

F 2854

Wolfram Jäger, Robert Masou, Tammam Bakeer, Sebastian Ortlepp, Werner Sobek, Walter Haase, Christian Bergmann, Heide Schuster, Leman Altinisik, Valentin Brenner, Simone Mörtl, Thomas Thümmeler

Entwicklung der Grundprinzipien für voll rezyklierbare, modulare, massive Bauweisen in Breitenanwendung auf 0-Energiebasis

F 2854

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

© by Fraunhofer IRB Verlag

2013

ISBN 978-3-8167-9076-1

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



Schlussbericht

„Entwicklung der Grundprinzipien für voll rezyklierbare, modulare, massive Bauweisen in Breitenanwendung auf 0-Energiebasis“

Az.: SF-10.08.18,7-09.26

Gefördert durch: **Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)**
Deichmanns Aue 31-37
53179 Bonn

Mitfinanziert durch: **Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH**
Hohes Steinfeld 1
14797 Kloster Lehnin

Forschende Stelle: **Technische Universität Dresden**
Fakultät Architektur
Lehrstuhl Tragwerksplanung
o. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger

in Kooperation mit: **Universität Stuttgart**
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
o. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek

sowie: **WSGreenTechnologies GmbH, Stuttgart**

Datum: **22.02.2013**

Bearbeiter:

- o. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Jäger**
- Dipl.-Ing. Architekt Robert Masou**
- Dr.-Ing. Tammam Bakeer**
- Dr.-Ing. Sebastian Ortlepp**

- o. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Werner Sobek**
- Dr.-Ing. Walter Haase**
- Dipl.-Ing. Architekt Christian Bergmann**

- Dr.-Ing. MA Heide Schuster**
- Dipl.-Ing. Leman Altinisik**
- Dipl.-Ing. Valentin Brenner**
- Dipl.-Ing. Simone Mörtl**
- Dipl.-Ing. Thomas Thümmeler**

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Regionalforschung gefördert. (Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7-09.26/II3-F20-09-1-104) Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	7
1.1.	Zum Projekt ReMoMaB	7
1.2.	Allgemeines	7
1.3.	Problemstellung	7
1.4.	Ziel des Forschungsvorhabens	8
2.	Theoretische Grundlagen für ReMoMaB.....	11
2.1.	Systemisches Denken	11
2.1.1.	System „Bauwerk“ und System „Bauen“	11
2.1.2.	Bauwesen und Technische Produkte.....	11
2.1.3.	Prozesse und Phasen.....	12
2.1.4.	Modularer Aufbau	14
2.2.	Strukturebenen	14
2.2.1.	Baustruktur.....	14
2.2.2.	Bauweise	15
2.2.3.	Austauschcluster.....	17
2.2.4.	Baugruppe.....	17
2.2.5.	Bauteil	18
2.2.6.	Material	18
2.3.	Verbindungstechnik	19
2.3.1.	Verbindung „Modul-Modul“ und „Schicht-Schicht“	19
2.3.2.	Verbindungsarten	20
2.3.3.	Demontageeigenschaften und Design for Disassembly	22
2.3.4.	Demontageprozesse	24
2.3.5.	Rationalisierung und Effizienzsteigerung	26
2.4.	Breitenanwendung.....	28
2.4.1.	Standardisierung und Individualisierung.....	28
2.4.2.	Basisbauteil und Plattformprinzip.....	29
2.5.	Recyclingfähigkeit.....	30
2.5.1.	Demontage und Aufbereitung.....	30
2.5.2.	Arten des Recycling	31
2.5.3.	Lebenszyklusbetrachtungen	33
2.6.	Zusammenfassung Abschnitt 2	34
2.6.1.	Begriffsdefinitionen und Festlegungen.....	34
2.6.2.	Schematische Grundprinzipien.....	35
2.6.3.	Bewertungsmatrix.....	40
3.	Rahmenbedingungen und Zielmarken.....	43
3.1.	Konstruktive Durchbildung.....	43
3.1.1.	Zur Baukonstruktion	44
3.1.2.	Tragwerk und statisches System.....	45
3.1.3.	Lastweiterleitung, Standsicherheit und Aussteifung	46
3.1.4.	Gebäudeaussteifung	47
3.1.5.	Optimierung von Tragwerken	50
3.2.	Einteilung nach Bauelementen	51
3.3.	Außenwand.....	52
3.3.1.	Fassaden im Massivbau.....	53
3.3.2.	Verbindung „Schicht-Schicht“: Vorhangsfassade	54
3.3.3.	Zur Massivwand in Mauerwerk.....	55

3.3.4.	Funktion von Mauerstein und Mauerfuge	56
3.3.5.	Mechanische Beanspruchungen im Mauergefüge.....	57
3.4.	Trockenmauerwerk	63
3.4.1.	Eigenschaften und Stand der Technik	63
3.4.2.	Vorteile	64
3.4.3.	Nachteile	65
3.4.4.	Mechanisches Verhalten von Trockenmauerwerk	66
3.4.5.	Potenzial und notwendige Modifikationen von Trockenmauerwerk.....	72
3.5.	Geschossdecken	73
3.5.1.	Anforderung, Einteilung.....	73
3.5.2.	Massivdecken	75
3.5.3.	Stahl – Stein - Decken	76
3.5.4.	Potenzial und notwendige Modifikationen von Stahl – Stein - Decken	78
3.6.	Der Wand – Decken – Knoten	79
3.7.	Vorspannung	82
3.7.1.	Vorspannung im Mauerwerksbau.....	84
3.7.2.	Vorspannung ohne Verbund	87
3.7.3.	Notwendige Modifikationen an bestehenden Systemen	88
3.7.4.	Rückschlüsse für die zu entwickelnde Konstruktion	90
3.8.	Energie- und Versorgungskonzept	91
3.8.1.	Zielmarke und Zieldefinition.....	91
3.8.2.	Strategie zur Erreichung des Nullenergiestandards.....	91
3.8.3.	Bauphysikalische Anforderungen an die Gebäudehülle.....	92
3.8.4.	Anforderungen an die technische Gebäudeausrüstung	93
3.8.5.	TGA-Konzept	93
3.8.6.	Raumlufttechnik und Gebäudekonditionierung	94
3.8.7.	Elektrische Installationen.....	96
3.8.8.	Wasserführende Systeme / Sanitär	103
3.9.	Zusammenfassung Abschnitt 3.....	106
3.9.1.	Rückschlüsse	106
3.9.2.	Übertragung in ein Baukastensystem	108
4.	Ausarbeitung und theoretische Untersuchung ausgewählter Varianten.....	111
4.1.	Ansätze.....	111
4.1.1.	Ansätze für die Außenwand	111
4.1.2.	Modularer Ansatz	111
4.1.3.	Elementbezogener Ansatz	112
4.2.	Gemeinsame baukonstruktive Elemente	113
4.2.1.	Geometrische Festlegungen	113
4.2.2.	Zum verwendeten Stein.....	113
4.2.3.	Schichtung – Konstruktive Aufbauten	116
4.2.4.	Statisch - Konstruktiver Ansatz.....	117
4.3.	Erläuterungen zur Gebäudestatik des Prototypenhauses	121
4.3.1.	Geometrische Konstruktive Vorgaben.....	121
4.3.2.	Lasten.....	123
4.3.3.	Statisches System.....	124
4.4.	Bauphysikalische Aspekte der Untersuchungen	125
4.4.1.	Wärmeschutz und Tauwasserfreiheit.....	125
4.4.2.	Wärmebrückenfreie Unterkonstruktion.....	126
4.5.	Integration der TGA - Installationen im Wand Decken Knoten.....	127
4.5.1.	Deckenkanal: Leitungsführung Zuluft, sowie Stromkreis für Beleuchtung ..	128
4.5.2.	Bodenkanal: elektrischer Kreislauf für Steckdosen und Geräte sowie EDV .	129

4.6.	Variantenbildung und –vorstellung	130
4.6.1.	Variante A: Vorspannung mit „modular-kreuzartiger“ Verbindungsart.....	130
4.6.2.	Variante B: Vorspannung mit „elementbezogen-linearer“ Verbindungsart..	131
4.7.	Ausarbeitung und Detaillierung: Variante A.....	131
4.7.1.	Entwicklung von „Kreuzverbindern“	131
4.7.2.	Übersicht zur Entwicklung anhand von Studien	134
4.7.3.	Fassadenschnitte und Detailzeichnungen	141
4.7.4.	Zusammenfassung Variante A	145
4.8.	Ausarbeitung und Detaillierung: Variante B.....	146
4.8.1.	Anlass zur Entwicklung der „Linienhaften Verbindung“	146
4.8.2.	Modul unabhängige, schichtbezogene Fugenabdichtung	147
4.8.3.	Öffnungen in vorgespannten Mauerwerkswänden	147
4.8.4.	Im Bauteilinneren angeordnete Spannstelle	148
4.8.5.	Zeilenhafte Fassadenbefestigung	149
4.8.6.	Schichtbezogene Abdichtung mit zeilenhafter Befestigung	150
4.8.7.	Fassadenschnitte und Detailzeichnungen	154
4.8.8.	Zusammenfassung Variante B	157
5.	Variantenvergleich	159
5.1.	Vergleich der Varianten A und B	159
5.1.1.	Ökobilanzieller Vergleich der Varianten A und B	159
5.1.2.	Ausgangsbedingungen.....	159
5.1.3.	Untersuchungsmethode	161
5.1.4.	Eingangsdaten.....	162
5.1.5.	Ergebnisse und Vergleich.....	172
5.1.6.	Bewertung der Ergebnisse	176
5.1.7.	Optimierungsmöglichkeiten	176
5.2.	Recyclingoptionen.....	178
5.2.1.	Wiederverwendung (Produktrecycling)	178
5.2.2.	Stoffliches Recycling (Materialrecycling).....	179
5.3.	Zusammenfassung der Abschnitte 4 und 5	180
6.	Versuche zur Tragfähigkeit	183
6.1.1.	Allgemeine Angaben	183
6.1.2.	Vorbereitende Steinmessungen.....	185
6.1.3.	Ergebnisse	187
6.1.4.	Hinweise, Bemerkungen.....	188
6.2.	Begleitende Materialprüfungen	188
6.2.1.	Begleitende Materialprüfungen an Steinprismen und Zylindern	188
6.2.2.	Druckkraftuntersuchungen an Einzelsteinen.....	196
6.3.	Tragfähigkeitstest an Wänden: RILEM-Tests.....	198
6.3.1.	Versuchsbeschreibung	198
6.3.2.	Beobachtungen	198
6.3.3.	Testergebnisse.....	203
6.4.	Tragfähigkeitstest an vorgespannten Steindecken	204
6.4.1.	Allgemeine	204
6.4.2.	Einzelstein Anker.....	206
6.4.3.	Versuche zum Spannverlust.....	210
6.4.4.	Biegetest an vorgespannten Decken	211
6.4.5.	Ergebnisse der Tragfähigkeitsprüfung mit Punktlast	213
6.4.6.	Ergebnisse der Tragfähigkeitsprüfung mit Flächenlast	217
6.5.	Zusammenfassende Bewertung der Bauteiltests.....	221
7.	Mögliche Weiterentwicklungen.....	223

7.1.	Weiterentwicklungen bei der Wand	223
7.1.1.	Beschränkung auf den Einsatz bei Schubwänden.....	223
7.1.2.	Kombination von zentrischer Vorspannung mit Umreifungsstählen.....	224
7.2.	Außenwand, Fassade.....	226
7.2.1.	Forschungsansätze zur Luftdichtigkeit	226
7.2.2.	Weitere Ansätze	226
7.3.	Abdichtung erdberührender Bauteile: Gründung, Sockel, Kellerwände	229
7.3.1.	Stand der Technik.....	230
7.3.2.	Vorschläge für demontable Gründungen.....	231
7.3.3.	Ansätze zur Entwicklung demontabler Abdichtungen	232
7.4.	Weiterentwicklungen der Decke	238
7.4.1.	Verbesserung der Tragfähigkeit.....	238
7.4.2.	Leistungsvergleich	240
7.4.3.	Vorgespannten Steinbalken.....	244
7.4.4.	Anwendung im Wand-Decken-Knoten	248
7.5.	Ringanker	249
7.6.	Balkone und Dächer	250
7.7.	Treppen	252
7.7.1.	Stand der Technik.....	252
7.7.2.	modulare Höhenentwicklung.....	253
7.7.3.	Ansätze für demontable Massivtreppen.....	255
7.8.	Entwicklung eines Prototypenhauses	257
7.8.1.	Entwurf eines Musterhauses	259
7.8.2.	Modularität in der Grundrissorganisation.....	260
8.	Ergebnis und Ausblick	263
8.1.	Ergebnis	263
8.2.	Ausblick	266



1. Einleitung

1.1. Zum Projekt ReMoMaB

Das Projekt ReMoMaB wird im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“ durch das Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung und die Xella Technologie- und Forschungsgesellschaft mbH gefördert und ist eine Kooperation zwischen der Technischen Universität Dresden, der Universität Stuttgart und WSGreenTechnologies. Der Projektname ReMoMaB transportiert verkürzt den Projekttitel „Entwicklung der Grundprinzipien für voll rezyklierbare, modulare, massive Bauweisen in Breitenanwendung auf 0-Energiebasis“ [213].

1.2. Allgemeines

Europaweit ist sowohl im Gebäudebestand als auch bei Neubauten eine Vielzahl an Materialkombinationen vorzufinden, deren zukünftiges Potenzial zur Wiederverwendung primär durch den Verbund der Materialien in der Konstruktion bestimmt wird. Nach derzeitiger Gesetzgebung stellt ein Teil der in der Vergangenheit eingesetzten Baumaterialien in Europa Sonderabfall dar und kann nur mit erhöhtem Energie- und Kostenaufwand entsorgt werden [109]. Die EU-Strategie für Abfallvermeidung und Abfallrecycling [1], welche thematisch eng mit dem „Sustainable Materials Management“ der OECD verbunden ist, formuliert dazu klare Anforderungen an die Funktion von Stoffkreisläufen. Ziel der EU-Strategie ist die Minimierung freigesetzter Problemstoffe bei Um- und Rückbau von Gebäuden sowie deren schadlose, kostengünstige und energiesparende Entsorgung durch gezielte Trennung und Ausschleusung.

1.3. Problemstellung

In Deutschland verarbeitet der Bausektor mit ca. 85% den größten Teil der mineralischen Ressourcen. Darüber hinaus verursacht das Bauen mit ca. 58% den größten Anteil des Gesamtabfallaufkommens [200]. Zur Umsetzung der EU-Ressourcenstrategie [1] in Deutschland soll die Inanspruchnahme von Rohstoffen im Wohnungsbau deshalb bis 2025 um 50% gesenkt und die Abfallmenge reduziert werden.

