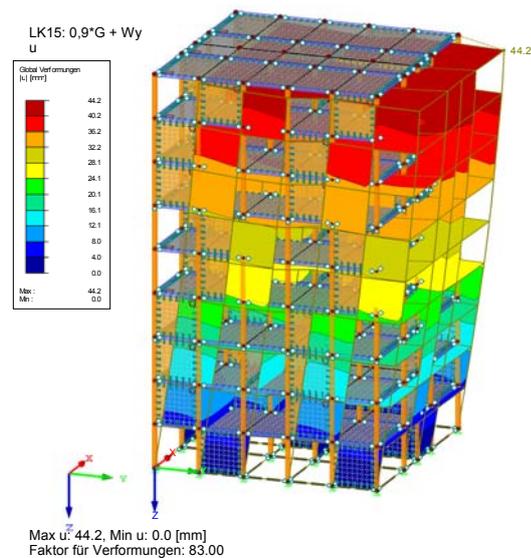
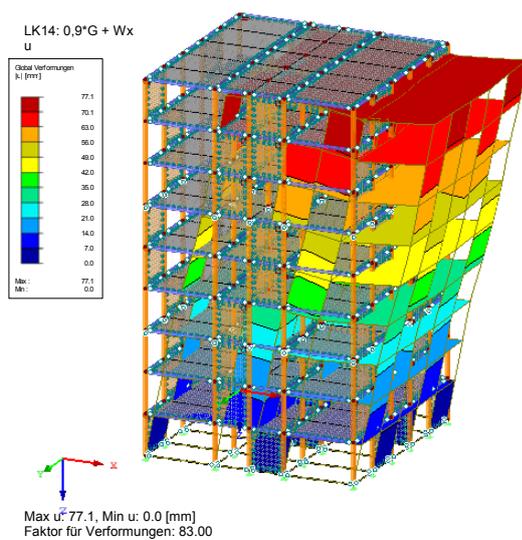
Für die Kostenermittlung wurden die in Tabelle 12 dargestellten Annahmen getroffen und in Verhältnis zum Mittelwert der Verformungen in x- und y-Richtung gestellt.

5.1 Ausgangsmodell

Das Ausgangsmodell beruht auf den im Abschnitt 4.3 dargestellten Annahmen. Im Folgenden die Ergebnisse der betrachteten Lastkombinationen LK14 und LK15 (vgl. Abs. 4.5.4) mit den zugehörigen Verformungsfiguren sowie die erste und zweite Eigenform des Systems.

LK14: $0,9 \cdot G + W_x$
 $u = 77,1 \text{ mm}$

LK15: $0,9 \cdot G + W_y$
 $u = 44,2 \text{ mm}$



1. Eigenform: 1,82 Hz

2. Eigenform: 2,18 Hz

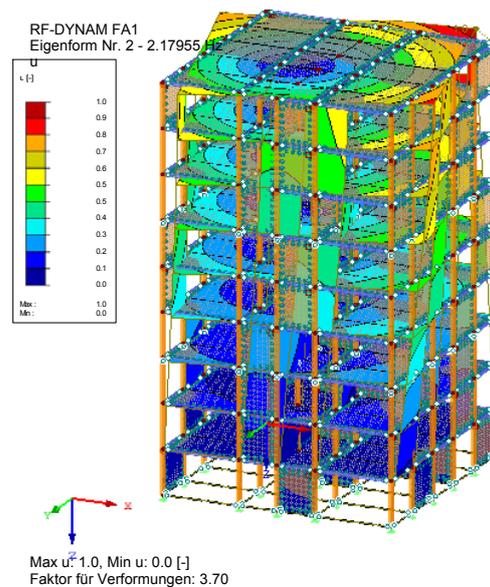
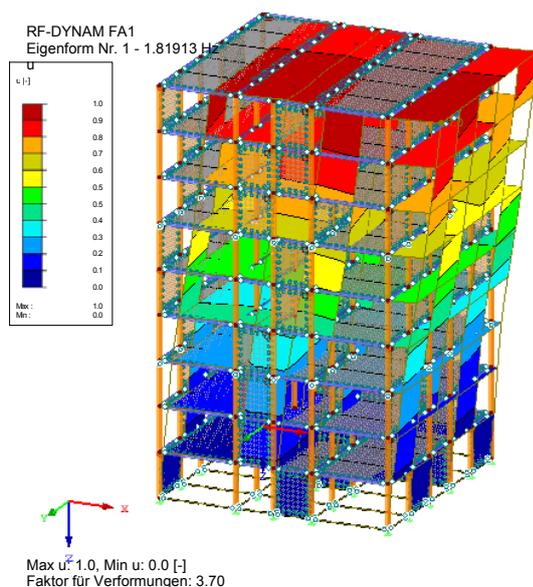


Bild 15 Verformungsfiguren, erste und zweite Eigenform des Systems

5.2 Stützen

Die Stützen dienen der Aufnahme und Ableitung der Vertikalbelastungen sowie die aus den aussteifenden Bauteilen eingetragenen Kräftepaare. Somit haben sie Anteil am horizontalen Verformungs- und Schwingungsverhalten. Nachfolgend werden die Varianten unterschiedlicher Holzwerkstoffe und Querschnittsabmessungen untersucht sowie der Einfluss der Stützenstöße.

5.2.1 Werkstoff

Es wird zu dem beim Ausgangsmodell verwendeten konventionelle Brettschichtholz GL28h (Var.1) aus Tanne, Fichte oder Kiefer außerdem eine Variante aus Buchen-Furnierschichtholz (Zulassung Z-9.1-837)(Var. 2) betrachtet. Zum Vergleich wird zusätzlich eine Variante aus konventionellem Nadelholz C30 (Var. 3) hinzugezogen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die hier erforderlichen Querschnittsabmessungen nicht oder nur schwer als Vollholz erhältlich sind, es müssten durch zusätzlichen Aufwand Teilquerschnitte aneinander gekoppelt werden.

Tabelle 13 Untersuchung unterschiedlicher Stützenwerkstoffe

Stützenwerkstoff		Var. 1	Var. 2	Var. 3
		BSH GL28h	BSH aus Buchenfurnier	NH C30
E-Modul	N/m ²	12.600	16.700	12.000
	%	100 %	+ 32,5 %	- 4,8 %
Auslenkung LK 14	mm	77,1	71,7	78,2
(x-Richtung)	%	100%	-7,00%	1,40%
Auslenkung LK 15	mm	44,2	41,8	44,7
(y-Richtung)	%	100%	-5,40%	1,10%
Eigenfrequenz 1. Eigenform	Hz	1,82	1,78	1,78
Eigenfrequenz 2. Eigenform	Hz	2,18	2,12	2,13
Holz	m ³	72,58	72,58	72,58

Die Auswertung der Tabelle 13 zeigt, dass der Einfluss der Stützensteifigkeit relativ gering ist. Bei einer deutlichen Erhöhung der Steifigkeit (Var.2: +32,5%) reduziert sich die Verformung (Var2: -7%) nur um circa ein Fünftel gegenüber der Steifigkeitszunahme. Unter Einbeziehung der Kosten verstärkt sich jedoch der Vorteil von Var. 2 gegenüber Var. 1.

Die Wahl eines Nadelvollholzes als Stützenquerschnitt bewirkt auf den ersten Blick, bei nur sehr geringem Steifigkeitsverlust (-4,8%) und zu vernachlässigenden Einfluss auf die Verformung (+1,4%), einen großen Kostenvorteil. Hier sind jedoch keine Kosten für die Kopplung der Teilquerschnitte berücksichtigt. Zudem bieten verleimte Querschnitte weitere für die Steifigkeit nicht direkt messbare Vorteile, wie die Formbeständigkeit und geringere Rissbildung.

Da Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz (Var.2) zudem deutlich höhere charakteristischen Festigkeiten aufweist (z.B. $f_{c,k,Buche}=49,5 \text{ N/mm}^2$ gegenüber $f_{c,k,GL28h}=26,5 \text{ N/mm}^2$), wäre eine Querschnittsreduktion möglich. Dies würde den ökonomischen Vorteil noch weiter erhöhen.

Je nachdem, ob sichtbare Stützenquerschnitte erwünscht sind, muss die deutlich abweichende Anmutung des Buchenfurniers (Var. 2) gegenüber den Nadelholzflächen (Var. 1 und 3) im architektonischen Konzept berücksichtigt werden.

5.2.2 Querschnittsabmessungen

Ähnlich zum vorigen Abschnitt 5.2.1 wird ebenfalls die Dehnsteifigkeit der Stützenquerschnitte variiert. Zur Veranschaulichung und Berücksichtigung des zugehörigen Holzverbrauches in diesem Fall nicht über die Steifigkeit, sondern verschiedener Querschnittsabmessungen.

In Tabelle 14 werden bei gleich bleibender Holzgüte die Auswirkungen drei verschiedener Stützenquerschnitte (Var. 1 bis 3) auf das Schwingungs- und Verformungsverhalten betrachtet. Zudem wird in Variante 4 eine der Belastung folgenden Staffelung der Querschnitte untersucht. Dabei wird in den untersten drei Geschossen ein Querschnitt von 34/34 cm² angesetzt, für die Geschosse 4 bis 6 der Querschnitt nach Variante 1 und die Stützen der obersten drei Geschosse werden mit einem 24/24 cm² Querschnitt belegt.

Tabelle 14 Untersuchung unterschiedlicher Stützenquerschnitte

Stützenquerschnitt		Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4
		30/30	24/24	34/34	Staffelung
Querschnittsfläche	cm ²	900	576	1156	Ø 877
	%	100 %	- 36 %	+ 28,4 %	- 2,6 %
Auslenkung LK 14	mm	77,1	90,1	71,4	73,9
(x-Richtung)	%	100%	+ 16,7 %	- 7,4 %	- 4,2 %
Auslenkung LK 15	mm	44,2	50,3	41,7	43
(y-Richtung)	%	100%	+ 13,8 %	- 5,7 %	- 2,7 %
Eigenfrequenz 1. Eigenform	Hz	1,82	1,75	1,84	1,9
Eigenfrequenz 2. Eigenform	Hz	2,18	2,1	2,2	2,29
Materialverbrauch	m ³	72,58	46,45	93,22	70,75
	%	100 %	-36,00 %	28,44 %	-2,52 %

Das Ergebnis der Tabelle 14 gleicht, wie erwartet, dem der Werkstoffvariation. Die Vergrößerung des Querschnitts um circa 28% (Var.3) bewirkt eine Reduktion der Verformung um 5 bis 7 %. Das gleicht der Variante 2 aus dem vorigen Abschnitt 5.2.1, wo die Steifigkeit um 32% erhöht wurde und annähernd gleiche Verformungen bewirkte. Der leichte Vorteil der Querschnittsänderung (4% Punkte geringere Erhöhung der Dehnsteifigkeit) lässt sich auf den zusätzlichen geometrischen Effekt der größeren Flächenträgheitsmomente zurückführen.

Darüber hinaus wird durch Variante 4 sichtbar, dass eine an den Kraftfluss angepasste Steifigkeitsverteilung mit geringfügig geringerem Materialverbrauch (-2,5%) sich, wenn auch nur leicht, günstig auf das Verformungsverhalten auswirkt (- 2,7 bis 4,2 %). Stärkeren Einfluss hat die angepasste Querschnittsbelegung auf die dynamischen Eigenschaften des Gesamtsystems. Im Vergleich mit Variante 3 wird deutlich weniger Material benötigt (31,8%) und trotzdem die Frequenzen der Eigenformen erhöht. Ein Beispiel des Einflusses einer Abstimmungsmöglichkeit zwischen eingebrachter Masse und Steifigkeit.

Bei Betrachtung der relativen Kosten, also dem Kostenzuwachs bzw. der –abnahme im Verhältnis zur Verformungsänderung, wird ebenfalls deutlich, dass die Staffelung das wirtschaftlichste Ergebnis erzielt. Für nur ca. 500 € kann die Kopfauslenkung um einen Millimeter minimiert werden. Es zeigt sich deutlich, dass kein linearer Zusammenhang zwischen Dehnsteifigkeit der Stützen und der Verformung besteht. So liegt der Nutzen der Querschnittserhöhung zwischen Variante 2 und 1 fast doppelt so hoch, wie zwischen Variante 1 und 3.

Auf die Flächenausnutzung hat die Veränderung der Stützenabmessungen hingegen nur einen zu vernachlässigenden Einfluss. Die Wahl kleinerer Stützenquerschnitte nach Variante 2 ergäbe lediglich höhere Mietseinnahmen des Gesamtgebäudes von 73 €. In ähnlicher Dimension bewegt sich der Verlust bei Variante 3 (-58 €).

5.2.3 Stützenstoß

Um die beim mehrgeschossigen Holzbau auftretende Querdruckproblematik zu umgehen, sind die Stützen als über die Geschosse durchlaufend konstruiert. Aufgrund von begrenzten Lieferlängen sowie montagebedingten Einschränkungen werden die Stützen an zwei Stellen, jeweils nach drei Geschossen, gestoßen. Bei einer dauerhaft gewährleisteten Druckbeanspruchung hätte der Stoß keinen Einfluss auf das Verformungsverhalten des Gebäudes. Aufgrund der werkstoffbedingten leichteren Bauweise, kann es jedoch, gerade in den oberen Geschossen, zu Zugbeanspruchung der Stützen kommen. In der nachfolgenden Untersuchung soll nun die Auswirkung einer nachgiebigen Verbindung der Stützen untersucht werden.

Im Ausgangsmodell sind die Stützen als durchlaufend und somit steif verbunden modelliert. In den beiden anderen Varianten 2 und 3 sind nachgiebige Anschlüsse berücksichtigt. Es wird, ähnlich zum Stütze/Wand-Anschluss, von einem eingelassenen Schlitzblech ausgegangen, dass an einem Stützenende (vorgefertigt) mit Stabdübeln Ø12 an der Stütze befestigt ist und an der anzuschließenden Stütze (bauseits) mit selbstbohrenden Stabdübeln Ø7. Variante 2 ist für eine Zugkraft von ungefähr 50 kN ausgelegt, woraus eine Steifigkeit von 50.000 kN/m resultiert. In Variante 3 wird mit 150.000 kN/m eine deutlich steifere Lösung betrachtet, die ungefähr die vierfache Tragfähigkeit gegenüber Variante 2 hätte.

Im Modell wurde angenommen, dass jegliche Momente und auch die orthogonal zur Stützenlängsrichtung wirkenden Kräfte übertragen werden. Die angenommene Federsteifigkeit wirkt unter Druck- und Zugbelastung. An dieser Stelle weicht die Modellierung von der Realität ab, denn unter Druckbeanspruchung ist in der Regel der Kontakt zwischen den beiden Stützen gewährleistet und die Nachgiebigkeit der Verbindungsmittel nimmt keinen Einfluss. Zur Begrenzung der Berechnungsdauer wurde jedoch von einem nichtlinearen Federverhalten abgesehen.

Tabelle 15 Untersuchung unterschiedlicher Stützenstoß-Ausführungen

Stützenstoß		Var. 1	Var. 2	Var. 3
	kN/m	∞	50.000	150.000
Auslenkung LK 14	mm	77,1	107	88
(x-Richtung)	%	100%	+38,8%	+14,1%
Auslenkung LK 15	mm	44,2	52,4	47,0
(y-Richtung)	%	100%	+18,6%	+6,3%
Eigenfrequenz 1. Eigenform	Hz	1,82	1,57	1,71
Eigenfrequenz 2. Eigenform	Hz	2,18	2,01	2,11

Die Ausbildung der StützenstöÙe hat großen Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit des Gebäudes. Die Ergebnisse der Tabelle 10 zeigen, dass eine Auslegung des Anschlusses allein auf die Erfordernisse der Tragfähigkeit mit einer vermeintlich geringen Zugbeanspruchung, zu Verformungserhöhungen bis zu fast 40 % führen kann. Demgegenüber steht die Variante 3, die mit der vierfachen Menge eine Verformungserhöhung von ca. 14 % bewirkt.

Die geringe Steifigkeit des Anschlusses wirkt sich ebenfalls auf die dynamischen Eigenschaften des Bauwerkes aus. In keinem der in diesem Abschnitt vorgenommenen Untersuchungen ist der Wert der ersten Eigenfrequenz geringer.

Tabelle 16 Untersuchung der monetären Auswirkungen der Stützenstoß-Varianten 2 und 3

Stützenstoß		Var. 2	Var. 3
	kN/m	50.000	150.000
Mittelwert der Auslenkung	mm	79,7	67,5
	%	100 %	-18,1%
Dübel WS-T-7,0	-	600	2400
	€	3.000	12.000
Stabdübel Ø12	-	360	1440
	€	1.080	4.320
Summe	∑ €	4.080	16.320
	€/mm	-	-1003

Zur Beurteilung der ökonomischen Auswirkungen des Stützenstoßes wird an dieser Stelle eine separate Tabelle 16 eingeführt. Da im Ausgangsmodell der unrealistische Fall eines ideal steifen Stützenstoßes angenommen wird, eignet er sich nicht, um ihn als Bezug für die Kostenermittlung heranzuziehen. Die Variante 2 mit einer relativ geringen Steifigkeit, bemessen für eine geringe Zugbeanspruchung der Stützen, soll als die Bezugsvariante bilden.

Die Erhöhung der Verbindungsmittellanzahl um das Vierfache bewirkt eine Reduzierung der Verformung um 18 %. Betrachtet man den finanziellen Aufwand in dem Zusammenhang, ergibt sich eine Kostenbelastung von ca. 1000 € pro Millimeter Kopfauslenkung, ein vergleichsweise geringer Betrag zur Reduzierung der Gesamtverformung.

5.3 Wände

In diesem Abschnitt wird u.a. eine Steuerung der Steifigkeit durch verschiedene Wandquerschnitte untersucht (Abs. 5.3.1). Darüber hinaus wird die Auswirkung der in Abschnitt 4.8 diskutierten abweichenden Annahmen zur Implementierung von Brettsperrholz dargelegt (Abs. 5.3.2)

5.3.1 Wandstärken

Als Teil des Aussteifungskonzeptes sind die Wände für die Schublastabtragung verantwortlich. Sie sind umlaufend nachgiebig an das Skeletttragwerk angeschlossen. In der folgenden in Tabelle 17 dargestellten Grenzwertbetrachtung soll die Auswirkung der Querschnittsänderung der Wandbauteile beleuchtet werden. Dazu wurden im Vergleich zum Ausgangsmodell (Var. 1) mit 20 cm Wandstärke eine sehr dünne Wandstärke mit 12 cm (Var.1) betrachtet und zudem der größte verfügbare Regelaufbau eines Brettsperrholzelementes mit 32 cm Dicke (Var.3) gewählt. Unter Variante 4 wird eine Staffelung der drei Querschnitte über je drei Geschosse mit Variante 4 im unteren Bereich und in den oberen Geschossen dem 12 cm Elementen betrachtet.

Die Berechnung der Eingabewerte der Steifigkeitsmatrix in Abhängigkeit des Bauteilaufbaus erfolgt nach Abschnitt 4.8 und ist in Tabelle 17 dargestellt.

Tabelle 17 Berechnung der Elemente der Scheiben-Steifigkeitsmatrix

Wandstärke	mm	200	120	320
Lamellen in x	mm	3 x 40	2 x 40	3 x 80
Lamellen in y	mm	2 x 40	1 x 40	2 x 40
Dehnsteifigkeit Dx	kN/m	1.440.000	960.000	2.880.000
Dehnsteifigkeit Dy	kN/m	960.000	480.000	960.000
Schubsteifigkeit Dxy	kN/m	50.000	30.000	80.000

Tabelle 18 Untersuchung unterschiedlicher Wandstärken

Wandstärke		Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4
	mm	200	120	320	Staffelung
Schubmodul	N/mm ²	50.000	30.000	80.000	
	%	100 %	- 40,0 %	+60,0 %	
Auslenkung LK 14	mm	77,1	93,7	67,5	76,5
(x-Richtung)	%	100%	21,50%	-12,50%	-0,80%
Auslenkung LK 15	mm	44,2	52,9	39,3	43
(y-Richtung)	%	100%	19,70%	-11,10%	-2,70%
Eigenfrequenz 1. Eigenform	Hz	1,82	1,64	1,95	1,84
Eigenfrequenz 2. Eigenform	Hz	2,18	2	2,31	2,21
Holzverbrauch	m ³	226,69	136,01	362,70	246,89
	%	100 %	- 40,0 %	+ 60,0 %	+ 8,9 %
Flächenbeanspruchung	m ²	70,84	42,50	113,34	77,15
	€		255	-383	-57
Materialkosten in Abh. der Verformung	€/mm		4.086	-10.693	-12.793

Bei größerer Zu- als Abnahme der Schubsteifigkeit verhält sich die jeweils zugehörige Änderung der Verformung gegenläufig. Eine Zunahme von 60 % Steifigkeit (Var.3) bewirkt eine ca. 11 bis 12 % Abnahme der Verformung. Eine Reduktion der Steifigkeit um 40 % (Var.2) hingegen lässt die Verformungen um circa 20 % ansteigen. Hier sind Effekte der Berechnung am verformten System (Theorie II Ordnung) sichtbar.

Da die Wandelemente gegenüber den Stützen einen circa um den Faktor drei größeren Material- und Flächenbedarf haben, sind sie eine relativ kostenintensive „Stellschraube“ zur Optimierung der Konstruktion hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit.

5.3.2 Annahme Schubmodul

In Abschnitt 4.8 wird ausführlich die Ermittlung des für Brettspertholz anzusetzenden Schubmoduls für Scheibenbeanspruchung beschrieben. Die verschiedenen Ansätze liefern deutlich voneinander abweichende Ergebnisse. Neben dem Wert aus der Herstellerzulassung (vgl. ETA-06/0138) unter Variante 1 (Faktor $\approx 0,37$) werden der Ansatz nach Eurocode und [Winter, 2009] (Faktor 0,25) als Variante 2 und die Ergebnisse der TU Graz (Faktor 0,75) als Variante 3 untersucht. Die aussteifenden Wandscheiben sind planmäßig und in der Modellierung nur für die Abtragung der aus Horizontaleinwirkung entstehenden Schubkräfte zuständig.

Tabelle 19 Untersuchung unterschiedlicher Schubsteifigkeitsberechnungen

Schubmodul nach		Var. 1	Var. 2	Var. 3
		KLH	Norm	TU Graz
Schubmodul	N/mm ²	50.000	34.500	103.500
	%	100 %	- 31 %	+ 107 %
Auslenkung LK 14	mm	77,1	87,8	64
(x-Richtung)	%	100%	+ 13,9 %	-17,00%
Auslenkung LK 15	mm	44,2	49,6	37,4
(y-Richtung)	%	100%	12,20%	-15,40%
Eigenfrequenz 1. Eigenform	Hz	1,82	1,7	2
Eigenfrequenz 2. Eigenform	Hz	2,18	2,06	2,36

Wie auch in Abschnitt 5.3.1 zu sehen, haben relativ große Änderungen an den Steifigkeitseigenschaften der Wände verhältnismäßig geringen Einfluss auf die Kopfauslenkung des Gesamtgebäudes. Führt man sich jedoch vor Augen, dass die Abweichungen nicht auf realen Veränderungen des Systems, sondern auf theoretische Annahmen zu den Berechnungsgrundlagen beruhen, sind abweichende Verformungswerte von bis zu 17 % jedoch zu große Unsicherheiten, um eine wirtschaftliche und ökologische Tragwerksplanung zu gewährleisten.

In der dynamischen Auswertung wird die Steifigkeitszunahme im Vergleich zu den übrigen Parameteruntersuchungen hingegen am stärksten berücksichtigt.

5.4 Verbindungsmittel

Nachfolgend wird zunächst die Auswirkungen der Verbindungsmittelanzahl auf die Kopfverformung betrachtet (Abs. 5.4.1) und nachfolgend eine Variante der Implementierung der Verbindungsmittel in die Berechnungssoftware (Abs. 5.4.2).

5.4.1 Anzahl der Verbindungsmittel

Im Folgenden soll der Einfluss der Verbindung zwischen aussteifenden Wänden und den Stützen bzw. der Deckenebene untersucht werden. Als unterster Grenzwert dient dabei die nach Bemessung im Grenzzustand der Tragfähigkeit notwendige Anzahl (Var. 1), abgestuft nach Belastung, Geschoss und Achsenorientierung (siehe Tabelle 9 in Abschnitt 4.7). In Variante 2 wird die nach den Vorgaben der Mindestabstände die maximal mögliche Anzahl angesetzt (vgl. Tabelle 20). In der Variante 3 werden nur in den untersten drei Geschossen die Maximalanzahl angenommen und darüber die aus Variante 1.

Tabelle 20 Maximalanzahl der Verbindungsmittel (Variante 2)

		Dübel WS-T-7,0	Stabdübel Ø12
Mindestabstand	cm	2,5	5
Anzahl	Stck./m	28,6	16,7
		Wand/ Decke	Wand/ Stütze
Resultierende Steifigkeit	kN/m	257.657	136.159

Die Untersuchung wird zusätzlich unterteilt, um die Einflüsse der Verbindung Wand/Stütze gegenüber den Kopf- und Fußanschlüssen Wand/Decke differenzieren zu können. Dazu wird in Variante 4 in den horizontalen Fugen, also Wand/Decke, die Anzahl der Verbindungsmittel maximiert und in Variante 5 die der Stütze/Wand Anschlüsse.

Tabelle 21 Untersuchung unterschiedlicher Verbindungsmittelmengen

Tabelle 22 Anzahl der Verbindungsmittel		Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4	Var. 5
		GZT	maximal	Staffelung	Wand/Decke max.	Wand/Stütze max.
Auslenkung LK 14	mm	77,1	50,9	59,4	59,6	55,4
(x-Richtung)	%	100%	-34,00%	-23,00%	-22,7 %	-28,1 %
Auslenkung LK 15	mm	44,2	29,2	37,9	37,9	34,2
(y-Richtung)	%	100%	-33,90%	-14,30%	-14,3%	-22,6
Eigenfrequenz 1. Eigenform	Hz	1,82	2,21	2,06	2,05	2,12
Eigenfrequenz 2. Eigenform	Hz	2,18	2,65	2,4	2,39	2,50
Dübel WS-T-7,0	-	11850	41100	15600	26250	26700
	%	100 %	+ 246,8 %	+ 31,6 %		
	€	59.250	205.500	78.000	131.250	133.500
Stabdübel Ø12	-	3300	12150	4300	3300	12150
	%	100 %	+ 268,2 %	+ 30,3 %		
	€	69.150	241.950	90.900	141.150	169.950
	∑ €	69.150	241.950	90.900	141.150	169.950
	€/mm		-8.388	-1.813	-6.050	-6.360

Aus Tabelle 21 wird ersichtlich, dass durch die Anzahl der Verbindungsmittel die Kopfauslenkung wesentlich beeinflusst werden kann. Dabei zeigt sich im Vergleich der Varianten 2 und 3, dass bei gezielter Verdichtung der Verbindungsmittel an den am stärksten belasteten Bereichen (Var. 3) viel Material eingespart werden.

Die Ergebnisse der getrennten Erhöhung der Verbindungsmitteldichte bei den horizontalen (Var. 4) und vertikalen (Var. 5) Fugen zeigen einen stärkeren Einfluss der Wand/Stützen Anschlüsse. Folglich könnten durch eine zusätzliche Differenzierung der Fugenorientierung (vertikal/ horizontal) bei der Erhöhung der Verbindungsmitteldichte weitere Dübel eingespart werden.

Die Kopfauslenkung über die Anzahl der Verbindungsmittel zu steuern, bringt den architektonischen Vorteil, dass dies weitestgehend ohne Beeinträchtigung der Gestaltung und Flächenausnutzung geschieht.

In die Beurteilung, ob man die Steifigkeit des Gebäudes über die Anzahl der Verbindungsmittel verbessert, sollte einfließen, dass das Einbringen der Verbindungsmittel kein automatisierter Vorgang ist und damit sehr zeit- und lohnintensiv. Dies ist in der Kostenaufstellung in Tabelle 21 noch nicht berücksichtigt.

5.4.2 Detailausführung/ Modellierung

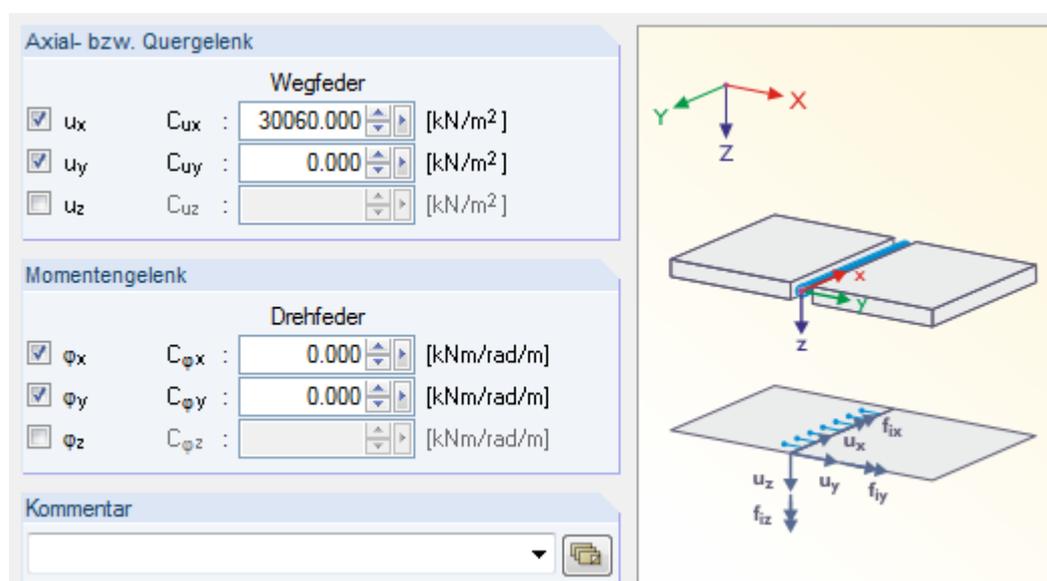


Bild 16 Eingabemaske eines Liniengelenkes bei RFEM der Dlubal Software GmbH

An dieser Stelle wird der Einfluss einer Kraftübertragung orthogonal zur jeweiligen Verbindungsfuge untersucht. Da die Ausfachungen im Skelettsystem planmäßig nur Schubbeanspruchungen ausgesetzt sein sollen, wirken die Federn der Liniengelenke nur in Fugenlängsrichtung, also nach Bild 16 in Richtung der lokalen x-Achse. Bewegungen in Richtung der y-Achse wären dann frei. Dies entspräche in der Praxis einer Ausführung mit Langlöchern in den Schlitzblechen.

Diese sind bei der Verwendung von selbstbohrenden Stabdübeln aber nicht ausführbar. Aus diesem Grund wird in dieser Untersuchung die ideale Annahme einer reinen Schubkraftübertragung im Vergleich zur realeren Implementierung betrachtet.

Tabelle 23 Untersuchung verschiedener Liniengelenk-Modellierungen

Modellierung Liniengelenke		Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4
			Vertikal ux=uy	Horizontal ux=uy	Alle ux=uy
Auslenkung LK 14	mm	77,1	63,2	59,6	56,9
(x-Richtung)	%	100%	-18,00%	-22,70%	-26,2 %
Auslenkung LK 15	mm	44,2	42,2	39,5	37,1
(y-Richtung)	%	100%	-4,50%	-10,60%	- 16,1%
Eigenfrequenz 1. Eigenform	Hz	1,82	1,99	2,05	2,10
Eigenfrequenz 2. Eigenform	Hz	2,18	2,29	2,36	2,43

Die Berücksichtigung der Verbindungsmittelsteifigkeit orthogonal zur Fuge hat teilweise erheblichen Einfluss (vgl. Tabelle 23) auf die Gesamtverformung des Gebäudes. Außerdem erhöhen sich die dynamischen Eigenschaften der Gesamtkonstruktion um bis zu 0,3 Hz. An dieser Stelle liegt eine große Fehlerquelle für die realitätsnahe Abbildung des Systems und der Verlässlichkeit der daraus resultierenden Ergebnisse. Dass die Annahme einer zusätzlichen Steifigkeitsdimension eines Anschlussdetails zu einer Erhöhung der Steifigkeit des Gesamtsystems führt ist zunächst naheliegend. Jedoch gehen mit der Implementierung nach Variante 2 bis 4 auch Änderungen bei den für die Beurteilung der Tragfähigkeit maßgebenden Schnittkräften einher. Die zusätzliche Steifigkeit führt zu einer stärkeren Lastverteilung und somit Abminderung der Extrema. Eine falsche Abschätzung an dieser Stelle könnte somit die Standsicherheit des Gesamtgebäudes gefährden.

Zu diesem Sachverhalt sind nähere Untersuchungen, bestenfalls in Abstimmung mit den Softwareherstellern, zur Validierung der Systemeingabe notwendig.

5.5 Analyse des Schwingungsverhaltens

Die vorstehenden Varianten der Hochhauskonstruktion weisen einen Frequenzbereich von 1,5 bis 2,5 Hz auf. Damit liegt das Gebäude deutlich über dem für Windanregung kritischen Frequenzbereich (vgl. Bild 13). Stünde das Gebäude hingegen in einer für Erdbeben kritischen Region, wären genauere Untersuchungen notwendig.

Im Folgenden soll nun exemplarisch für das Ausgangsmodell die Überprüfung der Schwingungsanfälligkeit und der Horizontalbeschleunigung vorgenommen werden.

5.5.1 Überprüfung Schwingungsanfälligkeit nach DIN EN 1991-1-4, NA.C.2

Zur Überprüfung der Schwingungsanfälligkeit wurde das Modell auf Grundlage der unter Abschnitt 4.3 angegebenen Randbedingungen zugrunde gelegt.

Nachweisformat
$$\frac{x_s}{h} \leq \frac{\bar{\delta}}{\left(\sqrt{\frac{h_{ref}}{h} \cdot \frac{h+b}{b}} + 0,125 \cdot \sqrt{\frac{h}{h_{ref}}} \right)^2}$$

mit Gebäudebreite $b = 16,5$ m; Gebäudehöhe $h = 28,8$ m (nur Holzbau) und einer ermittelten Kopfauslenkung von $x = 95,5$ cm.

Dies ergibt eingesetzt und umgeformt als Anforderung für das Dämpfungsdekrement:
 $\bar{\delta} \geq 0,093$

Die Ermittlung des Dämpfungsdekrementes erfolgt nach Anhang F der DIN EN 1991-1-4 und den Angaben aus[54].

Nach Gl. (1) ergibt sich das logarithmische Dekrement aus der Summe von drei Einzelanteilen:

$$\bar{\delta} = \bar{\delta}_s + \bar{\delta}_a + \bar{\delta}_d$$

mit $\bar{\delta}_s$: das logarithmische Dekrement der Strukturdämpfung
 $\bar{\delta}_a$: das logarithmische Dekrement der aerodynamischen Dämpfung
 $\bar{\delta}_d$: das logarithmische Dekrement der Dämpfung infolge besonderer Maßnahmen

$\bar{\delta}_s$ nach Abschnitt 4.9.2:

Zur Ermittlung der Strukturdämpfung nach [PetersenDyn] werden die Werte für die mittlere Bauteilbelastung herangezogen. Da die Gebäudestruktur aus unterschiedlichen Baustoffen besteht, wird für die Ermittlung des Baustoffdämpfungswertes Brettschichtholz angenommen. Dies entspricht dem verwendeten Stützenmaterial. Bei den Brettsperrholzelementen handelt es sich um zusammengeleimte Nadelhölzer. Insofern ist eine Annahme ähnlicher Dämpfungseigenschaften gegenüber Brettschichtholz, insbesondere weil auf der sicheren Seite liegend, eine sinnvolle Annahme.

$$\bar{\delta}_s = \bar{\delta}_1 + \bar{\delta}_2 + \bar{\delta}_3 = 0,075$$

mit $\bar{\delta}_1=0,03$ (Brettschichtholz)
 $\bar{\delta}_2=0,04$ (Dübelverbindungen)
 $\bar{\delta}_3=0,005$ (Lagerung auf Betonkonstruktion)/ alternativ $\bar{\delta}_3=0,010$ (Sand)

$\bar{\delta}_a$ nach Gleichung (F.18) der DIN EN 1991-1-4:

$$\bar{\delta}_a = \frac{c_f \cdot \rho \cdot b \cdot v_m(z_s)}{2 \cdot n_1 \cdot m_e} = 0,0056$$

Mit	$c_f = 1,35$	aerodynamischer Kraftbeiwert (nach 7.7 in [EC1])
	$\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$	Dichte der Luft
	$b = 16,5$	Gebäudebreite
	$z_s = 0,6 \cdot h = 0,6 \cdot 34,2 = 20,52 \text{ m}$	nach Bild 6.1 aus [EC1]
	$v_m(z_s) = 1,18 \cdot v_b \cdot (z/10)^{0,16} = 1,18 \cdot 30 \cdot (20,52/10)^{0,16} = 39,7 \text{ m/s}$	
	$n_1 = 1,82$	Grundeigenfrequenz der ersten Schwingungsform
	$m_e = 54.052 \text{ kg/m}$	m_e äquivalente Masse je Längeneinheit mit $m = 1.556.700 \text{ kg}$ und $l = 28,8 \text{ m}$ (Höhe Holzbau)

δ_a Dämpfung infolge besonderer Maßnahmen:

Da keine besonderen Maßnahmen zur Schwingungsdämpfung angedacht sind, ergibt sich δ_a zu Null.

Daraus resultiert für das logarithmische Dämpfungsdekrement:

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d = 0,075 + 0,0056 = 0,081 \leq 0,093$$

Der Nachweis ist somit nicht erfüllt. Nimmt man nun die Gründung des Erdgeschosses aus Stahlbeton auf Sand hinzu, verbessert sich das resultierende Dekrement, reicht jedoch nicht zur Erfüllung des Nachweises.

Zur Erfüllung des Nachweises kann zum einen die Dämpfung verbessert werden. Dies würde einen starken Eingriff in die Konstruktion bedeuten oder das Anbringen kostenintensiver Schwingungsdämpfer. Darüber hinaus ist die Kopfauslenkung des Gebäudes unter Eigenlast ein wichtiger Faktor. Die Erhöhung der Steifigkeit, zum Beispiel durch eine der in Abschnitt 5 aufgezeigten Möglichkeiten, würde die Auslenkung beschränken und damit die zur Verfügung stehende Dämpfung den Anforderungen genügen.