Dem entgegen steht, dass momentan der überwiegende Teil der Stoffströme im Hochbau durch lineare, offene Prozesse gekennzeichnet ist [88]. Dies hat unter anderem zur Folge, dass nahezu alle baukonstruktiven Verbindungen, insbesondere jene im Massivbau, auf Prozessen beruhen, bei denen verschiedene Baumaterialien innig, fest und unlösbar miteinander verbunden werden: Stein – Mörtel – Stein, Beton – Betonstahl - Beton, Putz - Thermo- haut, Rohkonstruktion - Putz etc.

Für die hierdurch erschwerte Trennung werden zusätzlich Zeit, Arbeit und Energie benötigt. Der Rückführungsprozess bei mineralischen Produkten gelingt deshalb momentan nur auf einem, im Vergleich z.B. mit der Automobilindustrie, geringem Niveau. Es entsteht Mauerwerksschutt, Betonschutt und Schrott aus Betonstahl. Rückgebautes Mauerwerk weist deshalb heute in den meisten Fällen eine sehr heterogene stoffliche Zusammensetzung auf, welche nur untergeordneten Verwertungsmöglichkeiten oder einer Deponierung zugeführt

werden kann. Der einst wertvoll hergestellte mineralische Roh- und Baustoff steht nicht mehr zur Verfügung [111].

Die Endlichkeit von Rohstoffen erfordert jedoch ein Umdenken, auch bei den Massivbauwerken. Am Ende der Nutzung des Bauwerks soll das einmal hergestellte Bauelement bzw. das verbaute (mineralische) Material durch einen effizienten Prozess, im besten Fall ohne das Bauelement zu beschädigen, demontiert oder das Material durch einen einfachen Trennvorgang sortenrein bewahrt werden. Der Baustoff - oder ein ganzes Bauelement - kann hierdurch hochwertig weiter- bzw. wiederverwendet werden. Es ist deshalb wichtig, bestehende Baukonstruktionen vor dem Hintergrund einer späteren Trennbarkeit methodisch zu erfassen. Dabei dienen Bereiche, wie beispielsweise die Elektro-, Maschinenbau-, oder Automobilindustrie, in denen bereits seit Jahren recyclinggerecht konstruiert wird, als Vorbild für zukünftige Entwurfs- und Konstruktionsstrategien im Bauwesen [98] [130].

Diese methodische Erfassung beginnt mit einer ganzheitlichen Betrachtung der infrage kommenden Baustoffe, da wirtschaftliche Potenziale insbesondere im Hinblick auf die dem Material eigenen Leistungsmerkmale und seine Dauerhaftigkeit häufig ungenutzt bleiben. Im Mauerwerksbau ist dies der Fall, wenn beispielsweise die vorhandenen Genauigkeiten (Plansteine) durch Applikation von Deckschichten (Putz) ungenutzt bleiben. Vorhandene Ansätze wie Vorkonfektionierung zum Beispiel beim KS-Planelement oder großformatigen Elementen aus Porenbeton werden kaum ausgeschöpft.

Hinzu kommt, dass der technische Ausbau bei der Rohkonstruktion selten ausreichend berücksichtigt wird und somit meist unzureichend abgestimmt im Nachhinein in diese eingegriffen werden muss. Die hierbei entstehenden Bauteilverbindungen sind dann ebenfalls oft unlösbar. Ansätze für eine Flexibilisierung des technischen Ausbaus sind vorhanden [55], werden aber noch nicht bedarfsgerecht berücksichtigt und ausgeformt.

1.4. Ziel des Forschungsvorhabens

Gegenwärtige Forschungsvorhaben, mit dem Schwerpunkt „Recycling am Bau“, stehen meist im Zusammenhang mit drohenden Rücknahmeverpflichtungen für Recycling-Materialien durch die Baustoffindustrie sowie mit den von der EU-Kommission angekündigten Deponieverboten zum Beispiel für Kalksandstein [126]. Diese Ansätze stellen jedoch statt der Behebung der Ursache, den Kampf gegen die Wirkung dar und müssen daher als kurzfristige Lösungsansätze angesehen werden [69] [72]. Es werden weitere Verwertungswege gesucht. Nach Schulze [151] werden Innovationen im Recycling nicht ausschließlich durch Restriktionen geschaffen. Sie benötigen vielmehr folgende Voraussetzung;

- eine technische Lösung,
- eine kaufmännische Idee, mit der die technische Innovation realisiert werden kann, sowie
- kommunikative Strategien, mit denen eine Akzeptanz für die (Recycling-) Innovation geschaffen werden kann.

Ziel des Forschungsvorhabens ReMoMaB ist die Entwicklung eines rezyklierbaren Modulsystems für massive Bauweise. Wesentlicher Forschungsschwerpunkt ist die Entwicklung von technischen Lösungen für vollständig demontierbare Bauwerke in Massivbauweise, deren konstruktive Verbindungen eine sortenreine Trennbarkeit der eingesetzten Baustoffe

und Bauteilkomponenten erlauben. Primäres Ziel ist die direkte Wiederverwendung möglichst vieler Bauteile, bis hin zu ganzen Gebäudeelementen.

Aus der Forderung nach Rezyklierbarkeit ergibt sich für Massivbauten ein Widerspruch zwischen der Dauerhaftigkeit und der Demontabilität der Konstruktion, den es zu lösen gilt. Daher werden in diesem Forschungsprojekt ausschließlich technische Lösungen entwickelt und bewertet. Mögliche weitere Innovationen werden im Ausblick gegeben. Unter Berücksichtigung der Anforderungen an den Nullenergiestandard sollen Grundprinzipien für die Breitenanwendung im Wohnungsbau aufgezeigt werden. Zu folgenden Punkten des Forschungsvorhabens werden Methoden entwickelt:

- Demontierbarkeit und sortenreine Trennbarkeit von Bauteilen und Bauelementen bis zur sortenreinen Trennbarkeit des gesamten Gebäudes,
- Evaluierung möglicher Rückführungen der Baustoffe in den Stoffkreislauf (Stoffstrommanagement),
- Reduktion des Materialeinsatzes und damit Schonung der Ressourcen,
- Reduktion von Deponieabfällen durch sortenreine Trennung,
- Anwendung ökologisch unbedenklicher Baustoffe und Vermeidung umweltgefährdender Stoffe
- Wiederverwendung oder Weiterverwertung von Bauteilen und Baustoffen.

Es soll ein frei konfigurierbares Modulsystem für die Breitenanwendung entwickelt werden, welches den vorgefertigten Roh- und Ausbau enthält [57]. Durch den modularen Aufbau der Einzelkomponenten kann die Effizienz und Flexibilität der Fügung zusätzlich erhöht werden. Neben einer Auswertung bisher bekannter Vorgehensweisen und einer begleitenden Recherche zum Stand der Technik werden folgende Einzelziele definiert:

- Festlegung von Schnittstellen, Leistungsgrenzen, Modulen und Modulgrößen, bei denen sich demontable Verbindungen realisieren lassen,
- Entwicklung von Regeln zur Integration des technischen Ausbaus im Gebäude, welche die Recyclierbarkeit erhöht,
- Weiterentwicklung der im Hochbau existierenden (De-)Montagesysteme und lösbaren Verbindungen,
- Nachweisführung der Komponentenfügung, Füge- und Verbindungstechnik [113] unter Berücksichtigung der Fugen- und Toleranzproblematik
- Weiterentwicklung von integralen Gebäudekonzeptionen.
- Nachweisführung der Anforderungen an Schall-, Wärme-, Feuchte- und Brandschutz
- rechnerische und experimentelle Nachweisführung der Statik der Konstruktion.

Wie die Auflistung der genannten Einzelziele zeigt, handelt es sich bei der Entwicklung von Grundprinzipien für eine vollrezyklierbare massive Bauweise um eine komplexe, vielschichtige Aufgabe. Daher gliedert sich der Schlussbericht wie folgt:

In den ersten Abschnitten wird eine Zusammenfassung der Rechercharbeit vorgenommen, deren Einzelaspekte anhand von Analysen herausgearbeitet und fortlaufend in den Gesamtzusammenhang des Bauens gestellt werden. Hierbei sind insbesondere die konstruktiven und prozessualen Zusammenhänge der Einzelaspekte von besonderer Bedeutung. Es ergeben sich Festlegungen, die das weitere Vorgehen bei der Entwicklung von demontablen Konstruktionen leiten.

Es folgt ein Überblick über bestehende konstruktive und technische Lösungen sowie die Entwicklung und Detaillierung demontabler Bauweisen in zwei Varianten. Systematische Rückschlüsse, Handlungsanweisungen, detaillierte Betrachtungen mit ökobilanziellen Vergleichen ausgewählter Konstruktionsweisen und Recyclingoptionen schließen den theoretischen Teil ab.

In den im Anschluss durchgeführten Material- und Bauteiltests wird zum Einen ein Bezug zum aktuellen Stand des Wissens hergestellt. Zum Anderen werden in den durchgeführten Bauteiltests die Grenze sowie der Umfang und die Realisierbarkeit der theoretisch entwickelten Konstruktionen und ihrer Fügeprinzipien nachgewiesen. Darüber hinaus werden Grundlagen zur Entwicklung von Grundrissen für ein Prototypenhaus gegeben. Der Bericht schließt mit einem Ausblick auf mögliche weitere Innovationen und Vorschlägen für zukünftige Forschungen ab.

2. Theoretische Grundlagen für ReMoMaB

2.1. Systemisches Denken

2.1.1. System „Bauwerk“ und System „Bauen“

Ein Bauwerk ist ein Gebilde aus einer Vielzahl von Einzelteilen, welche nach Plan zusammengesetzt werden. Hierdurch entsteht ein technisches System [155]. Diese aufgaben- und sinngeladene Einheit definiert sich durch die Struktur, welche die Systemelemente und ihre Beziehungsgeflechte organisiert. Ebenso wie die Wahl der Materialien spielt daher die Verbindungstechnik zwischen den einzelnen Elementen eine wichtige Rolle für die Konzeption einer Stoffkreislaufwirtschaft im Bauwesen.

Auch bei dem Prozess des Planens und Bauens handelt es sich um ein System, welches als Organisations- und Kommunikationssystem verstanden werden kann. Das Bauen verfügt über eine der komplexesten Wertschöpfungsketten, in deren Prozessverlauf die Schnittstelle zwischen Dienstleistung (Planen) und Produktion (Bauen) für die Qualität des Bauwerks entscheidend ist. Um Grundprinzipien für vollrezyklierbare, modulare Bauweisen zu entwickeln, muss das Wissen über die relevanten Parameter des gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks möglichst früh in den Wertschöpfungsprozess integriert werden. Das Beschaffen und Kommunizieren von Information über die Grenzen von Phasen und Disziplinen hinweg, sowie ihre Interpretation und Deutung innerhalb des Entwurfs- und Konstruktionsprozesses erzeugt Wissen, dessen Umsetzung in Bau und Betrieb über Müllproduktion oder -vermeidung am End-of-Life-Punkt eines Gebäudes entscheidet. Sowohl das System „Bauwerk“ (Produkt) als auch das System „Bauen“ (Prozess), welches ersterem zugrunde liegt, haben einen entsprechend großen Einfluss auf die Rezyklierbarkeit der gebauten Umwelt.

2.1.2. Bauwesen und Technische Produkte

Eine Festlegung ist den Untersuchungen im Rahmen des Projektes ReMoMaB voranzustellen: Bauwerke entstehen typischerweise unter komplexen Bedingungen, sind in einen soziokulturellen Rahmen eingebunden und wirken durch die durch sie gebildeten Räume in maßgeblicher Weise auf unser alltägliches Leben ein. Jedes Bauwerk folgt eigenen, durch den Bauherrn und Architekten individuell definierten Parametern und unterliegt eigenen vielschichtigen Anforderungen. Diese Aspekte deuten auf den Begriff „Architektur“ hin, welcher die kulturelle Relevanz des Bauens hervorhebt und es vom produzierenden Gewerbe unterscheidet.

Im Rahmen des Forschungsprojektes ReMoMaB erfolgt daher eine Fokussierung auf die technischen Kriterien „vollrezyklierbar“, „modular“ und „massiv“. Bauweisen werden hier nach ausschließlich unter technischen Aspekten betrachtet und Zwischenergebnisse anhand dieser bewertet. Unter dieser Prämisse folgt die Projektbearbeitung einem interdisziplinären Ansatz. Erkenntnisse aus der Literatur artverwandter Branchen wie dem Maschinenbau oder der Automobilindustrie werden herangezogen.

2.1.3. Prozesse und Phasen

Wird ein Bauwerk als System begriffen, so muss es systemtechnisch betrachtet werden. Hierbei wird ersichtlich, dass erst das Zusammenspiel aller Komponenten zu einem funktionierenden Ganzen führt, das mehr ist, als nur die Summe seiner Teile [165]. Das Systemdenken beinhaltet die Erfassung und Berücksichtigung aller durch die geplante Vorgehensweise zu erwartenden Auswirkungen.

Es lassen sich die in Bild 1 dargestellten unterschiedlichen Phasen unterscheiden, welche das Ziel haben, möglichst umfassende Informationen über das System „Bauen“ zu geben [165]. Insbesondere zeigt die lebenszyklusbezogene Darstellung eine Feedback-Funktion, welche vom End-Of-Life-Punkt rückwirkend Einfluss auf die vorgelagerten Phasen hat. Diese erweitert die Faktoren, welche auf den iterativen Charakter der Bauwerksplanung Einfluss haben, maßgeblich.