5.5.2 Überprüfung der Behaglichkeit

Die Überprüfung der Behaglichkeit geschieht nach dem in Abschnitt **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** beschriebenen Verfahren über die Berechnung der Horizontalbeschleunigung:

$$\ddot{x} = \sqrt{2 \cdot \ln(f_0 \cdot T)} \cdot \left(0,68 + \frac{\ln R}{5}\right) \cdot e^{(-3,65 - 0,41 \cdot \ln f_0)}$$

Die Überprüfung erfolgte zum einen an dem unter Abschnitt 4.3 beschriebene Ausgangsmodell mit $f = 1,82$ sowie weiteren beispielhaften Eigenfrequenzen zwischen 1,5 und 2,5, die das Spektrum der Parameteranalyse abdecken.

Die ermittelten Werte der Horizontalbeschleunigung sind in Tabelle 24 dargestellt. Sie liegen für $R = 1$ im unteren zulässigen Bereich für Wohngebäude und für eine Wiederkehrperiode von $R = 10$ unterschreiten sie alle gegebenen Grenzwerte. Es ist somit davon auszugehen, dass unter es maximaler Böeneinwirkung zu keiner Einschränkung der Nutzerbehaglichkeit infolge zu großer Horizontalbeschleunigungen kommt. Es zeichnet sich ab, dass mit sinkender Eigenfrequenz die Horizontalbeschleunigung steigt und somit den angegebenen Grenzwerten (vgl. Tabelle 24) näher kommt. Die Werte bestätigen die Theorie, dass eine Zunahme der Steifigkeit und damit verbundene Steigerung der Eigenfrequenzen das Schwingungsverhalten einschränken.

Tabelle 24 Untersuchung der Horizontalbeschleunigung

Eigenfrequenz f_0	Horizontalbeschleunigung \ddot{x}	
	$R = 1$	$R = 10$
1,5	5,52	9,26
1,82	5,17	8,67
2,00	5,01	8,40
2,5	4,64	7,79

5.6 Zusammenfassung Tragwerksplanung

5.6.1 Einfluss der einzelnen Konstruktionselemente

Die Auswertung der konstruktiven Einflussparameter auf das Verformungsverhalten, insbesondere vor dem Hintergrund der Materialkosten, erlaubt kein eindeutiges Ergebnis. Die Abhängigkeit der Kopfauslenkung zum jeweiligen Konstruktionselement verhält sich nicht linear und so lässt eine Grenzwertbetrachtungen zunächst nur Tendenzen erkennen. Zudem sind die Auswirkungen der Variation einzelner Parameter vielschichtiger, als die Darstellung hier suggeriert, architektonische Gesichtspunkte zum Beispiel lassen sich monetär schwer erfassen.

Es wird jedoch deutlich, dass für die Steifigkeit die Verbindungsmittel das maßgebliche Kriterium sind. Die Erhöhung der Verbindungsmittelanzahl führt zu einen zu den größten Verformungsänderungen und zudem sind sie – sinnvoll eingesetzt – die günstigste Variante die Verformungen zu reduzieren (vgl. Abs. 5.2.3 und 5.4.1). Weiterer Vorteil sind die geringen Auswirkungen auf die Architektur und Flächenausnutzung. Zudem stellt sich heraus, dass die Wahl des Stützenquerschnittes ebenfalls ein im Verhältnis kostengünstiges Mittel der Einflussnahme auf die Verformungen ist (vgl. Abs. 5.2.2). Die Wandquerschnitte hingegen sind nur kostenintensiv zur Begrenzung der Verformungen einzusetzen (vgl. Abs. 5.3.1). Es scheint sinnvoll, diese rein nach statischem Erfordernis (GZT) zu bemessen. Außerdem ergibt sich aus der Parameteranalyse, dass eine Staffelung nach Lasteinwirkung in jedem Fall sinnvoll ist (vgl. Abs. 5.2.2, 5.3.1 u. 5.4.1).

5.6.2 Schwingungsverhalten

Die Analyse des Schwingungsverhaltens (Abs. 5.5) ergibt weder Probleme hinsichtlich des kritischen Frequenzbereichs von Windeinwirkungen, noch in Bezug auf die Nutzerbehaglichkeit in Form einer kritischen Horizontalbeschleunigung unter Böeneinwirkung.

Als kritisch erweist sich hingegen der Nachweis der Schwingungsanfälligkeit. Die im Ausgangsmodell erreichte Steifigkeit reicht nicht aus, um eine vereinfachte Windlast anzusetzen und auf die Erhöhung infolge Böenresonanz zu verzichten. Da die Überschreitung des Grenzwertes relativ gering ist, kann davon ausgegangen werden, dass eine der in diesem Abschnitt genannten Möglichkeiten zur Erhöhung der Gesamtsteifigkeit des Gebäudes ausreicht, um das Kriterium zu erfüllen.

Die Betrachtung der Schwingungsanfälligkeit macht zudem deutlich, dass keine normativ verankerten Werte zum Dämpfungsverhalten von Holzgeschossbauten existieren. Sollte sich der Holzbau über der Hochhausgrenze etablieren, sollte die Anwendbarkeit der Werte nach Tabelle 9 (Abs. Abs. 4.2.2) unter Berücksichtigung der Herleitung selbiger überprüft werden.

6 Brandschutz

6.1 Allgemeine Bemerkungen

Das Bauordnungsrecht fällt unter Hoheit der sechzehn Bundesländer. Die Festlegungen erfolgen in den jeweiligen Landesbauordnungen teilweise in Verbindung mit Durchführungsverordnungen. Die von der Bauministerkonferenz zur Verfügung gestellten Muster werden in den einzelnen Bundesländern rechtsverbindlich, wenn es sich um eingeführte Richtlinien handelt. Die weitere Diskussion der Brandschutzthematik erfolgt dennoch anhand der Musterbauordnung - MBO (Fassung 2004) sowie der Muster-Hochhaus-Richtlinie – MHHR (Fassung 2008) [10] [11] [12]. Eine ungeprüfte Übertragung der diskutierten Anforderungen und Lösungen in das Landesrecht ist daher nicht ohne weiteres möglich.

Die Definition des Begriffs „Hochhaus“ erfolgt in § 2 Abs. (4) der Musterbauordnung und richtet sich nach Einsatzrandbedingungen der Feuerwehren. Gemäß MBO werden Hochhäuser als „Gebäude mit einer Höhe von mehr als 22 m“ definiert. Die Höhe ist dabei nach Absatz (3) „das Maß der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, über der Geländeoberfläche im Mittel“.

Die 22 m Höhe ergeben sich aus dem in Deutschland standardmäßig eingesetzten Drehleiterfahrzeug 23/12 gemäß DIN EN 14043 (vollautomatische Drehleiter) bzw. DIN EN 14044 (halbautomatische Drehleiter) [13] [14]. Dieses Fahrzeug hat eine Nennrettungshöhe von 23 m bei einer Ausladung von 12 m. Ein Gebäude wird demnach dann als Hochhaus bezeichnet, wenn die Feuerwehr keine Rettungsmaßnahmen mehr über das Drehleiterfahrzeug vornehmen kann.

Das brandschutztechnische Sicherheitskonzept eines Hochhauses fordert daher standardmäßig, die Flucht- und Rettungswege baulich sicherzustellen. Weiterhin sind die Anforderungen an die Konstruktion so gewählt, dass ein Hochhaus auch ohne den Einsatz der Feuerwehr ein übliches Brandereignis (Brand innerhalb einer Nutzungseinheit) ohne ein Versagen der Tragstruktur überstehen soll. Darüber hinausgehende Schadensszenarien (z.B. Terrorangriff) finden baurechtlich keine Berücksichtigung.

Eine Höhenbeschränkung eines Hochhauses ist aus brandschutztechnischer Sicht daher nicht notwendig. Prinzipiell steigt zwar das Risiko mit der Höhe des Gebäudes an; ein Brand bleibt aber gemäß den Anforderungen auf eine Nutzeinheit beschränkt. Das Brandszenario (definiert über die üblicherweise vorhandenen Brandlasten einer Nutzeinheit) reicht üblicherweise nicht aus, die Struktur zu gefährden. Daher bestehen prinzipiell keine Bedenken gegen unbeschränkt hohe Hochhäuser. Im deutschen Baurecht ist lediglich ab 60 m nochmals eine Verschärfung der Anforderungen (> 60 m Sprinklerung zwingend vorgeschrieben) vorgesehen. War das Singer Building in New York Anfang des 20. Jahrhunderts noch 187 m hoch, nähert sich der Burj Kalifa (Dubai, 2010) mit 828 m fast der ein Kilometer Marke. Das bislang höchste in Deutschland errichtete Hochhaus ist der Commerzbank-Tower in Frankfurt mit 259 m.

Die Anforderung an ein Hochhaus, im Brandfall mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht zu versagen, ist nach derzeitigem Stand der Technik durch die Holzbauweise nicht zu erfüllen. Obwohl sich nahezu jede beliebige Feuerwiderstandsdauer mit einer Holzkonstruktion erreichen lässt, ist ein Selbstverlöschen eines Brandes nach der thermischen Umsetzung mobiler Brandlasten ohne den Löschangriff der Feuerwehr nicht zu erwarten. Auch Sprinkleranlagen können dieses hohe Schutzniveau nicht garantieren, da diese als technische Anlage auch versagen können.

6.2 Allgemeine Anforderungen an den Brandschutz im Hochhausbau

Die grundsätzlichen brandschutztechnischen Anforderungen an den Hochhausbau ergeben sich aus den Bestimmungen der Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern (Muster-Hochhaus-Richtlinie - MHHR) Fassung April 2008.

6.2.1 Definition der bauordnungsrechtlichen Schutzziele und des erforderlichen Schutzniveaus für Hochhäuser.

Das wesentliche Schutzziel der MHHR ist der Personenschutz. Daraus ergeben sich spezifische Anforderungen an den vorbeugenden Brandschutz. So muss das Rettungssystem zum einen die Selbstrettung von Personen aus dem Gebäude und zum anderen den Angriff der Feuerwehr durch das Gebäudeinnere sicherstellen.

6.2.1.1 Grundkonzeption und Brandschutzsystematik der M-HFHolzR

Die Abschnitte 2 bis 7 der M-HFHolzR sowie die Betriebsvorschriften des Abschnittes 9 gelten für alle Hochhäuser. Hochhäuser unterscheiden sich demnach von anderen Gebäudarten durch:

- eine große Zahl von Geschossen auf relativ kleiner Grundfläche
- eine große Zahl von Personen im Gebäude
- eine vertikale Haupteinschließung

Hinsichtlich der horizontalen Binneneinschließung in den Geschossen unterscheiden sich Hochhäuser nicht grundsätzlich von Gebäuden unterhalb der Hochhausgrenze. Die horizontale Binneneinschließung folgt daher weitgehend dem Rettungswegkonzept der MBO.

6.2.1.2 Beurteilung des Brandrisikos in Verbindung mit Holzbauteilen

Eine wesentlicher Planungsparameter für die Hochhauskonstruktion mit Holzbauteilen besteht in der Forderung, dass zumindest die Untersicht der Geschosdecken aus Massivholzelementen als sichtbare Holzoberfläche erhalten bleiben. Die brennbaren Oberflächen haben nach bisherigen Ansichten zunächst eine Erhöhung des brandschutztechnischen Risikos des Gebäudes zur Folge. Zur Wahrung der Brandsicherheit muss eine fehlende Brandschutzbekleidung der Holzbauteile sinnvoll kompensiert werden. Auch ohne die Gefahr von Hohlraumbränden muss zunächst davon ausgegangen werden, dass im Brandfall die zusätzlichen immobilen Brandlasten des Tragwerks umgesetzt werden können.

Durch die zusätzliche Brandlast ist zudem mit einer höheren Energiefreisetzung des Brandes zu rechnen.

Aus bereits durchgeführten Forschungen wurde eine sog. Index-Methode entwickelt, um das Gesamt-Brandrisiko von Gebäuden bewerten und vergleichen zu können. Eine speziell zur Beurteilung des Brandrisikos mehrgeschossiger Wohngebäude entwickelte Methode (Fire Risk Index Method for Multi-storey Apartment Buildings; kurz: FRIM-MAB) wurde im Zuge des eines weiteren Forschungsvorhabens weiterentwickelt.

Dabei ist beim Einsatz massiver flächiger Holzbauteile in mehrgeschossigen Gebäuden neben dem zusätzlichen Eintrag von Brandlasten, der erhöhten Brandausbreitungsgeschwindigkeit auf brennbaren Oberflächen und der damit verbundenen Personengefährdung durch Rauchgase zu untersuchen, ob die Massivholzbauteile nach einem Vollbrand durch einen anschließenden üblichen Löschangriff der Feuerwehr gelöscht werden können.

Die bisherigen Forschungsergebnisse in dieser Richtung beziehen sich auf die verantwortbare Zulassung massiver flächiger Holzbauteile für die Anwendung bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 gemäß der MBO 2002. Die Bewertungen sind somit an die Anforderungen des Hochhausbaus anzupassen.

6.3 Grundsätzliche Risiken und Lösungsansätze

Zur Risikobeurteilung der Holzbauweise können Forschungsergebnisse und Brandversuche herangezogen werden, auf deren Grundlage die Musterrichtlinie für brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFHolzR) entwickelt wurde. Mittels theoretischer Grundlagenuntersuchungen und durch ein umfangreiches Brandversuchsprogramm am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig wurde der Nachweis erbracht, dass das hohe brandschutztechnische Sicherheitsniveau in Deutschland auch bei Gebäuden in Holzbauweise im mehrgeschossigen Bereich aufrechterhalten werden kann [15] [16].

Im Rahmen der Untersuchungen wurden folgende Risiken herausgearbeitet:

- Zusätzlicher Eintrag von Brandlasten durch die Holztragkonstruktion,
- Beteiligung an der Rauchgasentwicklung und an Pyrolyseprodukten,
- Gefahr von Nachentzündungen,
- Bildung von Glutnestern innerhalb der Bauteile,
- Brandentstehung innerhalb der Konstruktion (durch Kurzschluss o.ä.),
- Brandeinleitung und Brandweiterleitung über Installation und
- Rauchweiterleitung über Anschlüsse.

Neben diesen potenziellen Risiken bietet die Bauweise auch Vorteile im Vergleich zu anderen Bauweisen. Gegenüber der Stahlbauweise besitzen Holzbauteile bei gleicher Bekleidung erhebliche Vorteile, da letztere viel geringere thermische Dehnungen im Brandfall aufweisen und demzufolge den Durchgang von Rauch- und Brandgasen im Anschlussbereich wirkungsvoller behindern. Auch im Versagensfall verhalten sich Holzbauteile deutlich günstiger, da im Gegensatz zur Stahlbauweise kein schlagartiges Versagen zu erwarten ist. Gegenüber der Massivbauweise (Stahlbeton, Mauerwerk) sind die Vorteile geringer ausgeprägt. Im Brandfall ist allerdings nicht mit den bei Beton auftretenden Abplatzungen zu rechnen.

Um diese Risiken zu beherrschen, wurde im Rahmen der genannten Forschungsprojekte die Kapselbauweise entwickelt. Dabei werden alle tragenden und aussteifenden und/oder raumabschließenden Wände und Decken in Holzbauweise eines Gebäudes durch nichtbrennbare Bekleidungen eingekapselt. Durch dieses Konstruktionsprinzip nimmt die Holztragkonstruktion für definierte Zeiträume nicht am Brandgeschehen teil. Weil wie bei allen anderen Bauweisen zunächst das im Brandraum vorhandene Mobiliar und sonstige Brandlasten (Fußbodenbeläge, Vorhänge etc.) am Brandgeschehen teilnehmen, ergibt sich bei Einkapselung der brennbaren Konstruktionsbrandlast keinerlei erhöhtes Risiko im Vergleich zu Massivbauten.

Durch die Einkapselung der Holztragkonstruktion kann für definierte Zeiträume (gemäß M-HFHolzR für 60 Minuten) auch eine vermehrte Rauchgasentwicklung und die Entstehung von zusätzlichen Pyrolysegasen verhindert werden. Die Verhinderung der Entzündung der Holztragglieder innerhalb der Konstruktion durch diese spezifischen Konstruktionsvorgaben wird außerdem die Gefahr von Nachentzündungen und eines verzögerten Tragfähigkeitsverlustes durch ggf. vorhandene Glutnester im Inneren der Bauteile nach dem Ablöschen des Primärbrandes nahezu ausgeschlossen. Die Brandentstehung innerhalb der Holztragkonstruktion durch Installationen kann praktisch ausgeschlossen werden, da alle gebündelten Installationsbrandlasten außerhalb der eigentlichen Konstruktion in Vorwandebenen bzw. im Estrich geführt werden müssen. Lediglich Einzelkabel bzw. bis zu drei Kabel in einem nichtbrennbaren Hüllrohr sind innerhalb der Konstruktion zulässig.

Das Problem der Rauchweiterleitung über Bauteilanschlüsse Wand/Wand und Wand/Decke wird beherrscht, indem die in der M-HFHolzR genannten konstruktiven Mindestanforderungen erfüllt werden.

Zusammenfassend ergibt sich, dass bei Einhaltung und korrekter Umsetzung von entsprechenden konstruktiven Maßnahmen bei mehrgeschossigen Holzbauten bezüglich des brandschutz-technischen Sicherheitsniveaus für den definierten Zeitraum der Kapselklasse keine signifikanten Unterschiede zu Massivbauten (Stahlbeton, Mauerwerk) oder Stahlleichtbauweisen bestehen. Gegenüber der Stahlbauweise besitzen Holzbauteile bei gleicher Bekleidung sogar erhebliche Vorteile, da letztere viel geringere thermische Dehnungen im Brandfall aufweisen und demzufolge den Durchgang von Rauch- und Brandgasen im Anschlussbereich wirkungsvoller behindern.

Die Vorgaben der M-HFHolzR gelten zunächst nur für die Holzrahmen- bzw. Holztafelbauweise. Der Einsatz von flächigen, massiven Holzbauteilen (z.B. Brettstapel- oder Brettsperrholzbauteile) ist zunächst nicht abgedeckt. Grundsätzlich lässt sich das Prinzip der Kapselbauweise aber 1:1 übertragen. Die massiven Holzbauteile sind prinzipiell im Brandfall sogar besser zu beurteilen, als die Holzrahmenbauweise. Prinzip bedingt kann es bei diesen Bauteilen zu keinem verdeckten Hohlraumbrand innerhalb der Konstruktion kommen. Auch ist die Rauchdichtigkeit in der Fläche noch wesentlich besser gegeben als bei den Holzrahmenbauweisen. Problematisch sind allerdings die Anschlusspunkte. Der Mehreintrag an Brandlast kann zunächst vernachlässigt werden, wenn die Kapselbauweise in vollem Umfang umgesetzt wird.

Die Bedenken, dass derartige Bauteile nicht löschar sind, weil die Kühlwirkung des Löschwassers die Pyrolysefront im Holz nicht erreicht, konnten im Rahmen eines Forschungsprojekts ausgeräumt werden.

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Vorteile im Vergleich zur Holzrahmenbauweise bietet sich die Holzmassivbauweise insbesondere bei „höheren“ mehrgeschossigen Holzgebäuden an.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die Philosophie der absoluten Äquivalenz einer Holzbauweise mit einer Stahlbetonbauweise über einen definierten Zeitraum in der Praxis grundsätzlich bewährt hat. Probleme bereiten aber weiterhin die Abschottungsmaßnahmen sowie eine Reihe von Detailfragestellungen. Allerdings handelt es sich bei dieser Bauweise, um eine vergleichsweise aufwendige und damit teure Konstruktion. In der Praxis kommen in der Gebäudeklasse 4 daher abgeminderte Kapselkonstruktionen (K₂30) zum Einsatz. Deckenuntersichten bleiben oftmals gänzlich unbekleidet. In der Regel werden diese Abweichungen durch vernetzte Brandmelder und Holzmassivdecken im Rahmen von ganzheitlichen Brandschutzkonzepten kompensiert [17] [18] [19] [20] [21] [22] [23] [24] [25] [26] [27] [28] [29] [30] [31] [32] [33].

6.3.1 Spezifische Risiken aus der Bauweise Hochhaus

Unabhängig von der Art der Konstruktion liegt bei einem Hochhaus im Vergleich zu den durch die Landesbauordnungen abgedeckten Gebäuden ein deutlich höheres Risiko vor. Dieses Risiko steigt mit zunehmender Höhe des Gebäudes, da im Brandfall zunehmend mehr Menschen betroffen sind und sich gleichzeitig die vertikalen Fluchtweglängen vergrößern. Weiterhin ist der Feuerwehreinsatz ausschließlich von Innen möglich, da die üblichen Fahrzeuge der Feuerwehren (Drehleiter 23/12) in ihrer Höhenauslegung planmäßig begrenzt sind.

Damit sind bei Hochhäusern nicht nur längere Fluchtzeiten zu erwarten, sondern auch längere Zeiträume bis zum Beginn von wirksamen Löschmaßnahmen. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass die Einsatzkräfte das notwendige Material zunächst an die Einsatzstelle schaffen müssen. Grundsätzlich ist hierfür zwar ein Feuerwehrrfahrstuhl vorzusehen. Hierbei ist aber zu berücksichtigen, dass es sich um eine technische Anlage handelt, die auch ausfallen oder durch Brandeinwirkungen blockiert sein kann. Baurechtlich wird dies über die Forderung berücksichtigt, dass Feuerwehraufzüge einen eigenen Vorraum haben müssen.

Eine gleichzeitige Nutzung des Vorraums mit notwendigen Treppenhäusern ist nicht zulässig.

Neben der erhöhten Zeitspanne bis zum Einleiten von Löschmaßnahmen ist auch zu berücksichtigen, dass sich die Rückzugszeiten für die Einsatzkräfte bei einem drohendem Totalschaden eines Hochhauses ebenfalls in Abhängigkeit der Höhe verlängern. Das in der Muster-Hochhaus-Richtlinie – MHHR beschriebene Sicherheitskonzept zielt daher darauf ab, den Brand auf eine Nutzungseinheit zu begrenzen und ein Totalversagen eines Hochhauses auszuschließen. Ein wesentlicher Aspekt ist dabei die Forderung nach feuerbeständigen Konstruktionen in Verbindung mit Anlagentechnik (vgl. Abschnitt 6.4). Damit ist die Verwendung des brennbaren Baustoffes Holz als Konstruktionswerkstoff explizit ausgeschlossen.

6.3.2 Grundsatzanforderungen versus geplanter Holzbauweise

Gemäß den geltenden baurechtlichen und gesetzlichen regeln sind die wesentlichen tragenden aussteifenden und raumabschließenden Bauteile eines Hochhauses feuerbeständig auszuführen und i.d.R. aus nichtbrennbaren Baustoffen herzustellen. Dies entspricht der Feuerwiderstandsklasse F 90-A nach DIN 4102-2 bzw. R 90, EI 90 oder REI 90 gemäß DIN EN 13501-2.

Bauteile, deren tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen bestehen und die allseitig eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen haben, sind grundsätzlich auch feuerbeständig, also in der Feuerwiderstandsklasse F 90 herstellbar. In Tabelle 25 sind die Anforderungen an die wesentlichen Bauteile eines Gebäudes oberhalb der Hochhausgrenze nach Muster-Hochhausrichtlinie sowie nach der Landesbauordnung für das Land Schleswig-Holstein aufgeführt. Diese werden den geplanten Ausführungen der Bauteile in Holzbauweise gegenübergestellt.

Tabelle 25 Gegenüberstellung der bauaufsichtlichen Anforderungen und der geplanten Ausführung wesentlicher Bauteile eines Hochhauses

Bauteile	Anforderung n. LBO-SH	Ausführung
Tragende und aussteifende Bauteile	feuerbeständig und aus nichtbrennbaren Baustoffen F 90-A / R 90-A	feuerbeständig, tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen und allseitig mit brandschutztechnisch wirksamer Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen, F 90-BA / R 90-BA
Raumabschließende Bauteile	aus nichtbrennbaren Baustoffen, A2/A2	strukturelle Teile aus brennbaren Baustoffen und allseitig mit brandschutztechnisch wirksamer Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen, B2/A1
Geschossdecke	feuerbeständig, raumabschließend mit der Feuerwiderstandsfähigkeit der tragenden Bauteile und aus nichtbrennbaren Baustoffen F90-A / REI 90-A	feuerbeständig, tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen und mit brandschutztechnisch wirksamer Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen, unterseitig unbedeckt F90-BA / REI 90-BA
Wände von notwendigen Treppenträumen und deren Vorräume	feuerbeständig, raumabschließend und aus nichtbrennbaren Baustoffen F90-A / EI 90-A	feuerbeständig, raumabschließend und aus nichtbrennbaren Baustoffen F90-A / EI 90-A
Wände der Fahrschächte von Feuerwehraufzügen und deren Vorräumen.		
Wände von Fahrschächten und deren Vorräumen		
Wände von Installationschächten		
Trennwände zwischen Nutzungseinheiten und zu anderen Räumen und Fluren	Raumabschließend und feuerhemmend, nichtbrennbare Baustoffe F30-A / EI 30-A	hochfeuerhemmend, raumabschließend, strukturelle Teile aus brennbaren Baustoffen und allseitig mit brandschutztechnisch wirksamer Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen F60-BA / EI 60-BA
Wände notwendiger Flure	Raumabschließend und feuerhemmend, nichtbrennbare Baustoffe F30-A / EI 30-A	Raumabschließend und feuerhemmend, nichtbrennbare Baustoffe F30-A / EI 30-A
durchgehende Systemböden, durchgehende Unterdecken		
Trennwände zwischen Aufenthaltsräumen und anders genutzten Räumen im Keller	feuerbeständig, raumabschließend und aus nicht brennbaren Baustoffen F 90-A / EI 90-A	feuerbeständig, raumabschließend und aus nicht brennbaren Baustoffen F 90-A / EI 90-A

Bauteile	Anforderung n. LBO-SH	Ausführung
Wände und Brüstungen offener Gänge	feuerbeständig, raumabschließend und aus nicht brennbaren Baustoffen F 90-A / EI 90-A	feuerbeständig, strukturelle Teile aus brennbaren Baustoffen und mit brandschutztechnisch wirksamer Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen, F90-BA / REI 90-BA
Nichttragende Außenwände, nichttragende Teile tragender Außenwände, müssen in allen ihren Teilen aus bestehen.	nichtbrennbare Baustoffe A1/A2 / A2-s1,d0	feuerhemmend, strukturelle Teile aus brennbaren Baustoffen und allseitig mit brandschutztechnisch wirksamer Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen F 30-B / EI 30-B
Außenwandbekleidungen, Balkonbekleidungen und Umwehrungen	nichtbrennbare Baustoffe A1/A2 / A2-s1,d0	nichtbrennbare Baustoffe A1/A2
Dächer, Dachbauteile	nichtbrennbare Baustoffe A1/A2 / A2-s1,d0	tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen, raumseitig unbekleidet, oberseitig Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen F30-B / EI 30-B
Dachhaut	brennbare Baustoffe, wenn Bedeckung mit mind. 5 cm mineralischen Baustoffen B2 (+ A1/A2-Bedeckung)	brennbare Baustoffe mit mind. 5 cm mineralischen Baustoffen B2 (+ A1/A2-Bedeckung)
Bodenbeläge, Bekleidungen, Putze und Einbauten	nichtbrennbar in <ul style="list-style-type: none"> • notwendigen Treppenräumen, • Vorräumen von notwendigen Treppenräumen, • Vorräumen von Feuerwehraufzugsschächten, • Räumen zwischen dem notwendigen Treppenraum und dem Ausgang ins Freie. 	

Die maßgebenden Bauteile im Hochhausbau sind nach den gegebenen Anforderungen im Wesentlichen feuerbeständig und /oder aus nicht brennbaren Baustoffen herzustellen. Es ist zu ermitteln, welche Möglichkeiten zur Herstellung von baurechtskonformen Bauteilen auf der Basis von Holz- und Holzprodukten für den Hochhausbau bestehen. Des Weiteren ist zu untersuchen, mit welchen Maßnahmen eine Kompensation die Verwendung brennbarer Baustoffe für die Herstellung der tragenden und/oder raumabschließenden Bauteile ermöglicht werden kann.

Die MHRRL erlaubt weiterhin nach Ziffer 8 eine Erleichterung für Hochhäuser bis 60 m in Zellenbauweise. Unter bestimmten Voraussetzungen darf bei diesen Gebäuden auf eine automatische Löschanlage und eine automatische Brandmeldeanlage verzichtet werden.

Diese sind:

- Nutzeinheiten maximal 200 m² groß
- Alle Trennwände zu anderen Nutzeinheiten und Räumen sowie zum Flur feuerbeständig
- Außenwand im Brüstungsbereich auf 1 m feuerbeständig oder 1 m feuerbeständige Auskragung zwischen den Geschossen

Im Vergleich der geplanten Ausführung mit den Grundsatzanforderungen der MHRR ergeben sich erhebliche Abweichungen, die auch bei einer schutzzielorientierten Betrachtung bestehen bleiben. Auch wird aus der Tabelle 25 erkennbar, dass es kaum Möglichkeiten der Kompensation gibt. Bis auf die Trennwände werden ohnehin die höchsten Anforderungen gestellt und die Fluchtwege sind baulich sicherzustellen (Sicherheitstreppe bzw. zwei notwendige Treppenräume). Auch ein verstärkter Einsatz von Anlagentechnik kann nicht als Kompensation herangezogen werden, da diese (Sprinkler, BMA, Sicherheitsbeleuchtung, Überdruckbelüftung etc. ohnehin gefordert wird).

Lediglich die Erleichterungen nach Ziffer 8 bieten Spielraum für Kompensationsmaßnahmen durch automatische Löschanlagen. Als Lösungsansätze sind daher zwei Wege weiter zu untersuchen:

- Angepasste Löschanlagentechnik
- Weiterentwicklung von Holzbauteilen unter Berücksichtigung des Schutzziels ein Versagen der Konstruktion auch ohne Eingreifen der Feuerwehr auszuschließen

6.4 Automatische Löschanlagen

Die Einordnung von Löschanlagen erfolgt zumeist nach dem verwendeten Löschmittel (z. B. Wasser-, Schaum-, Gaslöschanlagen) oder dem primären Schutzziel (Personen- oder Objektschutz).

Bei automatischen Löschanlagen handelt es sich um fest installierte Brandbekämpfungseinrichtungen, „die – ausgelöst durch Brandfolgeerscheinungen wie Rauch oder Wärme – ihr Löschmittel weitgehend ohne aktive Beteiligung von Personen freisetzen.

Sie werden eingesetzt, um einen Brand auf den Entstehungsbereich einzugrenzen, wenn infolge großer Brandabschnitte oder komplexer Gebäudegeometrie ein rechtzeitiges Eingreifen der Feuerwehr fraglich ist und/oder wenn mit einer sehr schnellen Brandausbreitung zu rechnen ist.“ [34].

6.4.1 Gaslöschanlagen

Gaslöschanlagen (häufig auch Inertgaslöschanlagen) fluten im Brandfall den zu schützenden Bereich durch die Zugabe von Inertgasen. Eine Verbrennungsreaktion ist aufgrund zu geringer Sauerstoffkonzentrationen nicht mehr möglich. Die Löschgaskonzentration muss für eine dem Risiko angepasste Zeit aufrecht gehalten werden.

Typische Inertgase sind alle Edelgase, sowie Stickstoff und Kohlendioxid. Alle Gase sind geruchs- und geschmacksneutral und nicht elektrisch leitfähig. Das einzige Atemgift in dieser Gruppe ist Kohlendioxid. Aufgrund der Sauerstoffverdrängung muss dennoch bei allen Gasen eine Auslöseverzögerung von mindestens 10 Sekunden (abhängig von den baulichen Gegebenheiten) vorgesehen werden, um anwesenden Personen ausreichend Zeit für eine Evakuierung zu geben.

Hier zeigt sich auch die größte Schwäche dieser Systeme für den Einsatz bei Wohnnutzungen. Da hier planmäßig schlafende Personen in zu flutenden Bereichen anzutreffen sind, ist das Risiko durch Sauerstoff verdrängende Gase unvertretbar hoch.

Obwohl Gaslöschanlagen große Vorteile unter dem Aspekt eines Löschsadens am Gebäude bieten, wird diese Lösungsvariante aufgrund einer unzulässig hohen Personengefährdung nicht weiter verfolgt.

6.4.2 Schaumlöschanlagen

Eine Schaumlöschanlage besteht aus einem Wasser- und Schaummittelvorrat, Pumpen und einem fest installierten Rohrnetz mit offenen Düsen (Bei Sprinkler- und Sprühwasserlöschanlagen besteht die Möglichkeit einer Schaumzumischung). Schaum eignet sich zum Löschen von Bränden der Klassen A und B. Der Löscherfolg wird dabei durch zwei Effekte erzielt: Der Schaum bedeckt das Brandgut vollständig und verhindert so die Sauerstoffzufuhr sowie das Ausgasen brennbarer Gase aus dem Brandgut. Aufgrund des Wasseranteils im Schaum kommt es auch zu einer Kühlung des Brandherds/ des Brandraums.

Schäume bestehen aus einem Premix (Wasser- Schaummittel- Gemisch, und Luft). Über das Verhältnis von Luft und Premix, der so genannten Verschäumungszahl (VZ) kann der Schaum definiert werden. Üblicherweise unterscheidet man in Schwerschaum ($VZ < 15$), Mittelschaum ($15 < VZ < 200$) und Leichtschaum ($VZ > 200$). Mit steigender Verschäumungszahl nimmt der Wasseranteil und damit der Kühleffekt ab. Das Schaumvolumen hingegen nimmt bei gleicher eingesetzter Wassermenge zu.

Der Einsatz von Netzmittel ($VZ=0$) über normale Sprinkleranlagen (Zugabe von Schaummittel in das Löschwasser) bietet sich speziell zum Löschen von Feststoffen wie Papier und Holz an. Da es aufgrund der herabgesetzten Oberflächenspannung besser als einfaches Wasser in die Stoffe eindringt, löscht es so tief sitzende Glutbrände und schützt vor Abbrand.

Leicht-, Mittel- und Schwerschäume eignen sich nur bedingt für die hier untersuchte Anwendung einer Löschanlage für ein Hochhaus aus Holz. Sie sind besser geeignet für das Löschen großer Lachenbrände oder das Zuschäumen kompletter Lager (z.B. Archive etc.).

Zumal bei der Anwendung zu beachten ist, dass ein hohes Rückzündungspotenzial beim Aufreißen der Schaumschicht (z.B. beim Betreten eines Raumes) gegeben ist.

6.4.3 Wasserlöschanlagen

Es gibt vier grundlegende Ausführungen von Wasserlöschanlagen: die klassische Sprinkleranlage, die Sprühwasserlöschanlage, die Niederdruck- sowie die Hochdrucknebellöschanlage. Die beiden letzten Anlagen werden auch als Feinsprühlöschanlagen bezeichnet. Sprinkleranlagen und Nebellöschanlagen sind in ihrem Aufbau relativ ähnlich, wesentliche Elemente dieser Anlagen sind [34]:

- Sprinkler bzw. Düsen zur Wasserverteilung
- Verteilerrohre
- Alarmventilstationen
- Druckluft-/Wasservorratsbehälter
- Sprinklerpumpe mit Motor
- Energieversorgung
- Nachspeiseeinrichtung für Löschwasser

Vorraussetzung ist ein im gesamten Gebäude verlegtes Rohrleitungsnetz mit mechanisch verschlossenen Austrittsöffnungen in Form von Sprinklern oder Wassernebellöschdüsen. Nur die vom Temperaturanstieg betroffenen Sprinkler bzw. Düsen öffnen und verteilen ihr Löschwasser. Das im Leitungsrohr unter Druck stehende Wasser setzt durch seine Bewegung eine Alarmierungseinrichtung (Alarmventilstation) in Gang und die vom Brandgeschehen in Kenntnis gesetzte Feuerwehr kann gegebenenfalls den Löschvorgang übernehmen.

Wasserlöschanlagen gibt es in der Ausführungsform der Nassanlage, die ständig unter Wasser steht, als Trockenanlage oder als kombinierte Tandemanlage. Für frostgefährdete Bereiche oder in anderen Bedarfsfällen kann man auf mit Druckluft gefüllte Trockenanlagen ausweichen: Das Rohrnetz zwischen Sprinkler und der Trockenalarmventilstation ist im Bereitschaftszustand ständig mit Druckluft gefüllt. Erst nach dem Auslösen eines Sprinklers wird Wasser in das System gepumpt. Für den vorliegenden Anwendungsfall ist eine Nassanlage am besten geeignet, da keine Frostgefahr zu erwarten ist und eine Löschverzögerung nicht in Frage kommt.

Ein besonderer Anlagentyp ist die Sprühwasserlöschanlage. Im Gegensatz zum Sprinkler fehlen bei dieser Anlage die Auslöseelemente. Mit Hilfe von offenen Löschdüsen können bei Auslösen der Sprühflutventile ganze Bereiche geflutet werden. Vorgeschrieben sind Sprühwasserlöschanlagen bei Großbühnen [35].

Zum größten Teil werden sie im Objektschutz eingesetzt. Im vorliegenden Fall ist diese Anlage eher ungeeignet, obwohl auch Feinsprühlöschanlagen als Sprühwasserlöschanlage zum Einsatz kommen.

Die Sprinkleranlage ist die wohl bekannteste Form einer Wasserlöschanlage. Sprinkleranlagen wurden erstmals im achtzehnten Jahrhundert verwendet. Das Prinzip der Sprinkleranlage ist dabei gleich geblieben. Entstehungsbrände sollen frühzeitig entdeckt, bekämpft bzw. auf ihren Entstehungsbereich begrenzt bleiben. Im Allgemeinen geht man von einer Erfolgsquote von über 90 % aus. In 60 % der Fälle kann ein Feuer mit nur einem geöffneten Sprinkler und in 80 % mit bis zu fünf Sprinklern unter Kontrolle gehalten werden [34].

Sprinkler werden üblicherweise über Glasfässchen gesteuert. Je nach Auslegung reagieren diese auf bestimmte Temperaturen (Bild 17). Bei Erreichen der Temperatur platzt das Glas und das Wasser kann austreten. Aufgrund von Wärmeableitung in das Rohrnetz kann die tatsächliche Auslösetemperatur wesentlich erhöht sein [36]. Neben dem Glasfass-Auslösesystem finden sich auch Schmelzlotsprinkler auf dem Markt, deren Lotverbindung im Brandfall schmilzt.

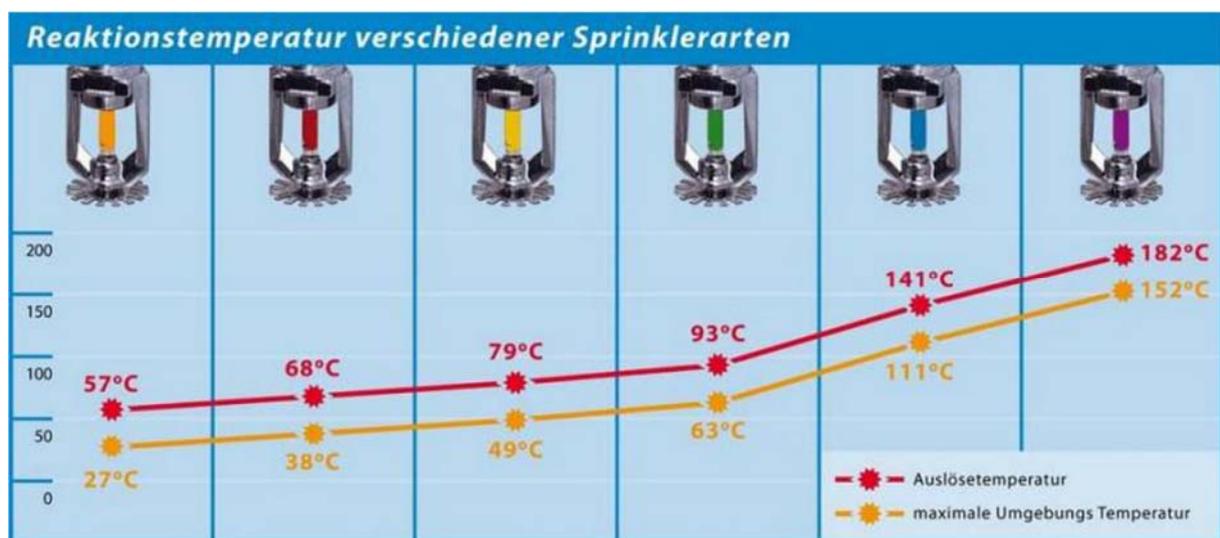


Bild 17 Auslösetemperaturen von Sprinklern (Quelle: URL: <http://www.fire-protectionsolutions.com/cms-produkte-brandschutz-feuerschutz/sprinkleranlagen>, 26.01.2014)

Die dynamische Ansprechempfindlichkeit des Sprinklers, auch Response Time Index (RTI-Wert) genannt, gibt die Ansprechempfindlichkeitsklasse an. Im vorliegenden Fall ist ein kleiner RTI-Wert (≤ 50) nötig, da die Anlage bezüglich des Personenschutzes schnell reagieren muss. Definiert ist die dimensionslose Größe als Verhältnis des Wärmespeichervermögens zu Wärmeaufnahme in einem Luftstrom mit der Geschwindigkeit von 1 m/s [37]. In der Praxis bedeutet dies, dass für ein schnelles Ansprechen eine höhere Oberfläche bei weniger Volumen vorteilhaft ist, d. h. schlankere Auslöseelemente verbaut werden müssen.

Die Umgebungsbedingungen, die das Anspringen eines Sprinklers beeinflussen und auch verzögern sind neben den sprinklerspezifischen Kenngrößen (RTI-Wert, Wärmeleitfaktor C, Auslösetemperatur) die Rauchgastemperatur, die Rauchgasgeschwindigkeit und die Rohrtemperatur.

Sprinkler können hängend, stehend oder horizontal eingebaut werden. Letztendlich schützen sie immer die darunterliegende Fläche. Im Hinblick auf die Wasserverteilung ist der Sprühstrahl das charakteristische Element eines Sprinklers. Er lenkt den Wasserstrahl in die gewünschte Richtung ab. Während ein Normalsprinkler ein kugelförmiges Sprühbild aufweist und gleichzeitig Boden und Decke benässen kann, erzeugt ein Schirmsprinkler ein paraboloidförmiges Sprühbild (Bild 18).

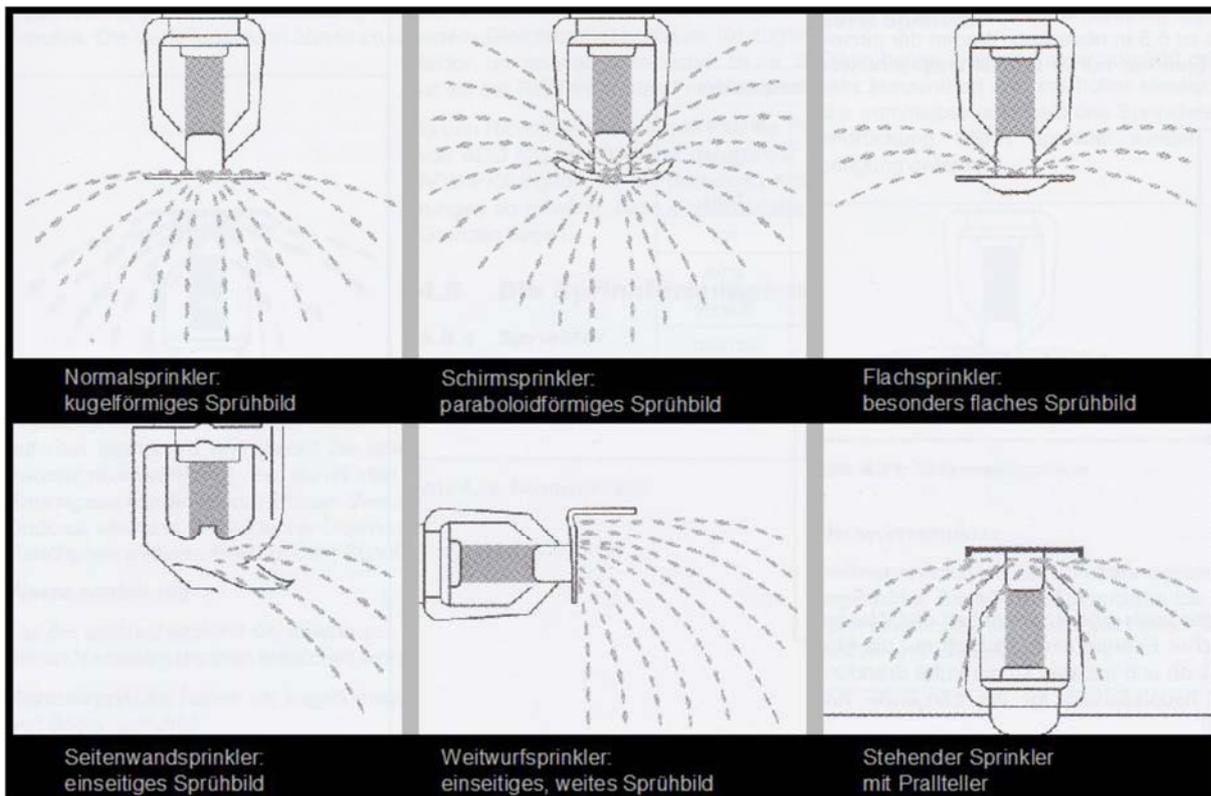


Bild 18 Sprühbilder verschiedener Sprinkler nach [34]

In Deutschland ist der Einsatz von Sprinkleranlagen in Wohngebäuden bisher sehr selten. Dies liegt vor allem an den noch zu hohen Kosten. Daher werden Sprinkleranlagen hauptsächlich dort eingesetzt, wo es sie baurechtlich vorgeschrieben sind (z.B. Einkaufszentren, Industriebauten etc.) oder wo kostenintensive Produkte zu schützen sind.

Eine andere Entwicklung ist in den USA zu beobachten, wo derzeit offensiv der „residential sprinkler“ propagiert wird [38], eine abgespeckte und preiswertere Version von industriellen Sprinkleranlagen, die auch in Einfamilienhäusern relativ kostengünstig und unkompliziert verbaut werden, da sie direkt an das Trinkwassersystem angeschlossen werden können.

Auch in Nordeuropa oder in der Schweiz ist der Einbau von Sprinkleranlagen in Wohnhäusern weitaus üblicher. Der Einsatz von solchen residential-Sprinklern ist in Deutschland bisher nicht zugelassen. In den letzten Jahren sind aber beträchtliche Schritte in der Normung abgeschlossen worden, sodass ein Direktanschluss von Sprinklern an die Trinkwasserinstallation über eine Direktanschlussstation möglich wurde [39].

Parallel werden seit einigen Jahren an der Forschungsstelle für Brandschutz in Karlsruhe die Einsatzmöglichkeiten von Wassernebellöschanlagen erforscht [36] [39]. Die Feinsprüh- bzw. auch Wassernebellöschanlage kombiniert die Vorteile einer Sprinkleranlage mit der Löschwirkung von Wassernebel. Grundsätzlich weist sie vom Aufbau her grundlegend die gleichen Merkmale wie die oben genannten Sprinkleranlagen auf. Ausgestattet mit Glasfaser-Auslöseelementen produzieren sie aber mithilfe von Sprinklerdüsen und Druck im Brandfall einen feinen Wassernebel.

Es wird zwischen drei verschiedenen Anlagen unterschieden: Niederdruckanlagen mit einem Betriebsdruck bis zu 12,5 bar, Mitteldruckanlagen mit 12 bis 34,5 bar sowie Hochdruckanlagen mit mehr als 35 bar. Der Löscherfolg beruht auf der hohen Anzahl kleiner Tropfen, so dass ein sehr guter Wärmeübergang erzeugt wird. Kleine Tropfen erwärmen sich schneller als große und entziehen dem Brand mit weit weniger Wassereinsatz als herkömmliche Sprinkleranlagen Wärme. Dies ist jedoch nur gegeben, wenn die Tropfen die Reaktionszone erreichen. Wichtige Einflussfaktoren sind dabei die Ventilationsbedingungen, da kleine Tropfen leichter abgelenkt werden können als größere Tropfen. Die Wirksamkeit der Anlage ist zudem stark abhängig von der kinetischen Energie des Düsenkopfes, der Ausrichtung auf das Feuer und der Raumgeometrie.

Sowohl die Niederdruck- als auch die Hochdruckanlage eignen sich aufgrund ihres geringen Löschwasserbedarfs sehr gut für den Einsatz im Holzbau: Eine Niederdruckanlage braucht bis zu 85 Prozent weniger Wasser als eine konventionelle Sprinkleranlage, die Hochdruckanlage benötigt bis zu 95 Prozent weniger Löschwasser. Trotz größerer Löschwassermengen haben Niederdruckanlagen den Vorteil, dass ihre Rohrleitungen sowohl aus verzinkten Rohren als auch aus Kunststoffrohren (hier allerdings nicht geeignet) bestehen können. Der Betriebsdruck ist geringer und es werden keine kostenintensiven Hochdruckpumpen benötigt. Diese sind bei Hochdrucksystemen zwingend notwendig, zudem dürfen nur Edelstahlrohre verwendet werden. Eine ausreichende Wasserfilterung ist aufgrund von erhöhter Verstopfungsgefahr der Hochdruckdüsen (Bild 19) zu beachten.

Da es noch keine allgemeinen Normen gibt, gibt es derzeit nur Systemzulassungen. Ein bekanntes System im Niederdruckbereich ist das EconAqua-System von Minimax. Ein Beispiel für die Hochdruckanlage ist das HI-FOG-System von Marioff. Jede Anlage muss auf ihre Wirksamkeit untersucht werden. Bei den vorzunehmenden Brandversuchen testet man die konfigurierte Löschanlage in verschiedenen Brandszenarien für den jeweiligen Anwendungsfall. Es gilt vor allem den denkbar schlimmsten Fall zu testen wie z. B. verdeckte Brände, Hindernisse oder ein Brand in der Zimmerecke. Die in der Planung gewählten Anlagenteile wie z. B. Düsenköpfe oder die beaufschlagte Wassermenge werden im Experiment auf ihre Wirksamkeit überprüft.

Hinsichtlich des Einsatzzieles kann gewählt werden zwischen der Brandkontrolle, der Brandunterdrückung oder der Brandlöschung.



Bild 19 Vergleich Sprühbild klassischer Sprinkler mit Niederdrucknebellöschanlage (Quelle: <http://www.aling.hr/clanak/40/vodena-magla>, 26.01.2014)

6.4.4 Auswahl einer Anlage nach Bewertungskriterien

Für die Auswahl einer geeigneten Anlage wurde in einem ersten Schritt ein Bewertungsschema entwickelt, welches verschiedene Kriterien unter dem Gesichtspunkt der spezifischen Nutzung und Bauweise wertet.

Das Auslöseverhalten ist dabei nicht mit in die Bewertung eingegangen, da die Art der Auslösung noch nicht abschließend bestimmt wurde. Hintergrund ist, dass zumindest in Teilbereichen (z.B. Küchen) eine kombinierte Auslösung aus Sprinkler und Brandmeldeanlage wünschenswert wäre. Ob dies auch für andere Bereiche gilt, bleibt weiteren Untersuchungen vorbehalten. Die Bewertungskriterien bilden zunächst nur die Einschätzung des Verfassers ab. Es ist geplant, im Rahmen weiterer Untersuchungen eine Abfrage und Bewertung der Kriterien in den Fachkreisen vorzunehmen. Hierzu wird voraussichtlich das Instrument einer Delphi-Studie genutzt.

Die höchste Wertung erhält das Kriterium Löschwirkung, da dies wesentlich zur Erreichung der Schutzziele ist. Darauf folgt die Löschwassermenge, da diese wesentlich über den entstehenden Gebäudeschaden entscheiden wird.

Die Wirtschaftlichkeit ist ein weiteres Kriterium, welches allerdings erst an nachgeordneter Stelle folgt. Zudem die Abfragen gezeigt haben, dass sich die Wartungs- bzw. Instandhaltungskosten sowie anfallende Energie-/Unterhaltungskosten für alle Anlagen in einem ähnlichen Bereich bewegen werden und nur der Anschaffungspreis größere Unterschiede aufweist. Der größte Kostenpunkt einer Wasserlöschanlage ist die Zentrale. Die Wirtschaftlichkeit einer Wasserlöschanlage wird daher entscheidend von der zu schützenden Fläche bestimmt. Ein interessanter Ansatz ist dabei, eine Anlage für mehrere Gebäude nutzbar zu machen. In diesem Falle verfügt eine Hochdruckanlage über Vorteile, da ein Druckverlust im einstelligen bar-Bereich bei diesen Anlagen keinen großen Unterschied macht. Bei klassischen Sprinklern und Niederdruckanlagen macht dies einen größeren Unterschied aus. Bei diesen Anlagen sind daher weitere Maßnahmen erforderlich. Ein weiterer Vorteil einer Hochdruckanlage liegt in der vergleichsweise geringen Löschwasserbevorratung.

Ausgehend von einer Wirkfläche von 72 m² und einer Wirkdauer von 60 min. benötigt eine klassische Sprinkleranlage ungefähr 30.000 l Wasser, die bevorratet werden müssen. Eine Hochdruckanlage benötigt für die gleiche Wirkfläche etwa 4.500 l Wasser. Der Platzbedarf des Wassertanks ist wesentlich geringer. Aufgrund dieser Wechselwirkungen ist der Bewertungspunkt der Einbausituation gleichwertig zu berücksichtigen wie der des Anschaffungspreis.

Die Frage nach der Vereinbarkeit von Sprinkleranlagen und Architektur bzw. Design stellt sich natürlich auch. Die größeren Rohrdurchmesser einer Sprinkleranlage benötigen mehr Platz beim Einbau.

Sprinkler sind auch in der zurückgesetzten oder der verdeckten Variante erhältlich. Im Brandfall werden die Abdeckungen abgeworfen. Bei Hochdruckanlagen könnte man u. U. eventuell auch die Sichtbarkeit der Rohre und Düsen in Erwägung ziehen, da sie in hochwertigem Edelstahl hergestellt werden. Verdeckte oder zurückgesetzte Sprinkler sind im Hochdruckbereich bisher nicht erhältlich.

Die Rohrdurchmesser von Feinsprühanlagen bewegen sich zwischen den Durchmessern der Sprinkler- und der Hochdruckanlage. Dies wirkt sich natürlich auch auf die Größe des Steigschachtes aus.

Die geringe Bewertung der Löschzeit lässt sich z. B. im Hinblick auf die vorrangige Brandkontrolle und eine spätere Ablösung durch die Feuerwehr erklären. Hier ist auch die Einbindung in die städtische Infrastruktur zu berücksichtigen. Eine durchschnittliche Zeit bis zum Eingreifen der Feuerwehr wird hierbei mit 18 min angesetzt [41]. Diese Schätzung ist sehr realistisch, da die Hauptwache der Berufsfeuerwehr Flensburg 3,5 km weit entfernt ist und die Fahrzeit etwa 8 min. beträgt. Bei der Bewertung des Extinktionskoeffizienten, der die Schwächung der Intensität eines Lichtstrahles durch Brandrauch beschreibt, ist zu beachten, dass die Bewohner des Hauses den Fluchtweg sehr genau kennen und auch bei schlechter Sicht finden, wohingegen die Feuerwehr sehr wohl an schlechte Sichtverhältnisse durch Ver Rauchung gewöhnt ist. Zumal die Flucht- und Rettungswege mit unter 20 m vergleichsweise kurz sind.

Die Werte hinsichtlich der Löschwassermenge, Löschzeit und des Extinktionskoeffizienten sowie die Angaben zur Löschwirkung beziehen sich dabei auf Brandversuche in einem Holztrepfenraum [42].

Tabelle 26 Bewertungskriterien für Sprinkleranlagen [42]

Bewertungskriterium	Gewichtung %	Sprinkleranlage	Bewertung
Löschwirkung	25	++ Von Ventilationsbedingungen aufgrund großer Tropfen weitgehend unabhängige Löschwirkung, + geeignet für tiefsitzende Glutbrände +/- u. U. auch bei verdeckten Bränden - ungleichmäßige Wasserverteilung (Hohlkegelbildung)	8
Löschwassermenge	20	1.488 l (= 100 %)	1
Anschaffungskosten	15	Geringste Anschaffungskosten	10
Einbausituation/ Design	15	+ Auch mit verzinkten Rohrleitungen, Kunststoffrohren oder in Beton verlegten Rohren + Einbau der Sprinkler verdeckt/zurückgesetzt möglich - große Rohre notwendig - sehr großer Wassertank	5
Forschungsertrag für den Holzbau	12,5	+ Beitrag zur Etablierung von Wasserlöschanlagen +/- Notwendigkeit für Entwicklung besserer Abdichtungssysteme steigt	3
Löschzeit	7,5	22,57 min	7
Extinktionskoeffizient	5	1,34 m^{-1}	4
Gesamt:	100 %		Σ 5,55

Tabelle 27 Bewertungskriterien für Niederdruckwassernebellöschanlagen [42]

Bewertungskriterium	Gewichtung %	Niederdruckwassernebellöschanlage	Bewertung
Löschwirkung	25	+ Gleichmäßigere Wasserverteilung + Vorteile bei der Bekämpfung von tiefen Glutbränden + gute Löschwirkung bei hochsiedenden Flüssigkeiten (Öl) - begrenzte Löschfähigkeit in verdeckten Bereichen	9
Löschwassermenge	20	292 l (= 20 % der Sprinkleranlage)	8
Anschaffungskosten	15	Leicht höhere Anschaffungskosten als Sprinkleranlage	9
Einbausituation/ Design	15	+ kleinere Rohre als Sprinkleranlage + kleinerer Wassertank als Sprinkleranlage + auch mit verzinkten Rohrleitungen, Kunststoffrohren oder in Beton verlegten Rohren + Einbau der Sprinkler verdeckt/zurückgesetzt möglich	8
Forschungsertrag für den Holzbau	12,5	+ weitere Erforschung von vereinfachter Verknüpfung mit haustechnischer Installation +/- Kompromisslösung zwischen Sprinkler- und Hochdruckanlage	6
Löschzeit	7,5	22,33 min	8
Extinktionskoeffizient	5	0,74 m^{-1}	10
Gesamt:	100 %		Σ 8,50

Tabelle 28 Bewertungskriterien für Hochdruckwassernebellöschanlagen [42]

Bewertungskriterium	Gewichtung %	Hochdruckwassernebellöschanlage	Bewertung
Löschwirkung	25	++ Gleichmäßige Wasserverteilung +/- Tiefsitzende Glutbrände können u. U. nicht vollständig abgelöscht, weitere Brandausbreitung aber verhindert werden, - begrenzte Löschfähigkeit in verdeckten Bereichen - Ventilationsbedingungsabhängig	8
Löschwassermenge	20	227 l (= 15 % der Sprinkleranlage)	10
Anschaffungskosten	15	ca. 30 % höhere Anschaffungskosten als Sprinkleranlage	7
Einbausituation/ Design	15	++ kleinste Rohrdurchmesser ++ kleinster Wassertank + dauerhafte Edelstahlrohre + Verlegung in Beton möglich - keine Flexibilität beim Rohrmaterial - Einbau verdeckt/zurückgesetzt bisher nicht erhältlich, Sprinkler kann aber lackiert werden	9
Forschungsertrag für den Holzbau	12,5	++ bisher in keinem Holzbau in Deutschland verbaut + Wassernebel als Mittel zur Rauchableitung nutzbar	10
Löschzeit	7,5	17,43 min	10
Extinktionskoeffizient	5	1,78 m^{-1}	1
Gesamt:	100 %		Σ 8,70

Eine automatische Wasserlöschanlage in einem Hochhaus aus tragenden Holzelementen ist letztlich für die Genehmigungsfähigkeit entscheidend. Eine Realisierung einer angepassten Anlage ist auch für die Forschung ein sehr interessantes Feld. Gilt es doch, die Entwicklung von kostengünstigeren Sprinkler- bzw. Feinsprühlöschanlagen voranzutreiben, um die Akzeptanz derartiger Projekte weiter zu erhöhen. Durch den Einsatz im Projekt wären ableitbare Erkenntnisse für die standardmäßige Anwendung wünschenswert. Auf diesem Gebiet sind andere Länder technisch sowie normungsrechtlich bereits deutlich weiter fortgeschritten. In Finnland z. B. wurde 2011 in Vierumäki ein fünfgeschossiges Holz-Wohnhaus mit einer Hochdrucklöschanlage errichtet.

6.5 Weiterentwicklung von Holzbauteilen

Neben einem Schwerpunkt auf eine angepasste Anlagentechnik sind auch bauliche Maßnahmen in Form weiterentwickelter Holzbauteile erforderlich, da technische Anlagen Ausfallwahrscheinlichkeiten haben. Hier werden zwei Ansätze gesehen:

- Weiterentwicklung der M-HFHolzR (erweiterte Kapselung)
- Bauteile mit selbstverlöschenden Eigenschaften

6.5.1 Erweiterte Kapselung

Ein grundsätzlicher Lösungsansatz besteht in einer Weiterentwicklung des Konzepts der M-HFH HolzR. Analog der Kapselbauweise K 60 bei hochfeuerhemmenden Bauteilen könnte eine Kapselbauweise K 90 für feuerbeständige Bauteile entwickelt werden. Dies könnte durch die Anordnung von 3 Lagen á 15 mm Gipsfaserplatten gelingen, da die bislang untersuchten Konstruktionen der Klasse K 60 erhebliche Leistungsreserven in der Fläche haben. Prinzipiell steht diesem Lösungsweg aber die architektonische Anforderung einer sichtbaren Holzuntersicht der Decken entgegen. Dies wäre lösbar, indem unter der Decke eine Installationsebene vorgesehen wird. Die äußere Schicht der Installationsebene könnte ein ungeschützter dekorativer Holzwerkstoff sein. Der wesentliche Vorteil dieser Lösung ist, dass gegenüber den Bauaufsichtsbehörden eine bereits aus der Gebäudeklasse 4 bekannte Argumentation heran gezogen werden könnte.

Weiterhin besteht die Möglichkeit, notwendige technische Anlagen (z.B. Rohrleitungsnetz der automatischen Löschanlage, Einbau der Düsen, Beleuchtungskörper etc.) verdeckt einzubauen.

Dieser Lösungsweg bietet zudem den Vorteil, dass Zündquellen in Form von Elektroinstallationen außerhalb der Bauteile geführt werden und die Rauchdichtigkeit der Bauteile kann vermutlich über 90 Minuten realisiert werden.

6.5.2 Bauteile mit selbstverlöschenden Eigenschaften

Der mögliche Einsturz eines Hochhauses ist gemäß den Schutzzielen der MHHR nicht zulässig. Eine Ausnahme bilden lediglich Terroranschläge, die nicht im Rahmen des Baurechts sondern im Rahmen der Gefahrenabwehr (Polizei, Strafverfolgungsbehörden etc.) geregelt werden. Aus diesem Schutzziel lässt sich ableiten, dass die tragenden Bauteile auch nach der thermischen Umsetzung aller Brandlasten weiterhin tragend sind. Bei der Verwendung brennbarer Konstruktionsbaustoffe ist dies unter Umständen nicht erreichbar, da diese ohne Löschmaßnahmen bis zur vollständigen thermischen Umsetzung weiterbrennen können.

Mittels der M-HFH HolzR wurde ein Konstruktionsprinzip (Kapselung) entwickelt, welches die Entzündung tragender Bauteile durch eine äußere brandschutztechnisch wirksame Bekleidung verhindert. Prinzipiell ist vorstellbar, dass diese brandschutztechnisch wirksame Bekleidung als brandschutztechnisch wirksame Zwischenschicht in das Innere eines Bauteils verschoben wird. Anbieten würde sich eine Tiefe im Bauteil, die gleich oder größer dem erwarteten Abbrand nach 90 Minuten ist. Im Brandfall käme es zu einem üblichen Raumbrand unter Beteiligung der Konstruktion. Nach 90 Minuten sind die mobilen Brandlasten weitgehend aufgebraucht. Lediglich die Konstruktion würde weiter brennen, bis die wirksame Schicht erreicht wird. Mangels Brandlasten würde das Feuer dann verlöschen. Das Bauteil müsste statisch so ausgelegt werden, dass der Restquerschnitt weiterhin tragend ist. Im Vergleich zu einer klassischen heißen Bemessung eines Holzbauteils für einen Feuerwiderstand von 90 Minuten, ist bei dieser Lösung eine Überbemessung des Bauteils zu erwarten. Dies erscheint aber vor dem Hintergrund der Schutzziele vertretbar.

Unklar ist allerdings, wie sich Plattenwerkstoffe auf Gips- oder Zementbasis auf das mechanische Verhalten eines Holzbauteils (z.B. Brettsperrholzdecke) auswirken wird. Hier sind weiterführende Untersuchungen notwendig.

Eine weitere Möglichkeit ist der Einbau von Brandschutzsystemen mit intumeszierenden (dämmschichtbildenden) und/ oder flammenhemmenden Eigenschaften. Grundsätzlich ist bekannt, dass sich das Baustoffverhalten organischer Materialien durch dämmschichtbildende Beschichtungen oder Brandschutzimprägnierungen grundsätzlich positiv beeinflussen lässt. Seit den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts werden dämmschichtbildende Brandschutzbeschichtungen in zunehmendem Umfang zum Schutz tragender Bauteile eingesetzt. Sie schützen den Baustoff bzw. das Bauteil im Brandfall über einen definierten Zeitraum vor übermäßiger Temperaturbeanspruchung. Die größte Verbreitung weisen Systeme zum Schutz von Stahlbauteilen auf. Ein ähnliches Verfahren wird auch zum Schutz von Holzbauteilen eingesetzt. Ziel ist hier jedoch nicht die Erhöhung der Feuerwiderstandsdauer, sondern die Reduktion der Brennbarkeit des Baustoffes von normalentflammbar zu schwerentflammbar. Prinzipiell ist es auch möglich, mittels Hochleistungsbrandschutzbeschichtungen eine Kapselwirkung von bis zu 30 Minuten zu erzielen. Analog den Ausführungen zum Einbau nicht-brennbarer Schichten in das Holzbauteil, könnten auch reaktive Brandschutzsysteme in das Holzbauteil in definierter Tiefe eingebaut werden, um den Weiterbrand des Bauteils nach der 90. Minute zu unterdrücken. Hierzu gibt es eine Reihe von bislang unveröffentlichten Voruntersuchungen. Besonders interessant ist der Einbau von intumeszierenden Reaktionen in einen Leim. Hierzu wird am Fraunhofer-Institut für Holzforschung derzeit eine Dissertation durchgeführt. Neben intumeszierenden Reaktionen besteht auch die Möglichkeit gezielt einzelne Holzlagen mit einer Brandschutzimprägnierung auszurüsten. Je nach thermischen Randbedingungen kann damit eine selbstverlöschende Eigenschaft erzielt werden [43] [44] [45].

6.6 Grundlagen eines Brandschutzkonzepts

Auf Basis der diskutierten Ergebnisse können die Grundzüge eines Brandschutzkonzepts für ein 10- bis 12-geschossiges Hochhaus in Holzbauweise entwickelt werden. Die Nutzeneinheiten werden auf Größen unter 200 m² beschränkt. Als Kompensation der Holzbauweise kommt eine automatische Löschanlage zum Einsatz. Hier bietet eine Hochdruckanlage das größte Potenzial. Abweichend von den Erleichterungen gemäß Ziffer 8 werden die Trennwände innerhalb eines Geschosses hochfeuerhemmend (EI 60 und K 60) ausgeführt.

Die Geschoßtrennung erfolgt über REI 90 Holzbetonverbunddecken. Um die sichtbare Untersicht zu erhalten, können die unter Ziffer 5.4.1 bzw. Ziffer 5.4.2 diskutierten Lösungen zum Einsatz kommen.

Die Außenwand wird analog den Trennwänden EI 60 innenseitig K60 und außenseitig K 30 ausgeführt. Um den Brandüberschlag von Geschoß zu Geschoß wirksam zu unterbinden, werden die Löschröhren im Bereich der Fenster verdichtet. Die Löschanlage wird für Löschdauer von mindestens zwei Stunden ausgelegt.

Das Treppenhaus wird als Sicherheitstreppenhaus in einem vom Gebäude abgerückten feuerbeständig ausgeführten Gebäudekörper (Stahlbeton) ausgeführt. Dieser nimmt auch den Feuerwehrrfahrstuhl auf. Die Erschließung erfolgt über Stahlbetonbrücken vom Treppenhaus zum eigentlichen Gebäude. Die sonstige geforderte Anlagentechnik wird in vollem Umfang umgesetzt.

Im Vergleich zu einem herkömmlichen Hochhaus gemäß Ziffer 8 der MHRR kann durch ein angepasstes Brandschutzkonzept unter Beachtung der hier diskutierten Grundlagen trotz der Holzbauweise eine höhere Sicherheit erzielt werden. Hierzu sind allerdings weiterführende Untersuchungen als Beleg notwendig.

6.7 Abgeleiteter Forschungsbedarf

Auf Grundlage der in Ziffer 5 diskutierten konzeptionellen Ansätze und Lösungsideen ergibt sich ein erweiterter Forschungsbedarf. Für die Genehmigungsfähigkeit ist eine angepasste Wasserlöschanlage von entscheidender Bedeutung. Hier wird auf Basis der entwickelten Bewertungskriterien ein Hochdruckanlage vorgeschlagen. Vor einer abschließenden Entscheidung sollten aber die Bewertungskriterien mittels einer Umfrage in den Fachkreisen verifiziert werden. Hierzu könnte das Instrument einer Delphi-Studie genutzt werden. Da in jedem Fall eine Feinsprühlöschanlage zum Einsatz kommen wird, müssen Löschversuche mit der gewählten Anlagentechnik durchgeführt werden.

Weiterhin sind für die Entwicklung der Holzbauteile Brandversuche zu planen und durchzuführen. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf den Aspekten Rauchdichtigkeit, Entzündungsschutz sowie selbstverlöschende Eigenschaften.

7 Wärmeschutz

7.1 Einleitung

Bisher lag ein primärer Fokus auf der Senkung des Energieverbrauchs im Betrieb durch Dämmung und effiziente Haustechniksysteme. Diese Betriebsenergien werden jedoch durch Niedrigenergie- und Passivhauskonzepte so reduziert, dass im Verhältnis hierzu die Umweltauswirkungen durch die gewählten Baustoffe und Konstruktionen eine hohe Relevanz erreichen. Um einen entscheidenden Einfluss auf die Umweltbilanz eines Bauwerks auszuüben, müssen insbesondere die großen Massenanteile, also die Primärkonstruktionen, aus nachwachsenden Rohstoffen bestehen. Diese Überlegungen führen in der Konsequenz zum Holzbau, der durch vielfältige Weiterentwicklungen und Produktinnovationen auch für eine Vielzahl an größeren Bauaufgaben interessante Lösungen zu bieten hat.

Der Baustoff Holz weist nicht nur hinsichtlich der konstruktiven Leistungsfähigkeit, z.B. im Verhältnis Eigengewicht zur Tragfähigkeit, herausragende Eigenschaften auf. Hinzu kommt, dass Holz mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,13 \text{ W/mK}$ (für Nadelholz), im Gegensatz zu mineralischen Baustoffen oder auch Stahl, selbst zur Wärmedämmung des Gebäudes beitragen kann. Des Weiteren werden in Anschlusspunkten im Vergleich zu anderen Bauweisen Wärmebrückenwirkungen durch den Einsatz von Holz deutlich verringert.

Holzbaukonstruktionen sind im energieoptimierten Bauen allgemein nicht mehr wegzudenken. Mit Blick auf nachkommende Generationen sind neben den wärmeschutztechnischen Aspekten die Speicherefähigkeit von CO_2 , der geringe Verbrauch von grauer Energie sowie die gute Entsorgbarkeit oder Wiederverwertbarkeit gewichtige Argumente für den Holzbau.

7.2 Anforderungen an den Wärmeschutz

Das hier untersuchte Gebäude soll gemäß nach den bisherigen Planungsansätzen als sog. KfW-Effizienzhaus 55 konzipiert werden.

Gemessen wird die energetische Qualität anhand des Jahresprimärenergiebedarfes und des Transmissionswärmeverlustes der Gebäudehülle. Für diese beiden Kennzahlen definiert die Energieeinsparverordnung (EnEV) entsprechende Höchstwerte, die ein vergleichbarer Neubau zunächst einhalten muss und somit den energetischen Mindeststandard für ein Gebäude darstellt. Aus dem Vergleich mit diesem Mindeststandard erfolgt die Zuordnung in einen der Förderstandards der KfW. Ein KfW-Effizienzhaus 100 entspricht den Vorgaben der EnEV für den Neubau als Mindeststandard. Ein KfW-Effizienzhaus 70 hat einen Jahresprimärenergiebedarf von nur 70 % eines vergleichbaren Neubaus nach EnEV, ein KfW-Effizienzhaus 55 dementsprechend nur 55 %.

Für das Objekt E28 ergeben sich daraus insbesondere Vorgaben über die energetische Leistungsfähigkeit bzw. Dämmwirkung der Außenhülle sowie hinsichtlich der Anlagentechnik zur Bereitstellung von Heizenergie und der Wärmeversorgung. Die Ermittlung der Bauteilanforderungen zur Erreichung des avisierten Energiebedarfsniveaus hängt hierbei nur am Rand mit der Tatsache zusammen, dass es sich bei dem Gebäude um ein Hochhaus handelt.

Der wesentliche Einflussfaktor besteht hierbei in der sog. A/V_e-Kennzahl, welche durch das Verhältnis von äußerer Gebäudehüllfläche A und dem davon eingeschlossenen beheizten Gebäudevolumen (umbauter Raum) V_e definiert wird. Demnach sinkt die A/V_e-Kennzahl mit zunehmender Kompaktheit des Gebäudes. Die Nutzfläche A_N ergibt sich dabei aus dem umbauten Volumen V_e nach der Formel $A_N = 0,32 \cdot V_e$ und ist nicht zwingend identisch mit der realen beheizten Wohnfläche. Diese ist in der Regel ca. 20% geringer als A_N.

Eine ausschließlich auf die Energieeffizienz ausgerichtete Gebäudegestaltung würde somit dem Ansatz zur Erzielung eines möglichst geringen Wertes für die A/V_e-Kennzahl folgen. Große kompakte Gebäude haben zunächst das Potential eines deutlich besseren, weil geringeren, A/V_e-Verhältnisses als kleinere Gebäude wie z.B. Ein- und Zwei-Familienhäuser. Wie in Abschnitt 2.2.2 dargestellt, werden von allen Projektbeteiligten im vorliegenden Fall jedoch hohe Ansprüche an die Grundrissgestaltung gestellt. Dazu gehört insbesondere die Erlebbarkeit der Gebäudehöhe und der besonderen Lage und Aussicht, die durch die Anordnung von Loggien in jedem Geschoss gegeben sein soll. Loggien stellen Einschnitte in die Gebäudehülle dar, welche erheblichen Einfluss auf die Größe der Hüllfläche des Gebäudes haben. Durch die Erhöhung der Gebäudehüllfläche vergrößert sich ebenfalls die A/V_e-Kennzahl, welche wiederum als Einflussfaktor auf den Grenzwert für den Primärenergiebedarf des Gebäudes herangezogen wird. Bei dem vorliegenden Gebäude nach derzeitigem Planungsstand wirken sich die Einschnitte in die Gebäudehülle in Form der Loggien auf das A/V_e-Verhältnis wie in nachfolgender Tabelle 29 aufgeführt aus. Dabei wird ein Vergleich angestellt, welche Auswirkung die Loggien im Vergleich zu einem Gebäude gleicher Abmessungen, jedoch als Reinkubus ohne jegliche Aus- und Einschnitte in der Hüllfläche hat.