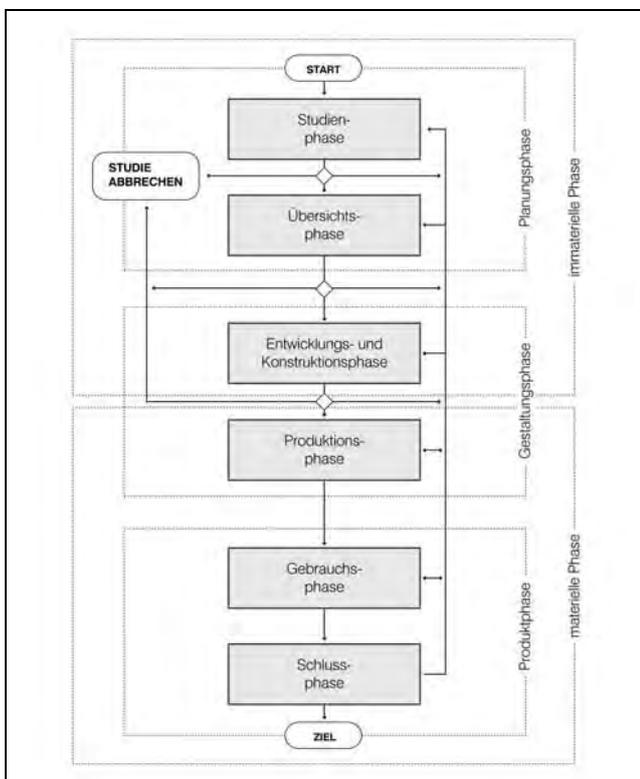


Bild 1 Zeitphasen von Systemen [165]

Am Beispiel der hier angeführten Aufgabenstellung sei dies kurz illustriert. Die Definition einer modularen Massivbauweise als Ausgangsbasis hat maßgeblichen Einfluss auf den Bauprozess, die Zeitpläne, die Logistik und die Möglichkeiten der späteren Anpassungsfähigkeit und Flexibilität des Bauwerks. Die Modulgröße ist hierbei einer der Faktoren, welche die Materialwahl beeinflussen. Diese hat ihrerseits Auswirkungen auf die Wahl der Bauweise. Unterschiedlich zu bewertende Eigenschaften hinsichtlich des Energieverbrauchs oder der Demontageeigenschaften sind die Folge. Das Beispiel zeigt die Relevanz des Zeitpunktes auf, zu welchem entsprechende Informationen vorliegen müssen, um effektiv und effizient Entscheidungen treffen zu können. Aktuelle Studien zeigen, dass in der Planungsphase von Gebäuden die Beeinflussbarkeit der Kosten innerhalb der ersten zwei Leistungsphasen

am größten ist [60], obwohl diese laut HOAI 2009 nur mit 10% der Gesamtsumme des Architektenhonorars vergütet werden (s. Bild 2).

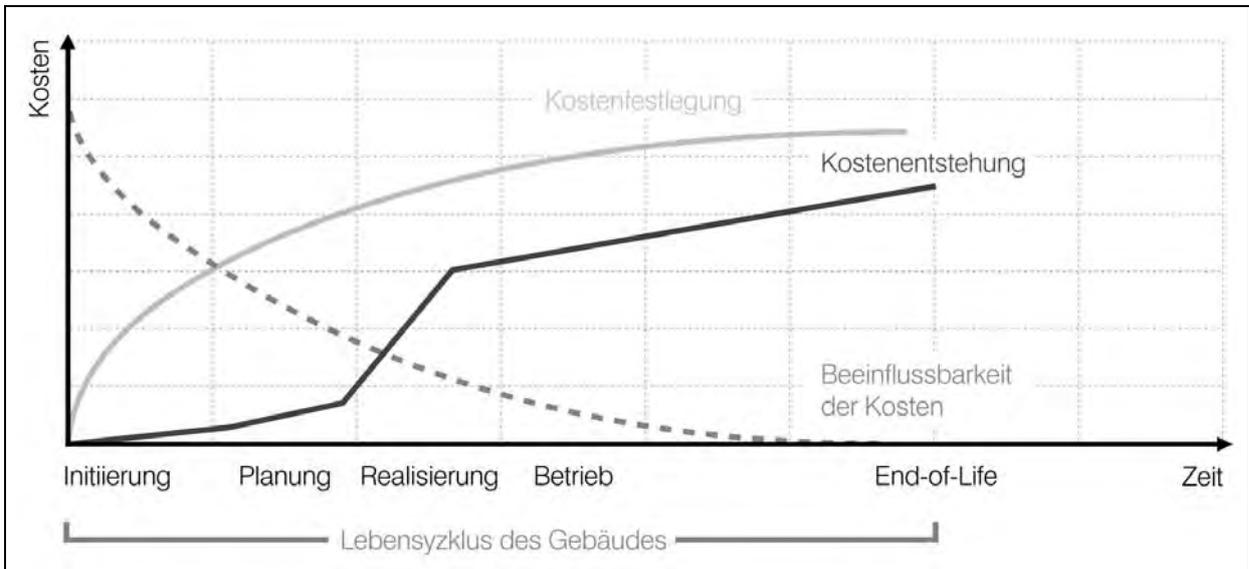


Bild 2 Aufwandsentstehung und Beeinflussung im Zeitablauf, nach [60]

Ein Ungleichgewicht wird ersichtlich, welches sich theoretisch von der Kostenebene auf die Ebene der Rezyklierbarkeit übertragen lässt. In Bild 3 wird der Einfluss des Recyclings auf den Konstruktionsprozess dargestellt, wobei die Pfeildicke den Grad der Beeinflussung zeigt [165]. Zu Beginn der Planung müssen zukünftig vorausschauend – bspw. mithilfe von Simulationen - Recyclingorientierte Entscheidungen getroffen werden. Da sich die Bewertung technischer Lösungen im Anfangsstadium um ein Vielfaches schwerer gestaltet als die Analyse einer fertigen Konstruktion, dient die Baustruktur (siehe Bild 4) dazu, Rückschlüsse für die Formulierung von Grundprinzipien abzuleiten.

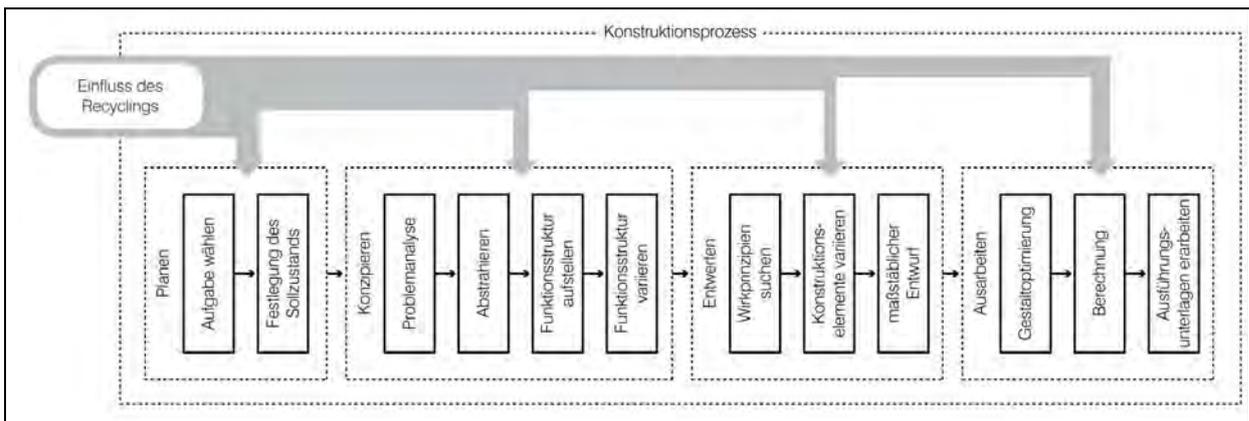


Bild 3 Einfluss des Recyclings auf den Konstruktionsprozess [165]

2.1.4. Modularer Aufbau

Der Terminus „Modul“ hat vielfältige Bedeutungen. Im Bauwesen stellt zum Einen „der“ Modul eine zugrunde liegende Verhältniszahl dar, auf welcher die Modulordnung im Bauwesen (DIN 18000) basiert [29]. Diese beinhaltet Angaben zu einer Entwurfs- und Konstruktionsystematik unter Zugrundelegung eines Koordinationssystems als Hilfsmittel für Planung und Ausführung [114]. „Das“ Modul hingegen ist ein austauschbares, komplexes Teil eines Gerätes oder einer Maschine, das eine geschlossene Funktionseinheit bildet [53]. Durch letztgenannte Definition wird deutlich, dass im Zusammenhang mit dem Projekt ReMoMaB das modulare Bauen dem monolithischen Bauen gegenübersteht. Die Folge ist eine Art Bausatz oder Baukastensystem, welches die Kombination verschiedenster Formate und Hersteller ermöglichen und somit auch eine hohe Flexibilität bieten muss. Die Definition weitestgehend einheitlicher Schnittstellen ist eine Voraussetzung, um dies zu gewährleisten [124].

Im Automobilbau wird der Begriff „Modulbauweise“ für komplexere Baugruppen verwendet. Ein Hauptgrund für deren Verwendung ist die einfache Wartung und Austauschbarkeit der Module. Des Weiteren bietet sie für den Hersteller aufgrund großer Loszahlen baugleicher Serien Vorteile in Bezug auf die Entwicklungs- und Herstellungskosten. Schnelle Produktzyklen, einfache Montageprozesse und die Möglichkeit der Generierung einer großen Variantenvielfalt durch Kombination mehrerer Komponenten verschiedener Gruppen forcieren die Modularisierung im Automobilbau. Durch eine intelligente Übertragung dieser Prinzipien auf das Bauwesen werden neben der Rezyklierbarkeit die genannten weiteren Vorteile erwartet.

2.2. Strukturebenen

2.2.1. Baustruktur

Bauwerke können systematisch anhand ihrer Baustruktur unterteilt werden, die sich, wie in Bild 4 dargestellt, aus vier hierarchisch organisierten Ebenen zusammensetzt [12]:

- Austauschcluster
- Baugruppe (Nutzungseinheit)
- Bauteil (Funktionseinheit)
- Material

Das durch S. Brand [11] geprägte Konzept der Austauschcluster (s. Bild 6) stellt dabei die höchste Hierarchieebene dar [12]. Innerhalb dieser sind verschiedene Bauteile als Funktionseinheiten in Baugruppen zusammengefasst, welche wiederum Nutzungseinheiten bilden. Jedes Bauteil setzt sich typischerweise aus einzelnen Baustoffen unterschiedlicher Materialität zusammen. Alle diese Bestandteile eines Gebäudes stehen in definierten Beziehungen zueinander, die maßgeblich durch die Verbindungstechnik gekennzeichnet sind. Diese Vereinfachung trägt dazu bei, über die Definition der Gebäudeunterelemente nach DIN 276 [34] hinaus, Ansätze zum Erreichen des Ziels einer voll rezyklierbaren Bauweise zu finden.

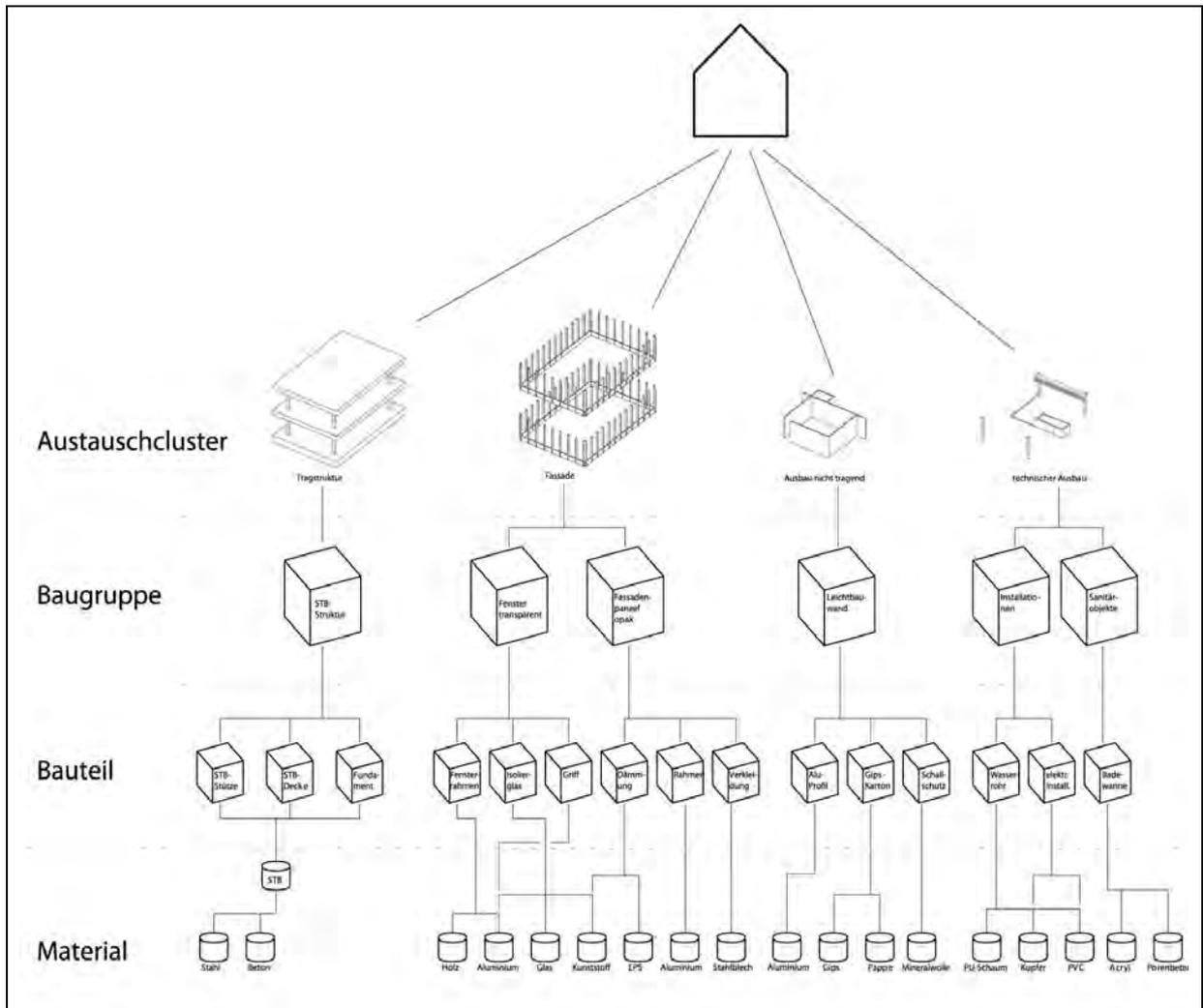


Bild 4 Systematik der Baustruktur [12]

2.2.2. Bauweise

Während im Bauwesen zumeist nur die Begriffe „Skelettbauweise“ und „Massivbauweise“ unterschieden werden, existieren im Maschinenbau vier Bauweisen-Begriffe, die über die Grenzen der erstgenannten hinweg auch im Bauwesen angewendet werden können (s. Bild 5) [154]:

- Differentialbauweise
- Integralbauweise
- Integrierende Bauweise
- Verbundbauweise