Tabelle 29 Einfluss des A/V_e-Kennwertes auf den max. zul. Primärenergiebedarf infolge der Loggia-Anordnung in der Gebäudefassade

Kennwert	ohne Loggien	mit Loggien
Bruttovolumen V _e	8670,0 m ³	7.527,6 m ³
Nutzfläche A _N	2774,4 m ²	2.408,8 m ²
Thermische Hüllfläche	2040,0 m ²	2.817,5 m ²
A/V _e -Verhältnis	0,24 m ⁻¹	0,37 m ⁻¹
Primärenergiebedarf Q _p · 1)	69,91 kWh/(m ² a)	79,83 kWh/(m ² a)

1) Max. zulässiger Jahres-Primärenergiebedarf nach, Tabelle 1 Anlage 1 EnEV 2009

Hierbei wird erkennbar, dass sich durch den Einfluss der architektonischen Gestaltung des Gebäudes, insbesondere durch die Anordnung der Loggien, eine Erhöhung des zulässigen Primärenergiebedarfs um 14 % gegenüber dem Gebäude als geschlossener Kubus ergibt. Dabei ist anzumerken, dass diese Berechnung eine überschlägige Ermittlung des Primärenergiebedarfs ohne Berücksichtigung weiterer Einflussfaktoren wie Energieeinträge, Anlagentechnik oder Wärmebrücken darstellt. Allerdings wird hierbei deutlich dem Anspruch der hohen Energieeffizienz in relativer und absoluter Betrachtung des Energiebedarfs nur gerecht zu werden ist, wenn die negativen Einflüsse der Gebäudegeometrie durch bauliche und auch anlagentechnische Maßnahmen kompensiert werden.

Die konzeptionelle Zielsetzung, das Gebäude als sogenanntes KfW Effizienzhaus 55 zu entwickeln, wurde einer Wärmebedarfsberechnung nach EnEV 2009 zugrunde gelegt, deren Eingabeparameter und Ergebnisse nachfolgend zusammengefasst werden.

7.3 Eingabeparameter und Ansätze der Wärmebedarfsberechnung nach EnEV 2009

Gebäudedaten			
Bruttovolumen V_e	7.527,6 m ³	Fensterfläche [m ²]	1.021,00
Nettovolumen V	5.721,0 m ³	Außentürfläche [m ²]	51,20
Nutzfläche AN	2.408,8 m ²	Bauart	leicht
A/Ve-Verhältnis	0,37 m ⁻¹	Gebäudetyp und Lage	freistehendes Gebäude
Thermische Hüllfläche	2.817,5 m ²		

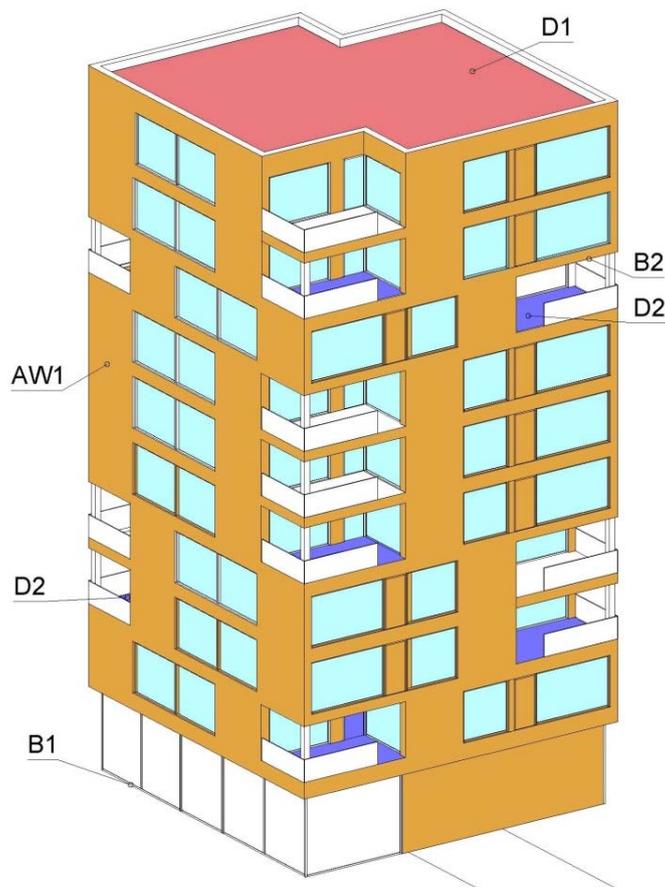


Bild 20 Isometrie mit Markierung der in der Wärmebedarfsberechnung berücksichtigten Bauteilarten

7.3.1 Berechnungsverfahren

Gebäudeart	Wohngebäude nach DIN 4108/4701 oder DIN V 18599
Berechnung gemäß	EnEV 2009
Verwendete Norm	DIN 4108-6 / DIN V 4701
Art des KfW-Nachweises	Neubau, KfW-Effizienzhaus 55
verwendete EnEV-Software	ZUB Helena
Referenzgebäude Wohnbau	
Anzahl Wohnungen	1
Berechnung nach	EnEV Anlage 1 Nummer 2.1.2 DIN EN 832, DIN V 4108-6 und DIN V 4701-10
Randbedingungen	
Berücksichtigung von Wärmebrücken	0,05 W/(m ² K) (Pauschalwert)
Dichtheitsprüfung	mit Prüfung, Zu- und Abluftanlage
Luftwechselrate	0,60 h ⁻¹
Bauweise	leicht
Wärmebrückenkorrektur	optimiert
Wärmebrücken-Korrekturwert	0,050 W/(m ² K)

7.3.2 Berechnungsergebnisse

	Ist-Wert E28	Referenzgebäude
spez. Transmissionswärmeverlust [W/(m ² K)]	0,496	0,716
H _T (Referenzgebäude) [W/(m ² K)]		
spez. Heizwärmebedarf [kWh/m ² a]	32,5	43,7
Anlagenaufwandszahl [-]	0,77	1,13
spez. Primärenergiebedarf [kWh/m ² a]	34,77	63,21

7.3.3 KfW-Ergebnisse

Ergebnisse	Ist-Wert	Soll-Wert	% vom Soll-Wert	Soll-Wert für KfW-Effizienzhaus 55
H_T' bzgl. Referenzgebäude [W/(m ² K)]	0,496	0,716	69,3 %	70,0 %
H_T' bzgl. EnEV-Sollwert [W/(m ² K)]	0,496	0,500	99,2 %	100,0 %
spezifischer Primärenergiebedarf [kWh/(m ² a)]	34,8	63,2	55,0 %	55,0 %
Primärenergiebedarf [kWh/a]	83.756,4	152.269,9	55,0 %	55,0 %

Der Effizienzhausstandard "KfW-Effizienzhaus 55 (EnEV 2009)" (Neubau) wird erreicht.

Der Transmissionswärmeverlust H_T' für das Referenzgebäude bzw. der Höchstwert von H_T' sind gemäß Tabelle 1 bzw. Tabelle 2 der Anlage 1 der EnEV 2009 ermittelt.

7.4 Zusammenfassung Wärmeschutz

Der Effizienzhausstandard "KfW-Effizienzhaus 55 (EnEV 2009)" (Neubau) wird durch das Gebäude in der bisher geplanten Form erreicht. In diesem Zusammenhang kann belegt werden, dass der Bauteilaufbau der Gebäudehülle in der bisher avisierten Form und Schichtenfolge auch im Hinblick auf den Wärmeschutz beibehalten werden kann. Insbesondere korrespondieren diese Ergebnisse mit den Untersuchungsergebnissen der bauphysikalischen Berechnungen. Bei der Berechnung wurden hinsichtlich der Anlagentechnik und der Berücksichtigung von Wärmebrücken zum derzeitigen Planungsstand lediglich Standardparameter eingesetzt. Somit können im Bedarfsfall durch genauere Berechnungen bzw. Bestimmung dieser Parameter weitere energetische Optimierungen vorgenommen werden können.

8 Schallschutz

8.1 Entwicklung der Schallschutzprognose für den Holzbau

Grundsätzlich sind die Anforderungen an den Schallschutz im Hochbau nach folgenden technischen Regeln zu beurteilen.

- DIN 4109:1989-05 Schallschutz im Hochbau; Anforderungen und Nachweise [56]
- Berichtigungen zu DIN 4109/11.89; DIN 4109 Bbl. 1/11.89 und DIN 4109 Bbl. 2/11.89 [57]
- Beiblatt 1 zu DIN 4109:1989-11 Schallschutz im Hochbau; Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren [58]
- Beiblatt 2 zu DIN 4109:1989-11 Schallschutz im Hochbau; Hinweise für Planung und Ausführung, Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz, Empfehlungen für den Schallschutz im eigenen Wohn- Arbeitsbereich [59]
- Berichtigungen zu DIN 4109/11.89; DIN 4109 Bbl. 1/11.89 und DIN 4109 Bbl. 2/11.89 [60]
- DIN 4109/ A1:2001-01 Schallschutz im Hochbau; Anforderungen und Nachweise; Änderungen A1 [61]

Die allgemeinen Anforderungen an den Schallschutz nach DIN 4109 entsprechen jedoch bereits seit längerer Zeit nicht mehr den üblichen Komfortansprüchen, was insbesondere in Gebäuden mit insgesamt höherer Bauqualität zum tragen kommt.

Die Anforderungen der DIN 4109 sind bauordnungsrechtlich verbindlich, während die Ausführungen zum erhöhten Schallschutz im Beiblatt 2 zu dieser Norm grundsätzlich nur empfehlenden Charakter haben. Dennoch setzen diese je nach Bauaufgabe bzw. Qualitäts- und Komfortstandard des Gebäudes zunehmend verbindliche Maßstäbe im privatrechtlichen Sinne. Um dahingehende Differenzen bereits im Vorfeld werden die Schallschutz-Anforderungen im Rahmen der hier betrachteten Gebäude grundsätzlich nach den Empfehlungen für den erhöhten Schallschutz gemäß Beiblatt 2 zu DIN 4109 als Grundsatzanforderung im modernen Wohnungsbau ausgerichtet.

8.1.1 Stand der Forschung und Entwicklung als Grundlage zu Schallschutzprognose für den Holzbau

Bereits 2005 ist ein umfangreicher Forschungsbericht unter dem Titel „Integration des Holz- und Skelettbbaus in die neue DIN 4109“ (Scholl, Werner; Bietz, Heinrich, 09/2005, Fraunhofer IRB Verlag) [55] veröffentlicht worden. Hier wird eine umfassende Zusammenstellung von praxisüblichen Bauteilaufbauten in Holzbauweise mit durch Messergebnisse hinterlegten Schallschutzeigenschaften angeboten. Ansatz war es, diesen Konstruktionskatalog als Anhang einer überarbeiteten Fassung der DIN 4109 zu etablieren, was jedoch bisher an einer fehlenden überarbeiteten Fassung der Norm scheitert.

Nach wie vor gilt der Grundsatz, dass eine massereiche Schale, die biegeweich mit dem Grundbauteil verbunden ist, die größte Verbesserungswirkung für den Schallschutz eines Bauteils erzielt. Wie auch im mineralischen Massivbau sind die empfohlenen Eigenschaften des erhöhten Schallschutzes auch bei Trennwänden und Trenndecken in Massivholzbauweise nur mit zusätzlichen schallschutztechnischen Maßnahmen zu erreichen. Bei der Kombination verschiedener Bauteile spielt neben der schallschutztechnischen Qualität der Bauteile selbst die Schalllängsleitung und die Nebenwegübertragung eine zentrale Rolle.

Trenndecken aus Massivholzelementen in Verbindung mit Trittschalldämmungen und schwerem Fußboden wie z.B. Zementestrich bieten gute Schallschutzeigenschaften. Holz-Beton-Verbunddecken widersprechen zwar aufgrund des steifen Verbundes zwischen den Schalen dem vorgenannten Entkopplungsprinzip. Allerdings kommt hier die hohe Gesamtmasse des Bauteils den Schallschutzeigenschaften zugute, ähnlich den vollständig aus Stahlbeton bestehenden Decken.

8.1.2 Ergebnisse des Forschungsvorhabens

Ein wesentliches Ergebnis des vorgenannten Forschungsvorhabens besteht in der Formulierung von Prognoseverfahren für die Luft- und Trittschallübertragung im Holzbau in Anlehnung an das Verfahren der DIN EN 12354-2.

Dabei war zu berücksichtigen, dass die Ermittlung der Körperschall-Nachhallzeit und die Berechnung der Nebenwegübertragung anhand der Stoßstellen-Dämm-Maße im Holz- und Skelettbau aufgrund der stark inhomogenen Konstruktionen äußerst problematisch ist. Daher wurden die Flanken pauschal mittels der bewerteten Norm-Flankenpegeldifferenz $D_{n,f,w}$ einbezogen.

Prognoseverfahren für Luftschallübertragung

Das bewertete Bau-Schalldämm-Maß berechnet sich mit Bezug auf das Berechnungsverfahren nach DIN EN 12354-1 auf Grundlage von Messwerten nach folgender Gleichung

$$R_w = -10 \lg \left[10^{-R_{DL,w}/10} + \sum_{F=F=1}^a 10^{-R_{Ff,w}/10} \right]$$

Dabei ist

R_w das bewertete Bau-Schalldämm-Maß zwischen zwei Räumen, in Dezibel;

$R_{Dd,w}$ das bewertete Schalldämm-Maß des trennenden Bauteils, in Dezibel;

$R_{Ff,w}$ das bewertete Flankendämm-Maß für den Übertragungsweg F_f , in Dezibel;

$D_{n,f,w}$ die bewertete Norm-Schallpegeldifferenz eines flankierenden Bauteils, in Dezibel;

n die Anzahl der flankierenden Bauteile in einem Raum; üblicherweise $n=4$ (je nach Entwurf und Konstruktion kann aber n in der betreffenden Bausituation auch kleiner oder größer sein)

l_{lab} die Bezugslänge, in Metern;

l_{lab} die gemeinsame Kopplungslänge der Verbindungsstelle zwischen dem trennenden Bauteil und den flankierenden Bauteilen F und f in der Bausituation, in Metern;

S_s die Fläche des trennenden Bauteils, in m^2

A_0 10 m^2

Im Falle der Trittschallübertragung wird unter Verwendung des bewerteten Norm-Trittschallpegel $L_{n,w}$ der Holzdecke ohne Flankenübertragung berechnet und dies mit zwei Korrekturfaktoren K_1 und K_2 belegt. Hintergrund ist die Tatsache, dass bei Decken in Holzbauweise neben dem eigentlichen Flankenweg D_f über die Rohdecke ein weiterer Nebenweg D_{Ff} über den Randanschluss des schwimmenden Estrichs existiert.

Die Trittschallübertragung berechnet sich demnach wie folgt:

$$L'_{n,w} = L_{n,w} + K_1 + K_2$$

$L_{n,w}$ der bewertete Norm-Trittschallpegel der Holzdecke in der Bausituation, in Dezibel;

$L_{n,w}$ der bewertete Norm-Trittschallpegel der Holzdecke ohne Flankenübertragung nach DIN EN ISO 140-6, in Dezibel;

K_1 der bewertete Norm-Trittschallpegel der Holzdecke ohne Flankenübertragung nach DIN EN ISO 140-6, in Dezibel, ermittelt nach Abschnitt 5.4.3.2.2 des Bauteilkataloges des genannten Forschungsberichtes [1]

K_2 der bewertete Norm-Trittschallpegel der Holzdecke ohne Flankenübertragung nach DIN EN ISO 140-6, in Dezibel, ermittelt nach Abschnitt 5.4.3.2.3 des Bauteilkataloges es des genannten Forschungsberichtes [1]

8.1.3 Anwendung der Forschungsergebnisse

Auf Grundlage der Erkenntnisse und Ansätze des Forschungsberichtes wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Schallschutzprognosen mit verschiedenen Bauteilaufbauten geführt. Dabei wurden Bauteilaufbauten gewählt, welche nach entsprechenden technischen und wirtschaftlichen Überlegungen und derzeitigen Planungsansätzen im Hochhausbau in Holzbauweise zum Einsatz kommen sollten. Die Prognosen dienen zur ersten Einschätzung der schallschutztechnischen Bauteil- und Konstruktionsleistungen.

Eine Beurteilung des Schallschutzes innerhalb einer Nutzungseinheit wurde dabei nicht untersucht.

Die Bauteilnachweise für den Holzbaubau wurden Mithilfe von Prüfaufbauten im Rahmen es genannten Forschungsprojektes [55] geführt. Geringe Abweichungen der geplanten Bauteilaufbauten zu den Prüfaufbauten wurden mit entsprechenden Korrekturfaktoren bewertet.

8.2 Anforderungen an den Schallschutz

Nachfolgend werden die hier maßgebenden erforderlichen Luft- und Trittschalldämmmaße zum Schutz gegen Schallübertragung aus einem fremden Wohn- und Arbeitsbereich zusammengestellt.

Die für die Schalldämmung der trennenden Bauteile angegebenen Werte gelten nicht für diese Bauteile allein sondern für die resultierende Dämmung unter Berücksichtigung der an der Schallübertragung beteiligten Bauteile und Nebenwege im eingebauten Zustand; dies ist bei der Planung zu berücksichtigen.

Tabelle 30 Auszug aus DIN 4109 für normale Schallschutzanforderungen und Bbl. 2 zu DIN 4109 für erhöhte Schallschutzanforderungen

1	1	2	3	4	5	6
Zeile		Bauteile	Anforderungen			
			Normaler Schallschutz		Vorschläge für erhöhten Schallschutz	
			erf. R'_w [dB]	erf. $L'_{n,w}$ [dB]	erf. R'_w [dB]	erf. $L'_{n,w}$ [dB]
Geschosshäuser mit Wohnungen und Arbeitsräumen						
1	Decken	Decken unter allgemein nutzbaren Dachräumen, z.B. Trockenböden, Abstellräumen und ihren Zugängen	53	53	≥ 55	≤ 46
2		Wohnungstrenndecken (auch -treppen) und Decken zwischen fremden Arbeitsräumen bzw. vergleichbaren Nutzungseinh.	54	53	≥ 55	≤ 46
3		Decken über Kellern, Hausfluren, Treppenräumen unter Aufenthaltsräumen	52	53	≥ 55	≤ 46
4		Decken über Durchfahrten, Einfahrt von Sammelgaragen und ähnliches unter Aufenthaltsräumen	55	53	--	≤ 46
5		Decken unter/ über Spiel- oder Gemeinschaftsräumen	55	46	--	--
6		Decken unter Terrassen und Loggien über Aufenthaltsräumen	--	53	--	≤ 46
7		Decken unter Laubengängen	--	53	--	--
8		Decken und Treppen innerhalb von Wohnungen, die sich über zwei Geschosse erstrecken	--	53	--	≤ 46
9		Decke unter Bad und WC ohne/ mit Bodenentwässerung	54	53	≥ 55	≤ 46
10		Decken unter Hausfluren	--	53	--	≤ 46
Geschosshäuser mit Wohnungen und Aufenthaltsräumen						
11	Treppen	Treppenläufe und -podeste	--	58	--	≤ 46
12	Wände	Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremden Arbeitsräumen	53	--	≥ 55	--
13		Treppenraumwände und Wände neben Hausfluren	52	--	≥ 55	--
14		Wände neben Durchfahrten, Einfahrten von Sammelgaragen u. ä.	55	--	--	--

15		Wände von Spiel- oder ähnlichen Gemeinschaftsräumen	55	--	--	--
16	Türen¹	Türen, die von Hausfluren oder Treppenträumen in Flure und Dielen von Wohnungen und Wohnheimen oder von Arbeitsräumen führen	27	--	≥ 37	--
17		Türen, die von Hausfluren oder Treppenträumen unmittelbar in Aufenthaltsräume – außer Flure und Dielen - von Wohnungen führen	37	--	--	--

Anmerkung: die Spalten und Zeilenbezeichnungen stimmen z.T. nicht mit denjenigen aus DIN 4109 überein. Maßgebend sind die Bauteilbeschreibungen

Erläuterungen:

DIN 4109; Abs. 2.1, Tabelle 1, R'_w = bewertetes Schalldämm - Maß in dB mit Schallübertragung über flankierende Bauteile
Seite 2

R_w = bewertetes Schalldämm - Maß in dB ohne Schallübertragung über flankierende Bauteile
z. B. bei Türen Berücksichtigung der Schallübertragung nur über die Tür.

$L'_{n,w}$ = bewerteter Norm- Trittschallpegel in dB

TSM = Trittschallschutzmaß in dB (TSM = 63 dB – $L'_{n,w}$)

Nachfolgend werden die hier maßgebenden erforderlichen Anforderungen an zulässige Schalldruckpegel in schutzbedürftigen Räumen von Geräuschen aus haustechnischen Anlagen und Gewerbebetrieben zusammengestellt.

Tabelle 31 Auszug aus Tabelle 4 DIN 4109

Spalte	1	2	3
Zeile	Geräuschquelle	Art der schutzbedürftigen Räume	
		Wohn- und Schlaf- räume	Unterrichts- und Aufenthaltsräume
		Kennzeichnender Schalldruckpegel dB (A)	
1	Wasserinstallationen (Wasserversorgungs- und Abwasseranlagen gemeinsam)	≤ 35^{a,b}	≤ 35^a
2	Sonstige haustechnische Anlagen	≤ 30^c	≤ 35^c
3	Betriebe tags 6 bis 22 Uhr	≤ 35	≤ 35^c
4	Betriebe nachts 22 bis 6 Uhr	≤ 25	≤ 35^c
^a	Einzelne, kurzzeitige Spitzen, die beim Betätigen der Armaturen und Geräte nach Tabelle 6 (Öffnen, Schließen, Umstellen, Unterbrechen u. a.) entstehen, sind zurzeit nicht zu berücksichtigen.		
^b	Werkvertragliche Voraussetzungen zur Erfüllung des zulässigen Installations-schall-druck-pegels: - Die Ausführungsunterlagen müssen die Anforderungen des Schallschutzes berücksichtigen, d.h. u. a. zu den Bauteilen müssen die erforderlichen Schallschutznachweise vorliegen. - Außerdem muss die verantwortliche Bauleitung benannt und zu einer Teilnahme vor Verschließen bzw. Verkleiden der Installationen hinzugezogen werden. Weitergehende Details regelt das ZVSHK- Merkblatt. (zu beziehen durch: Zentralverband Sanitär Heizung Klima (ZVSHK), Rathausallee 6, 53757 St. Augustin)		
^c	Bei Lüftungstechnischen Anlagen sind um 5 dB (A) höhere Werte zulässig, sofern es sich um Dauergeräusche ohne auffällige Einzeltöne handelt.		

Zulässige A-bewertete Schalldruckpegel von Aufzugsanlagen in schutzbedürftigen Räumen nach DIN 4109

Wohn- und Schlafräume	Unterrichts- und Arbeitsräume
30 dB(A)	35 dB(A)

Zwischen „besonders lauten“ und schutzbedürftigen Räumen sind die nachfolgenden Anforderungen an die Luft- und Trittschalldämmung von Bauteilen einzuhalten:

Tabelle 32 Anforderungen an die Luft- und Trittschalldämmung zwischen „besonders lauten“ und schutzbedürftigen Räumen

Spalte	1	2	3	4	5
	Art der Räume	Bauteile	Bewertetes Schalldämm-Maß erf. R'_w [dB]		Bewerteter Normtrittschallpegel erf. $L'_{n,w}$ [dB]
			Schalldruckpegel 75 bis 80 dB(A)	Schalldruckpegel 81 bis 85 dB(A)	
1.1	Räume mit „besonders lauten“ haustechnischen Anlagen oder Anlagenteilen	Decke, Wände	57	62	--
1.2		Fußböden	--		43
2.1	Betriebsräume von Handwerks- und Gewerbebetrieben; Verkaufsstätten	Decke, Wände	57	62	--
2.2		Fußböden	--		43

8.3 Höreindruck im gestörten Raum

Tabelle 33 Darstellung der Bauteilleistung zwischen Sende- und Empfangsraum

R'_w (dB)	Höreindruck im gestörten Raum
37	Normale Sprache, gut verständlich
42	Normale Sprache, gerade noch verständlich
47	Laute Sprache, kaum verständlich, Melodien erkennbar
52	Sprache nicht mehr hörbar, normal lautes Radio schwach zu hören
57	Lautes Radio noch hörbar
62	Auch lautes Radio nicht mehr hörbar

8.4 Schallschutztechnische Nachweise

8.4.1 Nachweis von Trennwänden in Massivholzbauweise

Bauteil		Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremden Arbeitsräumen		IW 1
Anforderungen und Vorschläge an den Schallschutz nach DIN 4109				dB
Anforderung nach DIN 4109 an den Schallschutz für Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremden Arbeitsräumen			erf. R'_w	≥ 55
Wandaufbau von außen nach innen		Flächenbezogene Masse m' in kg/m^2		<p>Skizze zum Bauteil:</p>
1	≥ 78 mm	Brettsperrholz (3 lagig), $\rho = 470 \text{ kg/m}^3$		
2	10 mm	Luftschicht		
3	75 mm	freistehende Vorsatzschale (CW 75)		
4	(50) mm	Mineralwolle, $r \geq 5 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$		
5	2 x 12,5 mm	Gipsfaserplatte, $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ oder Feuerschutzplatte, $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$		
$\Sigma H = 188$ mm		Gesamtmasse $m' =$		kg/m^2
Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes $R'_{w,R}$				
analog zu Fa. Binderholz, IW04a			$R_{w,P} =$	61,0 dB
gemäß DIN 4109, 6.4: Vorhaltemaß Prüfwert			$V_{\text{Prüfwert}} =$	-2,0 dB
gemäß DIN 4109, Beiblatt 1, 5.3: vereinfachter Nachweis flankierende Bauteile			$K =$	-5,0 dB
			$R'_{w,R} =$	54,0 dB
Bemerkung:				
Der oben aufgeführte Wandaufbau erfüllt <u>nicht</u> die Anforderungen an den erhöhten Schallschutz!				

Ergebnis: Folgende Schallschutzprognose wird für das Bauteil erwartet.	Anforderungen erfüllt	
	ja	nein
vorh. $R'_{w,R} = 54 \text{ dB} > 53 \text{ dB} = \text{erf. } R'_{w,R}$ normaler Luftschallschutz	x	---
vorh. $R'_{w,R} = 54 \text{ dB} < 55 \text{ dB} = \text{erf. } R'_{w,R}$ erhöhten Luftschallschutz	--	x

Bauteil		Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremden Arbeitsräumen			IW 2	
1						
2 Anforderungen und Vorschläge an den Schallschutz nach DIN 4109					3	dB
4 Anforderung nach DIN 4109 an den Schallschutz für Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremden Arbeitsräumen					5	e rf. R'_{w}
					6	≥ 55
7						
8 Wandaufbau von außen nach innen				9	Flächenbezogene Masse m' in kg/m^2	
11	12	13	14	10 <u>Skizze zum Bauteil:</u>		
	≥ 100 mm	Brettsper Holz (5 lagig), $\rho = 470 \text{ kg/m}^3$				
15	16	17	18			
	10 mm	Luftschicht				
19	20	21	22			
	75 mm	freistehende Vorsatzschale (CW 75)				
23	24	25	26			
	(50) mm	Mineralwolle, $r \geq 5 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$				
27	28	29	30			
	2 x 12,5 mm	Gipsfaserplatte, $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ oder Feuerschutzplatte, $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$				
31	ΣH = 210 mm	32	33			
		Gesamtmasse $m' =$	kg/m²			
34						
35 Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes $R'_{w,R}$						
36 analog zu Fa. Binderholz, IW04b					37	R $w,P =$
					38	62,0 dB
39 gemäß DIN 4109, 6.4: Vorhaltemaß Prüfwert					40	V Prüfwert =
					41	-2,0 dB
42 gemäß DIN 4109, Beiblatt 1, 5.3: vereinfachter Nachweis flankierende Bauteile					43	K =
					44	-5,0 dB
45					46	R $'_{w,R} =$
					47	55,0 dB
48 Bemerkung:						
49						

Ergebnis: Folgende Schallschutzprognose wird für das Bauteil erwartet.	Anforderungen erfüllt	
	ja	nein
vorh. $R'_{w,R} = 55 \text{ dB} > 53 \text{ dB} = \text{erf. } R'_{w,R}$ normaler Luftschallschutz	X	---
vorh. $R'_{w,R} = 55 \text{ dB} = 55 \text{ dB} = \text{erf. } R'_{w,R}$ erhöhten Luftschallschutz	X	--

Bauteil		Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremden Arbeitsräumen		IW 3
Anforderungen und Vorschläge an den Schallschutz nach DIN 4109				dB
Anforderung nach DIN 4109 an den Schallschutz für Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremden Arbeitsräumen			erf. R'_w	≥ 55
Wandaufbau von außen nach innen		Flächenbezogene Masse m' in kg/m^2		<p>Skizze zum Bauteil:</p>
1	≥ 78 mm	Brettsperrholz (3 lagig), $\rho = 470 \text{ kg/m}^3$		
2	10 mm	Luftschicht		
3	75 mm	freistehende Vorsatzschale (CW 75)		
4	(50) mm	Mineralwolle, $r \geq 5 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$		
5	2 x 12,5 mm	Gipsfaserplatte, $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ oder Feuerschutzplatte, $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$		
6	2 x 12,5 mm	Gipsfaserplatte, $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ oder Feuerschutzplatte, $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$		
$\Sigma H = 213$ mm		Gesamtmasse $m' =$		kg/m^2
Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes $R'_{w,R}$				
analog zu Fa. Binderholz, IW04a			$R_{w,P} =$	61,0 dB
gemäß DIN 4109, 6.4: Vorhaltemaß Prüfwert			$V_{\text{Prüfwert}} =$	-2,0 dB
Verbesserung durch Anordnung Gipsfaserplatten auf Außenseite			$V_1 =$	+1,0 dB
gemäß DIN 4109, Beiblatt 1, 5.3: vereinfachter Nachweis flankierende Bauteile			$K =$	-5,0 dB
			$R'_{w,R} =$	55,0 dB
Bemerkung:				

Ergebnis: Folgende Schallschutzprognose wird für das Bauteil erwartet.	Anforderungen erfüllt	
	ja	nein
vorh. $R'_{w,R} = 55 \text{ dB} > 53 \text{ dB} = \text{erf. } R'_{w,R}$ normaler Luftschallschutz	X	---
vorh. $R'_{w,R} = 55 \text{ dB} = 55 \text{ dB} = \text{erf. } R'_{w,R}$ erhöhten Luftschallschutz	X	--

8.4.1.1 Nachweis von HBV-Decken mit Massivholzelement als Wohnungstrenndecke (Geschossdecke)

Bauteil	Geschossdecke zwischen fremden Arbeitsräumen bzw. vergleichbaren Nutzungseinheiten		DE 1	
Anforderungen und Vorschläge an den Schallschutz nach DIN 4109			dB	
Anforderung nach DIN 4109 an den Schallschutz für Geschosshäuser mit Wohnungen und Arbeitsräumen			erf. R'_w ≥ 55	
			erf. $L'_{n,w}$ $\leq 46 - 2 = 44$	
Deckenaufbau von oben nach unten		Flächenbezogene Masse m' in kg/m^2 *)	Skizze zum Bauteil: 	
1	Belag			
2	50 mm	Zementestrich, $\rho' = 2100 \text{ kg/m}^3$		105,0 kg/m^2 *)
3	40/45 mm	Trittschalldämmung, MW, $s' \leq 6 \text{ MN/m}^3$		
4	$\geq 60 \text{ mm}$	Beton, $\rho' = 2300 \text{ kg/m}^3$		1.380,0 kg/m^2 *)
5	260 mm	Massivholzplatte z.B. BBS, $\rho' = 450 \text{ kg/m}^3$		117,0 kg/m^2 *)
$\Sigma H = 410 \text{ mm}$		Gesamtmasse $m' =$		1.602,0 kg/m^2 *)
Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes $R'_{w,R}$				
gemäß ift Rosenheim: (siehe Anhang)			$R_{w,P} = 76,0 \text{ dB}$	
gemäß DIN 4109, 6.4: Vorhaltemaß Prüfwert			$V_{\text{Prüfwert}} = -2,0 \text{ dB}$	
gemäß DIN 4109, Beiblatt 1, 5.3: vereinfachter Nachweis flankierende Bauteile			$K = -5,0 \text{ dB}$	
			$R'_{w,R} = 69,0 \text{ dB}$	
Ermittlung des bewerteten Trittschallpegel				
gemäß ift Rosenheim: (siehe Anhang)			$L_{n,w,P} = 38,0 \text{ dB}$	
gemäß DIN 4109, 6.4: Vorhaltemaß Prüfwert-Decke			$V_{\text{Prüfwert}} = +2,0 \text{ dB}$	
Rechenwert			$L_{n,w,R} = 40,0 \text{ dB}$	
gemäß Integration des Holzbaus in die neue DIN 4109: 5.4.3.2.2, Flankenübertragung Decke/Wand			$K_1 = +4,0 \text{ dB}$	
gemäß DIN 4109, 6.4: Vorhaltemaß Prüfwert-Decke			$L_{n,w,R} = 44,0 \text{ dB}$	
gemäß Integration des Holzbaus in die neue DIN 4109: 5.4.3.2.2, Flankenübertragung Estrich/Wand			$K_2 = +4,0 \text{ dB}$	
bewerteter Trittschallpegel			$L'_{n,w,R} = 48,0 \text{ dB}$	
Bemerkung:				
<p>*1) Die angegebene Flächenbezogene Masse m' bezieht sich auf die Rohdichten für den Schallschnachweis und sind nicht mit den tatsächlichen Massen gleichzusetzen.</p> <p>Der hier gewählte Aufbau kann Schallschutztechnisch nicht genau beurteilt werden. Die unter DE1 geführte Schallschutzprognose wurde mithilfe verschiedener Datenblätter geführt. Weitere Abstimmungen werden mit den Produktherstellern geführt und ggf. der Deckenaufbau angepasst.</p> <p>Sollte durch die Abstimmung mit den Produktherstellern keine Planungssicherheit entstehen, empfehlen wir für eine genaue Beurteilung eine Schallschutztechnische Messung, mit dem gewählten Deckenaufbau.</p>				

Ergebnis: Folgende Schallschutzprognose wird für das Bauteil erwartet.	Anforderungen erfüllt	
	ja	nein
$R'_{w,R} = 69 \text{ dB} > 54 \text{ dB} = \text{erf. } R'_w, \text{ normaler Luftschallschutz}$	X	
$L'_{n,w,R} = 48 \text{ dB} < 53 - 2 = 51 \text{ dB} = \text{erf. } R'_w, \text{ normaler Trittschallschutz}$	X	
$R'_{w,R} = 69 \text{ dB} > 55 \text{ dB} = \text{erf. } R'_w, \text{ erhöhter Luftschallschutz}$	X	
$L'_{n,w,R} = 48 \text{ dB} > 46 - 2 = 44 \text{ dB} = L'_{n,w,R}, \text{ erhöhter Trittschallschutz}$	--	X

Bauteil		Geschossdecke zwischen fremden Arbeitsräumen bzw. vergleichbaren Nutzungseinheiten		DE 2
Anforderungen und Vorschläge an den Schallschutz nach DIN 4109				dB
Anforderung nach DIN 4109 an den Schallschutz für Geschosshäuser mit Wohnungen und Arbeitsräumen				erf. R'_w ≥ 55
				erf. $L'_{n,w}$ $\leq 46 - 2 = 44$
Deckenaufbau von oben nach unten			Flächenbezogene Masse m' in kg/m^2 *)	Skizze zum Bauteil:
1		Belag		
2	70 mm	Zementestrich, $\rho' = 2100 \text{ kg/m}^3$	147,0 kg/m^2 *)	
3	40/45 mm 50 mm	Trittschalldämmung, MW, $s' \leq 6 \text{ MN/m}^3$ + Ausgleichschicht mit EPS Dämmung, $s' \leq 20 \text{ MN/m}^3$		
4	$\geq 60 \text{ mm}$	Beton, $\rho' = 2300 \text{ kg/m}^3$	1.380,0 kg/m^2 *)	
5	260 mm	Massivholzplatte z.B. BBS, $\rho' = 450 \text{ kg/m}^3$	117,0 kg/m^2 *)	
$\Sigma H = 480 \text{ mm}$		Gesamtmasse $m' =$	1.602,0 kg/m^2*)	
Ermittlung des bewerteten Schalldämm-Maßes $R'_{w,R}$				
gemäß ift Rosenheim: (siehe Anhang)				$R_{w,P} = 76,0 \text{ dB}$
gemäß DIN 4109, 6.4: Vorhaltemaß Prüfwert				$V_{\text{Prüfwert}} = -2,0 \text{ dB}$
gemäß DIN 4109, Beiblatt 1, 5.3: vereinfachter Nachweis flankierende Bauteile				$K = -5,0 \text{ dB}$
				$R'_{w,R} = 69,0 \text{ dB}$
Ermittlung des bewerteten Trittschallpegel				
gemäß ift Rosenheim: (siehe Anhang)				$L_{n,w,P} = 38,0 \text{ dB}$
Verbesserungsmaß des Estrichaufbaus aus DE 1: nach DIN EN 12351-2, Bild C.1				$\Delta L_{n,w}^1 = +36,0 \text{ dB}$
gemäß DIN 4109, 6.4: Vorhaltemaß Prüfwert-Decke				$V_{\text{Prüfwert}} = +2,0 \text{ dB}$
Rechenwert der Rohdecke				$L_{n,w,R} = 76,0 \text{ dB}$
Verbesserungsmaß des Estrichaufbaus aus DE 2: nach DIN EN 12351-2, Bild C.1				$\Delta L_{n,w}^2 = -40,0 \text{ dB}$
gemäß Integration des Holzbaus in die neue DIN 4109: 5.4.3.2.2, Flankenübertragung Decke/Wand				$K_1 = +6,0 \text{ dB}$
gemäß DIN 4109, 6.4: Vorhaltemaß Prüfwert-Decke				$L_{n,w,R} = 40,0 \text{ dB}$
gemäß Integration des Holzbaus in die neue DIN 4109: 5.4.3.2.2, Flankenübertragung Estrich/Wand				$K_2^{*2)} = +6,0 \text{ dB}$
bewerteter Trittschallpegel				$L'_{n,w,R} = 46,0 \text{ dB}$
Bemerkung:				
<p>*1) Die angegebene Flächenbezogene Masse m' bezieht sich auf die Rohdichten für den Schallschnachweis und sind nicht mit den tatsächlichen Massen gleichzusetzen.</p> <p>*2) Durch eine noch bessere Trittschalldämmung der Decke steigt auch der Korrekturfaktor K_2, gemäß Integration des Holzbaus in die neue DIN 4109: 5.4.3.2.2, Flankenübertragung Estrich/Wand. Ein so hoher Anstieg des Korrekturfaktor K_2 ist aus theoretischer Schallschutztechnischer Sicht, bei dem gewählten Decken/Wandanschluss, nicht zu erwarten. Dieser kann jedoch ohne eine Messung nicht verifiziert werden.</p> <p>Der hier gewählte Aufbau kann Schallschutztechnisch nicht genau beurteilt werden. Die unter DE1 geführt Schallschutzprognose wurde mithilfe verschiedener Datenblätter geführt. Weitere Abstimmungen werden mit den Produktherstellern geführt und ggf. der Deckenaufbau angepasst. Sollte durch die Abstimmung mit den Produktherstellern keine Planungssicherheit entstehen, empfehlen wir für eine genaue Beurteilung eine Schallschutztechnische Messung, mit dem gewählten Deckenaufbau.</p>				

Ergebnis: Folgende Schallschutzprognose wird für das Bauteil erwartet.	Anforderungen erfüllt	
	ja	nein
$R'_{w,R} = > 69 \text{ dB} > 54 \text{ dB} = \text{erf. } R'_{w}$, normaler Luftschallschutz	X	--
$L'_{n,w,R} = 46 \text{ dB} < 53 - 2 = 51 \text{ dB} = L'_{n,w,R}$, normaler Trittschallschutz	X	--
$R'_{w,R} = > 69 \text{ dB} > 55 \text{ dB} = \text{erf. } R'_{w}$, erhöhter Luftschallschutz	X	--
$L'_{n,w,R} = 46 \text{ dB} > 46 - 2 = 44 \text{ dB} = L'_{n,w,R}$, erhöhter Trittschallschutz	--	X

8.4.2 Fußboden

Einbau des Fußbodenaufbaus als schwimmender Fußboden (schwimmender Estrich). Ein schalltechnisch wirksamer Randdämmstreifen, aus Mineralwolle, $r \geq 5 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2$, ist vorzusehen. Trennwände stehen auf dem Rohfußboden und sind vom Fußbodenaufbau zu entkoppeln. Rohrleitungsdurchdringungen sind vom Fußboden durch Dämmstreifen zu entkoppeln.

8.4.3 Wasserinstallationen und haustechnische Anlagen

Die Schallimmissionen aus Wasserinstallationen, aus haustechnischen Anlagen und damit verbundene Anforderungen an Installationsschächte und Kanäle müssen innerhalb der Grenzwerte des Abschnittes 5.3 liegen. Dies ist durch entsprechende Produktdatenblätter zu belegen. Folgende Maßnahmen können getroffen werden:

- Aufstellen von Sanitärobjekten auf schwimmendem Estrich oder körperschallentkoppelte Mon-tage an Vorwänden. Die Vorwände sollten geprüfte Systembauteile sein.
- Leitungen müssen körperschallgedämmt verlegt werden.

Ausführung der Armaturen in Armaturengruppe I im Sinne der DIN 4109, Tabelle 6

- Begrenzung des Fließdruckes auf maximal $p = 0,35 \text{ MPa}$.
- Begrenzung des Ruhedruckes vor Armaturen auf maximal $0,5 \text{ MPa}$.
- Durchgangsarmaturen müssen immer voll geöffnet sein. Sie dürfen nicht zum Drosseln verwendet werden.
- Installationen an Wänden dürfen nur dann ausgeführt werden, wenn die betroffenen Wände eine flächenbezogene Masse von mind. 220 kg/m^2 besitzen. Wände mit geringerer flächenbezogener Masse sind zulässig, wenn durch entsprechende Eignungsprüfung nachgewiesen wurde, dass sich Installationsgeräusche nicht ungünstiger auswirken.

8.5 Zusammenfassung Schallschutz

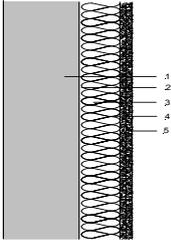
Den vorangegangenen Ausführungen können die wesentlichen Angaben zum baulichen Schallschutz des Gebäudes entnommen werden.

Unter den beschriebenen Prognoseansätzen auf Grundlage der DIN 12354 und den im Rahmen des genannten Forschungsprojektes beschriebenen Weiterentwicklungen zur Anwendbarkeit auf den Holzbau können die Anforderungen an den erhöhten Schallschutz nur unter folgenden Bedingungen eingehalten werden:

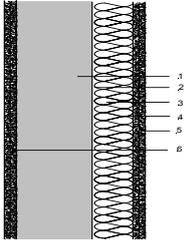
Trennwände:

Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremden Arbeitsräumen müssen den nachfolgend aufgeführten Bauteilaufbau aufweisen, oder in einer schallschutztechnisch mindestens gleichwertigen Ausführung hergestellt werden:

Wandaufbau IW2

Wandaufbau von außen nach innen			Flächenbezogene Masse m' in kg/m^2	Skizze zum Bauteil: 
1	$\geq 100 \text{ mm}$	Brettsperrholz (5 lagig), $\rho = 470 \text{ kg/m}^3$		
2	10 mm	Luftschicht		
3	75 mm	freistehende Vorsatzschale (CW 75)		
4	(50) mm	Mineralwolle, $r \geq 5 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2\text{r}$		
5	2 x 12,5 mm	Gipsfaserplatte, $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ oder Feuerschutzplatte, $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$		
$\Sigma H = 210 \text{ mm}$		Gesamtmasse $m' =$	kg/m^2	

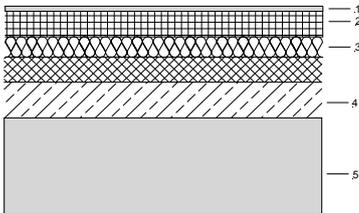
Wandaufbau IW3

Wandaufbau von außen nach innen			Flächenbezogene Masse m' in kg/m^2	Skizze zum Bauteil: 
1	$\geq 78 \text{ mm}$	Brettsperrholz (3 lagig), $\rho = 470 \text{ kg/m}^3$		
2	10 mm	Luftschicht		
3	75 mm	freistehende Vorsatzschale (CW 75)		
4	(50) mm	Mineralwolle, $r \geq 5 \text{ kPa} \cdot \text{s/m}^2\text{r}$		
5	2 x 12,5 mm	Gipsfaserplatte, $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ oder Feuerschutzplatte, $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$		
6	2 x 12,5 mm	Gipsfaserplatte, $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$ oder Feuerschutzplatte, $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$		
$\Sigma H = 213 \text{ mm}$		Gesamtmasse $m' =$	kg/m^2	

Trenndecken

Mit den untersuchten Bauteilaufbauten können nach dem hier zugrundgelegten Prognoseverfahren in keinem Fall die Anforderungen des erhöhten Trittschallschutzes erfüllt werden. Der Aufbau der Trenndecke „DE2“ kommt jedoch mit $L'_{n,w,R} = 46$ dB dem Anforderungsziel relativ nahe. Der hier gewählte Aufbau kann schallschutztechnisch nicht genau beurteilt werden. Die hier geführte Schallschutzprognose wurde mithilfe verschiedener Hersteller-Datenblätter geführt. Es besteht eine erhebliche Abhängigkeit der schallschutztechnischen Eigenschaften von dem jeweiligen Produkt hinsichtlich des Holz-Beton-Verbundelementes als Rohdecke. Somit sind zur genaueren Prognose weitere Abstimmungen mit einem im konkreten Fall ausgewählten Produkthersteller zu führen, so dass der Deckenaufbau zu Erreichung des Anforderungsziels angepasst werden kann. Die relativ große Annäherung an den Grenzwert zum erhöhten Schallschutz zeigt, dass mit dem nachfolgend aufgeführten Bauteilaufbau die Einhaltung der Anforderungen möglich ist. Sollte jedoch durch die Abstimmung mit ausgewählten Produktherstellern keine Planungssicherheit entstehen, werden für eine genaue Beurteilung schallschutztechnische Messungen mit dem gewählten Deckenaufbau zu empfehlen. Dies kann in praxisgetreuen Laborversuchen oder durch eine Baustellenmessung bzw. durch eine Kombination aus beiden erfolgen.

Deckenaufbau DE2 mit $L'_{n,w,R} = 46$ dB

Deckenaufbau von oben nach unten			Flächenbezogene Masse m' in kg/m^2 ⁽¹⁾	Skizze zum Bauteil: 
1		Belag		
2	70 mm	Zementestrich, $\rho' = 2100 \text{ kg/m}^3$	147,0 kg/m^2 ⁽¹⁾	
3	40/45 mm 50 mm	Trittschalldämmung, MW, $s' \leq 6 \text{ MN/m}^3$ + Ausgleichschicht mit EPS Dämmung, $s' \leq 20 \text{ MN/m}^3$		
4	≥ 60 mm	Beton, $\rho' = 2300 \text{ kg/m}^3$	1.380,0 kg/m^2 ⁽¹⁾	
5	260 mm	Massivholzplatte z.B. BBS, $\rho' = 450 \text{ kg/m}^3$	117,0 kg/m^2 ⁽¹⁾	
$\Sigma H = 480$ mm		Gesamtmasse $m' =$	1.602,0 kg/m^2 ⁽¹⁾	

8.6 Nutzung von Entkopplungssystemen

Hinsichtlich der Verbesserung des Trittschallschutzes sind insbesondere die Möglichkeiten der Reduzierung der Flankenübertragung (Korrekturfaktoren K1 und K2) durch den Einsatz von elastischen Zwischenschichten in den Bauteilknoten. Hierbei sind insbesondere die Verbindungen zwischen Trenndecken und den darunterliegenden Wänden von Bedeutung.

Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass auch bei elastischen Lagerungslösungen die bauakustische Verschlechterung von Konstruktionen durch die Anordnung von Verbindungsmitteln erheblich ist. In entsprechenden Forschungsergebnissen [63] konnte dies messtechnisch eindeutig nachgewiesen werden. Während das effizienteste Baulager zu Verringerungen von $L'_{n,w}$ um bis zu 8 dB führt, erhöht sich der Wert durch die Verschraubung wieder um 6 dB, was nur noch einer Verbesserung von 2 dB entspricht.

Dies würde jedoch im vorliegenden Falle der Trenndecke DE2 bereits ausreichen, um von dem prognostizierten Trittschallschutzwert mit $L'_{n,w,R} = 46$ dB auf das Niveau der Anforderung des erhöhten Trittschallschutzes von $L'_{n,w,R} = 44$ dB zu gelangen.

Generell ist die Reduzierung der Verbesserung durch elastische Zwischenschichten bei Anordnung von Verbindungsmitteln abhängig von der akustischen Qualität des Lagers, dem Aufbau des Trennbauteils und der Flankenbauteile sowie der Einbausituation.

Ein Zusammenhang besteht dabei auch zwischen der Verschlechterung und der Anzahl der eingebauten Verbindungsmittel. Z.B. konnte aus Schallmessungen ermittelt werden, dass eine Verdopplung der Anzahl von Winkelverbindern, welche bei höheren Windlasten erforderlich sind, zur Verschlechterung des Luftschallschutzes von Bauteilen um 3 dB zur Folge hatte. Ähnliche Zusammenhänge sind im Hinblick auf den Trittschallschutz ebenfalls anzunehmen.

Im Rahmen der Errichtung von mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise sind die Aspekte der schallschutztechnischen Entkopplung von Bauteilverbindungen von großer Bedeutung. Für Gebäude der Gebäudeklasse 4, in der bis zu fünf Geschosse realisierbar sind, ist es möglich die Anzahl und Dimensionierung der Verbindungen so zu auszurichten, dass mit schalltechnisch entkoppelten Verbindungsmitteln die vorgenannten Verbesserungseffekte erzielt werden können. Im Rahmen der konkreten Entwicklung eines Hochhauses in Holzbauweise mit 10 bis 12 Geschossen müssen Anschlüsse und Verbindungen in erster Linie darauf ausgerichtet sein, die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Gebäudes sicherzustellen. Inwiefern hier schalltechnisch entkoppelte bzw. optimierte Verbindungen möglich sind, die mit vertretbarem technischen und wirtschaftlichem Aufwand zu angemessenen Verbesserungsergebnissen führen, muss im konkreten Fall näher untersucht werden.

9 Feuchteschutz

Hinsichtlich des Feuchteschutzes ist grundsätzlich zwischen dem äußeren Feuchteschutz und dem inneren Feuchteschutz zu unterscheiden. Hier ergeben sich im Hochhausbau insbesondere in den oberen Geschossen Bedingungen, die über den bisherigen mehrgeschossigen Holzhausbau hinausgehen.

9.1 Äußerer Feuchteschutz

Das Grundkonzept der angedachten Gebäudetypen lässt zunächst die Auswahl zwischen zwei grundsätzlichen Fassadentypen zu. Dies sind zum einen Wärmedämm-Verbundsysteme und zum anderen vorgehängte hinterlüftete Fassadensysteme. Bei den hinterlüfteten Fassadensystemen erfolgt nochmals eine Unterscheidung hinsichtlich der äußeren Bekleidung. Diese kann aus witterungsbeständigen, klein- oder großformatigen Fassadenplatten oder aus einer Putzträgerplatte mit anschließend aufgebrachtem Putzsystem bestehen.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wird keine prinzipielle Festlegung auf ein bestimmtes Fassadensystem vorgenommen, da dies Aufgabe der konkreten Planung eines auszuführenden Projektes ist. Es sollen in kurzer Darstellung die wesentlichen Anforderungen und Merkmale der genannten drei Fassadensysteme im Zusammenhang auf deren Verwendung im Hochhausbau gegenübergestellt werden. Diese Gegenüberstellung soll insbesondere als Entscheidungsgrundlage für die Systemauswahl im konkreten Fall sein.

9.1.1 Anforderungen an den Witterungsschutz

Neben gestalterischen und ästhetischen Anforderungen müssen die Fassaden vor allem Schutzfunktionen für das Gebäude erfüllen. Die tragende und raumbildende Konstruktion muss vor Feuchte, besonders vor Schlagregen, Temperatureinwirkungen, so wie vor Sonneneinstrahlung und Wind, geschützt werden. Schlagregenbeanspruchungen von Wänden entstehen bei Regen und gleichzeitiger Windanströmung auf eine Fassade und stellen den maßgebenden Schutzparameter für die Wirkung einer Fassade dar. Das auftreffende Regenwasser kann durch kapillare Saugwirkung der Oberfläche in die Wand aufgenommen werden oder infolge des Staudrucks z.B. über Risse, Spalten oder fehlerhafte Abdichtungen in die Konstruktion eindringen. Die erforderliche Abgabe des aufgenommenen Wassers durch Verdunstung, z. B. über die Außenoberfläche, darf nicht unzulässig beeinträchtigt werden.

Der Schlagregenschutz einer Wand kann durch konstruktive Maßnahmen (z. B. Außenwandbekleidung, Verblendmauerwerk, Schutzschichten im Inneren der Konstruktion) oder durch Putze bzw. Beschichtungen erzielt werden. Die zu treffenden Maßnahmen richten sich nach der Intensität der Schlagregenbeanspruchung, die durch Wind und Niederschlag sowie durch die örtliche Lage und die Gebäudeart bestimmt wird.

Die Konstruktion der hier angedacht Hochhausbauten in Holzbauweise soll in die Gebrauchsklasse 0 nach DIN 68800:2012-02 eingestuft werden, um vorbeugend chemischen Holzschutz in allen Bauteilen zu vermeiden. Dazu ist die Konstruktion dauerhaft trocken zu halten und für alle Fassadenbauteile in großer Höhe ein gesondertes Feuchte-Sicherheitskonzept aufzustellen. Gemäß Anhang C DIN 4108-3 ist der vorgesehene Standort der angedachten Gebäude der Schlagregen-Beanspruchungsgruppe III - starke Schlagregenbeanspruchung (Küstengebiete) – zuzuordnen. Gemäß Abschnitt 5.2.4 DIN 4108-3 ist diese definiert durch Jahresniederschlagsmengen über 800 mm. Des Weiteren sind windreiche Gebiete auch mit geringeren Niederschlagsmengen (z. B. Küstengebiete, Mittel- und Hochgebirgslagen, Alpenvorland) sowie für Hochhäuser oder für Häuser in exponierter Lage dieser Beanspruchungsgruppe zuzuordnen. Dies auch, wenn solche Gebäude in Gebieten stehen, die aufgrund der regionalen Regen- und Windverhältnisse einer mittleren Schlagregenbeanspruchung zuzuordnen wären. Demnach sind Hochhäuser standortunabhängig grundsätzlich der Beanspruchungsgruppe III zuzuordnen.

Eine Befeuchtung des Bekleidungsmaterials oder der dahinter befindlichen Schichten ist unschädlich, wenn durch geeignete konstruktive Maßnahmen diese Feuchtemengen wieder an die Umgebung abgeführt werden. Hierbei geht es somit in erster Linie um die Vermeidung von sogenannten Feuchtenestern.

Hierzu sind zwei wesentliche Anforderungen zu erfüllen:

- Möglichst ungestörte Ableitung des auftreffenden Niederschlagswassers sowohl in der Fassadenfläche als auch im Bereich von Anschlüssen und Übergängen
- Entkopplung von bewitterter Fassadenoberfläche und Wandkern im Hinblick auf die Vermeidung von erhöhten Feuchtebelastungen in diesem Bereich (Umkehrdiffusion).

Ist die Fassadenebene durch horizontale oder vertikale Fugen unterbrochen, muss in Abhängigkeit zur baulichen Situation ein erhöhter Feuchteeintrag in den Luftzwischenraum konstruktiv berücksichtigt werden.

Gemäß Tabelle 3 DIN 4108-3 gelten für die Beanspruchungsgruppe III durch die hier betrachteten Fassadensysteme folgende Anforderungen und technische Regeln

- Wärmedämm-Verbundsysteme:
 - Wärmedämmverbundsystem mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ),
 - Anwendbarkeit in der Beanspruchungsgruppe III muss durch abZ belegt werden
- Vorgehängte hinterlüftete Außenwandbekleidung mit Putzsystem
 - hinterlüftete Außenwandbekleidungen nach DIN 18516-1
 - mit wasserabweisendem Außenputz nach DIN 18550-1 bis DIN 18550-4 oder Kunstharzputz nach DIN 18558
- Für vorgehängte hinterlüftete Außenwandbekleidungen aus
 - hinterlüftete Außenwandbekleidungen nach DIN 18516-1
 - aus großformatigen Elementen mit einer Einzelfläche von $> 0,40 \text{ m}^2$
 - Prüfung der Schlagregendichtheit nach DIN EN 12155

9.1.1.1 Besondere Anforderungen an vorgehängte hinterlüftete Fassaden

Hinterlüftete Außenwandbekleidungen bestehen aus

- Bekleidungen mit offenen oder geschlossenen Fugen, sich überdeckenden Elementen bzw. Stößen;
- Unterkonstruktionen (z.B. Trag- und gegebenenfalls Wandprofilen aus Metall, Holzlaten (Traglaten), Konterlaten (Grundlaten));
- Halterungen (Verankerungs-, Verbindungs-, Befestigungselementen);
- Zubehörteilen (z. B. Anschlussprofile, Dichtungsbänder, thermische Trennelemente);
- Hinterlüftungsspalt;
- ggf. Wärmedämmung mit Dämmstoffhaltern.

Eine vorgehängte hinterlüftete Außenwandbekleidung bildet eine Wetterschutzschale, die über eine tragende Unterkonstruktion kraftschlüssig auf einer raumabschließenden Wand (Außenwand) montiert wird.

Dabei handelt es sich in der Regel um Fassadensysteme, die aus Bekleidung mit offenen, geschlossenen oder überlappten Fugen bzw. Stößen bestehen können, gemäß DIN 18516-1.

Zwar heißt es in der Fußnote a) zu Tabelle 3 DIN 4108-3 in Bezug auf offene Fugen zwischen den Bekleidungsplatten, dass diese den Regenschutz nicht beeinträchtigen. Im Hinblick auf die besonderen Schlagregenbelastungen auf die Fassaden mit zunehmender Gebäudehöhe, sind jedoch besondere Vorkehrungen hinsichtlich des Witterungsschutzes zu treffen. Dabei sollte unabhängig vom Fassadensystem, mit oder ohne offene Fugen, von der Möglichkeit des Wassereintritts in den Luftraum zwischen Außendämmung und Außenwandbekleidung gerechnet werden. Tropfbares Wasser kann an dieser Stelle zum Einen aufgrund des Durchschlagens von Schlagregen durch planmäßig offene Fugen entstehen. Unter bestimmten Witterungsbedingungen ist es jedoch auch möglich, dass feucht-kalte Luft in den Luftzwischenraum auskondensiert und sich dieses Kondensat an der Wandaußenseite niederschlägt. Für beide Szenarien ist demnach auf der Oberfläche der Außendämmung unbedingt die Anordnung einer wasserableitenden Schicht vorzusehen. Diese wird an dieser Stelle i.d.R. durch eine geeignete Fassadenbahn hergestellt, die grundsätzlich folgende Eigenschaften aufzuweisen hat:

- geprüfte Wasserdichtheit W1 nach, EN 13859-1 und -2
- dauerhafte UV-Beständigkeit (Insbesondere bei Außenwandbekleidungen mit offenen Fugenteilen)
- s_d -Wert ca. 0,02 m, geprüft nach DIN 52615
- hohe Reißfestigkeit, geprüft nach EN 12311-2
- Brandverhalten mindestens Baustoffklasse E nach DIN EN 13501-1
- Temperaturbeständigkeit -40 °C bis +80 °C

Des Weiteren kann eine solche Fassadenbahn die Durchströmung der äußeren Dämmschicht verhindern, sofern die Fassadenbahn mit ausreichenden Überlappungen verlegt und an den Überlappungen verklebt wird. Hier werden derzeit Bahnen mit selbstklebenden Rändern oder geeignete Klebebänder zur Verklebung der Überlappung angeboten.

9.1.1.2 Brandschutz für vorgehängte hinterlüftete Fassaden

Vorgehängte hinterlüftete Außenwandbekleidungen weisen i.d.R. geschossübergreifende Hohl- oder Lufträume auf. Hierbei sind besondere brandschutztechnische Vorkehrungen zu treffen, die Anlage 2.6/4 zu DIN 18516-1 der Musterliste der Technischen Baubestimmungen wie folgt beschrieben sind:

Hinterlüftete Außenwandbekleidungen bestehen aus

- Bekleidungen mit offenen oder geschlossenen Fugen,
- sich überdeckenden Elementen bzw. Stößen;
- Unterkonstruktionen (z.B. Trag- und gegebenenfalls
- Wandprofilen aus Metall, Holzlatten (Traglatten), Konterlatten

- (Grundlatten));
- Halterungen (Verankerungs-, Verbindungs-, Befestigungselementen);
- Zubehörteilen (z. B. Anschlussprofile, Dichtungsbänder,
- thermische Trennelemente);
- Hinterlüftungsspalt;
- ggf. Wärmedämmung mit Dämmstoffhaltern.

Abweichend von § 28 Abs. 3 Satz 1 MBO muss die Wärmedämmung nichtbrennbar sein. Die Dämmstoffe sind entweder mechanisch oder mit einem Klebemörtel, der schwerentflammbar ist oder einen Anteil von nicht mehr als 7,5 % an organischen Bestandteilen aufweist, auf dem Untergrund zu befestigen.

Die Tiefe des Hinterlüftungsspalt es darf bei Verwendung einer Unterkonstruktion aus Metall nicht größer sein als 150 mm. Da Außenwandbekleidungen von Hochhäusern inklusive der Unterkonstruktion aus nicht brennbaren Baustoffen bestehen müssen, wird von einer Unterkonstruktion aus Metall ausgegangen.

Brandsperren dienen der Begrenzung der Brandausbreitung im Hinterlüftungsspalt über eine ausreichend lange Zeit durch Unterbrechung oder partielle Reduzierung des freien Querschnitts des Hinterlüftungsspalts. In jedem zweiten Geschoss sind horizontale Brandsperren im Hinterlüftungsspalt anzuordnen. Die Brandsperren sind zwischen der Wand und der Bekleidung einzubauen. Bei einer außenliegenden Wärmedämmung genügt der Einbau zwischen dem Dämmstoff und der Bekleidung, wenn der Dämmstoff im Brandfall formstabil ist und einen Schmelzpunkt von $> 1.000\text{ °C}$ aufweist.

9.1.1.3 Wärmedämm-Verbundsysteme

Wärmedämm-Verbundsysteme, die für den Einsatz im Hochhausbau geeignet sind bestehen im Wesentlichen aus folgenden Bestandteilen:

- Dämmplatten auf Mineralfaserbasis nach DIN EN 13162 mit den folgenden Eigenschaften gemäß Bezeichnungsschlüssel dieser Norm
 - T5 - DS(T+) - WL(P)
 - definierte Druckfestigkeit oder einer Druckspannung bei 10 % Stauchung nach DIN EN 826 , definierte Querkzugfestigkeit nach DIN EN 1607
 - definierte Scherfestigkeit nach DIN EN 12090
 - definierter Schubmodul nach DIN EN 12090
 - Nachweis der Nichtbrennbarkeit DIN 4102-2 oder DIN EN 13501-2
 - nachgewiesenes Glimmverhalten gemäß Bauregelliste B, Teil 1 , Anlage 1/5.2
 - Die Verwendung ist durch die Chemikalien-Verbotsverordnung vom 19. Juli 1996 (Bundesgesetzblatt Teil I S. 1151), zuletzt geändert gemäß der Bekanntmachung vom 25. Mai 2000 (Bundesgesetzblatt Teil I S. 747) nicht untersagt

- Bewehrungen aus speziellem Gittergewebe nach den Angaben der jeweiligen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung
- Unterputz, der die Eigenschaften gemäß den Angaben in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung ausweist
- Haftvermittler, der zwischen Unter- und Oberputz angeordnet wird und den Angaben in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung entsprechen muss
- Oberputz, der die Eigenschaften gemäß den Angaben in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung ausweist
- Zubehörteile, wie z. B. Sockel-, Kanten- und Fugenprofile, die aus mindestens aus normalentflammbaren Baustoffen bestehen müssen.

Die Zusammensetzung der Putze und Haftvermittler muss mit den beim Deutschen Institut für Bautechnik hinterlegten Rezepturen und weiteren Angaben übereinstimmen.

Um den ausreichenden Witterungsschutz für die Konstruktion dauerhaft zu gewährleisten, sind für den hier diskutierten Anwendungsfall ausschließlich wasserabweisende Putzsysteme anzuwenden.

Wasserabweisende Putzsysteme erfüllen die Anforderungen nach Abschnitt 7.4.2.2 DIN V 18550. Demnach gelten Putzsysteme als wasserabweisend, wenn sie nach Tabelle 2, Zeile 17 bis 24 DIN V 18550, aufgebaut sind und die wasserabweisenden Eigenschaften nachgewiesen werden. Hierzu muss (müssen) die den Regenschutz hauptsächlich bewirkende(n) Putzlage bzw. Putzlagen bei der Prüfung an dem entsprechenden Mörtel oder Putz nach Anhang A DIN V 18550 folgende Anforderungen erfüllen:

a) $w \cdot s_d \leq 0,2 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{h}^{0,5})$

b) $w \cdot 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$

Diese Anforderung gilt bei mineralischen Putzen auch als erfüllt, wenn bei der Prüfung nach 28 d der Wasseraufnahmekoeffizient bis um den Faktor 2 größer ist; bei der Ermittlung von $w \cdot s_d$ wird in diesem Fall der Wasseraufnahmekoeffizient w mit $0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$ angesetzt.

c) $s_d \leq 2,0 \text{ m}$

Dabei ist

w der Wasseraufnahmekoeffizient in $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{0,5})$;

s_d die diffusionsäquivalente Luftschichtdicke in m

9.1.1.4 WDVS für den Hochhausbau

Wärmedamm-Verbundsysteme unterliegen in ihrer Anwendbarkeit für bestimmte Gebäudeklassen einer Kategorisierung in höhenbezogene Anwendungsbereiche. Die für die Verwendung von WDVS zulässige Gebäudehöhe ergibt sich aus den jeweils geltenden Brandschutzvorschriften der Länder (LBO).

Grundsätzlich wurde in den Landesbauordnungen der Länder das System der Gebäudeklassen 1 - 5 aus der Musterbauordnung 2002 übernommen.

Daraus ergeben sich für die Baustoffklassen der WDVS die in Tabelle 34 aufgeführten Mindestanforderungen:

Tabelle 34 Anforderungen an die Baustoffklasse von Außenwandbekleidungen nach Bauordnung

Gebäudeklasse	Baustoffklasse der Fassade nach Bauordnung	Baustoffklasse der Fassade für Holzbauten
GK 1	B2	B2
GK 2	B2	B2
GK 3	B2	B2
GK 4	B1	B1 (B2 mit besonderen Maßnahmen mögl.)
GK 5	B1	A (B1 mit besonderen Maßnahmen mögl.)
Hochhäuser	A	A

Im Regelfall können somit an Gebäuden bis zur Hochhausgrenze schwerentflammbare WDVS eingesetzt werden, sofern es sich nicht um Sonderbauten mit speziellen Anforderungen handelt. WDVS mit Mineralwolle-Dämmplatten oder Mineralwolle-Lamellen nach DIN EN 13162 sowie Mineralschaum-Dämmplatten sind als nichtbrennbare Baustoffe eingestuft. Solche WDVS können demnach auch an Hochhäusern eingesetzt werden.

9.1.2 Auswahl geeigneter Fassadensysteme und –konstruktionen zur Sicherstellung des ausreichenden äußeren Feuchteschutzes

Die bisher am Markt erhältlichen Standardlösungen für Fassaden an Holzkonstruktionen sind i.d.R. für den Einsatz in Gebäuden mit 1-4 Stockwerken entwickelt worden und können nicht direkt auf den Hochhausbau, der sehr viel höhere Anforderungen im Hinblick auf die Schlagregenbelastung die statischen Anforderungen aufweist. Bei der Auswahl des Fassadensystems bedarf es somit der Gegenüberstellung der wesentlichen Systemeigenschaften allgemein und im Hinblick auf deren Einsatz als Fassade für ein Hochhaus in Holzbauweise. Die Feuchteschutzwirkung ist dabei zwar eine grundsätzliche, jedoch nicht die alleinentscheidende Größe.

Naturgemäß ergeben sich mit steigender Gebäudehöhe in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Gesamtkonstruktion eine Erhöhung der absoluten Verformungen des Gebäudes. Dies wirkt sich insbesondere auf die horizontalen Auslenkungen der oberen Gebäudebereiche aus. Je nach Fassadensystem besteht eine die Außenfassade aus zusammenhängenden Flächen, welche den zu erwartenden Gebäudeverformungen schadensfrei standhalten müssen. Es ist davon auszugehen, dass Trennfugen zur Spannungsminimierung innerhalb der Fassadenflächen unabdingbar sind. Es ist zu untersuchen, welche Ausführung solcher Trennfugen zu einem dauerhaften und sicheren Witterungsschutz geeignet sind. Dabei ist zu berücksichtigen, ob Erfahrungen aus dem bisherigen mehrgeschossigen Holzhausbau unterhalb der Hochhausgrenze auf die Anforderungen und Beanspruchungen an Hochhausbauten übertragbar bzw. skalierbar sind.

Tabelle 35 Gegenüberstellung der in Frage kommenden Fassadensysteme

System Kriterium	Wärmedämm- Verbundsystem auf Mineralfaserdämmung	vorhängte hinter- lüftete AW- Bekleidung mit Putzbe- schichtung	vorhängte hin- terlüftete AW- Bekleidung aus Fassaden- platten
Wirtschaftlichkeit	Kosten 100,- € - 130,- €	150,- € – 200,- €	150,- € – 200,- €
	(+)	(-)	
Witterungsschutz	Putzschicht mit direktem Kontakt zur Dämmebene	2 wasserführende Ebenen aus AW-Bekl. und Fassadenbahn vor der Dämmschicht	
	(-)	(+)	
Brandschutz	Das System bildet insgesamt eine geschlossene, hohlraumfreie Ebene aus nichtbrennbaren Baustoffen und erfordert kaum zusätzliche Maßnahmen zur Vermeidung der geschossübergreifenden Brandweiterleitung	Das System weise eine geschossübergreifende Luftschicht auf, so dass besondere Maßnahmen zur Vermeidung der geschossübergreifenden Brandweiterleitung erforderlich sind (horizontale Brandsperrern aus Schürzen o. Dämmstreifen)	
	(+)	(-)	
Standsicherheit	Begrenzung der max. Windsogbeanspruchungen, evtl. Verwendbarkeitseinschränkungen und Erfordernis einer ZiE für vorgesehenen Anwendungsfall (Windsog ca. 2,3 kN/m ²)	Auslegung der erf. Unterkonstruktion kann i.d.R. ohne weiteres rechnerisch ermittelt werden.	
	(-)	(+)	
Robustheit	Hohe Empfindlichkeit gegen Bewegung in der Gebäudestruktur. → Evtl. zus. Anordnung von Entspannungsfugen erforderlich	Reduzierte Empfindlichkeit gegen Bewegung in der Gebäudestruktur durch Spannungsabbau in der Unterkonstruktion	Hohe Robustheit gegen Bewegung in der Gebäudestruktur durch planmäßige Fugen (Elementfugen) und Spannungsabbau in der Unterkonstruktion
	(-)	(+)	
Brandschutz, Vermeidung von Brandweiterleitung	Geringer Aufwand zur Vermeidung von Brandweiterleitung durch allgemein nicht brennbare Ausführung (MiFa + Putz)	erhöhter Aufwand durch Einbau von Brandsperrern erforderlich	
	(+)	(-)	

System Kriterium	Wärmedämm- Verbundsystem auf Mineralfaserdämmung	vorhängte hinter- lüftete AW- Bekleidung mit Putzbe- schichtung	vorhängte hin- terlüftete AW- Bekleidung aus Fassaden- platten
äußerer Feuchte- schutz	Feuchteintrag in die äußeren Schichten der Dämmebene je nach w-Wert des Oberputzes möglich → Minderung der Dämmeigenschaften	Dämmebene ist durch zwei wasserableitende Ebenen gut geschützt, bleibt trocken und behält ständig → keine Störung der Dämmeigenschaften zu erwarten	
	(-)	(+)	
innerer Feuchte- schutz	Bauteil erhält durch raumseitige Nutzungsfeuchte, außenseitigen Feuchteintrag und möglicher Umkehrdiffusion unter ungünstigen Witterungsbedingungen mehr Feuchtebelastung	Anordnung von zwei wasserführenden Schichten und einer Belüftungsebene führt vorhandene Feuchte vor dem Eindringen in das Bauteil sicher ab	
	(-)	(+)	
Ausführungszeit- raum	Ausführung bei Außentemperaturen unter 5°C nicht möglich bzw. nicht empfohlen → jahreszeitliche Abhängigkeit der Ausführung	Ausführung jahreszeitlich weitgehend unabhängig	
	(-)	(+)	
Summe der Bewer- tungen	6 x (-) / 3 x (+)	3 x (-) / 6 x (+)	

9.1.3 Zusammenfassung Fassadensysteme

Bei der Auswahl des Fassadensystems für ein Hochhaus in Holzbauweise erfolgt zunächst eine Beschränkung auf sinnvoll einsetzbare Systeme im Hinblick auf die technische Ausführbarkeit und auf architektonische Vorgaben. Daher werden hier ausschließlich Wärmedämmverbundsysteme sowie vorgehängte Außenwandbekleidungen mit Putzbeschichtung oder aus Fassadenplatten in Betracht gezogen. Alle Systemkomponenten bestehen hierbei vollständig aus nichtbrennbaren Baustoffen. Die vorgegangenen Ausführungen zeigen auf, dass die betrachteten Systemvarianten unter technischen Gesichtspunkten und den gegebenen Anforderungen des Hochhausbaus jeweils sehr unterschiedliche Qualitäten aufweisen. Im Wesentlichen stehen hier die überwiegenden technischen Vorteile einer vorgehängten hinterlüfteten Außenwandbekleidung den wirtschaftlichen Vorteilen von Wärmedämmverbundsystemen gegenüber. Die Entscheidung für eines der hier betrachteten Fassadensysteme ist zu einem möglichst frühen Zeitpunkt des Planungsprozesses zu treffen, da die Auswahl des Fassadensystems wesentlichen Einfluss auf gestalterische und technische Parameter der weiteren Planung haben.

Des Weiteren besteht eine zentrale Problematik im Bereich des Witterungsschutzes von Gebäuden weniger in der Fläche einer Fassade, als vielmehr in den Detailpunkten der Übergänge von Fassaden zu Fenstern, Türen sowie an Rand und Bauteilabschlüssen.

Demnach wird von den Verfassern in Anbetracht der erhöhten Beanspruchungen in höheren und windreichen Lagen die Notwendigkeit zur Untersuchung bzw. Entwicklung von sicheren Lösungen für folgende Bereiche gesehen:

- Anschlüsse Fassade / Fenster- und Türrahmen
- Anschlüsse Wand / Fenster- und Türrahmen
- Anschlüsse Fassade / Fensterbänke
- Randabschlüsse von Fassaden
- Eckanschlüsse von Fassaden
- Sichere Abschlüsse und Übergänge an Bauteilfugen

In diesen Punkten ist somit weiterer und detaillierter Forschungsbedarf vorhanden, um zu sicheren Lösungen zu gelangen, die einen vollständigen und insbesondere dauerhaften Witterungsschutz für die Holzkonstruktion darstellen.

9.2 Innerer Feuchteschutz

Es ist sind die bauphysikalischen Prozesse in der Gebäudehülle unter Berücksichtigung der Gebäudehöhe im Zusammenhang mit thermischen Effekten und erhöhten Windeinflüssen zu untersuchen.

Die Verfahren zum Nachweis des Tauwasserschutzes im Inneren von Bauteilen legen zunächst ausschließlich die Feuchteverhältnisse in den Bauteilen zu Grunde, die aufgrund des Feuchteintrags infolge von Wasserdampfdiffusion durch die Bauteilschichten verursacht werden. Die Dampfkonvektion, d. h. das Einströmen feuchter Raumluft in ein Bauteil, wurde als zusätzlicher Faktor für Feuchteinträge in Bauteile in ihrer Wirkung lange Zeit unterschätzt.

Da sich die Dampfkonvektion jedoch im Gegensatz zur Dampfdiffusion nicht durch einfache rechnerische Ansätze abbilden lässt, wird entgegen besseren Wissens zunächst der Ansatz absolut luftdichter Bauteile verfolgt. Als Kompensation der realen, zusätzlichen Feuchteinträge aus leckagenbedingter Dampfkonvektion haben sich Begriffe wie Feuchtemanagement und Trocknungspotenzial in der Fachwelt etabliert, die ausdrücken sollen, dass eine Konstruktion in Bezug auf die Dampfdiffusion nur so dicht wie nötig, gleichzeitig aber so offen wie möglich ausgeführt werden sollte.