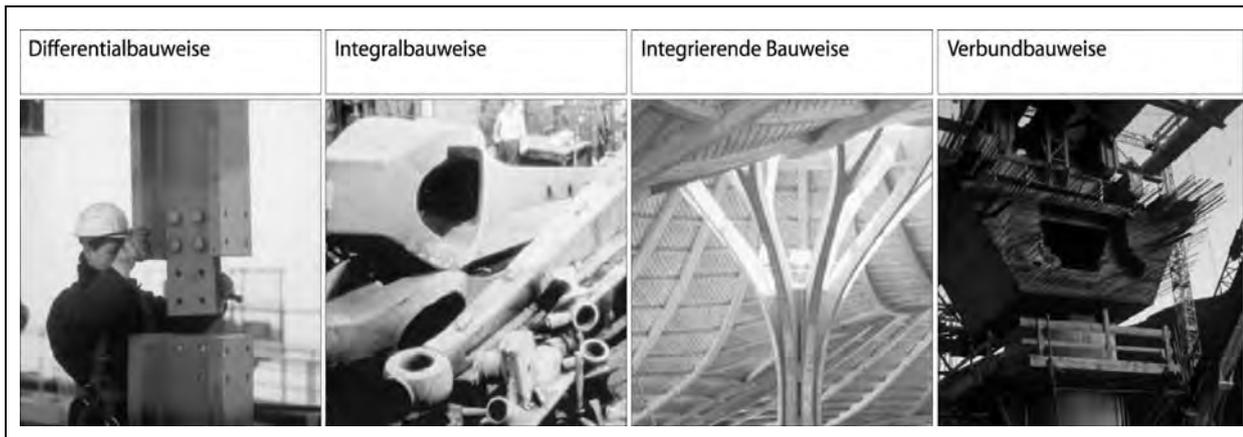


Bild 5 Bauweisen [9]

Die Bauweise bezeichnet die Art und Weise, in der Baustoffe geformt und zu Bauteilen verbunden werden. Sie trifft somit Aussagen zu konstruktiven Eigenschaften, zur Montage, zur Rezyklierbarkeit und zum Verhalten der Elemente im Tragwerk [9]. Unter dem Gesichtspunkt der Rezyklierbarkeit erscheint die Verbundbauweise aufgrund der zumeist flächigen und unlösbaren Verbindung mehrerer Materialien zu einem Stück ungeeignet. Eine Integrierende Bauweise ist in ihren Demontageeigenschaften sehr stark von der Wahl ihrer Verbindungsmittel abhängig und birgt durch Rückstände der Verbindungsmittel, die nach dem Trennen den einzelnen Materialien noch anhaften, prinzipiell die Gefahr der Verunreinigung. Im Gegensatz hierzu verfügt die Integralbauweise über äußerst positive Recyclingeigenschaften, da sie innerhalb nur eines Stoffes mehrere Funktionen übernehmen kann (Monostoffbauweise). Das Demontieren verschiedener Materialien, die damit verbundene Zeit und ein oft aufwändiges Trennverfahren entfallen [12].

Dies entspricht der Forderung der VDI-Richtlinie 2243 [160] nach grundsätzlicher Vermeidung des Einsatzes vieler verschiedener Werkstoffe. Im Hinblick auf das Ziel der Breitenanwendung im Einfamilienhausbau erscheint diese Wahl allerdings suboptimal, da auf die genannten Anforderungen im Innenausbau, der Fassadengestaltung und auf die Integration von technischen Gebäudeausstattungs-elementen nicht flexibel reagiert werden kann. Eine Monostoff-Außenwand würde die Austauschcluster Tragstruktur, Fassade und Innenausbau weitestgehend integrieren. Eine über die Lebensdauer des Gesamtbauwerks flexible Anpassung einzelner Cluster würde erschwert, auf individuelle Gestaltungsfreiheiten im Sinne einer Breitenanwendung könnte weniger eingegangen werden.

Die Differentialbauweise kann unter diesen Voraussetzungen optimal den genannten Parametern Rechnung tragen. Hierbei werden mehrere Elemente auch unterschiedlichster Materialien durch punktuelle Fügung zu einem Bauteil oder einer Baugruppe verbunden. Eine rückstandsfreie Lösung der punktuellen Verbindungen ermöglicht eine vergleichsweise einfache Demontage und eine sortenreine Separierung ohne aufwändige, energieintensive Trennprozesse.

2.2.3. Austauschcluster

Die höchste Hierarchieebene der Struktur eines Bauwerks bilden die Austauschcluster, welche in Bild 6 dargestellt sind [11]. Die in den einzelnen Clustern verarbeiteten Komponenten verfügen über prinzipiell unterschiedliche Lebensdauern. Auch wenn eine exakte Vorhersage der Austauschzyklen einzelner Bauwerkskomponenten aufgrund der sich ständig wandelnden technischen, ökologischen, ökonomischen und gesellschaftspolitischen Parameter nicht möglich ist, so kann doch eine grundlegende Unterscheidung zwischen langlebigen und kurzlebigen Komponenten getroffen werden. Letztere sind stark den individuellen Wünschen der jeweiligen Bewohner unterworfen, während ein Eingreifen in die Tragstruktur allein schon aus Kostengründen beim Umbau vermieden werden sollte. Aufgrund immer kürzer werdender Innovationszyklen des technischen Gebäudeausbaus ist die Lebensdauer der Komponenten hier ebenfalls geringer als bei der Tragstruktur. Ähnlich verhalten sich die Austauschzyklen der Fassadenbekleidung. Witterung, individuelle gestalterische Wünsche der Bewohner und das Inkrafttreten neuer gesetzlicher Bestimmungen wie bspw. in Deutschland der EnEV 2009 [56] führen hier zu durchschnittlichen Austauschzeiten von 25-30 Jahren – die Tendenz ist sinkend.

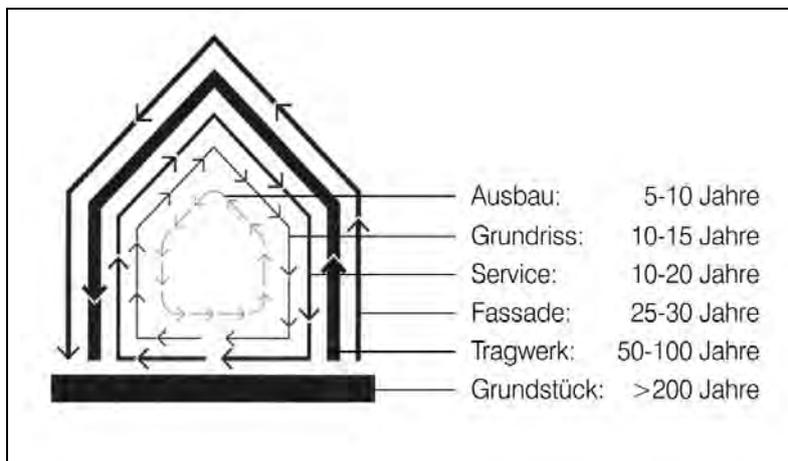


Bild 6 Austauschcluster eines Gebäudes [11]

Im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung der Bauwirtschaft sollten Gebäude zukünftig verstärkt so konzipiert werden, dass ein zu unterschiedlichen Zeiten erfolgender Umbau bzw. Ersatz einzelner Cluster ohne Beeinflussung der jeweils anderen Cluster stattfinden kann. Die Anpassungsfähigkeit von Habitaten wird im Hinblick auf moderne Wohnformen im Zuge differenzierter Nutzerbiographien und dem demographischen Wandel in Deutschland zukünftig noch an Relevanz gewinnen.[^]

2.2.4. Baugruppe

Die Differentialbauweise folgt dem Prinzip der Funktionstrennung. Verschiedene Baustoffe mit unterschiedlichen Eigenschaften werden dabei so kombiniert, dass jeder eine spezifische Funktion optimal erfüllen kann. Im Ganzen entsteht so eine Baugruppe, welche alle an sie gestellten Anforderungen optimal erfüllt. Der Aufbau einer tragenden Außenwand mit mehreren Schichten ist hierfür ein gutes Beispiel. Neben der Funktionstrennung in bspw. Tragstruktur, Wetter- und Wärmeschutz ergibt sich entsprechend dem systemischen Den-

ken der Gesamtwärmedurchgang erst durch das Zusammenspiel der einzelnen Komponenten. Auch die für die Wohnfläche nach WoFIV [162] entscheidende Gesamtwanddicke wird hierdurch definiert. Bei der Konzeption einer Bauweise hat die Wahl eines Einzelteils demnach jeweils Folgen für weitere Komponenten.

2.2.5. Bauteil

Baugruppen wie bspw. die genannte Außenwand setzen sich aus Bauteilen zusammen. Der tragende Teil der Wand kann als ein Bauteil verstanden werden, welches sich wiederum aus mehreren Komponenten - im Folgenden als Module weiter ausgeführt - zusammensetzt. Unter der Prämisse des modularen Massivbaus lassen sich für dieses Bauteil zwei grundsätzliche Modularisierungsarten identifizieren:

- Mauerwerk (aus Mauerwerkssteinen)
- Fertigteil (als Stahlbetonelement)

Eine dritte Möglichkeit stellt die Herstellung von Fertigteilen aus Mauerwerkssteinen als ganze Wandscheiben dar. In diesem Sonderfall handelt es sich um eine Optimierung des Bauprozesses, die einen direkten Einfluss auf die Montage- bzw. Demontage und die Möglichkeit zu einer Breitenanwendung hat. Aufgrund des bereits erreichten hohen Grades der Standardisierung bei größtmöglicher Flexibilität durch eine festgelegte Modulordnung im Mauerwerksbau ist dieser für den Einsatz im Wohnungsbau sehr gut geeignet. Industrielle Fertigungs- und Montageverfahren sind auf dem Markt vorhanden. Der Einsatz von Mauerwerk im Rahmen des Projektes ReMoMaB ist daher der Verwendung von Stahlbetonfertigteilelementen vorzuziehen.

2.2.6. Material

Sowohl Bauteile als auch deren Verbindungsmittel werden aus Materialien gewonnen. Diese bestimmen auf stofflicher Ebene die Recyclingeigenschaften. In Bild 7 wird beispielhaft der Materialfluss der einzelnen Ausbaumaterialien dargestellt [167]

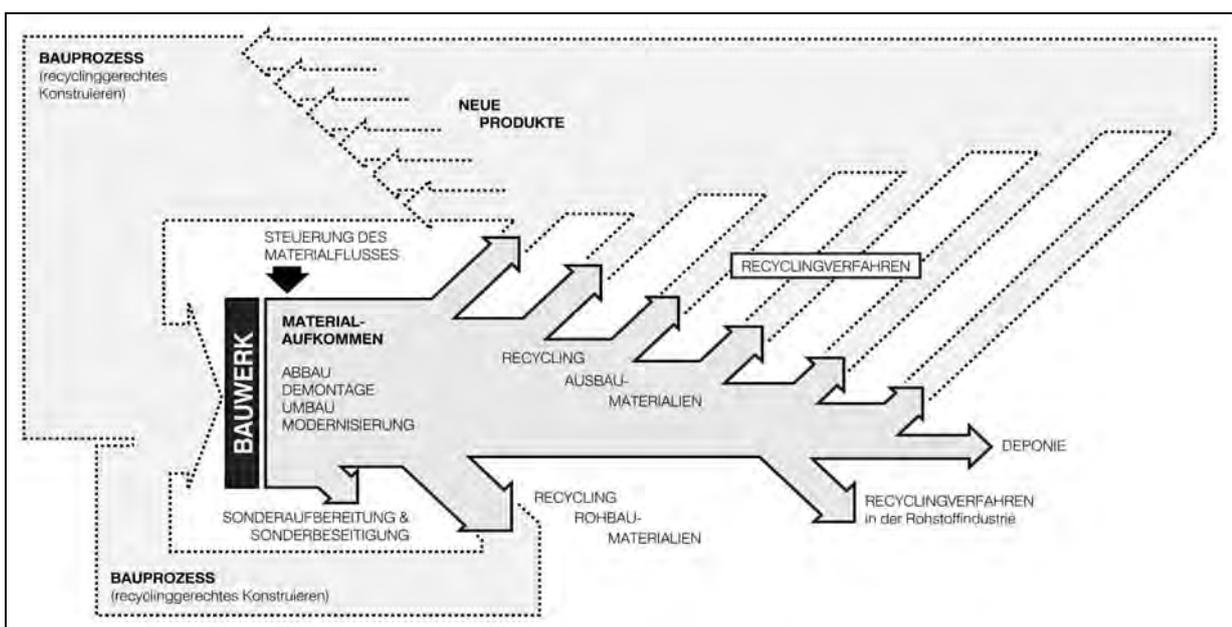


Bild 7 Materialfluss Recycling im Hochbau, vereinfacht nach [167]

Die bereits getroffene Wahl der geeigneten Differentialbauweise mit Mauerwerksmodulen als tragende Außenwand ermöglicht die Eingrenzung der Materialwahl. Für ein solches Bauteil zur Anwendung im Einfamilienhaus eignet sich der mineralische Werkstoff Kalksandstein (Markenname der Firma Xella: Silka) aufgrund seiner Eigenschaften besonders gut [19][204]. Porenbeton (Markenname der Firma Xella: Ytong) ist ein weiterer für das Recycling positiver Werkstoff, da er prinzipiell monostofflich in Integralbauweise eingesetzt werden kann. Aufgrund der komplexen Anforderungen, die sich aus den Untersuchungen zum Prinzip der Austauschcluster und den Betrachtungen zur Breitenanwendung ergeben, erscheint er im Kontext des Projektes ReMoMaB allerdings weniger geeignet.

2.3. Verbindungstechnik

2.3.1. Verbindung „Modul-Modul“ und „Schicht-Schicht“

Als Verbindungsmittel von Mauerwerkskonstruktionen aus Kalksandstein kommt typischerweise Mörtel zum Einsatz. Dieser steht in gleichem Maße einem effizienten Bauablauf (Montage) wie auch einem effektivem Rückbau (Demontage) und anschließendem Recycling diametral entgegen. Die flächige, unlösbare Verbindung der Mauersteine durch Mörtel resultiert in einer Verbundbauweise, die im Zuge des Projektes ReMoMaB durch eine vollrecyklierbare Bauweise ersetzt werden soll.

Die Überführung in eine Differentialbauweise hätte die Entwicklung eines neuartigen, lösbaeren Verbindungsmittels zur Aufgabe. Der Verzicht auf ein jeweils zwei Module verbindendes drittes Material bedeutet eine monostoffliche Konstruktion im Sinne der Integralbauweise – bspw. durch Verzahnung der Module. Hierzu existieren bereits Ansätze in sog. Trockenbauweise, die bisher allerdings auf wenig Akzeptanz bei der Bauherrenschaft stoßen [166]. Beide Ansätze führen zu einem dem Montageprozess entsprechend umgekehrten Demontageprozess, welcher trocken und sauber das schnelle und sortenreine Demontieren und Separieren der einzelnen Materialien ermöglicht. Im Weiteren wird dieses Ziel als „Verbindung Modul-Modul“ bezeichnet. Neben der Betrachtung dieser tragwerkstechnisch relevanten Verbindung besteht als zweites Recyclingproblem die Befestigung der einzelnen zur Baugruppe „Außenwand“ zählenden bauphysikalisch relevanten Schichten. Dieses Ziel wird im Weiteren mit „Verbindung Schicht-Schicht“ bezeichnet.

Je nach Ausführungsart bestehen heute gängige und dem angestrebten Standard „Nullenergiehaus“ entsprechende Wandaufbauten aus einer Vielzahl von Schichten. Je nach Art der Verbindungen zwischen diesen handelt es sich hierbei ebenfalls um Verbundbauweisen (z.B. Wärmedämmverbundsysteme (WDVS)), die nicht oder zumindest nicht zerstörungsfrei und rückstandslos getrennt werden können. Die Fokussierung auf die Thematik der Energieeffizienz hat in der Vergangenheit zu einer einseitigen Betrachtungsweise des Themenbereiches „Nachhaltiges Bauen“ geführt. Mit der Steigerung der Energieeffizienz besteht die Gefahr, dass langfristig auch ein Anstieg des Mischabfallaufkommens evoziert wird. Der im November 2010 in der FAZ erschienene Artikel „Die Burka fürs Haus“ beschreibt diese Problematik [131]. Die Initiative für Nachrichtenaufklärung (INA) identifizierte das Thema „Gefährlicher Müll beim Bauen und Sanieren“ als eines der zehn am stärksten vernachlässigten Themen bereits im Jahr 2009 [174]. Da nicht nur die Deponierung solcher Gemische

dauerhaft ökologisch und ökonomisch problematisch ist, sondern diese wertvollen Rohstoffe für die Stoffkreisläufe der Bauwirtschaft für immer verloren sind, stellt die Wahl der geeigneten Verbindungsmittel, wie sie im Automobilbau seit Ende des 20ten Jahrhunderts durch entsprechende Richtlinien [160][132][133] etabliert wurde, einen wichtigen Bestandteil des Projektes ReMoMaB dar. Für das Jahr 2020 zu erwartende Richtlinien sowohl auf Bundesebene im Rahmen des Entwurfs für ein Ressourceneffizienzprogramm der Bundesregierung [4], als auch auf europäischer Ebene im Zuge der geplanten Umsetzung der Ressourceneffizienz – Roadmap der Europäischen Kommission [1], erfordern im Bereich des Recyclings entsprechend zeitnahe Anstrengungen der Baubranche.

2.3.2. Verbindungsarten

Verbindungsarten werden zumeist nach ihrem physikalischen Wirkprinzip unterteilt. Für die Trennbarkeit der Komponenten muss folgende, in der Produktentwicklung gängige Einteilung zusätzliche Beachtung finden:

- unlösbare Verbindungen
- bedingt lösbare Verbindungen
- lösbare Verbindungen

Bild 8 ordnet heute gängige Verbindungstechniken diesen drei Kategorien zu und überlagert sie mit den jeweils wirkenden physikalischen Prinzipien [9]:

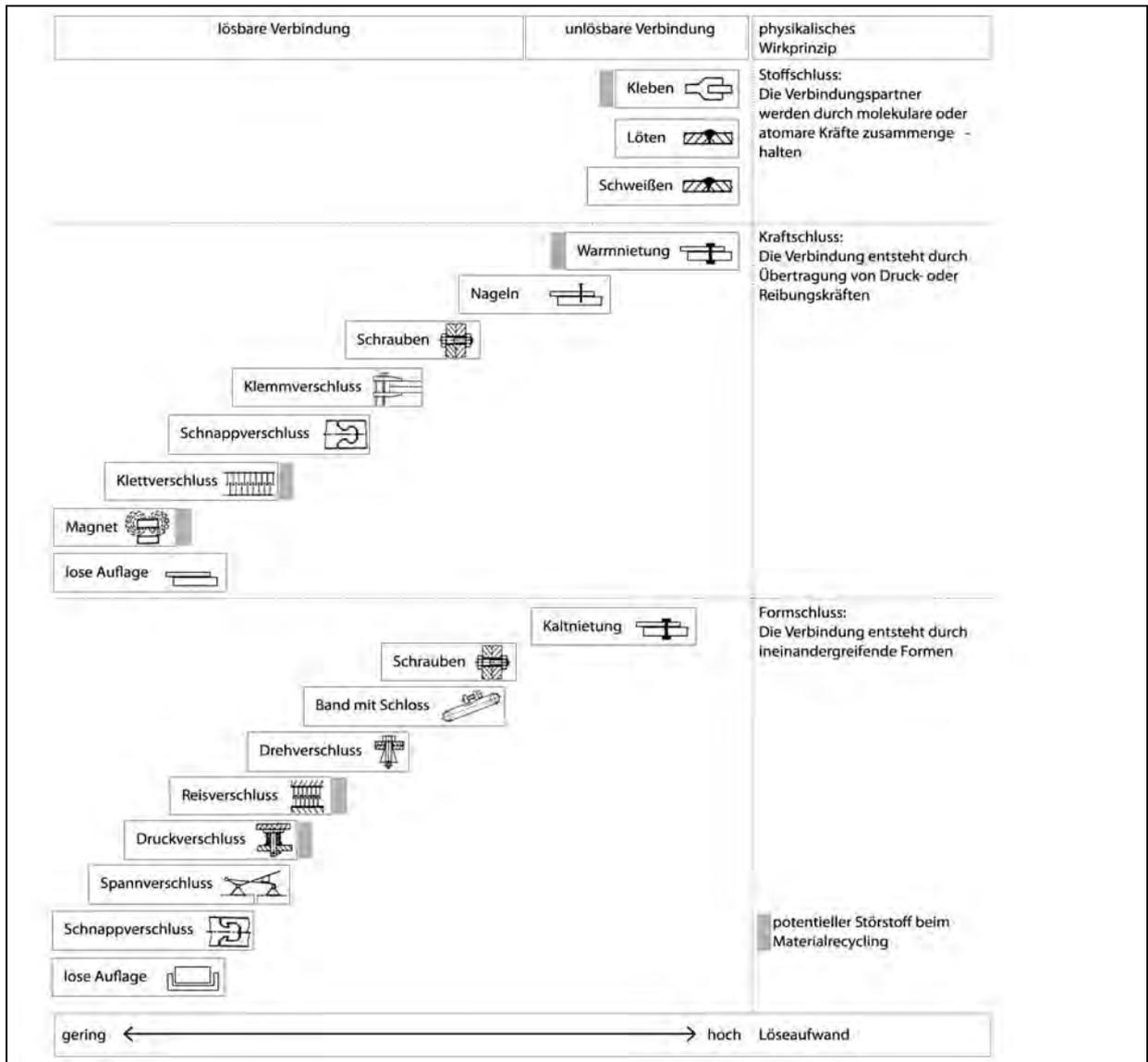


Bild 8 Bauteilverbindungen, nach [12]

Eine weitere Kategorisierung aus dem Bereich der technischen Produkte teilt die Verbindungstechniken nach deren Demontageeigenschaften wie folgt ein [76]:

- zerstörende Demontage
- partiell zerstörende Demontage
- zerstörungsfreie Demontage

Maßgeblich für die Wahl der Verbindungstechnik ist es, von vorne herein zu planen, welcher Recyclingform die zu demontierenden Teile im Anschluss unterzogen werden sollen. Die erläuterten Zusammenhänge der einzelnen Austauschcluster lassen den Schluss zu, dass eine zerstörungsfreie Demontage nicht nur als Basis aller hochwertigen Rezyklate fungiert. Am Beispiel der Außenwand eines Gebäudes lässt sich dies beispielhaft illustrieren: Wird bspw. durch das Inkrafttreten einer neuen Energieeinsparverordnung die Erneuerung der Wärmedämmebene notwendig, so erhöhte sich der Aufwand um ein Vielfaches, wenn e-

benfalls die Verbindungsmittel zwischen Wärmedämmstoff und Mauerwerk bzw. zwischen Mauerwerk und Außenschale zerstört und im weiteren Vorgehen auch die Fassadenelemente der Außenschale erneuert werden müssten. Die Unabhängigkeit dieser Elemente sollte somit gewährt bleiben.

Der gängige Demontageprozess im Maschinenbau entspricht heute meist nicht der Umkehrung der Montage [76]. Dort kennt man allerdings nicht den extremen Widerspruch, der sich im Bauwesen durch die Verwendung der Termini „Abriss“ und „Abbruch“ zeigt und die entsprechenden Methoden beinhaltet. Im Bauwesen muss unter Berücksichtigung der auf den Rückbau folgenden Aufbereitungsprozesse des Weiteren differenziert werden, ob nach dem Trennen noch Rückstände der Verbindungsmittel am jeweiligen Material anhaften oder nicht.

Lösbare Verbindungen, die gleichzeitig rückstands- und zerstörungsfrei sind, haben zwei entscheidende Vorteile: Zum Einen kann die höchste Stufe des Recyclings - die Wiederverwendung - erzielt werden. Zum anderen eröffnen Sie neue Potenziale im Hinblick auf die Technologien, die bei der Demontage zum Einsatz kommen können. Ein systematisch angelegter, planmäßiger und zukünftig industriell rationalisierter Rückbauprozess erscheint möglich. Das Entfallen gefährlicher staub- und lärmintensiver Abrissarbeiten im urbanen Raum entfielen. Das zu rezyklierende Material kann auf diese Weise noch vor Ort oder unter sauberen Bedingungen - der Vorfabrikation entgegengesetzt - an anderer Stelle sortenrein getrennt werden.

Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Austauschzyklen der jeweiligen Cluster und der unabhängigen Funktionstüchtigkeit ihrer angrenzenden Teile stellt ein System von lösba- ren, zerstörungs- und rückstandsfreien Verbindungsmitteln ein Optimum dar. Heutige Verantwortlichkeiten und Prozessketten über den Lebenszyklus eines Bauwerks müssen unter dieser Voraussetzung zukünftig einer Prüfung unterzogen werden. Des Weiteren muss untersucht werden, in wieweit ein Konzept des „Ersatzteillagers“, also die Rücknahme und direkte Wiederverwendung von Modulen durch den Hersteller, im Bauwesen rechtlich und emotional marktfähig ist.

2.3.3. Demontageeigenschaften und Design for Disassembly

Die Demontagefreundlichkeit von Konstruktionen wird durch Maßnahmen während des Entwurfs- und Konstruktionsprozesses, die unter dem Begriff „Design for Disassembly“ (DFD) zusammengefasst sind, definiert. In der Literatur der Produktgestaltung werden hierfür entsprechende Kriterien genannt [160][76][55][142].

In Bild 9 werden einige der zentralen Gestaltungsrichtlinien für demontagegerechte Konstruktionen aufgeführt, welche die enge wechselseitige Beziehung der Verbindungsmittel mit den zu verbindenden Teilen verdeutlichen.

Demontagegerechte Baustruktur		
Gestaltungsrichtlinien	nicht demontagegerecht	demontagegerecht
Gliedern in Demontagebaugruppen, deren Teile bzw. Werkstoffe verwertungsverträglich sind		
Zuordnen des Basisbauteils einer Demontagegruppe zu einer verwertungsgünstigen Altstoffgruppe		
Vermeiden von unlösbaren Verbundkonstruktionen mit verwertungsunverträglichen Werkstoffen		
Verringern von Fügstellen		
Vorsehen eindeutiger Demontageoperationen		
Demontagegerechte Fügstellen		
Gestaltungsrichtlinien	nicht demontagegerecht	demontagegerecht
Verringern der Verbindungselemente, Verwenden gleicher Verbindungselemente		
Verwenden leicht demontierbarer Verbindungselemente, auch nach längerer Nutzungsdauer		
Gewährleisten guter Zugänglichkeit für Demontagewerkzeuge, Bevorzugen einfacher Standardwerkzeuge		
Anstreben einheitlicher Demontagegerichtungen, Vermeiden langer Demontagewege		
Anstreben gleicher Montage- und Demontageoperationen und Werkzeuge		

Bild 9 Demontagegerechte und nicht demontagegerechte Gestaltung, vereinfacht nach [142]

Aus den bestehenden Gestaltungsrichtlinien für eine montagegerechte Produktgestaltung nach Pahl/Beitz [120] lassen sich ebenfalls für die Demontage Handlungsanweisungen ableiten. Das Gliedern, Reduzieren, Vereinheitlichen und Vereinfachen von Demontageoperationen führt in der Folge zu einer demontagegerechten Baustruktur des gesamten Bauwerks. Ebenso basiert eine demontagegerechte Gestaltung der Verbindungen auf dem Reduzieren, Vereinheitlichen und Vereinfachen der Fügestellen. Folgende Regeln werden zusammenfassend aus den Anforderungen der VDI-Richtlinie 2243 [160] übernommen:

- **Werkstoffvielfalt:**
Grundsätzlich sollen möglichst wenige verschiedene Werkstoffe verwendet werden.
- **Demontage:**
Jedes mehrteilige Produkt muss sich ohne Beschädigung einfach, eindeutig und sicher demontieren lassen.
- **Prüfen/Sortieren:**
Zur Vereinfachung und Erleichterung des Prüfens und Sortierens von Bauteilen aus demontierten Produkten sollen Elemente, Baugruppen und Produkte mit gleicher Funktion in Aufbau, Anschlussmaßnahmen und Werkstoffen standardisiert sein.
- **Funktion lösbarer Verbindungen:**
Lösbare Verbindungen müssen für die gesamte Verbrauchsdauer (einschließlich Recycling) funktionsfähig bleiben, d.h. sie dürfen weder festkorrodieren noch nach wiederholtem Lösen die Haltefähigkeit verlieren.
- **Zugänglichkeit:**
Zur einfachen Instandsetzung und zur Demontage ist für eine gute Zugänglichkeit aller Elemente zu sorgen.
- **Demontagegünstige Baustruktur:**
Die eine Kompletterverwertung störenden Teile und Gruppen eines Produktes, die im Zuge einer partiell getrennten Aufbereitung durch Demontage abgetrennt werden sollen, sollen leicht demontierbar und gut zugänglich an den äußeren Produktzonen angeordnet und gekennzeichnet sein.

Eine Übertragung auf das Bauwesen ist prinzipiell möglich [167]. Dies muss auf den unterschiedlichen Bauwerks- bzw. Strukturebenen in unterschiedlichen Skalierungsformen stattfinden.

2.3.4. Demontageprozesse

Das planmäßige, dem Montageprozess in umgekehrter Reihenfolge entsprechende Demonstrieren der Bauwerkskomponenten wird sich nur durchsetzen können, wenn es auch im Hinblick auf die hierfür benötigte Zeit mit dem heute gängigen unplanmäßigen Abriss- bzw. Abbruchverfahren konkurrieren kann.

Die Ressource „Arbeitskraft“ - der Mensch - spielt bei Effizienzbetrachtungen eine entscheidende Rolle. Die Gestaltung der Verbindungsmittel muss demnach auch unter diesem Aspekt untersucht werden. Die umfangreiche Liste der Literatur, welche sich mit den Aspekten der Zeit- und Kosteneinsparung während der Montage im Maschinenbau beschäftigt,

zeigt die Fülle der Anforderungen auf, welche zukünftig an den Demontageprozess gestellt werden müssen.