Der konvektive Eintrag von Feuchte über Fehlstellen in der Luftdichtheitsebene kann auch mit modernen hygrothermischen Simulationsverfahren nach EN 15026 nicht mit der Bauteildurchströmung selbst, sondern nur durch das ausfallende Tauwasser als zusätzliche Feuchtequelle innerhalb der Konstruktion rechnerisch abgebildet werden.

Eine nennenswerte Durchströmung von undichten Bauteilen findet nur statt, wenn die Druckverhältnisse dies ermöglichen. Die Luftdruckdifferenz über einem Bauteil ist die treibende Kraft für die Durchströmung. Solche Druckdifferenzen können folgende Ursachen haben:

- Windanströmung,
- Thermische Auftriebskräfte,
- Gesamtdruckunterschiede durch mechanische Lüftungsanlagen,
- Dunstabzüge und offene Feuerstellen.

Insbesondere die Windanströmung sowie die thermischen Auftriebseffekte sind abhängig von der Gebäudehöhe bzw. der zusammenhängenden Luftsäule im Gebäude.

Die bisherigen Analysen und Berechnungen sind i.d.R. von Standard-Ansätzen im niedrigeren Gebäudebereich ausgegangen, also für Gebäude bis zur Gebäudeklasse 4 mit einer Gebäudehöhe von ca. 16 m (13 m OKFF zzgl. einer Geschosshöhe). Holzbauten mit einer Gesamthöhe von rd. 33 m waren bisher nicht Gegenstand der Betrachtungen.

Die geografische Lage und insbesondere die Gebäudehöhe geben Anlass zur Untersuchung, welchen Einfluss die Gebäudehöhe auf die hygrothermischen Beanspruchungen der Gebäudehülle in den oberen Geschossen hat.

9.2.1 Einfluss des Windsogs auf die konvektive Feuchtebeanspruchung von Holzbauteilen

Auf Grundlage des Fachaufsatzes [64] wird den Untersuchungen das sog. Luftinfiltrationsmodell des IPB zugrunde gelegt. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass ausschließlich Windsogbeanspruchungen auf die Außenbauteile eine feuchtebelastende Wirkung haben. Im Gegensatz bewirkt Winddruck von außen, dass bestenfalls ein Zurückdrängen von Feuchte in den Raum hinein erfolgt. Äußerer Unterdruck, und damit Windsog, an Außenbauteilen ergibt sich an allen Bauteilen, die sich auf der windabgewandten sowie an der windparallelen Gebäudeseite befinden. Dies betrifft somit neben den Außenwänden auch die Dachbauteile.

Der Staudruck im ungestörten Bereich vor dem Gebäude lässt sich aus der Windgeschwindigkeit in Gebäudehöhe mit Hilfe der Bernoulli-Gleichung ermitteln:

$$q_p = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot u^2$$

mit:

q_p [Pa] Staudruck infolge Windanströmung

ρ [kg/m³] Dichte der Außenluft ($\rho = 1,3$ kg/m³)

u [m/s] Windgeschwindigkeit in Gebäudehöhe

Die mittlere Windgeschwindigkeit v_m nach DIN EN 1991-1-4 kann für die hier gestellte Fragestellung nicht direkt herangezogen werden, da diese lediglich das aus der Basisgeschwindigkeit ermittelte „10-Minuten-Mittel“ darstellt. Diese mittlere Windgeschwindigkeit v_m kann zunächst nach den Gleichungen aus DIN EN 1991-1-4 + NA ermittelt werden. Sie ergibt sich aus Gleichung (4.3) mit

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b.$$

Dabei ist

$c_r(z)$ Rauigkeitsbeiwert nach 4.3.2 = 1,36

$c_o(z)$ Topographiebeiwert; nach 4.3.3 = 1,0

z = Höhe über Grund, in die Windgeschwindigkeit ermittelt werden soll = 30 m

v_b Basiswindgeschwindigkeit, die sich nach Gleichung (4.1) ermitteln lässt = 27,5

Daraus folgt:

$$v_m(z) = 1,36 \cdot 1,0 \cdot 27,5 = 37,42 \text{ m/s}$$

Ein Jahresmittelwert der Windgeschwindigkeit kann nach DIN EN 1991-1-4 jedoch nicht ermittelt werden. Hierzu kann der Ansatz der DIBt-Richtlinie für Windenergieanlagen Einwirkungen und Standsicherheitsnachweise für Turm und Gründung, Fassung Oktober 2012, herangezogen werden. Dort wird in Abschnitt 7.3.2.2 „Betriebswindbedingungen“ das Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe von Windanlagen als v_{ave} nach Gleichung (GL 3) wie folgt berechnet

$$v_{ave} = 0,18 \cdot v_{b,0}(h)$$

$v_{b,0}(h)$ entspricht hierbei dem Grundwert der Basiswindgeschwindigkeit, ohne Modifikation durch die Geländetopographie auf Grundlage der Geländekategorie II. Da der Standort Flensburg jedoch der Geländekategorie I zuzuordnen ist, soll hier der entsprechend standortmodifizierte Wert der Windgeschwindigkeit $v_m(z)$ angewendet werden.

Daraus ergibt sich für das quadratische Jahresmittel der Windgeschwindigkeit im vorliegenden Fall

$$v_{ave} = 0,18 \cdot v_m(z) = 0,18 \cdot 37,42 = 6,73 \text{ m/s}$$

Im Rahmen der Berechnungen der mittleren Windgeschwindigkeit in der Norm ist grundsätzlich das quadratische Mittel der Windgeschwindigkeiten eines Jahres gemeint. Daher kann dieser

Da die Windgeschwindigkeit in der Gleichung zur Staudruckberechnung im Quadrat eingeht, lässt sich der mittlere Staudruck nicht unmittelbar aus der mittleren Windgeschwindigkeit, sondern nur aus den mittleren Quadraten der Geschwindigkeit berechnen.

Damit lässt sich ein mittlerer Staudruck $q_{p,m}$ ermitteln nach der o.a. Gleichung mit

$$q_{p,m} = 0,5 \cdot \rho \cdot v_m(z)^2 = 0,5 \cdot 1,25 \cdot 6,73^2 = 28,3 \text{ [Pa]}$$

Berücksichtigt man die entsprechenden Beiwerte aus DIN EN 1991-1-4, Tabelle 7.1 und Tabelle 7.2 — Empfohlene Außendruckbeiwerte - ergeben sich für die Windsog beanspruchten Bereiche des Gebäudes die äußeren Unterdruck-Werte $q_{p,i}$ nach Tabelle XX.

Aus frei erhältlichen Wetterdaten (z.B. http://de.windfinder.com/windstats/windstatistic_flensburg-schaeferhaus.htm) lässt sich ermitteln, dass am Standort Flensburg der Wind zu rd. 50% aus westlichen Richtungen (Nordwest bis Südwest) weht, so dass dies die anzusetzende Hauptwindrichtung ist. Um den Einfluss zu berücksichtigen, dass somit die maßgebenden Situationen von Windsog-belastungen auf die Außenbauteile nur zur Hälfte des Jahreszeitraumes auftreten, werden die berechneten Windsogbeanspruchungen mit dem Häufigkeitsfaktor „H“ von 0,5 (für 50% Anteil der Hauptwindrichtung) belegt.

Tabelle 36 Druckbeiwerte $q_{p,i}$ aus DIN EN 1991-1-4, Tabelle 7.1 und Tabelle 7.2 — Empfohlene Außendruckbeiwerte - für die Windsog beanspruchten Bereiche des Gebäudes

	Flächenbezeichn. nach Tab. 7.1 / 7.2	$q_{p,i}$ [Pa]	$q_{p,i,H}$ [Pa] aus $q_{p,i} \cdot H$ (mit $H=0,5$)
windparallele Wände	A	34,0	17,0
	B	22,6	11,6
	C	14,2	7,1
windabgewandte Wände	E	19,8	9,9
Flachdach	F	45,3	22,6
	G	31,1	15,6
	H	19,8	9,9
	I	5,7	2,9

Innerhalb eines natürlichen Schwankungsbereiches ist die Windeinwirkung im Rahmen der Hauptwindrichtung zwar als veränderlich zu betrachten, jedoch sind die Beiwerte der Tabellen 7.1 und 7.2 bereits für einen Schwankungsbereich von 90° definiert.

Für die Dampfkongvektion sind in erster die Differenzdrücke über dem jeweiligen Bauteil relevant. Der Luftdruck im Gebäude ist jedoch abhängig von der Summe der Oberflächendrücke und der Luftdurchlässigkeiten der einzelnen Bauteile. Wenn Zwischenwände und -decken einen ungehinderten Luftaustausch verhindern, dann stellen sich in den Räumen auf der Luv-Seite höhere Drücke ein als auf der Lee-Seite. Sind keine dichten Zwischenwände vorhanden und wird auf der Luv-Seite ein Fenster geöffnet stellt sich im gesamten Gebäude ein Überdruck ein. Ist das Fenster hingegen auf der Lee-Seite geöffnet entsteht ein Unterdruck. Mit anderen Worten, die Druckverhältnisse im Gebäude sind sehr komplex und nur bedingt modellierbar. In jedem Fall führen sie dazu, dass die Differenzdrücke über den einzelnen Bauteilen kleiner sind als die oben errechneten Staudrücke an den Außenoberflächen.

Demnach ist damit zu rechnen, dass der Einfluss des Windsogs, und damit der verstärkte Feuchteeintrag in das Bauteil, nicht jeweils konzentriert in den nach DIN EN 1991-1-4 definierten Flächen stattfindet. Zudem sind Feuchteausgleichsbewegungen im Innenraum in die Überlegungen einzubeziehen, so dass ein erhöhter Feuchteabzug durch ein stark unterdruckbelastetes Bauteil zur Nachströmung von Feuchtigkeit aus anderen Räumen führt. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Effekte eine ausgleichende Wirkung auf die betrachtete Gebäudehülle insgesamt haben. Demnach ist auch mit einer Verteilung des Windsogeinflusses auf die jeweils gesamte Wand- oder Dachfläche zu rechnen, so dass aus den hier berechneten Einzelwerten jeweils ein arithmetischer Mittelwert gebildet wird.

Damit ergeben sich für die durch Windsog beanspruchten Bauteile die in nachfolgender Tabelle 27 aufgeführten mittleren Windsogbelastungen.

Tabelle 37 Mittlere Windsogbelastungen für die durch Windsog beanspruchten Bauteile

	Flächenanteil nach Bild 7.5 / 7.6	$q_{p,i,H,m}$ [Pa]
windparallele Wände	A	17,0
	B	11,6
	C (Einfluss = 0 aus durch Gebäudegeometrie)	(7,1)
$q_{p,m,1}$		14,3
windabgewandte Wände	E	9,9
$q_{p,m,2}$		9,9
Flachdach	F	22,6
	G	15,6
	H	9,9
	I	2,9
$q_{p,m,3}$		12,8

Die windinduzierten und die thermischen Druckdifferenzen, die als Antriebskräfte für die Dampfkonzektion in Frage kommen, erreichen im Mittel häufig eine ähnliche Größenordnung. Für das Konvektionsmodell der instationären Feuchteberechnung mit WUFI® 5.2 werden zunächst ausschließlich die thermischen Auftriebskräfte berücksichtigt.

In der verwendeten Software besteht jedoch die Möglichkeit im Rahmen der Anwendung des Luftinfiltrationsmodells einen raumseitigen Überdruck z.B. aus raumlufttechnischen Anlagen zu berücksichtigen. Eine Windsogwirkung auf ein Bauteil kann hinsichtlich der feuchteeintragenden Wirkung auf das Bauteil und dessen unvermeidlichen Leckagenanteil wie ein raumseitiger Überdruck betrachtet werden. Somit werden bei den Berechnungen die für die jeweiligen Bauteile berechneten Windsogwerte als zusätzlicher raumseitiger Überdruck einbezogen.

Da das Gebäude grundsätzlich als Passivhaus, oder zumindest im Bereich des Passivhausstandards, konzipiert werden soll, wird für die Bauteilberechnung die Luftdichtheitsklasse A angesetzt. Diese legt für die Bauteile und deren Anschlüsse eine Durchströmung der Gebäudehülle von $q_{50} = 1,0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ sowie einen Durchlässigkeitskoeffizienten Bauteil $KCL = 0,0015 \text{ m/hPa}$ zugrunde.

9.2.2 Methodik und Ansätze der hygrothermischen Berechnung

Die Berechnungen erfolgten mit einer Berechnungsmethodik nach den Vorgaben der DIN EN 15026, die den gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport bei instationären Klimarandbedingungen berücksichtigen. Das angewendete Berechnungsverfahren der numerischen Simulation des Wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens von Bauteilen berücksichtigt die vorherrschenden, veränderlichen Klimabedingungen, insbesondere Strahlungseinflüsse, sowie die feuchteabhängigen Materialeigenschaften der untersuchten Bauteile.

Die Berechnungen werden mit der vom Institut für Bauphysik (IBP), Holzkirchen, entwickelten Software WUFI-Pro (Version 5.2) durchgeführt. Das Programm basiert auf einem nach DIN EN 15026 anerkannten Berechnungsverfahren.

Die eindimensionale Berechnung bindet die feuchtevariablen Materialeigenschaften sowie z.B. durch die Bauphase hervorgerufene erhöhte Materialfeuchtigkeiten ein und berücksichtigt außerdem regelmäßige Feuchteinträge aufgrund der baupraktischen Unzulänglichkeiten bei der Ausbildung von Luftdichtheitschichten. Eine eindimensionale Untersuchung der Bauteile liefert hierbei ausreichend genaue Ergebnisse.

9.2.3 Feuchteeintrag

In DIN 68800-2:2012-02 wird für den Nachweis des Feuchteschutzes nach DIN 4108-3 (Glaser-Verfahren) bei allseitig geschlossenen Bauteilen in Holzbauart grundsätzlich eine jährliche sog. „Trocknungsreserve“ von 100 g/m^2 für Wandbauteile und 250 g/m^2 für Dachbauteile gefordert. Damit sollen insbesondere unplanmäßige Feuchteinträge z.B. infolge kleiner Leckagen in der Luftdichtheitsebene Berücksichtigung finden. Beim Nachweis mit numerischen Simulationsverfahren nach DIN EN 15026 ist der konvektive Feuchteeintrag entsprechend der geplanten maximalen Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle mit dem q_{50} -Wert nach DIN 4108-7 in Rechnung zu stellen.

Die Luftdichtheitsklassen A - C nach DIN EN 1507 werden grundsätzlich für Bauteile der Lüftungstechnik verwendet, können jedoch auf andere Bauteile übertragen werden, um die Luftdurchlässigkeit der Gebäudehülle zu definieren. Klasse A entspricht dabei dem Grenzwert für ein Gebäude mit kontrollierter Lüftung und Wärmerückgewinnung nach DIN 4108-7 ($n_{50} \leq 1,0 \text{ h}^{-1}$). Klasse B spiegelt die Mindestanforderungen der Bonusregelung der deutschen Energieeinsparverordnung für ein luftdichtes Gebäude wieder ($n_{50} \leq 3,0 \text{ h}^{-1}$), während Klasse C - ohne Nachweis - in etwa dem Mindeststandard des Bestandes an neueren Holzhäusern in Deutschland ($n_{50} \leq 5,0 \text{ h}^{-1}$) zugeordnet werden kann.

Für die untersuchten Bauteile wird im Hinblick auf die anzustrebende energetische und technische Qualität des Gebäudes gemäß den vorangegangenen Erläuterungen die Luftdichtheitsklasse A für Gebäude für Gebäude in oder nahe der Passivhaus-Qualität angesetzt. Für die anzusetzende Luftsäule wird eine in Ein- und Zweifamilienhäusern anzusetzende lichte Volumenhöhe von 5,0 m angenommen.

Der Feuchteeintrag wird bei der hygrothermischen Berechnung in den unteren 5 mm der jeweils äußeren Bauteilschicht angesetzt, da in dieser Bauteilschicht die potentielle Tauwasserbildung innerhalb eines Jahreszyklus zu erwarten ist. Unter diesen Ansätzen wird die ausreichende bauphysikalische Robustheit des Bauteils überprüft.

9.2.4 Berechnungsgrundlagen

9.2.4.1 Allgemeines

Für die Berechnungen wurden die in nachfolgender Tabelle 28 aufgeführten Ansätze und Daten verwendet. Weitere Angaben hierzu sind den Anlagen 1- 4 zur jeweiligen Bauteilberechnung zu entnehmen.

Tabelle 38 Ansätze und Rechenwerte für die hygrothermische Berechnung

Parameter	Ansatz / Wert	Anmerkung
Klimabedingungen außen	Bremerhaven	Vergleichbare bzw. leicht anspruchsvolleres Klima gegenüber dem Standortklima (hohe Niederschlagswerte, hoher Wind- u. Schlagregenbeanspruchung, relativ niedrige Strahlungseinträge)
Klimabedingungen innen	normale Feuchtelast n. WTA-Merkblatt 6-2-01/D	Sinusverlauf: 20 – 22°C , 40 – 60% rel. LF gilt als übliches Wohnklima
Ausrichtung der Bauteils	Wände: 90° Nord und Ost Dach, Loggia: 3° Nord	Gemäß Klimaanalyse bzw. unter Betrachtung der Hauptwindrichtung ergeben sich in dieser Richtung die ungünstigsten Bedingungen (Allgemeingültigkeit auf Grundlage der „Worst-Case-Annahme“)
Strahlungsabsorption	Wände: $\alpha = 0,4$ (= 40%) Dächer: $\alpha = 0,88$ (= 88%) / $\alpha = 0,4$ (= 40%) Loggia: $\alpha = 0,0$	Wände: Für Putzoberfläche, hell (ungünstige Annahme, helle Oberflächen ergeben einen geringeren Wärmestrahlungseintrag) Dächer: Strahlungsabsorption $\alpha = 0,88$ für dunkle Dachhaut (günstig) $\alpha = 0,40$ für helle Dachhaut (ungünstiger) Loggia: keine Strahlungsabsorption durch Verschattungen und Gehbelagsost

Strahlungsemission Wände	Wände: $\beta = 0,90$ (= 90 %) Dächer: $\beta = 0,90$ (= 90 %) Loggia: $\beta = 0,0$	Wände: Ansatz für frei liegende bzw. unverdeckte Putzoberflächen Dächer: Ansatz für frei liegende bzw. unverdeckte Dachoberflächen Loggia: keine Strahlungsemission aufgrund Gehbelagsrost
Feuchteeintrag gem. DIN 68800-2:2012-02	Luftinfiltrationsmodell unter Ansatz der Luftdichtheitsklasse A für hochwertig ausgeführte Konstruktionen	Zur Berücksichtigung von evtl. konvektiven Feuchteinträgen in der Nutzung (praxisübliche Leckagen)
Simulationszeitraum	10 Jahre Start: Okt 2014 (1. Tauperiode)	i.d.R. ausreichend zur Feststellung langfristiger Tendenzen der Feuchteentwicklung

9.2.4.2 Klimadaten

Als äußere Klimabedingungen werden die in WUFI verfügbaren Klimadaten für Bremerhaven angesetzt, da ein Datensatz für den Standort Flensburg in der Software nicht hinterlegt ist. Die Klimadaten für Bremerhaven sind denen des Standortes Flensburg sehr ähnlich bzw. stellt das Klima in Bremerhaven hinsichtlich der Temperatur- und Niederschlagsdaten eine etwas höhere Beanspruchung als am Gebäudestandort Flensburg betrachtet werden (Quelle: www.wetterdienst.de, Datenbasis 1991 – 2010). Dieser Datensatz spiegelt die vorhandenen klimatischen Bedingungen des Gebäudestandortes somit hinreichend genau wieder. Das Klimamodell berücksichtigt insbesondere die Jahresverteilungen der Außentemperaturen und der Niederschlagsereignisse sowie die Strahlungsintensitäten, die auf das untersuchte Bauteil einwirken.

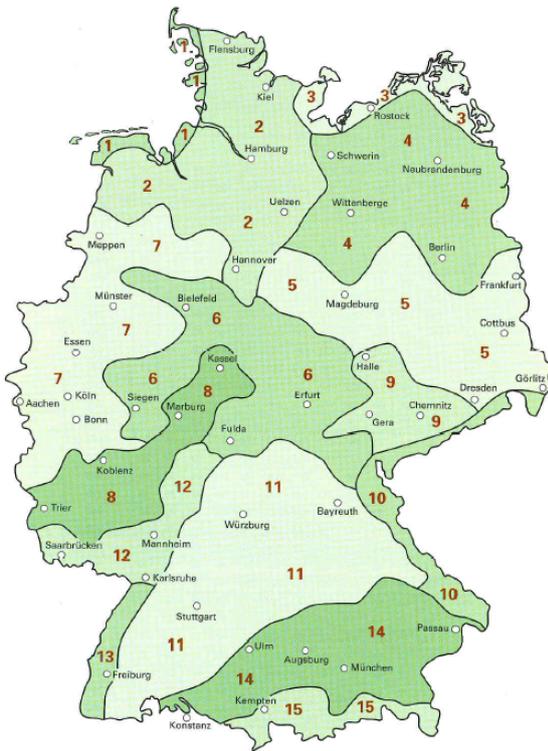


Bild 21 Referenzregionen in D für mittlere Strahlungsintensitäten n. DIN 4108-6

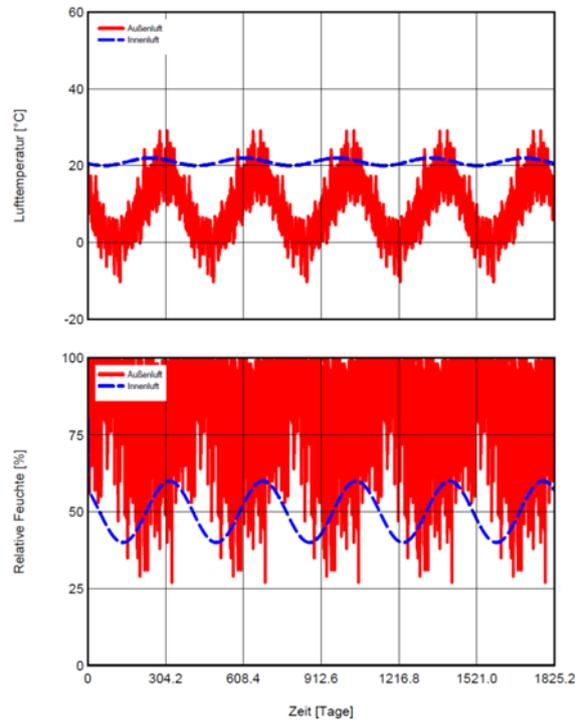


Bild 22 Klimabedingungen innen und außen nach WTA im Verlauf von 10 Jahren

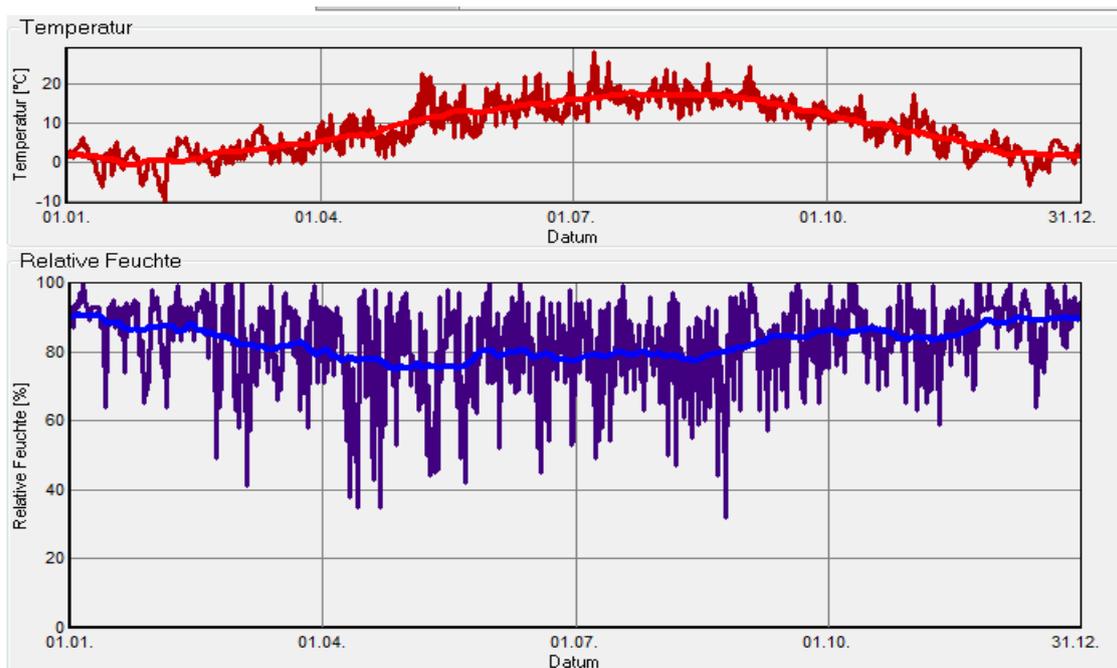


Bild 23 Jahresprofil des Referenz-Klimadatensatzes „Bremerhaven“

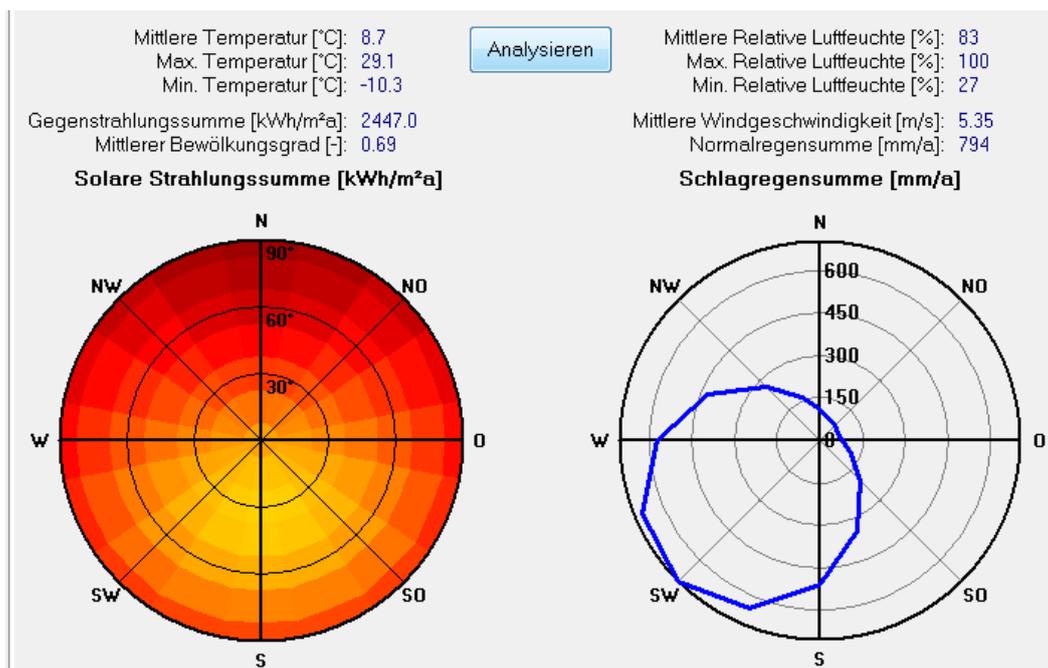


Bild 24 Jahresbilanz für solare Strahlungsbilanz und Schlagregensumme des Referenz-Klimatdatensatzes „Bremerhaven“

9.2.5 Bautailaufbauten

Das Gebäude soll hinsichtlich des Wärmeschutzes und der Energieeffizienz dem als „KfW Effizienzhaus 55“ definierten Energiestandard entsprechen. Dafür sind folgende Kennwerte vorgegeben

- Primärenergiebedarf $Q_P = \max. 55 \%$ des EnEV-Referenzgebäudes
- Transmissionswärmeverlust $H_T = \max. 70 \%$ des EnEV-Referenzgebäudes

Zur Erreichung dieses energietechnischen Niveaus ist davon auszugehen, dass die Bauteile der Gebäudehülle einen Wärmedurchgangskoeffizienten von ca. $U \approx 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ aufweisen müssen. Demnach sind alle untersuchten Bauteilvarianten neben den konstruktiv erforderlichen Bestandteilen mit Dämmstoffschichten versehen, so dass der Gesamtaufbau jeweils den vorgenannten U-Wert von ca. $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht.

9.2.5.1 Wandaufbauten

Es werden grundsätzlich Wandbauteile aus 180 mm dicken Brettsperrholzelementen betrachtet. Zur gezielteren Analyse des Feuchteverhaltens wird diese Schicht in zwei Schichten gleicher Dicke mit jeweils 90 mm modelliert.

Im weiteren außenseitigen Aufbau wird ist eine brandschutztechnisch erforderliche Gipsfaserplatte mit 18 mm Dicke sowie eine Dämmschicht auf nicht brennbarer Mineralfaserbasis vorgesehen.

Im Hinblick auf die Zielsetzung eines Gebäudes, welches dem KfW 55-Standard entsprechen soll, ist ein Gesamt-U-Wert der Außenbauteile von $u \leq 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$ einzuhalten. Dies wird mit einer äußeren Dämmschichtdicke von 140 mm aus Dämmstoff der Wärmeleitfähigkeitsstufe 040 erreicht.

Variationen bestehen in der Ausführung des Witterungsschutzes sowie der Ausrichtung der Bauteile relativ zur Hauptwindrichtung. Hinsichtlich des Witterungsschutzes werden Bauteile mit Wärmedämm-Verbundsystem sowie mit einer vorhängten, hinterlüfteten Außenwandbekleidung untersucht.

Die Hauptwindrichtung des Gebäudestandortes liegt in den westlichen Richtungen von Nord-West bis Südwest. Die Ausrichtung der Bauteile erfolgt somit einerseits in Nordrichtung, als windparallel angeordnete Bauteile und ungünstigen Strahlungsbilanzen sowie in Ostrichtung als windabgewandte Bauteile mit ebenfalls geringen Strahlungseinträgen. In diesen Anordnungen ergeben sich die in Abschnitt 9.2.1 ermittelten Windsogbeanspruchungen als zusätzlich ungünstig wirkende Feuchteeintragsparameter.

Tabelle 39 Varianten der untersuchten Wandbauteile

Variantenbezeichnung	Ausführung	zus. Überdruck durch Windsog
V-W1	BSpH-Wand mit WDVS, Ausrichtung Nord, ohne Windsogeinfluss	0,0 Pa
V-W2	BSpH-Wand mit WDVS, windabgewandte Ausrichtung Nord, mit Windsogeinfluss	9,9 Pa
V-W3	BSpH-Wand mit WDVS, windparallele Ausrichtung Ost, mit Windsogeinfluss	14,3 Pa
V-W4	BSpH-Wand mit hinterl. AW-Bekleidung, windabgewandte Ausrichtung Nord, mit Windsogeinfluss	9,9 Pa
V-W5	BSpH-Wand mit hinterl. AW-Bekleidung, windparallele Ausrichtung Ost, mit Windsogeinfluss	14,3 Pa

In Bild 25 sind die grafischen Darstellungen der untersuchten Wandbauteilvarianten gemäß der Bauteil-Modellierung in der Software zusammengestellt.

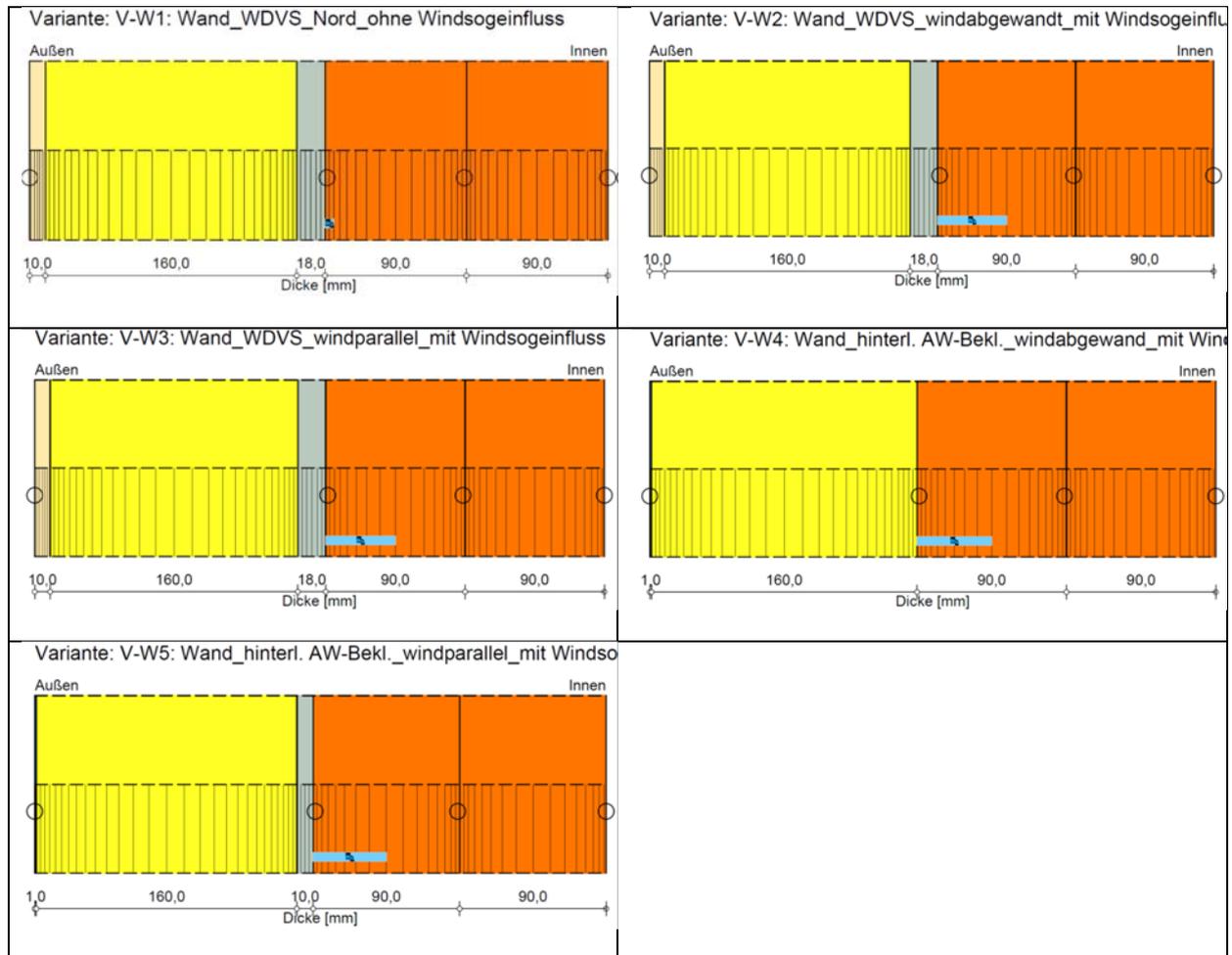


Bild 25 Grafische Darstellung der untersuchten Wandbauteilvarianten gemäß der Bauteilmodellierung in der Software

9.2.5.2 Dachaufbauten

Bei den Flachdachbauteilen wurden drei in der konstruktiven und bauphysikalischen Anordnung der Bauteilschichten identische Aufbauten betrachtet. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei den Dachdecken auf eine Betonschicht verzichtet werden kann. Im Rahmen der hygrothermischen Berechnungen wurde zunächst ein „ungestörter“ Dachaufbau mit druckfester Aufdachdämmung und dunkler Dachhaut (EPDM- oder Bitumendachbahn) angesetzt, (Variante V-D1). Des Weiteren wurde untersucht, welche Auswirkungen eine hellere Farbigkeit der Dachhaut auf das Feuchteverhalten zeigt. Die Strahlungsemission (positive Strahlungsenergie aus Sonneneinstrahlung) wurde hierbei auf 40% gesenkt, gegenüber dem Strahlungseintrag von 88% bei dunkler Dachhaut.

Es muss davon ausgegangen werden, dass eine vollständige oder bereichsweise Nutzung der Dachflächen als Dachterrassen vorgesehen ist. In diesem Falle entfallen die positiven Strahlungseinträge in das Bauteil infolge der vollständigen Verschattung der Dachhaut durch den Terrassenaufbau.

Dieser besteht i.d.R. aus Holz-Gehbelagsrosten, die mit geeigneten Trennstreifen auf die Dachhaut bzw. die entsprechend druckfest ausgeführte Dämmschicht aufgelegt werden. Eine evtl. erforderliche Verankerung der Gehbelagsroste gegen Abheben durch Windsog wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

Um hier den Einfluss verschiedener farblicher Ausführungen bzw. der Verschattung der Dachhaut zu ermitteln, wurden bei gleichbleibendem Bauteilaufbau lediglich die Faktoren der Strahlungsabsorption und der Strahlungsimmission entsprechen der jeweiligen Situation angepasst.

Um den Fall der evtl. doch erforderlichen Holz-Beton-Verbundausführung des Dachbauteils zu berücksichtigen, wurde zusätzlich ein solcher Aufbau mit Dachterrasse als potentiell kritischste Ausführung ebenfalls untersucht.

Bei allen untersuchten bauteilvarianten wurde eine zusätzliche Luftdruckbeanspruchung von 12,8 Pa berücksichtigt, um die Einflüsse der hohen Windsogbeanspruchungen auf der Dachfläche einfließen zu lassen.

Tabelle 40 Varianten der untersuchten Dachbauteile

Variantenbezeichnung	Ausführung	zus. Überdruck durch Windsog
V-D1	Brettsperrholz-Dachdecke, mit Aufdachdämmung u. Dachabdichtung dunkel	12,8 Pa
V-D2	Brettsperrholz-Dachdecke, mit Aufdachdämmung u. Dachabdichtung hell	12,8 Pa
V-D3	Brettsperrholz-Dachdecke, mit Aufdachdämmung u. Dachabdichtung und aufgelegtem Gehbelagsrost	12,8 Pa
V-D4	HBV-Dachdecke, mit Aufdachdämmung u. Dachabdichtung und aufgelegtem Gehbelagsrost	12,8 Pa

In Bild 26 sind die grafischen Darstellungen der untersuchten Dachbauteilvarianten gemäß der Bauteil-Modellierung in der Software zusammengestellt.