Die Demontagetiefe spielt hierfür eine entscheidende Rolle [55]. Ziel der Demontage kann vor diesem Hintergrund das Aufteilen des Gerätes in einzelne Fraktionen sein, welche dann verfahrenstechnisch zerkleinert, getrennt und verwertet werden. Aufgrund der EU-Richtlinie zum Altkar-Recycling [132] sind die Recyclingquoten in dieser Branche um die Jahrtausendwende rapide angestiegen. Entsprechende Bestrebungen zur Effizienzsteigerung der Demontage- bzw. Recyclingverfahren waren die Folge.

Beim direkten Vergleich der Demontagezeiten von Schnapp- und Schraubverbindungen von Produkten (s. Bild 10) wird bspw. deutlich, welchen geringen Anteil das Lösen an der Gesamtzeit des Demontageprozesses haben kann. Wichtige weitere Faktoren sind Erkennbarkeit, Zugänglichkeit, benötigte Lösekraft sowie insbesondere die Bauteilgröße und das Bauteilgewicht. Im ungünstigsten Fall kann alleine das Suchen der Verbindungsstelle bis zu 50% der Arbeitszeit ausmachen [55].

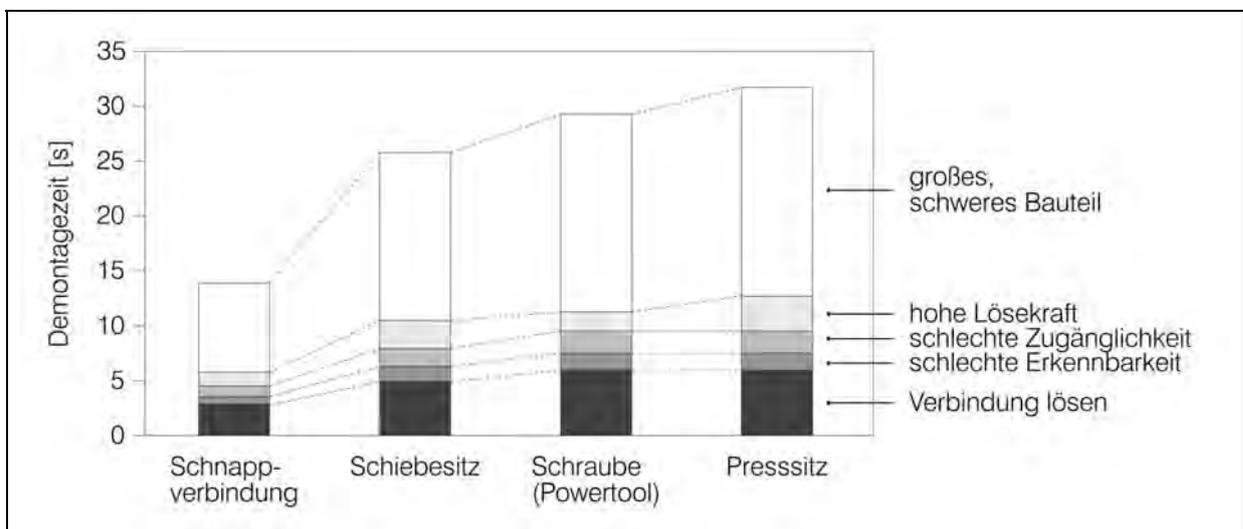


Bild 10 Demontagezeiten für das Lösen verschiedener Verbindungselemente [55]

Im Automobilbau wird während der Entwicklung einer neuen Serie das Verhalten des Fahrzeugs während des Fahrens und auch im Falle eines Crashes begleitend physisch und zunehmend virtuell simuliert. Darüber hinaus werden die Prozesse der Produktion mittels sog. „Digitaler Fabriken“ genauestens analysiert und geplant. Entsprechend finden diese Simulationen heute auch im Bereich der Demontage statt. Hierfür kommen prinzipiell drei Methoden zum Einsatz [55]:

- Analyse des Vorgängermodells
- Bau von Prototypen
- Simulation durch „Design for Environment“-Programme

Bei letzteren wird auf hinterlegte Demontagezeiten zurückgegriffen. Somit können auch Verwertungskosten sowie Materialerlöse, optimierte Demontagewege und Produkt-Umweltbelastungen ermittelt werden - eine ebenfalls für das Bauwesen erstrebenswerte Entwicklung.

2.3.5. Rationalisierung und Effizienzsteigerung

Rationalisierungsmaßnahmen werden für das Bauwesen ein wichtiger Faktor sein, um das Konzept des „Design for Disassembly“ in die Wertschöpfungskette integrieren zu können. Zwei prinzipiell zu unterscheidende Verfahren der Demontage sind zu nennen:

- Demontage vor Ort
- Demontage im Werk

Diese entsprechen der Umkehrung der beim Errichten eines Bauwerks zum Einsatz kommenden Methoden des Bauens in situ (Montage vor Ort) und der Vorfertigung (Montage im Werk). In der Umkehrung sollen Möglichkeiten der Rationalisierung für den Demontageprozess untersucht werden. Aufgrund der Größe finden im Bauwesen bei der Montage die letzten und entsprechend bei der Demontage die ersten Schritte immer vor Ort statt. Ein Ergebnis der Rationalisierung hiervon ist - ebenfalls vergleichbar mit der Automobilindustrie - die Modularisierung. Module können aus einem Stoff (z.B. Mauerwerksstein), aus mehreren Stoffen (z.B. Bauteil) oder aus ganzen Räumen (z.B. Raummodule) bestehen. Bei der Montage von Mauerwerkssteinen kommen im Zuge von Effizienzsteigerungen zunehmend teil- oder vollautomatisierte Maueranlagen sowie in jüngster Zeit Bauroboter zum Einsatz. Für letztere sind neben logistischen Voraussetzungen vor allem die Größe und das Gewicht der Module entscheidend. Auf der Basis einer lösbaren Verbindungstechnik der Mauerwerksmodule könnte der Bauroboter in umgekehrter Reihenfolge die Wände, die er einst aufgebaut hat, am End-Of-Life-Punkt des Bauwerks Schritt für Schritt präzise wieder abbauen. Dieses Prinzip würde unter Beachtung der DFD-Gestaltungsregeln im Weiteren für alle, den Außenwandaufbau betreffende Schichten angewandt werden.

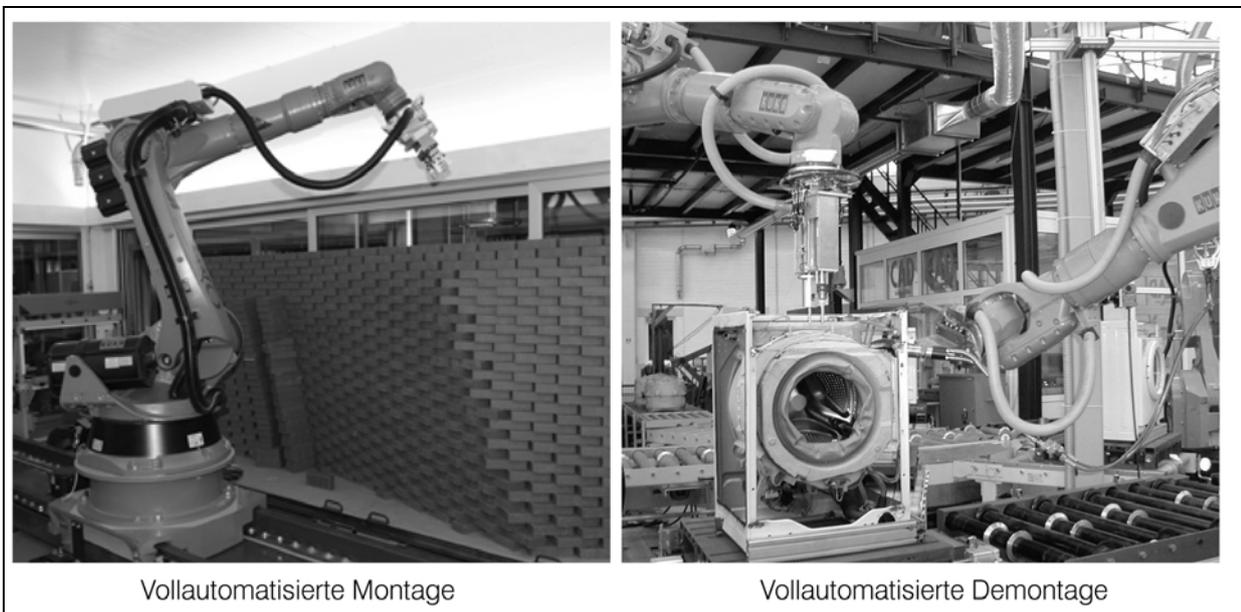


Bild 11 Mauerwerksmontage durch Roboter (links), (ROB Technologies AG) Testanlage Demontagefabrik (rechts), (SFB 281, TU Berlin) [171]

Die zunehmende Rationalisierung des Bauens hat zur Verlagerung immer größerer Anteile der Montage von der Baustelle in das Werk geführt. Dies ermöglicht Techniken einer hohen Präzision, deren Potenzial hinsichtlich des Demontageprozesses bisher weitestgehend un-

genutzt blieb. Betrachtet man die logischen Konsequenzen der Automatisierung, so läge das Verlagern der Demontage von Bauteilen bzw. Baugruppen in eine saubere und automatisierte Umgebung nahe. Die Demogtiefte vor Ort würde dabei minimiert und folglich die Belastung der Umgebung, der benötigte Zeit- sowie der Logistikaufwand verringert, da der getrennte Abtransport aller einzelnen Materialien an ihre verschiedenen Bestimmungsorte für die weiteren Recyclingschritte entfielen. Einzelne Projekte der Baubranche, in Kollaboration mit der Initiative „Cradle to Cradle“, zeigen bereits heute die Tendenz auf, dass Bauteile am End-Of-Life-Punkt eines Gebäudes nicht mehr zwangsläufig von sog. „Verwertern“ deponiert oder rezykliert, sondern zunehmend vom ursprünglichen Hersteller zurückgenommen und weiter verwendet werden [192]. Ohne aufwändige und energieintensive Aufbereitungsprozesse können die zurückgewonnenen Rohstoffe, die während der Demontage bereits sortiert werden, auf diese Weise wieder in die Produktion einfließen. Die gute Handhabung der Bauteile bzw. Baugruppen, welche eine für das vollautomatisierte Werk vorteilhafte Größe aufweisen, macht dieses Vorgehen vergleichbar mit Demontageprozessen von technischen Produkten (siehe Bild 11).

Ein Szenario für die Umsetzung eines solchen Konzeptes ist die Vorfertigung von ganzen Wandscheiben inklusive aller Schichtaufbauten im Werk. Hierbei wird zunächst der konstruktive Teil der Wand aus Mauerwerksmodulen erstellt. Dieses Vorgehen ist bereits heute in Nassbauweise mittels sog. „vollautomatischer Maueranlagen“ Stand der Technik. Sind die Module gefügt, können Roboter flexibel die weiteren Schichten aufbringen. Ein großer Vorteil ist die Flexibilität, die hierbei den Prozess kennzeichnet. Die Potenziale des Mauerwerksbaus werden bei gleichzeitiger Schaffung einer größtmöglichen Kombinationsvielfalt des Fassadenaufbaus optimal genutzt. Die Wärmedämmebene sowie die Materialien zur Abdichtung und der Innenausbau können unter fabriksauberen Bedingungen präzise montiert werden. Limitierende Faktoren im Hinblick auf Größe und Formgebung der Fertigteile, die auch gestalterische Auswirkungen auf das Gesamtbauwerk haben können, ergeben sich aus den Bedingungen des Transports und der Endmontage.

Im Umkehrschluss wird das Bauwerk vor Ort wieder in die ursprünglichen Fertigteile zerlegt, welche mitsamt ihrer Schichtaufbauten wieder in das Werk zurücktransportiert werden. Hier erfolgt die Demontage der Fertigteile in ihre einzelnen Komponenten und im Weiteren eine sortenreine Trennung der einzelnen Materialien. Bei technischen Produkten wird entsprechend von Grobzerlegung und Feinzerlegung gesprochen (s. Bild 12) [76]. Bei der Konzeption der Schnittstellen zwischen den Schichten ist darauf zu achten, dass gemäß der unterschiedlichen Lebenszyklen der Austauschcluster eine manuelle De- und Remontage der einzelnen Schichten jederzeit auch vor Ort möglich sein muss.

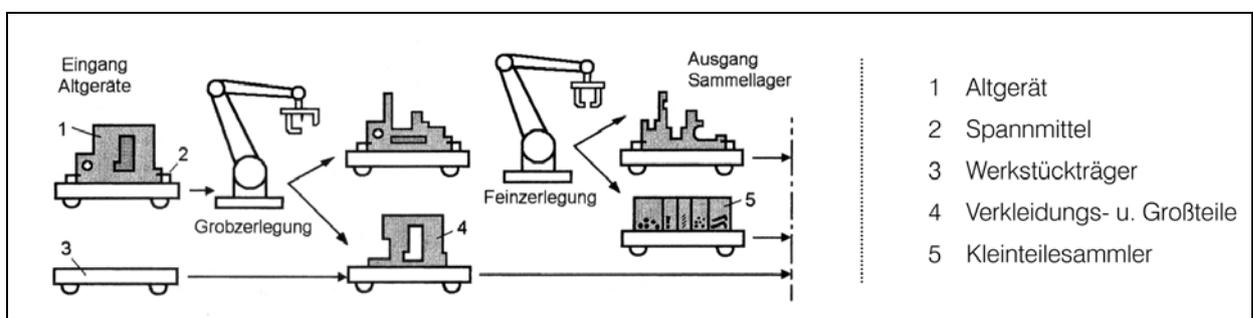


Bild 12 Grobblaus in einer robotisierten Demontageanlage [76]

Eine weitestgehende Vorfertigung von ganzen Wandscheiben inklusive aller Schichtaufbauten im Werk wird im Rahmen der Forschungsarbeit ReMoMaB als sinnvoll erachtet. Eine entsprechend entgegengesetzte Prozessgestaltung der Demontage wird als ökologisch und wirtschaftlich erstrebenswert eingestuft. Allerdings kann bei Bauwerken, anders als bei Produkten, aufgrund einer Nutzungsphase von bis zu 100 oder 150 Jahren nicht immer ohne Weiteres davon ausgegangen werden, dass sie auf der Basis der gleichen Technologien demontiert werden können, die zum Zeitpunkt der Planung hierfür vorgesehen waren. Deshalb und aufgrund der heute herrschenden Rahmenbedingungen im Bauwesen wird im Rahmen des Projektes ReMoMaB parallel auch die manuelle Montage und Demontage vor Ort in Betracht gezogen.