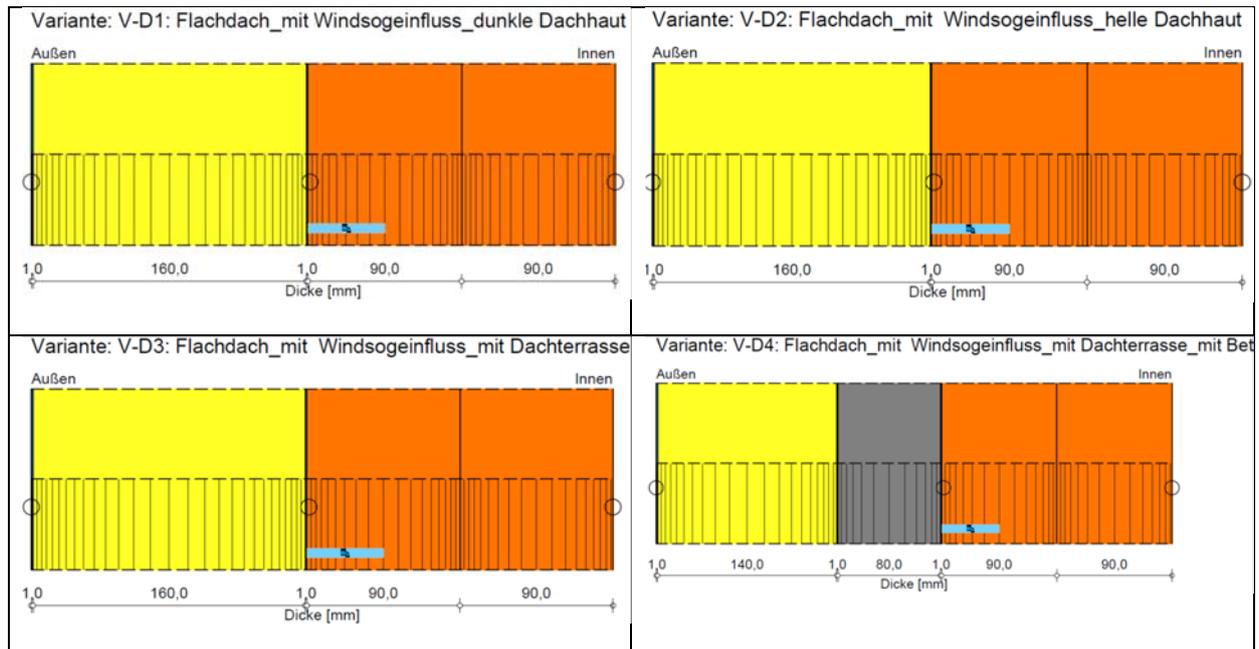


Bild 26 In Grafische Darstellung der untersuchten Dachbauteilvarianten gemäß der Bauteil-Modellierung in der Software

9.2.5.3 Loggia-Decken

In jedem Geschoss des Gebäudes ist mindestens eine Loggia vorgesehen, welche sich jeweils in den Eckbereichen in die Gebäudekubatur einfügen. Das Deckenbauteil von Loggien bedarf einer besonderen bauphysikalischen Betrachtung, da sich zum Einen aufgrund von Verschattungen durch die Auskragung von Decke, Seitenwänden und ggf. Brüstungen bereits ungünstige Verhältnisse hinsichtlich der Strahlungsbilanz für das Bauteil ergeben. Hinzu kommt, dass der Gehbelag, i.d.R. aus einem aufgelegten Holzrost, eine vollständige Verschattung der Dachhaut bewirkt. Die hygrothermische Robustheit des Bauteils muss somit unter nahezu vollständigem Verzicht auf günstig wirkende Sonnen- bzw. Wärmeeinstrahlungen auf die Dachhaut gewährleistet sein.

Des Weiteren besteht der Anspruch, dass die Oberkante des Gehbelags der Loggia in etwa Niveaugleich mit dem fertigen Fußbodenaufbau des anschließenden Wohnraumes ist. Je nach Erfordernis aus der Tragwerksplanung muss ggf. die vollständige Rohdecke aus Holz-Beton-Verbundbauteilen (Massivholzelement zzgl. Betonaufgabe) generell durchgehend bis zur Außenwand geführt werden, um die erforderliche Gesamtsteifigkeit des Gebäudes zu gewährleisten. Damit wird, unter Berücksichtigung des Kriteriums der Niveaugleichheit von raumseitigem Fußboden und Gehbelag, die mögliche Dämmdicke im Bereich der Loggiadecke auf ein bestimmtes Maß beschränkt.

Der Gesamtaufbau der raumseitigen Decken beläuft sich nach bisheriger Planung auf eine Aufbauhöhe von ca. 42 cm. Für einen funktionstauglichen und robusten Gehbelag sind Belagsdielen mit mindestens 24 mm Dicke sowie eine Entwässerungsebene (Lattung inkl. Lagerstreifen) von mindestens 20 mm anzunehmen.

Somit muss ein bauphysikalisch wirksamer Bauteilaufbau der Loggiadecke unterhalb des Gehbelags mit einer maximalen Bauteilhöhe von $42 - 2,4 - 2,0 = 37,6$, also rund 38 cm, hergestellt werden.

Tabelle 41 Varianten der untersuchten Loggiadecken

Variantenbezeichnung	Ausführung	zus. Überdruck durch Windsog
V-L1	HBV-Decke, mit belastbarer Aufdachdämmung und Dachabdichtung	12,8 Pa
V-L2	Massivholzelement (ohne Beton) mit belastbarer Aufdachdämmung und Dachabdichtung	12,8 Pa
V-L3	Lignotrend®-Decke (ohne Beton), mit belastbarer Aufdachdämmung und Dachabdichtung	12,8 Pa
V-L4	Lignotrend®-HBV-Decke, mit belastbarer Aufdachdämmung und Dachabdichtung	12,8 Pa

In Bild 27 sind die grafischen Darstellungen der untersuchten Loggiadeckenvarianten gemäß der Bauteil-Modellierung in der Software zusammengestellt.

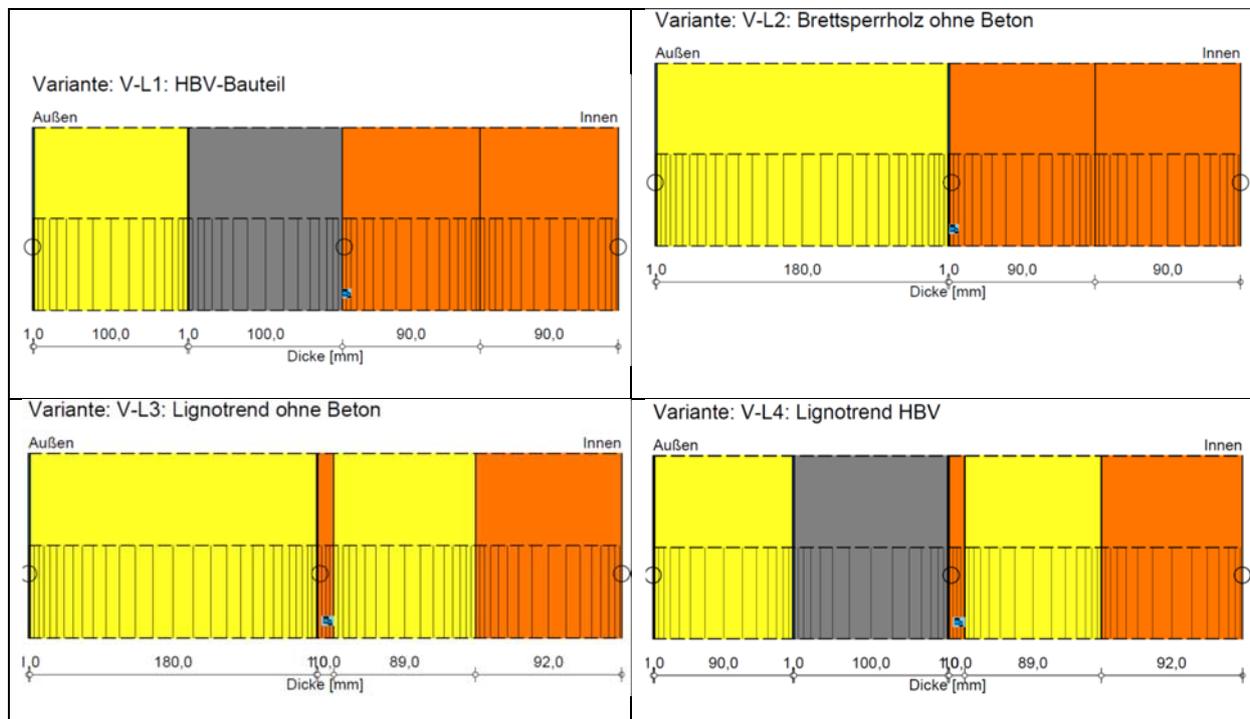


Bild 27 Grafische Darstellung der untersuchten Bauteilvarianten der Loggiadecken gemäß der Bauteil-Modellierung in der Software

9.3 Beurteilung der Berechnungsergebnisse

Zur Bewertung der Bauteilaufbauten wurden unter Beibehaltung der Randbedingungen die Bauteile mit verschiedenen Variationen wie in den Abschnitten 10.5.2.1 bis 10.5.2.3 beschrieben untersucht. Die Simulationsberechnungen wurden über einen aussagekräftigen Zeitraum von 10 Jahren, beginnend vor der Tauperiode im Oktober 2014, durchgeführt. In diesem Zeitraum ist davon auszugehen, dass sich die Feuchteverhältnisse in der Dachkonstruktion „eingeschwungen“ haben oder eine eindeutige Tendenz erkennbar ist.

Für eine Aussage der hygrothermischen Funktionstüchtigkeit der Konstruktion wird die ermittelte Materialfeuchtigkeit in der jeweils äußeren, feuchtereaktiven Schicht bewertet. Dies sind bei den auf Massivholzelementen basierenden Bauteilen die äußeren Bereiche des Massivholzes. Bei den Lignotrend-Bauteilen stellt die obere abschließende Sperrholzplatte am Übergang zu Betonschicht (sofern vorhanden) die Indikationsebene dar.

In diesen vorgenannten Indikationsschichten erfolgt die intensivste Feuchtebeanspruchung aufgrund der dort anzunehmenden Tauwasserebene der Konstruktion. Im vorliegenden Fall bestehen die Indikationsschichten stets aus Vollholz, so dass gemäß DIN 68800-2 die maximal zulässige Holzfeuchte grundsätzlich 20 % beträgt. Allerdings ist eine kurzfristige Erhöhung der Holzfeuchte auf mehr als 20 % erfahrungsgemäß unkritisch, sofern dieser Zustand einen Zeitraum von 3 Monaten nicht überschreitet.

Für die Sperrholzplatte gilt gemäß DIN 68800-2, dass die maximal zulässige Materialfeuchte grundsätzlich 18 % nicht überschritten wird. Allerdings ist eine kurzfristige Erhöhung der Holzfeuchte auf bis zu 20 % erfahrungsgemäß unkritisch, sofern dieser Zustand einen Zeitraum von 3 Monaten nicht überschreitet.

Die ermittelte Holzfeuchte in den oberen Lagen ist damit maßgebendes Kriterium für die hygrothermische Funktionstüchtigkeit (keine dauerhafte Auffeuchtung der Materialien) sowie zur Beurteilung von ggf. erforderlichen Holzschutzmaßnahmen.

Zusätzlich wird der Wert der relativen Porenluftfeuchte im oberflächennahen Materialgefüge als Kriterium herangezogen. Diese kritische Grenzschicht befindet sich in der Regel ebenfalls in der Tauebene des Bauteils. Dieser Wert soll 90% nicht überschreiten, um die Wahrscheinlichkeit eines Schimmelpilzbefalls im Innern des Bauteils zu minimieren.

Zur Auswertung des Gesamtfeuchteverhaltens der Bauteile wird jeweils der Gesamtwassergehalt im Bauteil ebenfalls ausgegeben.

Insbesondere in Flachdachbauteilen kann es vorkommen, dass es trotz der rechnerischen Funktionstauglichkeit in den Bauteilschichten aus hygroskopischen Materialien (Holz oder Holzwerkstoffe) zu einer stetigen Auffeuchtung der oberen Dämmschicht kommen kann. Dies ist insbesondere dann zu berücksichtigen, wenn diese Dämmschicht oberseitig durch eine diffusionsfähige Dachhaut und unterseitig durch eine diffusionsdichte Dampfsperre eingeschlossen ist. Diese Konstellation ist jedoch aus Gründen der Sicherheit für die Holzkonstruktion gegen evtl. eindringendes Wasser von außen so gewählt worden. Daher wird der Feuchteverlauf in der außenseitigen Dämmschicht ebenfalls ausgewertet.

9.4 Berechnungsergebnisse

9.4.1 Wandbauteile

Nachfolgend werden die grafischen Ausgaben der Berechnungsergebnisse für die Wandbauteile V-W1 bis V-W5 zusammengestellt und anschließend diskutiert.

<p>Bild 28 Gesamtwassergehalt V-W1</p>	<p>Bild 29 Feuchteverlauf in der Indikations-schicht V-W1</p>
<p>Bild 30 Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwassersebene), V-W1</p>	<p>Bild 31 Feuchteverlauf in der Außendäm-mung, V-W1</p>

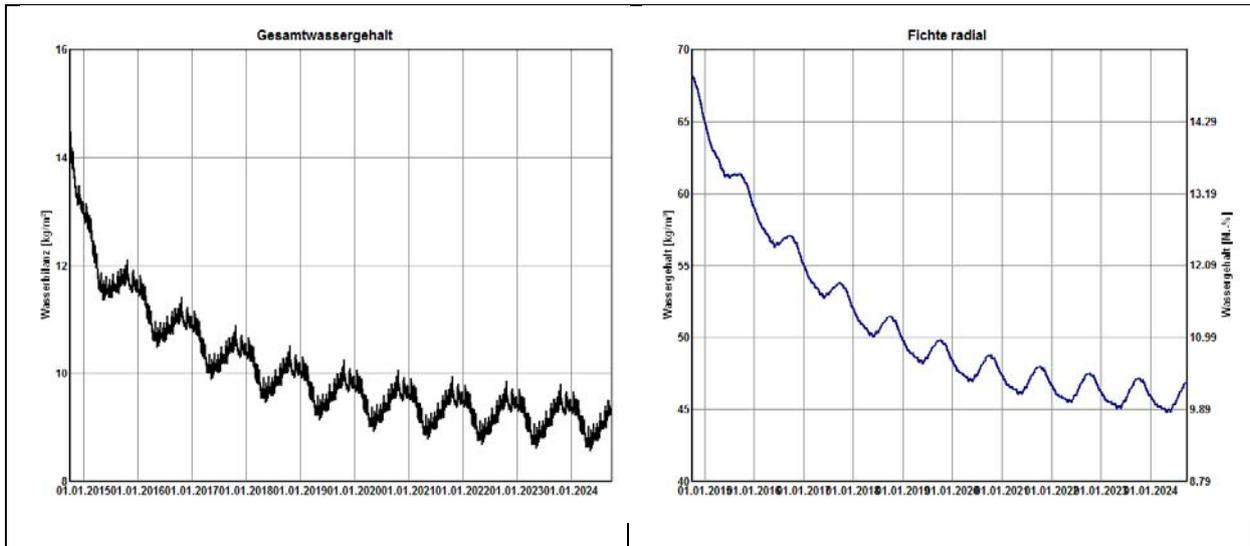


Bild 32 Gesamtwassergehalt V-W2

Bild 33 Feuchteverlauf in der Indikations-
schicht V-W2

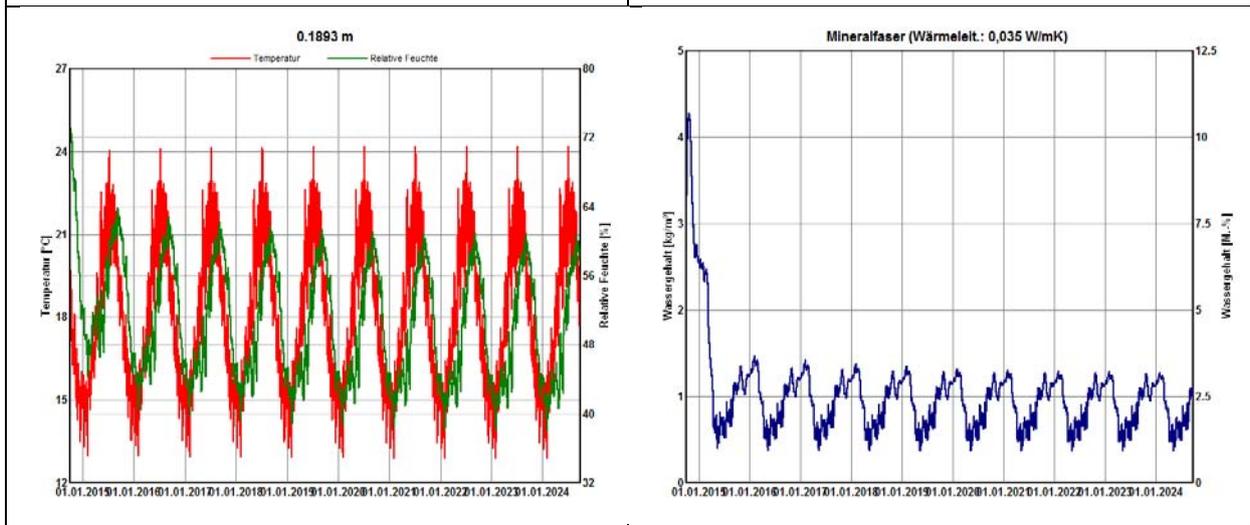


Bild 34 Relative Porenluftfeuchtigkeit in der
kritischen Grenzschicht (Tauwas-
serebene), V-W2

Bild 35 Feuchteverlauf in der Außendäm-
mung, V-W2

<p>Bild 36 Gesamtwassergehalt V-W3</p>	<p>Bild 37 Feuchteverlauf in der Indikations- schicht V-W3</p>
<p>Bild 38 Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwas- serebene), V-W3</p>	<p>Bild 39 Feuchteverlauf in der Außendäm- mung, V-W3</p>

<p>Bild 40 Gesamtwassergehalt V-W4</p>	<p>Bild 41 Feuchteverlauf in der Indikations- schicht V-W4</p>
<p>Bild 42 Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwas- serebene), V-W4</p>	<p>Bild 43 Feuchteverlauf in der Außendäm- mung, V-W3</p>

<p>Bild 44 Gesamtwassergehalt V-W5</p>	<p>Bild 45 Feuchteverlauf in der Indikations-schicht V-W5</p>
<p>Bild 46 Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwassersebene), V-W5</p>	<p>Bild 47 Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-W5</p>

Es kann festgestellt werden, dass in allen untersuchten Varianten eine grundsätzliche hygrothermische Funktionstauglichkeit und ausreichende Feuchterobustheit der Bauteile gewährleistet werden kann.

Der Einfluss der Gebäudehöhe, die damit einhergehende erhöhte Windsogbelastung und der daraus folgende erhöhte Feuchteinträgen durch Luftinfiltration kann durch die Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse als marginal bewertet werden. Dies liegt insbesondere an der Gegebenheit, dass Brettsperrholz in der Regel mit mindestens 5 kreuzweise verklebten Lagen als Luftdicht anzusehen ist.

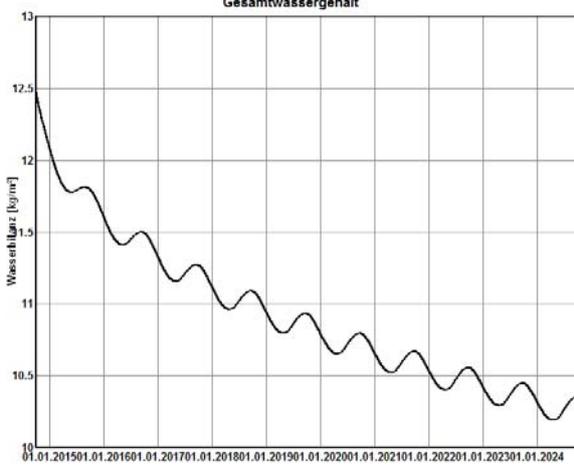
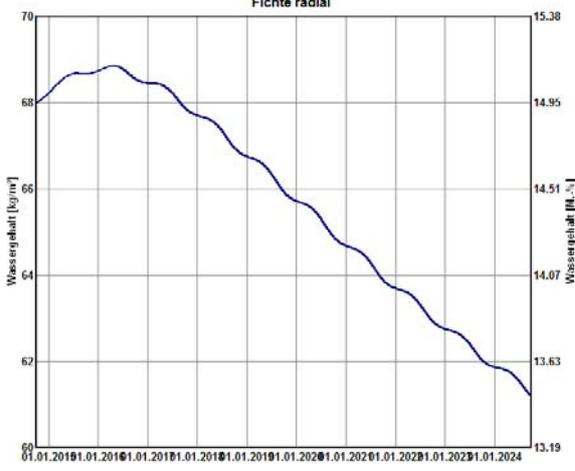
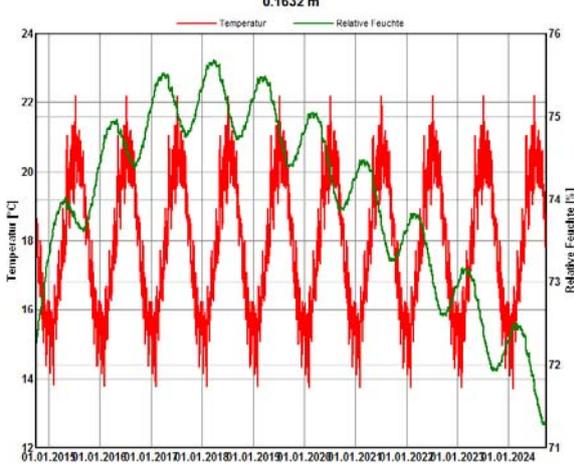
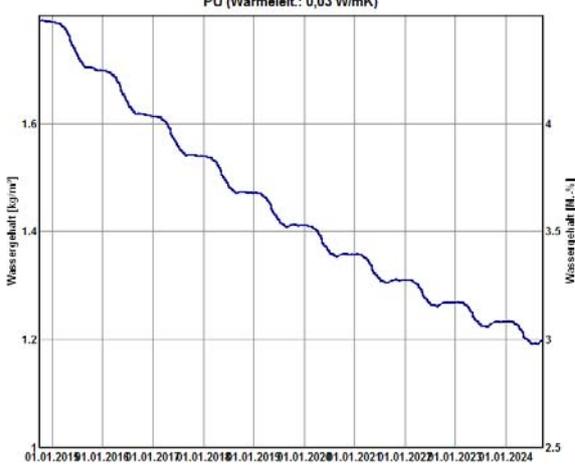
Bei dem Gebäude wird allgemein von einer hochwertigen Ausführung ausgegangen, so dass in den Berechnungen die Luftdichtheitsklasse A in Ansatz gebracht wurde. Durch damit einhergehenden geringen Leckageanteil können auch bei hohen Windsogbelastungen die Feuchteinträge auf sehr niedrigem bzw. unschädlichem Niveau gehalten werden.

9.4.2 Dachbauteile

Nachfolgend werden die grafischen Ausgaben der Berechnungsergebnisse für die Dachbauteile V-D1 bis V-D4 zusammengestellt und anschließend diskutiert.

<p>Bild 48 Gesamtwassergehalt V-D1</p>	<p>Bild 49 Feuchteverlauf in der Indikations-schicht V-D1</p>
<p>Bild 50 Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Taufasersebene), V-D1</p>	<p>Bild 51 Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-D1</p>

<p>Bild 52 Gesamtwassergehalt V-D2</p>	<p>Bild 53 Feuchteverlauf in der Indikations- schicht V-D2</p>
<p>Bild 54 Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwas- serebene), V-D2</p>	<p>Bild 55 Feuchteverlauf in der Außendäm- mung, V-D2</p>

	
<p>Bild 56 Gesamtwassergehalt V-D3</p>	<p>Bild 57 Feuchteverlauf in der Indikations- schicht V-D3</p>
	
<p>Bild 58 Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwas- serebene), V-D3</p>	<p>Bild 59 Feuchteverlauf in der Außendäm- mung, V-D3</p>

<p>Bild 60 Gesamtwassergehalt V-D4</p>	<p>Bild 61 Feuchteverlauf in der Indikations- schicht V-D4</p>
<p>Bild 62 Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwas- serebene), V-D4</p>	<p>Bild 63 Feuchteverlauf in der Außendäm- mung, V-D4</p>

Bei den Dachbauteilen wurde zunächst vorausgesetzt, dass aus statischen Hinsicht hier keine Betonaufgabe erforderlich ist. Um den Einfluss verschiedener farblicher Ausführungen bzw. der Verschattung der Dachhaut zu ermitteln, wurden bei gleichbleibendem Bauteilaufbau lediglich die Faktoren der Strahlungsabsorption und der Strahlungsimmission entsprechen der jeweiligen Situation angepasst.

Es ist erkennbar, dass der einfache Aufbau aus Brettsperrholz, Dampfsperre als Trennlage, Aufdachdämmung und Dachhaut insgesamt ein bauphysikalisch sehr robustes Bauteil ergibt.

Dadurch, dass der gesamte feuchteempfindliche Konstruktionsteil in Form des Brettsperrholzelementes auf der warmen Raumseite angeordnet ist, ergeben sich nur schwach ausgeprägte Zyklen bzw. Schwankungen der Holzfeuchte. Ferner wird dass jährlich ein deutlicher Verdunstungsüberhang erzielt, so dass in der Variante V-D1 die Holzfeuchte von anfänglich 15 % auf maximal 12,8 % nach 10 Jahren abfällt.

Auch die Absenkung des sommerlichen Energieeintrags auf eine Strahlungsabsorption von 40 % bewirkt lediglich eine Verschiebung der Feuchtekurve für das Brettsperrholz um ca. 0,5 % nach oben auf maximal 13,3 % nach 10 Jahren Berechnungszeitraum. Ebenso unempfindlich zeigt sich der Bauteilaufbau beim Aufbringen eines Dachterrassenbelags und somit bei vollständiger Verschattung der Dachhaut. Dies bewirkt lediglich eine weitere Erhöhung der Feuchtwerte um ca. 0,3 % auf dann 13,6 % nach Berechnungsjahren.

Die ermittelten Werte der relativen Porenluftfeuchte in der kritischen Grenzschicht zwischen Brettsperrholzoberfläche und Trennlage übersteigt auch bei der Variante V-D3 (volle Verschattung der Dachhaut) einen Wert von 75,6 % nicht. Der hier geltende Grenzwert von 90 % wird somit dauerhaft deutlich unterschritten.

Sofern aus konstruktiven Aspekten eine Ausführung der Dachdecke als Holz-Beton-Verbundelement erforderlich sein sollte, bestehen auch diesen Bauteilaufbau mit einer zusätzlichen Betonauflage von 100 mm aus bauphysikalischer Sicht kein Bedenken.

Die Kurve der Holzfeuchte in der Analyseebene des Brettsperrholzes steigt hierbei gegenüber der reinen Massivholzbauweise mit Dachterrasse lediglich um weitere 0,2 % auf dann 13,8 % im 10. Berechnungsjahr. Auch der Maximalwert der relativen Porenluftfeuchtigkeit in der vorgenannten Grenzschicht steigt im 4. Berechnungsjahr auf 76,5 %, um dann, wie bei den anderen Varianten, in den Folgejahren kontinuierlich um ca. 0,5 % jährlich zu sinken.

In keiner der berechneten Varianten erfolgt eine Auffeuchtung der Dämmschicht, so dass auch hier dauerhafte Schadensfreiheit gegeben ist.

Die hygrothermische Funktionstauglichkeit des hier untersuchten Dachaufbaus ist somit in allen Varianten V-D1 bis V-D4 bei fachgerechter technischer Ausführung sicher gewährleistet.

9.4.3 Loggia-Decke

Nachfolgend werden die grafischen Ausgaben der Berechnungsergebnisse für die Wandbauteile V-L1 bis V-L4 zusammengestellt und anschließend diskutiert.

<p>Bild 64 Gesamtwassergehalt V-L1</p>	<p>Bild 65 Feuchteverlauf in der Indikations-schicht V-L1</p>
<p>Bild 66 Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwassersebene), V-L1</p>	<p>Bild 67 Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-L1</p>

<p>Bild 68 Gesamtwassergehalt V-L2</p>	<p>Bild 69 Feuchteverlauf in der Indikations- schicht V-L2</p>
<p>Bild 70 Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwas- serebene), V-L2</p>	<p>Bild 71 Feuchteverlauf in der Außendäm- mung, V-L2</p>

<p>Bild 72 Gesamtwassergehalt V-L3</p>	<p>Bild 73 Feuchteverlauf in der Indikations-schicht V-L3</p>
<p>Bild 74 Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwassersebene), V-L3</p>	<p>Bild 75 Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-L3</p>

<p>Bild 76 Gesamtwassergehalt V-L4</p>	<p>Bild 77 Feuchteverlauf in der Indikations-schicht V-L4</p>
<p>Bild 78 Relative Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht (Tauwassersebene), V-L4</p>	<p>Bild 79 Feuchteverlauf in der Außendämmung, V-L4</p>

Die Besonderheiten und die hier untersuchten Bauteilaufbauten sind in Abschnitt 9.2.5.3 beschrieben. Die Berechnungen führen zu folgenden Ergebnissen:

Bei Variante V-L1 ist bei Einhaltung der Vorgaben der Gesamtbauhöhe nur eine oberseitige Dämmdicke von 100 mm möglich. Grundsätzlich kann mit diesem Aufbau lediglich ein Wärmedurchlasskoeffizient $U = 0,23 \text{ W/m}^2\text{K}$ anstatt der generell geforderten $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ erreicht werden, so dass die Effizienzvorgaben verfehlt werden. Zwar kann die hygrothermische Funktionstauglichkeit in allen untersuchten Kriterien für den Bauteilaufbau gewährleistet werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurde jedoch festgestellt, dass der Anspruch der

Niveaugleichheit des Gehbelags der Loggia mit der raumseitigen Fußbodenoberkante in Verbindung mit dem geforderten Wärmedurchgangswiderstand von ca. $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ und einer tauwasserfreien Konstruktion mit HBV-Decken auf Basis von Brettsperrholzelementen nicht zu erfüllen ist.

Eine Vereinbarkeit zwischen den architektonischen und energetischen Aspekten ist somit zunächst nur herzustellen, wenn im Bereich der Loggien auf die Betonaufgabe verzichtet werden kann, wie dies in Variante V-L2 umgesetzt wurde. Ein solches Bauteil ist dann in etwa gleichzusetzen mit dem als V-D3 bezeichneten Dachaufbau aus Brettsperrholz, Dampfsperre als Trennlage, druckfester Aufdachdämmung, Dachabdichtung und aufgelegtem Dachterrassenaufbau. Die vergleichbaren Ergebnisse der hygrothermischen Berechnung der Bauteilvarianten V-L2 und V-D3 belegen dies.

Als weitere Alternative ist ein Deckenaufbau mit Bauteilen, bei denen in der Tragebene ein gewisser Dämmstoffanteil untergebracht werden kann. Hier eignen sich z.B. Bauteile des Systems Lignotrend®, die in der Bauteilvariante V-L3 eingesetzt wurden. Hier wird unter Einhaltung der Rohbauteilhöhe vom maximal 38 cm ein Gesamt-U-Wert von $0,13$ erreicht. Dieser muss jedoch mit den Stegbereichen des Lignotrend®-Bauteils gemittelt werden, so dass hierdurch ein mittlerer U-Wert um $0,15 \text{ W/M}^2\text{K}$ erreicht wird.

In der hygrothermischen Untersuchung besteht die Indikationsschicht bei diesem Bauteilaufbau in der oberen Sperrholzlage des Lignotrend®-Bauteils bzw. in der Grenzschicht zwischen Gefachdämmung und oberer Brettlage. In den ersten Jahren kommt es hier zu relativ hohen Maximalwerten der Holzfeuchte bis zu 19,8 % im 2. Berechnungsjahr. Diese bauen sich jedoch in den Folgejahren kontinuierlich ab auf maximal 16 % im 10. Berechnungsjahr. Ebenso gilt dies für den Verlauf der relativen Porenluftfeuchte in der betrachteten kritischen Grenzschicht, die im 2. Jahr einen Maximalwert von 89 % erreicht. Auch dieser wird innerhalb des Berechnungszeitraumes es auch maximal 81 % reduziert. Das Bauteil kann somit als hygrothermisch funktionstauglich bewertet werden.

Sofern aus tragwerksplanerischer Sicht nicht auf eine Betonschicht im Loggiabereich verzichtet werden kann, ermöglichen die Lignotrend®-Bauteile auch die Ausführung als Holz-Beton-Verbundbauteile, die hier mit der Variante V-L4 untersucht werden.

Unter Einhaltung der Gesamtbauteilhöhe des Deckenaufbaus ohne Gehbelag von 38 cm verbleibt jedoch nur noch eine Dämmschichtdicke von 80 mm oberhalb der Betonschicht. Dies verschlechtert einerseits den Wärmedurchgangskoeffizienten auf $U = 1,75 \text{ W/m}^2\text{K}$. Des Weiteren ergeben die hygrothermischen Berechnungen insbesondere in den ersten Jahren eine Aufweitung der Sperrholzlage unterhalb des Betons auf Maximalwerte von 21,8 %, die auch zum Ende des Berechnungszeitraumes nach 10 Jahren nur auf maximal 19 % reduziert werden können. Ebenso verhält es sich mit der relativen Porenluftfeuchtigkeit in der kritischen Grenzschicht, die im 2. und 3. Berechnungsjahr Maximalwerte von 93 % erreicht, und somit die Wahrscheinlichkeit der Schimmelpilzbildung steigt. Eine hygrothermische Funktionstauglichkeit kann mit diesem Bauteilaufbau nicht sichergestellt werden. Probenberechnungen ergeben, dass bei diesem Bauteilaufbau eine Dämmdicke von mindestens 140 mm anzustreben ist, um eine ausreichenden bauphysikalische Sicherheit für dieses Bauteil zu erzielen.

9.5 Zusammenfassung Feuchteschutz

Es wurden die Bauteile der Außenhülle eines Gebäudes untersucht, welches in den flächigen bzw. raumbildenden Bauteilen aus Brettspertholz als Tragebene und weiteren bauphysikalisch erforderlichen Schicht hergestellt wird. Ein wesentliches Kriterium für den Bauteilaufbau und insbesondere die erforderliche Dicke der Dämmschichten ist die Ausrichtung auf einen Gesamt- Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile von ca. $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$. Damit soll hinsichtlich der Konstruktion bzw. der Gebäudehülle die Möglichkeit geschaffen werden, das Gebäude als KfW Effizienzhaus 55 auszuführen.

Aufgrund der Erfahrungen, die mit Bauteilen aus Massivholzelementen bereits gemacht wurden, ist bekannt, dass solche Bauteilaufbauten in der Regel eine gute bauphysikalische Robustheit aufweisen. Dies liegt zum einen daran, dass die tragende Holzstruktur (Massivholzbau teil) im Wesentlichen auf der warmen Raumseite des Gesamtbauteils angeordnet ist und flächig mit einer äußeren Dämmschicht versehen wird. Des Weiteren kann man insbesondere bei Brettspertholz mit mindestens 5 Lagen von einer luftdichten Ebene sprechen, so dass in der ungestörten Fläche keine Leckagen anzunehmen sind. Bei fachgerechter Anschlussausführung kann somit recht einfach eine hohe Luftdichtheit der Gebäudehülle erreicht werden. Daher kann für die untersuchten Bauteile als Grundlage für die hygrothermischen Berechnung auch die Luftdichtheitsklasse A für Gebäude mit kontrollierter Lüftung und Wärmerückgewinnung nach DIN 4108-7 ($n_{50} \leq 1,0 \text{ h}^{-1}$) angesetzt werden. Dies wirkt sich positiv auf den anzunehmenden Feuchteeintrag aus konvektiven Einflüssen aus.

Windanströmung an der Gebäudehülle kann in erster Linie zu Zugerscheinungen führen und große unkontrollierte Luftwechsel hervorrufen. Für Gebäude bis zur Gebäudeklasse 4 ist das Befeuchtungsrisiko durch Windeinwirkung für Außenbauteile eher gering, da die hierzulande vorherrschend westliche Windrichtung insbesondere im allgemeinen Binnenland mit relativ milden Temperaturen einhergeht.

Der Grund und Ansatz der genaueren Betrachtungen im Sinne von hygrothermischen Untersuchungen war die Tatsache, dass bei einer Gebäudehöhe von über 30 Metern mit deutlich größeren Windgeschwindigkeiten und Windsogeinflüssen auf die Außenbauteile zu rechnen ist, als dies niedrigeren Gebäuden der Fall ist.

Es ist somit sicherzustellen, dass insbesondere die erhöhten Windsogbeanspruchungen nicht zu einer unzuträglichen Erhöhung des konvektiven Feuchteintrags führen.

Dazu wurden zunächst die standort- und höhenbedingt ermittelten Windeinwirkungen auf die Bauteile ermittelt. Ein erhöhter Feuchteeintrag durch Leckagen ist anzunehmen, wenn die Windsogeinwirkung von außen als äquivalenter Überdruck auf das Bauteil von innen angesetzt wird. Somit muss angenommen werden, dass durch die Windsogeinwirkungen mehr Feuchtigkeit durch vorhandene Leckagen eingetrieben wird.

Die hygrothermischen Berechnungen haben ergeben, dass sich auch aus den erhöhten Windbeanspruchungen in den oberen Geschossen eines Hochhauses von etwa 30 m Höhe keine signifikanten Feuchteerhöhungen ausgehen. In den Wandbauteilen beläuft sich der Unterschied im Feuchteverlauf auf $0,1 - 0,2 \%$ Erhöhung der Holzfeuchte.

Daher wurde bei den Dachbauteilen die erhöhte Windbelastung zwar mit eingerechnet, jedoch keine besondere vergleichende Auswertung zu weniger windbelasteten Bauteilen vorgenommen. Hier wurde der Fokus auf den Einfluss der Dachhautfarbe sowie die Auswirkung eines Gehbelagsrostes bei Ausführung einer Dachterrasse gelegt. Hier kann erwartungsgemäß festgestellt werden, dass mit abnehmendem sommerlichem Strahlungseintrag die Holzfeuchte in der untersuchten Holzschicht zunimmt. Dennoch werden keine kritischen Werte erreicht und alle Bauteilvarianten sind als ausreichend feuchterobust einzustufen.