2.4. Breitenanwendung

2.4.1. Standardisierung und Individualisierung

Die Forderung nach voller Rezyklierbarkeit ist mit den Kriterien für eine Breitenanwendung maßgeblich durch den Aspekt der Flexibilität verknüpft. Beide haben direkte Auswirkungen auf die Form der gewählten Konstruktion und damit auf die verwendeten Materialien.

Eine kosteneffiziente Fertigung erfordert eine hohe Standardisierung, da hierdurch eine Wiederholung gleicher Vorgänge erzielt werden kann. Während der Begriff Standardisierung ressentimentsgeladen oftmals mit formaler Monotonie assoziiert wird, bestehen heute in der Produktgestaltung im Gegenteil Methoden, die trotz Massenproduktion individuell auf den Nutzer zugeschnittene Produkte ermöglichen. Die Steigerung der Variantenvielfalt in der Automobilindustrie ist hierfür ein bekanntes Beispiel. Durch standardisierte Fertigungsprozesse und ebenfalls standardisierte Schnittstellen der Bauteile können an den einzelnen Montagestationen je nach Kundenwunsch unterschiedliche Komponenten verbaut werden. Man spricht auch hier von „Modulbauweise“ [124].

Diesem Vorbild folgt heute die Fertighausindustrie. Individualität wird analog zum Automobil weniger durch die Form des Ganzen als vielmehr durch die gewählten Baugruppen bzw. Bauteile erzielt. Heutige Grundrissformen basieren auf einem Jahrzehnte andauernden Optimierungsprozess und folgen - was den breiten Markt angeht - funktionsorientierten Parametern. Die Gestaltung der Komponenten allerdings hat maßgeblichen Einfluss auf das Erscheinungsbild und die sog. „Ausstattungsqualität“ von Einfamilienhäusern. Eine Online-Konfiguration des Eigenheims ist entsprechend der beschriebenen Baustruktur bzw. Strukturebenen individuell möglich [186] und entspricht in weiten Teilen dem Vorgehen bei der „Mass Customization“ von Automobilen [188].

Die Adaptierung der durch die Digitalisierung geprägten Denkweise von der Automobilbranche auf das Bauwesen und die damit einhergehende Erkenntnis, dass Standardisierung durch Modularisierung zu Individualisierung führen kann, hat direkten Einfluss auf das Projekt ReMoMaB.

2.4.2. Basisbauteil und Plattformprinzip

Das in der Produktgestaltung zur Anwendung kommende Basisbauteil dient als konstruktive Basis, welche sequentiell mit weiteren sog. Sekundärkomponenten bestückt wird. Dieser Arbeitsschritt erfolgt hierbei i.d.R. in einem industriellen Prozess im Werk. Das Basisbauteil verfügt dabei über die positive Eigenschaft, als sog. „Träger“ das Modul in der Fertigung von Station zu Station zu führen. Seine Form hängt daher nicht nur von der späteren Verwendung und von den Anforderungen während der Nutzung ab, sondern folgt zudem industriellen Rahmenbedingungen, wie bspw. der Fließbandbreite oder den Robotergreifmethoden. In Bild 13 wird beispielhaft das Optimierungspotenzial eines solchen Basisbauteils hinsichtlich der recyclinggerechten Gestaltung eines Kopierer-Bauteils dargestellt.

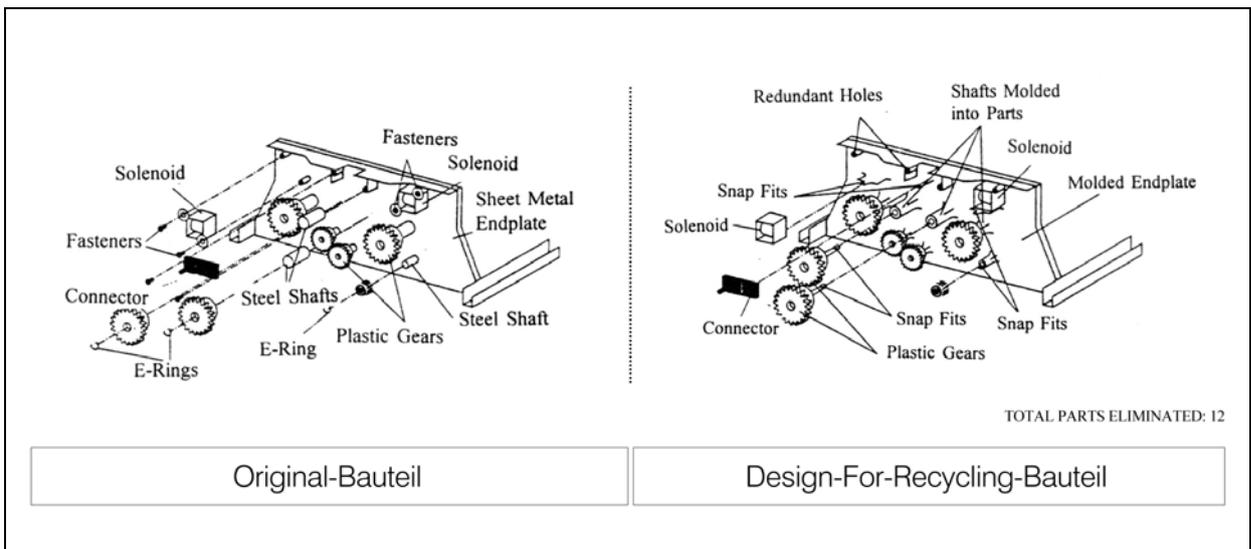


Bild 13 DFR-Basisbauteiloptimierung am Beispiel eines Kopierers (Hersteller: Xerox), vereinfacht nach [121]

Betrachtet man eine typische Außenwand eines Gebäudes in Mauerwerkbauweise, so kann die tragende Wand als Basiselement betrachtet werden, an welches sequentiell die weiteren Schichten innen und außen befestigt werden. Die sich aus der Montage dabei ergebenden Abhängigkeitsmuster sind ebenso für das Demontieren von Bedeutung. Verschachtelte Muster sind beim späteren Demontieren als problematisch zu bewerten, offene sind geschlossenen Mustern vorzuziehen (siehe Bild 14).

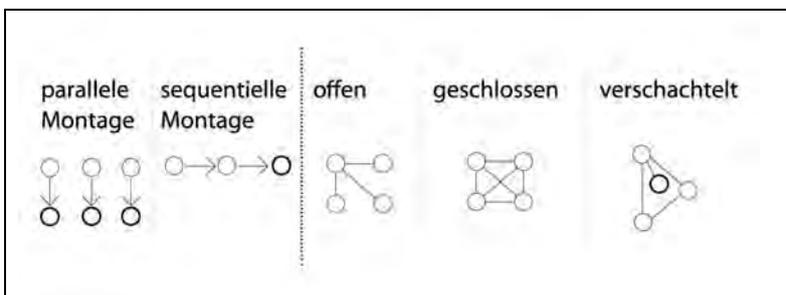


Bild 14 Montagesequenz und Abhängigkeitsmuster [12]

Mit steigender Relevanz des Supply-Chain-Managements im Automobilbau hat sich eine dem Basisbauteil sehr verwandte Bauweise entwickelt: Das Plattformprinzip. Eine sog. „Plattform“ bezeichnet im Automobilbau eine technische Basis, die auf das äußere Erscheinungsbild wenig Einfluss hat. Sie verbindet das Chassis mit den Radkästen zu einer Einheit, auf die unterschiedlichste Karosserien montiert werden können. Dieses Prinzip stellt heute eine gängige Methode dar, um am Markt konkurrenzfähig zu sein. Bei unterschiedlichen Karosserien sogar verschiedener Marken existieren hierfür gleiche Fixationspunkte, so dass Radaufhängung, Motor, Getriebe etc. ausgetauscht werden können. Auf diese Weise kann eine weitaus größere Anzahl an Gleichteilen verbaut werden, was nicht nur die Entwicklungszeiten und -kosten erheblich senkt, sondern vor allem die Produktion flexibler gestaltet [173]. Eine Anwendung des Plattform- bzw. Gleichteileprinzips erscheint im Rahmen des Projektes ReMoMaB auch im Einfamilienhausbau sinnvoll. Sie führt trotz des Steigerns der Variantenvielfalt zu rationellen Montage- und Demontageprozessen, die aufgrund der Modularisierung nach dem Vorbild der Automobilindustrie auch eine Kennzeichnung und sortenreine Trennung der einzelnen Materialien ermöglicht.

2.5. Recyclingfähigkeit

2.5.1. Demontage und Aufbereitung

Die unter dem Stichwort Ressourceneffizienz zusammengefassten Optimierungsvorhaben zielen darauf ab, der Umwelt weniger natürliche Ressourcen zu entziehen. Dies geschieht einerseits durch einen effizienteren, also sparsameren Umgang mit den verwendeten Rohstoffen, andererseits soll der Bedarf an Primärressourcen durch die Verwendung von Rezyklaten reduziert werden. Der Konstrukteur hat bereits durch die Materialwahl effektiv die Möglichkeit, die Ressourceneffizienz zu verbessern. Für das Bauwerk ist zusätzlich die gewählte Konstruktionsart bzw. die Bauweise von besonderem Interesse. Nur durch eine geeignete Schnittstellengestaltung innerhalb des Systems Bauwerk lässt sich eine präzise Demontage erzielen. In der VDI-Richtlinie 2243 „Konstruieren recyclinggerechter technischer Produkte“ [160] wird der Begriff Demontage wie folgt definiert:

- **Demontage:**

Gesamtheit aller Vorgänge, die der Vereinzelung von Mehrkörpersystemen zu Baugruppen, Bauteilen und / oder formlosem Stoff durch Trennen dienen.

Durch eine geeignete Konstruktionsart kann der auf die Demontage folgende Recyclingprozess erheblich vereinfacht, wenn nicht vermieden werden. Die Begriffe „Demontage“ und „Recycling“ werden daher als zwei aufeinander folgende Prozessschritte betrachtet. Das verfahrenstechnische Trennen und Wiederaufbereiten soll im Rahmen des Forschungsprojektes ReMoMaB nicht verwendet werden, da durch ein sortenreines Trennen während der Demontage dieser ressourcenintensive Prozessschritt entfallen kann.

2.5.2. Arten des Recycling

Recycling beschreibt das Rückführen von gebrauchten Stoffen oder Materialien in einen, dem natürlichen Stoffkreislauf nachempfundenen, künstlichen Kreislaufprozess. Der Begriff „Recycling“ ist in Deutschland nicht eindeutig definiert und wird teilweise widersprüchlich aufgefasst. Hösel [83] unterscheidet 1972 erstmals „Gestalt erhaltende Prozesse“ (Produktrecycling, Verwendung) und „Gestalt auflösende Prozesse“ (Materialrecycling, Verwertung) und führt damit eine erste hierarchische Bewertung der Nachnutzung von Produkten ein. Andere Publikationen wie die VDI-Richtlinie 2243 [160], das Kreislauf-wirtschafts- und Abfallgesetz [92] oder die EU-Richtlinie 2008/98/EG [134] nehmen weitere Untergliederungen vor. Dabei sorgt insbesondere die Implementierung der energetischen Verwertung von fossilen Rohstoffen in den Recyclingprozess für Verwirrung (vgl. VDI-Richtlinie 2243 [160]), da hier Materialien durch Verbrennen unwiderruflich für den Stoffkreislauf verloren gehen und somit nicht von einem Recycling im Sinne eines möglichst geschlossenen Kreislaufs gesprochen werden kann. Für das Projekt ReMoMaB wird ein differenziertes Verständnis des Recycling-Begriffs, wie im Folgenden beschrieben, vorausgesetzt. Zusätzlich zu den üblichen Hierarchiestufen wird hierbei eine qualitative Bewertung des Recyclingprozesses eingeführt.

Nachfolgend werden diese sechs Hierarchiestufen nach [9] in Anlehnung an die Definitionen der VDI-Richtlinie 2243 [160] und der EU-Richtlinie 2008/98/EG [134] erläutert.

- **Verwendung**

Erneute Nutzung von gebrauchten Produkten oder Produktteilen für denselben oder einen anderen Zweck. Gegebenenfalls nach Aufarbeitung oder Instandsetzung der Produkte. Diese Stufe kann auch als „Produktrecycling“ bezeichnet werden. Beispiel: Wiederverwendung eines gebrauchten Stahlträgers zum selben Zweck.

- **Stoffliche Verwertung**

Nutzung des Abfalls zur Substitution von Rohstoffen durch das Gewinnen von Stoffen aus Abfällen. Dabei erreicht der Sekundärrohstoff dieselbe oder für die jeweilige Anwendung gleichwertige Qualität wie das Ausgangsprodukt. Dieser Prozess kann auch als „Materialrecycling“ bezeichnet werden. Beispiel: Einschmelzen eines Stahlträgers und erneutes Herstellen eines gleichwertigen Produkts.

- **Stoffliche Verwertung mit Qualitätsverlust (Downcycling)**

Dieser Prozess verläuft analog zu „Stoffliche Verwertung“, jedoch mit Qualitätsverlusten durch den Recyclingprozess. Dabei verschlechtert sich die Qualität des Rezyklats mit jedem weiteren Recycling, bis schließlich keine weitere Verwertung mehr möglich ist und das Material aus dem Kreislauf ausscheidet und beseitigt werden muss. Beispiel: Altpapier kann maximal fünfmal rezykliert werden.

- **Energetische Verwertung**

Einsatz von Abfall mit hohem Brennwert als Ersatzbrennstoff. Diese Form der Verwertung ist nur für nachwachsende Rohstoffe als Recycling zu bezeichnen. Das Verbrennen von nicht erneuerbaren Rohstoffen wie bspw. Kunststoff zur Energiegewinnung ist nicht als Recycling zu bezeichnen. Es kann zwar argumentiert werden, dass die Verbrennung von Abfall aus nicht erneuerbaren Rohstoffen mit Energierückgewinnung ökologisch vertretbar ist, solange die Energiewirtschaft fossile Energieträger einsetzt – dem Recycling im Sinne eines Materialkreislaufs wird dieser Vorgang jedoch nicht gerecht.

- **Thermische Beseitigung**

Verbrennen von Abfall, dessen geringer Brennwert keine energetische Verwertung zulässt, mit dem primären Ziel, die zu deponierende Abfallmenge zu reduzieren. Gleichzeitig wird das Abfallmaterial inertisiert, d.h. organische Bestandteile werden so verändert, dass sie nicht mehr reagieren und somit die Menge an Deponiegasen minimieren.

- **Deponie**

Ablagerung von Abfall, der keiner weiteren Behandlung zugeführt werden kann, auf einer Mülldeponie.