Hinsichtlich der Loggiadecke ergibt sich eine besondere Situation, da hier eine Beschränkung der Konstruktionshöhe im Hinblick auf den barrierefreien Übergang zum Wohnraumfußboden vorliegt. Sofern die Aufbauhöhe auf das derzeit geplante Gesamtmaß von ca. 42 cm beschränkt bleibt, kann die hygrothermische Sicherheit nur erreicht werden, wenn gleichzeitig im Bereich der Loggiadecke auf eine Betonauflage auf der Massivholzrohdecke verzichtet werden kann. Hier bestehen jedoch starke Abhängigkeiten von den tragwerksplanerischen Vorgaben. Alternativ gibt es den Vorschlag, die Rohdecke als teilgedämmte Kasten-elemente auszuführen (Lignotrend®), um eine verbesserte Dämmwirkung unter Einsparung von Bauhöhe zu erreichen. Auch hier ergibt sich jedoch eine zwischenzeitliche Auffeuchtung der oberen Holzlamelle unterhalb der Betonschicht. Somit ist auch diese Ausführung mit Betonschicht nur mit einem höheren Gesamtaufbau bauphysikalisch sicher herzustellen.

Neben dem Feuchteeintrag aus bauphysikalischen Prozessen ist im Zusammenhang mit der obligatorischen Sprinkleranlage (vgl. Abschnitt 6.4) in einem Hochhaus in Holzbauweise ein zusätzlicher Fall zu berücksichtigen. Dies betrifft die Gefahr des Eindringens von Wasser und der Schädigung der Holzkonstruktion bei Auslösung der Sprinkleranlage. Dazu ist ein besonderes Konzept zu Abhaltung bzw. kontrollierten Ableitung von Wasser in diesem Fall zu entwickeln, so dass hier aus Sicht der Verfasser weiterer Forschungsbedarf besteht. Dabei sind Fragen des geeigneten Ansatzes für Schutzmaßnahmen zu beantworten und praktikable Lösungen auszuarbeiten, die nicht in Konflikt mit anderen bautechnischen Aspekten geraten dürfen.

10 Luftdichtheit

Ein Luftdichtheitskonzept muss unter Berücksichtigung evtl. erhöhter Gebäudebewegungen und Luftdruckwechseln aus Windbeanspruchungen entwickelt werden (beanspruchungsgerechte Anschlusslösungen für die Luftdichtheitschicht).

Mit steigender Gebäudehöhe in Abhängigkeit von der Steifigkeit der Gesamtkonstruktion ergibt sich eine Erhöhung der absoluten Verformungen des Gebäudes. Dies wirkt sich insbesondere auf die horizontalen Auslenkungen der oberen Gebäudebereiche aus. Ferner liegt mit steigender Gebäudehöhe an den Bauteilen ein deutlich erhöhter Winddruck und Windsog an. Luftdichtheitschichten bestehen in vielen Fällen aus Folien und Bahnen, deren Anschluss in Bauteilübergängen mittels Klebeverbindungen hergestellt werden. Diese Klebeverbindungen besitzen begrenzte mechanische Belastbarkeiten, die insbesondere im Hinblick auf den Widerstand gegen wechselnde Zug- und Druckverhältnisse zu betrachten sind.

Es somit eine gezielte Auswahl von am Markt befindlichen Systemen und Produkten vorzunehmen, deren Robustheit gegenüber den erhöhten Beanspruchungen möglichst durch unabhängige Prüfungen nachgewiesen ist.

Ein solcher Nachweis kann z.B. durch Untersuchungen nach den Methoden des Forschungsprojektes „Qualitätssicherung klebmassenbasierter Verbindungstechnik für die Ausbildung der Luftdichtheitsschichten“, Maas, A./Gross, R., Zentrum für Umweltbewusstes Bauen, Mai 2010, erfolgen.

Als Grundlage für das Forschungsprojekt wurde vorausgesetzt, dass die Funktionsfähigkeit von Anschlüssen der Luftdichtheitsschicht mit Klebmassen dauerhaft sein muss, was im Bauwesen Zeiträume von 50 - 100 Jahre umfasst. Die in DIN 4108-7 beispielhaft aufgeführten Empfehlungen für den Anschluss von Bahnen auf der Basis moderner Klebmassen legen nahe, dass diese auch ohne mechanische Sicherung anwendbar sind.

Anbieter von Klebebändern und -massen geben auf Basis eigener Untersuchungen für ihre Produkte häufig eine "weitreichende" Funktionsgarantie, meist jedoch ohne konkrete Angabe von Zeiträumen und der angewendeten Prüfmethode.

Eine allgemeingültige Kennzeichnung und Deklaration solcher Produkte existiert derzeit mangels entsprechender Produkt- und Prüfnormen nicht. In einem vorangegangenen Forschungsprojekt aus dem Jahre 2004 [Hauser, G. ,Maas A ,Gross R „Qualitätssicherung klebmassenbasierter Verbindungstechnik für Luftdichtheitsschichten“ Abschlussbericht von 16 Dezember 2004, Universität Kassel, Fachgebiet Bauphysik (E-2002/5)] wurde ein Prüfverfahren zur Bewertung von Klebebändern entwickelt.

Bei der Verarbeitung von Klebmassen gilt, wie bei jeder Verklebung, dass die Leistungsfähigkeit der Klebung umso höher ist, je sauberer, staubfreier, trockener und fettfreier die zu verklebenden Flächen sind. Für den Baubereich ist aber die Forderung nach trockenen und staubfreien Oberflächen praxisfremd. Das Versagen von in der Luftdichtheitsschicht verwendeten Verbindungsmitteln führt unweigerlich zu einer drastischen Erhöhung der Undichtigkeit der Gebäudehülle. Diese bergen erhebliches Problempotential in Form von auftretenden Zugerscheinungen kurzfristig, bis hin zu massiven Bauschäden infolge konvektiven Feuchteintrages mittel- bis langfristig.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- 180° Schältest, dynamische Belastung
- 180° Schertest, statische Belastung
- 90° Schältest, statische Belastung

Beschleunigte Alterung, Konditionierung bei 65°C, 80% rel. LF, max. 210 Tage

Im Ergebnis konnte festgestellt werden dass

- das im Rahmen der Untersuchungen entwickelte Verfahren ist geeignet, die Leistungsfähigkeit von Verklebungen in Kombination mit den unterschiedlichen Bahnen und Untergründen zu bewerten,
- eine geeignete Darstellung von Prüfergebnisse zur beschleunigten Alterung entwickelt werden konnte, die einen direkten Vergleich verschiedener Produkte untereinander ermöglicht
- nach dem entwickelten Verfahren die Ermittlung von geeigneten Fügepartnern ermöglicht wird.

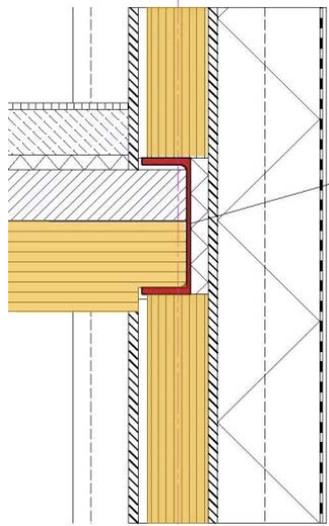
Es ist somit anzustreben auf Grundlage der vorgenannten Forschungsergebnisse und Prüfmethoden die Überprüfung von zuvor ausgewählten Produkten und Systemen zur Herstellung von Luftdichtheitsebenen vorzunehmen. Mit diesem Vorgehen kann die Versagenswahrscheinlichkeit der Luftdichtheitsebene unter den erhöhten Anforderungen in den oberen Geschossen eines Holzhochhauses auf ein absolutes Mindestmaß gesenkt werden.

11 Leitdetails

Nachfolgend werden die wesentlichen Detailpunkte der Konstruktion aufgeführt und hinsichtlich der technischen Eigenschaften auf Grundlage der im Rahmen dieses Forschungsberichtes erarbeiteten Erkenntnisse und Ergebnisse bewertet. Ferner wird der erforderliche Untersuchungs- und Forschungsbedarf aufgezeigt, welcher im Rahmen dieser Arbeit zur Erfüllung der gegebenen Anforderungen ermittelt wurde.

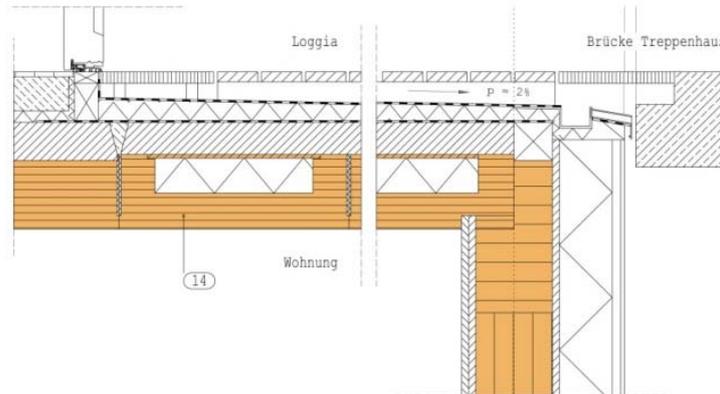
11.1 Anschluss Decke/BSH-Unterzug/Wand	
Planungsaspekte	Forschungs- bzw. weiterer Planungsbedarf
<p>Tragwerksplanung: Anschluss Wand/Decke Schlitzblech mittig in Wandbauteil eingelassen und durch selbstbohrende Stabdübel $d = 7 \text{ mm}$ befestigt. Erf. Anzahl Verbindungsmittel je nach Geschoss und Beanspruchung in Tab. 9, Abschn. 4.7</p>	<ul style="list-style-type: none"> - allgemeingültige Werte der Steifigkeit von Brettsperrholz - Entwicklung eines vereinfachten Modells zur Erfassung der Systemsteifigkeiten - Untersuchung alternativer Verbindungslösungen
<p>Brandschutz: Anforderung gem. LBO: F 90-A / R 90-A bzw. REI 90-A Ausführung: feuerbeständig, tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen und allseitig mit brandschutztechnisch wirksamer Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekl. und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen, F 90-BA / R 90</p>	<p>Untersuchung alternativer Bauteillösungen</p> <ul style="list-style-type: none"> - erweiterte Kapselung „K₂90“ - abgesetzte Bekleidung mit Hohlraum - selbstverlöschende Bauteile
<p>Schallschutz Decke: erf. $R'_w \geq 55 \text{ dB}$, vorh. $R'_w \geq 69 \text{ dB}$ erf. $L'_{n,w} \leq 46 - 2 = 44 \text{ dB}$ vorh. $L'_{n,w} = 46 \text{ bzw. } 48 \text{ dB}$</p>	<p>Ausführung der Anschlüsse mit elastischen Zwischenschichten</p> <ul style="list-style-type: none"> - schalltechnische Auswirkung - Auswirkung auf Tragwerksverhalten (Steifigkeitsminderungen)
<p>Wärmeschutz Außenwand Anforderung: erf. $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ Ausführung: vorh. $U = 0,148 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>	<p>Variationen des außenseitigen Wandaufbaus</p> <ul style="list-style-type: none"> - WDVS - hinterlüftete, gedämmte Fassade
<p>Feuchteschutz: innerer Feuchteschutz: Ergebnis hygrothermische Berechnung – keine Auffeuchtung äußerer Feuchteschutz - Witterungsschutz durch WDVS o. hinterl. Fassade</p>	<p>Untersuchung von Variationen des außenseitigen Wandaufbaus im Sinne der hygrothermischen Auswirkungen und des Witterungsschutzes</p> <ul style="list-style-type: none"> - WDVS - hinterlüftete, gedämmte Fassade
<p>Holzschutz: Einstufung GK 0</p>	<p>Erstellung Holzschutzkonzept (bauliche Holzschutzmaßnahmen)</p>

11.2 Anschluss Decke/Stahl-Unterzug/Wand



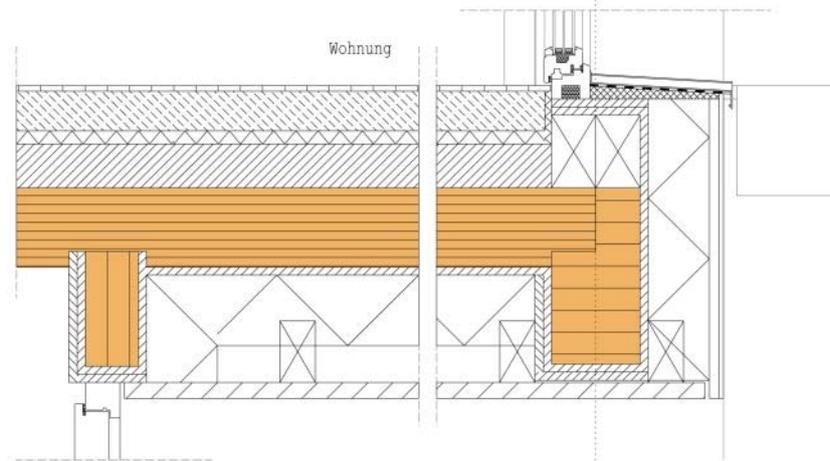
Planungsaspekte	Forschungs- bzw. weiterer Planungsbedarf
<p>Tragwerksplanung: Anschluss Wand/Decke über aufgeschweißtes Schlitzblech am Stahlunterzug in Deckenebene, Schlitzblech mittig in Wandbauteil eingelassen und durch selbstbohrende Stabdübel $d = 7 \text{ mm}$ befestigt.</p> <p>- noch keine weitere Ermittlung der Anschlussmöglichkeiten untersucht, jedoch als Ausführungsvariante in Betracht gezogen</p>	<p>Ausarbeitung von Anschlussmöglichkeiten und Ermittlung der anzusetzenden Steifigkeiten als Einflussgröße für das Gesamttragwerk</p>
<p>Brandschutz: Anforderung gem. LBO: F 90-A / R 90-A bzw. REI 90-A Ausführung: feuerbeständig, tragende und aussteifende Teile aus brennbaren und nicht brennbaren Baustoffen und allseitig mit brandschutztechnisch wirksamer Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen, F 90-BA / R 90 (BA)</p>	<p>Untersuchung alternativer Bauteillösungen</p> <ul style="list-style-type: none"> - erweiterte Kapselung „K₂90“ - abgesetzte Bekleidung mit Hohlraum - selbstverlöschende Bauteile
<p>Schallschutz Decke inkl. Zuschläge für Flankenübertragungen: erf. $R'_{w} \geq 55 \text{ dB}$, vorh. $R'_{w} \geq 69 \text{ dB}$ erf. $L'_{n,w} \leq 46 - 2 = 44 \text{ dB}$, vorh. $L'_{n,w} = 46 \text{ bzw. } 48 \text{ dB}$</p>	<p>Ausführung des Anschlusses mit elastischen Zwischenschichten</p> <ul style="list-style-type: none"> - schalltechnische Auswirkung - Auswirkung auf Tragwerksverhalten (Steifigkeitsminderungen)
<p>Wärmeschutz Außenwand Anforderung: erf. $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ Ausführung: vorh. $U = 0,148 \text{ W/m}^2\text{K}$</p>	<p>Variationen des außenseitigen Wandaufbaus</p> <ul style="list-style-type: none"> - WDVS - hinterlüftete, gedämmte Fassade - Bewertung der besonderen Wärmebrückenwirkung durch den Stahlträger
<p>Feuchteschutz: innerer Feuchteschutz: Ergebnis hygrothermische Berechnung – keine Auffeuchtung äußerer Feuchteschutz - Witterungsschutz durch WDVS o. hinterl. Fassade</p>	<p>Untersuchung von Variationen des außenseitigen Wandaufbaus im Sinne der hygrothermischen Auswirkungen und des Witterungsschutzes</p> <ul style="list-style-type: none"> - WDVS - hinterlüftete, gedämmte Fassade
<p>Holzschutz: Einstufung GK 0</p>	<p>Erstellung Holzschutzkonzept (bauliche Holzschutzmaßnahmen)</p>

11.3 Ausführung Loggia-Decken aus Lignotrend HBV-Elementen



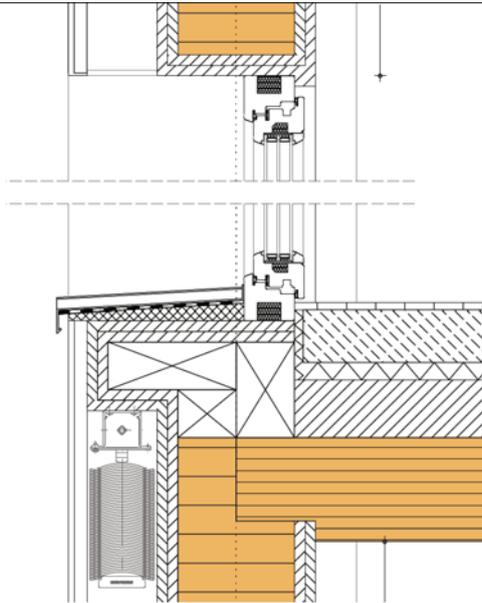
Planungsaspekte	Forschungs- bzw. weiterer Planungsbedarf
<p>Tragwerksplanung: noch keine genauere Ermittlung der Anschlussmöglichkeiten untersucht, jedoch als Ausführungsvariante in Betracht gezogen</p>	<p>Ausarbeitung von Anschlussmöglichkeiten und Ermittlung der anzusetzenden Steifigkeiten als Einflussgröße für das Gesamttragwerk</p>
<p>Brandschutz: Anforderung gem. LBO: F 90-A / REI 90-A</p> <p>Ausführung: feuerbeständig, tragende und aussteifende Teile aus brennbaren und nicht brennbaren Baustoffen und allseitig mit brandschutztechnisch wirksamer Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen, F 90-BA / R 90 (BA)</p>	<p>Untersuchung alternativer Bauteillösungen, wenn sichtbare Holz-Untersicht nicht maßgebendes Kriterium ist:</p> <ul style="list-style-type: none"> - erweiterte Kapselung „K₂90“ - abgesetzte Bekleidung mit Hohlraum - selbstverlöschende Bauteile
<p>Schallschutz Decke inkl. Zuschläge für Flankenübertragungen: erf. $R'_w \geq 55$ dB, erf. $L'_{n,w} \leq 46 - 2 = 44$ dB vorh. R'_w n.n. ermittelt, vorh. $L'_{n,w}$ n.n. ermittelt</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Schalltechnische Bewertung - Ausführung des Anschlusses mit elastischen Zwischenschichten <ul style="list-style-type: none"> o schalltechnische Auswirkung o Auswirkung auf Tragwerksverhalten (Steifigkeitsminderungen)
<p>Wärmeschutz Loggiadecke (im Gefachbereich)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Anforderung: erf. $U = 0,15$ W/m²K - Ausführung: vorh. $U = 0,157$ W/m²K <p>Auswirkung der Loggien auf das A/V im Zuge der Energiebedarfsberechnung</p> <ul style="list-style-type: none"> - A/V ohne Loggien: 0,24 m⁻¹ - A/V mit Loggien: 0,37 m⁻¹ 	<ul style="list-style-type: none"> - Optimierung des Loggia-Deckenaufbaus unter energetischen Aspekten - Untersuchung der konkreten Auswirkung der Loggien auf den Primärenergiebedarf des Gebäudes
<p>Feuchteschutz: innerer Feuchteschutz: Ergebnis hygrothermische Berechnung – keine Auffeuchtung äußerer Feuchteschutz - Witterungsschutz durch Abdichtung</p>	<p>Untersuchung von verschiedenen Verschattungssituationen durch unterschiedliche Brüstungsausführungen und Auswirkung auf die hygrothermische Robustheit des Bauteils</p>
<p>Holzschutz: Einstufung GK 0</p>	<p>Erstellung Holzschutzkonzept (bauliche Holzschutzmaßnahmen)</p>

11.4 Ausführung Loggia-Decken aus BSpH-HBV-Elementen



Planungsaspekte	Forschungs- bzw. weiterer Planungsbedarf
<p>Tragwerksplanung: noch keine genauere Ermittlung der Anschlussmöglichkeiten untersucht, jedoch als Ausführungsvariante in Betracht gezogen</p>	<p>Ausarbeitung von Anschlussmöglichkeiten und Ermittlung der Auswirkung der Loggia-Anordnungen für das Gesamttragwerk</p>
<p>Brandschutz: Anforderung gem. LBO: F 90-A / REI 90-A</p> <p>Ausführung: feuerbeständig, tragende und aussteifende Teile aus brennbaren Baustoffen und mit oberseitig brandschutztechnisch wirksamem Aufbau aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen, unterseitig unbedeckt F90-BA / REI 90-BA</p>	<p>Untersuchung alternativer Bauteillösungen, wenn sichtbare Holz-Untersicht nicht maßgebendes Kriterium ist:</p> <ul style="list-style-type: none"> - erweiterte Kapselung „K₂90“ - abgesetzte Bekleidung mit Hohlraum - selbstverlöschende Bauteile
<p>Schallschutz Decke inkl. Zuschläge für Flankenübertragungen: erf. $R'_w \geq 55$ dB, vorh. $R'_w \geq 69$ dB erf. $L'_{n,w} \leq 46 - 2 = 44$ dB vorh. $L'_{n,w} = 46$ bzw. 48 dB</p>	<p>Ausführung des Anschlusses mit elastischen Zwischenschichten</p> <ul style="list-style-type: none"> - schalltechnische Auswirkung - Auswirkung auf Tragwerksverhalten (Steifigkeitsminderungen)
<p>Wärmeschutz Loggiadecke (im Gefachbereich)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Anforderung: erf. $U = 0,15$ W/m²K - Ausführung: vorh. $U = 0,11$ W/m²K <p>Auswirkung der Loggien auf das A/V im Zuge der Energiebedarfsberechnung</p> <ul style="list-style-type: none"> - A/V ohne Loggien: 0,24 m⁻¹ - A/V mit Loggien: 0,37 m⁻¹ 	<p>Optimierung des Deckenaufbaus unter energetischen Aspekten</p> <p>Untersuchung der konkreten Auswirkung der Loggien auf den Primärenergiebedarf des Gebäudes</p>
<p>Feuchteschutz: innerer Feuchteschutz: Ergebnis hygrothermische Berechnung – keine Auffeuchtung äußerer Feuchteschutz - Witterungsschutz durch unterseitige Bekleidung</p>	<p>Untersuchung von verschiedenen Verschattungssituationen und Vermeidung von Schimmelpilzbildung an der außen liegenden Deckenunterseite</p>
<p>Holzschutz: Einstufung GK 0</p>	<p>Erstellung Holzschutzkonzept (bauliche Holzschutzmaßnahmen)</p>

11.5 Fenster- und Fenstertür-Anschlüsse



Planungsaspekte		Forschungs- bzw. weiterer Planungsbedarf
Tragwerksplanung: noch keine genauere Ermittlung der Anschlussmöglichkeiten untersucht		Auswahl an möglichen Rahmenkonstruktionen Ausarbeitung von Anschlussmöglichkeiten und Ermittlung der erforderlichen Befestigung unter Berücksichtigung erhöhter Windbeanspruchungen gegenüber bisherigen Einbauhöhen im Holzbau (z.B. Erfordernis nach Verdichtung von Anschlusselementen)
Brandschutz: Anforderung gem. LBO: keine bzw. B2 Ausführung n.n. festgelegt		Erstellung einer Auswahl an möglichen Konstruktionen unter brandschutztechnischen Aspekten
Schallschutz: bis keine Festlegungen bzw. gesonderte Untersuchung		Ausführung des Anschlusses mit elastischen Zwischenschichten - schalltechnische Auswirkung - Auswirkung auf Tragwerksverhalten (Steifigkeitsminderungen)
Wärmeschutz:		Untersuchung der konkreten Auswirkung der energetischen Kennwerte der Fenster- und Fenstertüren auf den Primärenergiebedarf des Gebäudes
U-Wert [W/(m ² K)]	0,90	
Gesamtenergiedurchlassgrad g [-]	0,52	
Korrektur g-Wert [-]	0,90	
Abminderungsfaktor Rahmen	0,70	
Abminderungsfaktor Verschattung	0,90	
äußerer Feuchteschutz: bis keine Festlegungen bzw. gesonderte Untersuchung		Untersuchung bzw. Entwicklung von feuchteschutzrelevanten Anschlüssen unter erhöhten Schlagregenbeanspruchungen - Anschlüsse Fassade / Fenster- und Türrahmen - Anschlüsse Wand / Fenster- und Türrahmen - Anschlüsse Fassade / Fensterbänke
Holzschutz: bisher keine Festlegungen bzw. gesonderte Untersuchung		Erstellung Holzschutzkonzept im Falle von Holz-Fensterrahmen (geeignete Holzarten, Beschichtungen, bauliche Gegebenheiten und Maßnahmen, etc.)

Literaturverzeichnis

- [1] <http://de.wikipedia.org/wiki/Hochhaus>
- [2] Kadatz, H.-J. (2001): Seemanns Lexikon der Architektur; Seemann Verlag, Leipzig, 3. Auflage 2001, S. 118
- [3] Pevnser, Honour, Fleming (1992): Lexikon der Weltarchitektur; von; 3. Auflage, 1992, Prestel Verlag, München; S. 279
- [4] Gräve, M., Stadt Flensburg, Fachbereich Entwicklung und Innovation, Stadtentwicklung (2012): Zielgruppenorientierte Wohnungsmarktanalyse für die Stadt Flensburg – 2012
- [5] Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern (Muster-Hochhaus-Richtlinie - MHHR), Fassung April 2008
- [6] DIN EN 338 Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen (Ausgabe 2010-02)
- [7] DIN EN 1995-1-1 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008
- [8] DIN EN 1995-1-1/NA Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau
- [9] DIN 1052:2008-12 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken — Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
- [10] Musterbauordnung - MBO – Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom Oktober 2008
- [11] Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern (Muster-Hochhaus-Richtlinie - MHHR) - Fassung April 2008
- [12] Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern (Muster-Hochhaus-Richtlinie - MHHR) - Fassung April 2008 - Erläuterungen
- [13] DIN EN 14043 Hubrettungsfahrzeuge für die Feuerwehr - Drehleitern mit kombinierten Bewegungen (Automatik-Drehleitern) - Sicherheits- und Leistungsanforderungen sowie Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 14043:2005+A1:2009
- [14] DIN EN 14044 Hubrettungsfahrzeuge für die Feuerwehr - Drehleitern mit aufeinander folgenden (sequenziellen) Bewegungen (Halbautomatik-Drehleitern) - Sicherheits- und Leistungsanforderungen sowie Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 14044:2005+A1:2009
- [15] Hosser, D.; Dehne, M.; Zehfuß, J.: Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz bei mehrgeschossigen Gebäuden in Holz-

- bauweise; Forschungs-auftrag der Deutschen Gesellschaft für Holzforschung unter Beteiligung des iBMB/MPA der TU Braunschweig sowie der VHT Heusenstamm; Stufe 2: Experimentelle Grundlagenuntersuchungen; Abschlussbericht Juli 2000
- [16] Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise — M-HFHolzR (Fassung Juli 2004)
- [17] Hosser, D., Winter, S., Dehne, M.: Von Forschung über Normung zur Praxis: Brand-schutz bei einem fünfgeschossigen Holzständerbau in Rostock. Bauingenieur Band 77, Ju-li/August 2002, S. 311-319
- [18] Hosser, D.; Zehfuß, J.; Dehne, M.: Brandschutz bei Gebäuden mittlerer Höhe in Holzstän-derbauweise. vfdb-Zeitschrift, Heft 2 (2001), S. 71-78
- [19] Hosser, D.; Wesche, J.; Zehfuß,J.; Dehne,M.: Theoretische und experimentelle Grundla-genuntersuchungen zum Brandschutz bei mehrgeschössigen Holzhäu- sern. Institut für Bau- stoffe, Massivbau und Brandschutz, iBMB, TU Braunschweig, Heft 144 (1999) S. 261-265
- [20] Hosser, D.; Dehne, M.: Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz bei mehрге- schossigen Gebäuden in Holzbauweise. Braunschweiger Brandschutz-Tage '99, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Heft 145 (1999), S. 91-108
- [21] Hosser, D.; Krolak, M.; Dehne, M.: Mehrgeschossiger Holzbau: brandsicher und wirt- schaft-lich. Holzzentralblatt, 127. Jahrgang, Nr. 73 (2001)
- [22] Dehne, M.; Hosser, D.: Gegen Rauch und Feuer. Mikado, 7-8 (2001), S. 60-64
- [23] Hosser, D.; Dehne, M.: Grundlagen einer Richtlinie für mehrgeschossige Holz- bauwerke der Gebäudeklasse 4. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brand- schutz, iBMB, TU Braun- schweig Heft 158 (2001), S. 99-122
- [24] Dehne, M.; Tichelmann, C.: Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen zum Brand- schutz bei mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauart. 9. DGfHBrand- schutztagung in Würzburg, 23./24. Oktober 2001, S. 187-217
- [25] Dehne, M.; Hosser, D.: Mit fünf Vollgeschossen in die Zukunft. Mikado, 1-2 (2002), S. 16-20
- [26] Dehne, M.; Krolak, M.: Brandsicher und wirtschaftlich – mehrgeschossiger Holz- bau. Deutsches Ingenieurblatt, Heft 11, DIBt-Special Brandschutz, November 2002, S. 9-11
- [27] Leuters, B.; Krolak, M.; Dehne, M.: Mehrgeschossige Holzbauten zwischen Faszina- tion und Unsicherheit. Bundesbaublatt Heft 6 (2003), S. 40-44
- [28] Dehne, M.; Peter, M.: Die neue Musterbauordnung - Potential für den Holzbau. Deutsche BauZeitschrift, Heft 8, (2003)
- [29] Kerbl, R.; Peter, M.; Dehne, M.: Sechsgeschossiges Pflegeheim in Holzbauweise. Bauen mit Holz, Fachzeitschrift für konstruktiven Holzbau und Ausbau, Ausgabe 01/2005, S. 34-38, (2005)

- [30] Wesche, J.; Dehne, M.: Konzepte des baulichen Brandschutzes für mehrgeschossige Holzbauwerke. Bundesbaublatt, Heft 7 (2000), S. 44-46
- [31] Dehne, M.; Kruse, D.; Kampmeier, B.: Wirtschaftlicher Brandschutz für Holzbauten. Bauen mit Holz, Fachzeitschrift für konstruktiven Holzbau und Ausbau, Ausgabe 08/2005, S. 29-34, (2005)
- [32] Dehne, M., Pape, H., Kruse, D., Krolak, M.: Informationsdienst Holz spezial, Brand-schutzkonzepte für mehrgeschossige Gebäude und Aufstockungen in Holzbauweise, De-zember 2005
- [33] Dehne, M., Kruse, D.: Brandschutz bei mehrgeschossigen Holzbauten – Praxiserfahrungen und neue Entwicklungen. Bauingenieur Band 81, März 2006, S. 142 – 151
- [34] Gressmann, H.-J.: Abwehrender und Anlagentechnischer Brandschutz für Architekten, Bauingenieure und Feuerwehringenieure. Mit 116 Tabellen. Renningen: Expert-Verl. 2008
- [35] Musterverordnung über den Bau und Betrieb von Versammlungsstätten. MVStättV Fassung Juni 2005
- [36] Kunkelmann, J.: Forschungsbericht Nr. 149: Brandschutz in Genlaboren - Einsatz von Wassernebel- und Gaslöschanlagen. Teil 1. Anwendungsbereiche für Wassernebel-Löschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Lösch-wassermengen in Abhängigkeit einer 'Brandgefahrenklasse' - Teil 3. <http://www.ffb.kit.edu/392.php>, 20.01.2014
- [37] Klein, W., Böke, J.: Brandschutzanlagen. Teil 1: Grundlagen und Wasserlöschanlagen. Köln: VdS Schadenverhütung Verl. 2004
- [38] USFA: FA-43 Home Fire Protection: Residential Fire Sprinkler Systems Save Lives, <https://apps.usfa.fema.gov/publications/display.cfm>, 08.01.2014
- [39] DIN 1988-600: Trinkwasser-Installationen in Verbindung mit Feuerlösch- und Brand-schutzanlagen: Dezember 2010
- [40] Kunkelmann, J., Brein, D.: Forschungsbericht Nr. 154: Feuerwehreinsatztaktische Problemstellungen bei der Brandbekämpfung in Gebäuden moderner Bauweise. Brände in Gebäuden moderner Bauweise, Gebäudekonstruktion, Gebäudetechnik in Gebäuden moderner Bauweise, Flashover/Rollover/Backdraft, Mobile Lösch-systeme (Auswahl), Erkennungsmerkmale für die Feuerwehr. <http://www.ffb.kit.edu/392.php>
- [41] Winter, S.: Brandsicherheit im mehrgeschossigen Holzbau - Teilprojekt 02. www.hb.bv.tum.de/HDZ/forschungsberichte/teilprojekt-2.pdf, 20.01.2014
- [42] Kunkelmann, J.: Forschungsbericht Nr. 143: Anwendungsbereiche für Wassernebel-Löschanlagen (geeignete und wirtschaftlich sinnvolle Nutzungen) und erforderliche Lösch-wassermengen in Abhängigkeit einer 'Brandgefahrenklasse'. Teil 1

Brand- und Löschversuche mit Hochdruck-Wassernebel im Holztrepfenraum (ohne und mit Windeinfluss auf einen natürlichen Rauchabzug), Vergleich mit Niederdruck-Wassernebel und Sprinkler. <http://www.ffb.kit.edu/392.php>, 20.01.2014

- [43] Kruse, D., Dehne, M., Kampmeier, B.: Schutz von Holzbauteilen. In: Brandschutzatlas, 2006
- [44] Kampmeier, B.; Kruse, D.: Sichere Holzkonstruktionen durch Hochleistungsbrandschutzbeschichtung. In: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, iBMB, TU Braunschweig Heft 188, September 2005
- [45] Daniliuc, A: Ausrüstung von Leimen mit Intumeszenzreaktionen (Arbeitstitel). Dissertation TU Braunschweig. Unveröffentlicht
- [46] Kampmeier, B.: Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschossigen Holzbau; Dissertation an der TU Braunschweig; Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz; Schriftenreihe des iBMB Heft 206; Braunschweig 2008
- [47] Winter, S.; Kreuzinger, H.; Mestek, P. (2009): Holzbau der Zukunft, Teilprojekt 15 - Flächen aus Brettstapeln, Brettsperholz und Verbundkonstruktionen. Reihe Holzbauforschung, Band 7/15. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- [48] Mestek, P.; Winter, S.(2010): Berechnung und Bemessung von Brettsperholz – ein Überblick. Fachtagung Holzbau 2010, Leinfelden-Echterdingen. Hrsg.: Landesbeirat Holz Baden-Württemberg e.V., Stuttgart. S. 23-40.
- [49] Traetta, G. (2006): Verformungsverhalten von Brettsperholzplatten unter Schubbeanspruchung in der Ebene. Tagungsband der 5. Grazer Holzbau-Fachtagung, 2006; Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz
- [50] Wallner-Novak, M.; Koppelhuber, J.; Pock, K. (2013): Brettsperholz Bemessung – Grundlagen für Statik und Konstruktion nach Eurocode. Hrsg.: pro:Holz Austria Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Holzwirtschaft zur Förderung der Anwendung von Holz, Wien
- [51] Silly, G.(2010): Numerische Studien zur Drill- und Schubsteifigkeit von Brettsperholz (BSP). Diplomarbeit am Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz.
- [52] Schickhofer, G., Bogensperger, T., Moosbrugger, T., (2010), BSPHandbuch, Holz-Massivbauweise in Brettsperholz, Technische Universität Graz
- [53] König, G.; Liphardt, S.(2003): Hochhäuser aus Stahlbeton. In: Bergmeister, K. (Hrsg.): Betonkalender 2003. Ernst und Sohn Verlag, Berlin. S. 1-71.
- [54] Petersen, C. (2000): Dynamik der Baukonstruktionen. Vieweg und Sohn Verlag, Braunschweig. Korrigierter Nachdruck.
- [55] Hirschmann, B. (2011): Ein Beitrag zur Bestimmung der Scheibenschubfestigkeit von Brettsperholz. Masterarbeit am Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz.

- [56] DIN 4109:1989-05 Schallschutz im Hochbau; Anforderungen und Nachweise
- [57] Berichtigungen zu DIN 4109/11.89; DIN 4109 Bbl. 1/11.89 und DIN 4109 Bbl. 2/11.89
- [58] Beiblatt 1 zu DIN 4109:1989-11 Schallschutz im Hochbau; Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren
- [59] Beiblatt 2 zu DIN 4109:1989-11 Schallschutz im Hochbau; Hinweise für Planung und Ausführung, Vorschläge für einen erhöhten Schallschutz, Empfehlungen für den Schallschutz im eigenen Wohn- Arbeitsbereich
- [60] Berichtigungen zu DIN 4109/11.89; DIN 4109 Bbl. 1/11.89 und DIN 4109 Bbl. 2/11.89
- [61] DIN 4109/ A1:2001-01 Schallschutz im Hochbau; Anforderungen und Nachweise; Änderungen A1
- [62] Scholl, W.; Bietz, H. (2005): Integration des Holz- und Skelettbbaus in die neue DIN 4109, Fraunhofer IRB Verlag, 09/2005,
- [63] Dolezal, F., Bednar, Th., Teibinger, M (2008): Flankenübertragung bei Massivholzkonstruktionen. Teil 1: Verbesserung der Flankendämmung durch Einbau elastischer Zwischenschichten und Verifizierung der Anwendbarkeit von EN 12354. Bauphysik 30 (2008), H. 3, S. 14-3-162.
- [64] Künzel, H.M., Zirkelbach, D., Schafaczek, B. (2010), Berücksichtigung der Wasserdampfkonvektion bei der Feuchteschutzbeurteilung von Holzkonstruktionen, wksb Heft 63/2010, S. 25 – 33

Anlage 2: Energiebedarfsberechnung nach EnEV 2009

Anlage 3: Pläne der zum Zeitpunkt der erstellten Bauleitplanung

- Vorhabenbezogener Bebauungsplan "Eckenerstraße 28" (VB Nr. 43), Entwurf, Stand 12.02.2014
- Lageplan, M1: 500, Stand 12.02.2014