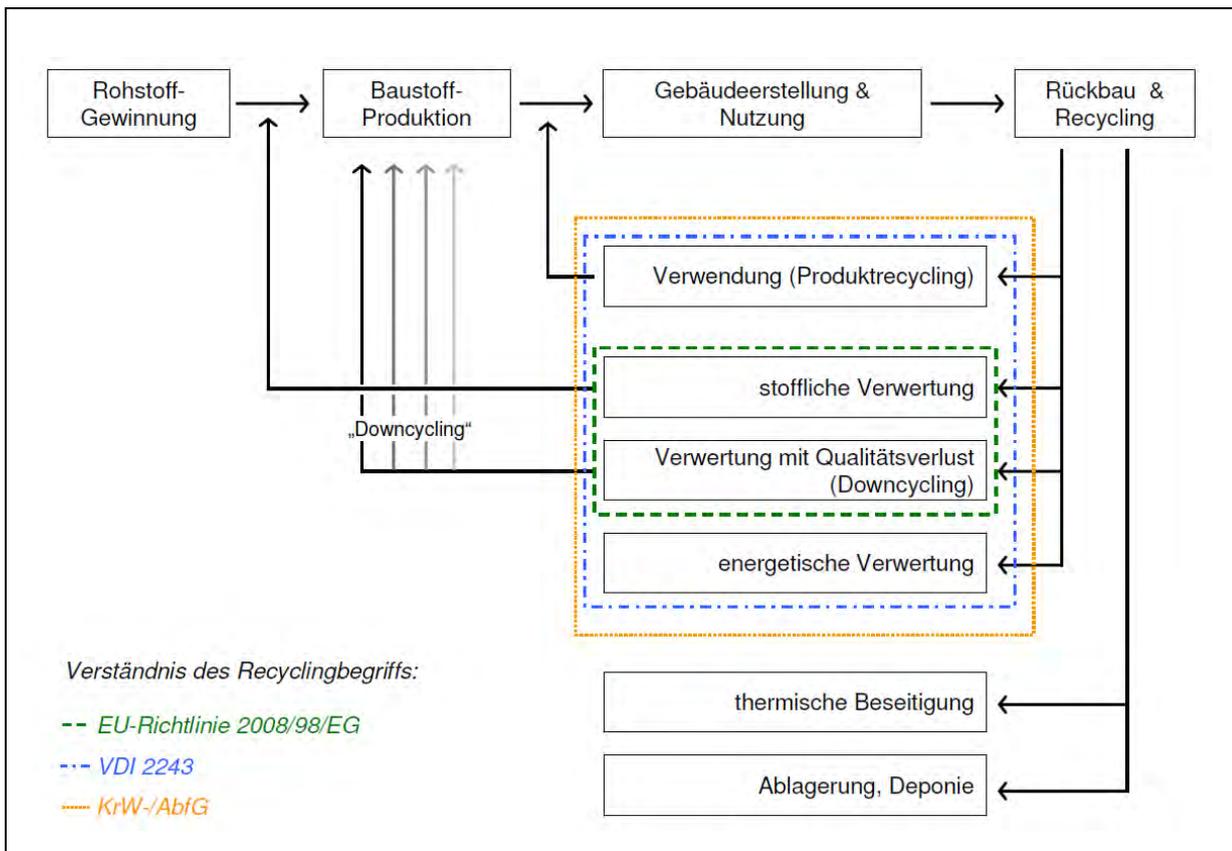


Bild 15 Arten des Recyclings und die sechs Hierarchiestufen [12]

2.5.3. Lebenszyklusbetrachtungen

Die Lebenszyklusbetrachtung von Gebäuden hat im Bauwesen erst in den vergangenen Jahren Verbreitung gefunden. Die End-of-Life-Phase wird wegen der weit verbreiteten Ansicht des „Bauens für die Ewigkeit“ nach wie vor häufig ausgeklammert. Dabei haben aktuelle ökobilanzielle Untersuchungen gezeigt, dass gerade bei neuen Wohngebäuden, deren Konstruktionsweisen auf die Reduktion des Heizenergieverbrauchs optimiert sind, die so genannte „Graue Energie“ über einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren bis zu 45% des Gesamtenergieverbrauchs ausmacht [158]. Werden die verbauten Materialien durch Recycling im Materialkreislauf gehalten und wiederverwendet bzw. weiterverwertet, kann ein erheblicher Teil der Grauen Energie, welche in diesen Materialien enthalten ist, eingespart werden. In der erwähnten Studie hat dieses Potenzial 35 bis 40% betragen.

Um diese Ansätze bereits in die Planungsphase zu integrieren, haben sich in der Fachsprache die Begriffe „Design for Disassembly“, „Design for Recycling“ und „Design for Reuse“ durchgesetzt. Penev [121] schlägt ein generelles Lebenszyklusmodell vor, welches die drei Verfahren miteinander kombiniert. Ziel ist es demnach, über den gesamten Lebenszyklus einen minimalen Ressourcenverbrauch (inkl. Energie) zu erzielen und im Idealfall jegliches Deponieren zu vermeiden. Es wird festgehalten, dass „Design for Disassembly“ einen maßgeblichen Einfluss auf die Konstruktion des Bauwerks und seiner Verbindungsmittel hat. „Design for Recycling“ hängt hingegen in erster Linie von den Materialeigenschaften der verwendeten Baustoffe ab. „Design for Reuse“ beschreibt den vorgestellten Prozess der Verwendung (Produktrecycling), bei dem die strukturelle Gestalt des Produktes erhalten bleibt.

Ziel der ökobilanziellen Vergleiche, die im Projektverlauf durchgeführt wurden, ist es, herauszufinden, wie groß das Recyclingpotenzial einer vollständig demontierbaren Konstruktion in modularer Massivbauweise ist. Des Weiteren wurde untersucht, welchen Einfluss die gewählte Materialität sowie die gewählte Verbindungstechnik auf die ganzheitliche Ökobilanz hat (siehe hierzu Abschnitt 5.1.1.).

2.6. Zusammenfassung Abschnitt 2

2.6.1. Begriffsdefinitionen und Festlegungen

Für das Projekt ReMoMaB werden ausgehend von der Analyse die wichtigsten Begriffe im spezifischen Kontext des Forschungsprojektes wie folgt definiert:

- **Modul:**
Der Begriff „Modul“ bezeichnet im Rahmen des Projektes ReMoMaB einen Mauerstein aus sortenreinem Kalziumsilikat (Kalksandstein), welcher sowohl im Wandaufbau als auch im Deckenaufbau zur Anwendung kommen kann. Das Basismodul für die tragende Außenwand hat die Abmessungen 500x500x125mm.
- **Element:**
Ein „Element“ ist im Rahmen des Projektes ReMoMaB eine Wand- bzw. Deckenscheibe, wie sie vorgefertigt zur Endmontage auf die Baustelle angeliefert wird. Je nach Vorfertigungsgrad kann dieses Element nur aus dem konstruktiven Teil der Wand, also den Modulen und der Vorspannglieder bestehen oder bereits weitere Schichten des bauphysikalischen Teils des Wandaufbaus beinhalten. Die Verbindungspunkte, die zur Befestigen der inneren und äußeren Schichten dienen, sind in jedem Falle bereits Teil des Elements.
- **Bauteil:**
Der Terminus „Bauteil“ bezeichnet im Rahmen des Projektes ReMoMaB den tragenden Teil des Wand- bzw. Deckenaufbaus. Das Bauteil setzt sich somit aus mehreren Modulen und den Vorspanngliedern zusammen und beinhaltet die Verbindungspunkte, die zur Befestigung weiterer Schichten dienen. Es kann somit auch als „Basisbauteil“ für den Gesamtaufbau der Wand bzw. Decke verstanden werden. Falls der Vorfertigungsgrad der Elemente diesen beschriebenen Umfang umfasst, bezeichnen die Begriffe Bauteil und Element das Gleiche.
- **Baugruppe:**
Unter einer „Baugruppe“ wird im Rahmen des Projektes ReMoMaB der gesamte Wand- bzw. Deckenaufbau mit allen benötigten Schichtaufbauten verstanden. Falls der Vorfertigungsgrad eines Elementes diesen beschriebenen Umfang umfasst, bezeichnen die Begriffe Baugruppe und Element das Gleiche.
- **Komponenten:**
Als „Komponenten“ werden im Rahmen des Projektes ReMoMaB alle übrigen Teile im Wand- bzw. Deckenaufbau bezeichnet. Hierunter fallen sowohl solche, die eine „Schicht“ des Gesamtaufbaus bilden, als auch solche, die zur „Verbindung“ der einzelnen Schichten dienen.
- **Schicht:**
Als „Schicht“ wird im Rahmen des Projektes ReMoMaB eine flächige Ebene als Bestandteil des Gesamtwand- bzw. Deckenaufbaus bezeichnet, welche sich in ihrer Materialität von den jeweils angrenzenden Ebenen unterscheidet. Auch der tragende Teil der Wand, der als Bauteil definiert ist, wird als eine Schicht verstanden.

- **Verbindung:**

Unter „Verbindung“ wird im Rahmen des Projektes ReMoMaB ein Teil verstanden, welches zur Befestigung der einzelnen Schichten innerhalb des Gesamtwand- bzw. Deckenaufbaus dient. Diese Verbindung besteht mitunter aus einer Anzahl von Verbindungsmitteln und kann sowohl punktuell als auch linear oder auch kreuzartig gestaltet sein.

Eine Bewertung der einzelnen Möglichkeiten wurde anhand der Parameter „Montage“, „Demontage“, „Recycling“, „Breitenanwendung“, „Nullenergiestandard“ und „Lebenszyklus“ fortlaufend vorgenommen. Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Konstruktionsprinzipien wurden herausgestellt und mit Hilfe einer Bewertungsmatrix zur Entscheidungsfindung analysiert (siehe Abschnitt 2.6.3 und Bild 20). Als Grundlage für die Entwicklung von Grundprinzipien dienen folgende Festlegungen:

- Modulbauweise als Mauerwerksbau
- Material: Kalksandstein
- Differentialbauweise (zweischalig mit flexiblen Vorhangfassaden)
- offene Bauteilstruktur
- Austauschcluster maßgeblich für Konstruktionsart
- lösbare, zerstörungsfreie und rückstandslose Verbindungsmittel (kein Stoffschluss)
- Montage bietet die Möglichkeit zur Wandfertigteil im Werk
- Demontagetiefe vor Ort gering (Rücktransport der Wandfertigteile ins Werk)
- Demontage im Werk
- Demontage und Remontage auch vor Ort ermöglichen (Wartung, Austausch)
- Vermeiden von verfahrenstechnischen Trenn- und Aufbereitungsverfahren
- Recyclingart: bevorzugt Weiterverwendung (spezifisch pro Material)
- Beachtung der Richtlinien für recyclinggerechtes Konstruieren und DFD

2.6.2. Schematische Grundprinzipien

Grundlegende Möglichkeiten zur vollrezyklierbaren Verbindungstechnik im modularen Massivbau können in vier Kategorien unterteilt werden:

- Verbindung „Modul-Modul“
- ohne Verbindungsmittel (unmittelbar)
- mit Verbindungsmittel (mittelbar)
- Verbindung „Schicht-Schicht“
- Kombination der Verbindung „Modul-Modul“ und „Schicht-Schicht“
- Großmaßstäbliche Verbindung durch Vorspannung

Die Entwicklung der schematischen Grundprinzipien und ihr Zusammenhang kann wie folgt (siehe Bild 16) dargestellt werden. Bild 17 zeigt Skizzen der jeweils erarbeiteten Prinzipien.

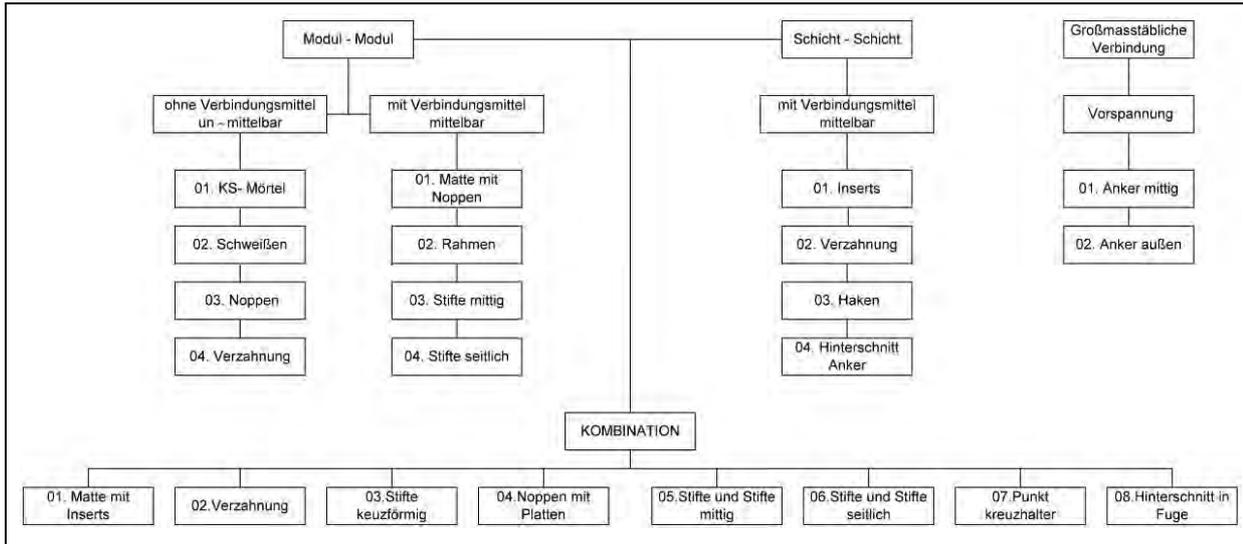


Bild 16 Übersicht Verbindungen

In Bild 18 ist eine Auswahl an kombinierten Verbindungstechniken (Modul-Modul und Schicht-Schicht) dargestellt. Bild 19 zeigt zwei Möglichkeiten der großmaßstäblichen Verbindung mittels Vorspannung. Diese insgesamt zehn Grundprinzipien sind der Gegenstand der Untersuchung, Bewertung und Auswahl im Rahmen der Bewertungsmatrix unter Abschnitt 2.6.3.

An die unter Abschnitt 2 dargestellten theoretischen Grundlagen schließt sich unter Abschnitt 1 und 1 eine konstruktive Betrachtung einzelner, ausgewählter Grundprinzipien an. Diese werden unter den real herrschenden Bedingungen im Bauwesen konzipiert und berücksichtigen die gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie die anerkannten Regeln der Technik und bauen auf die unter Abschnitt 2 dargestellten Erkenntnisse auf.

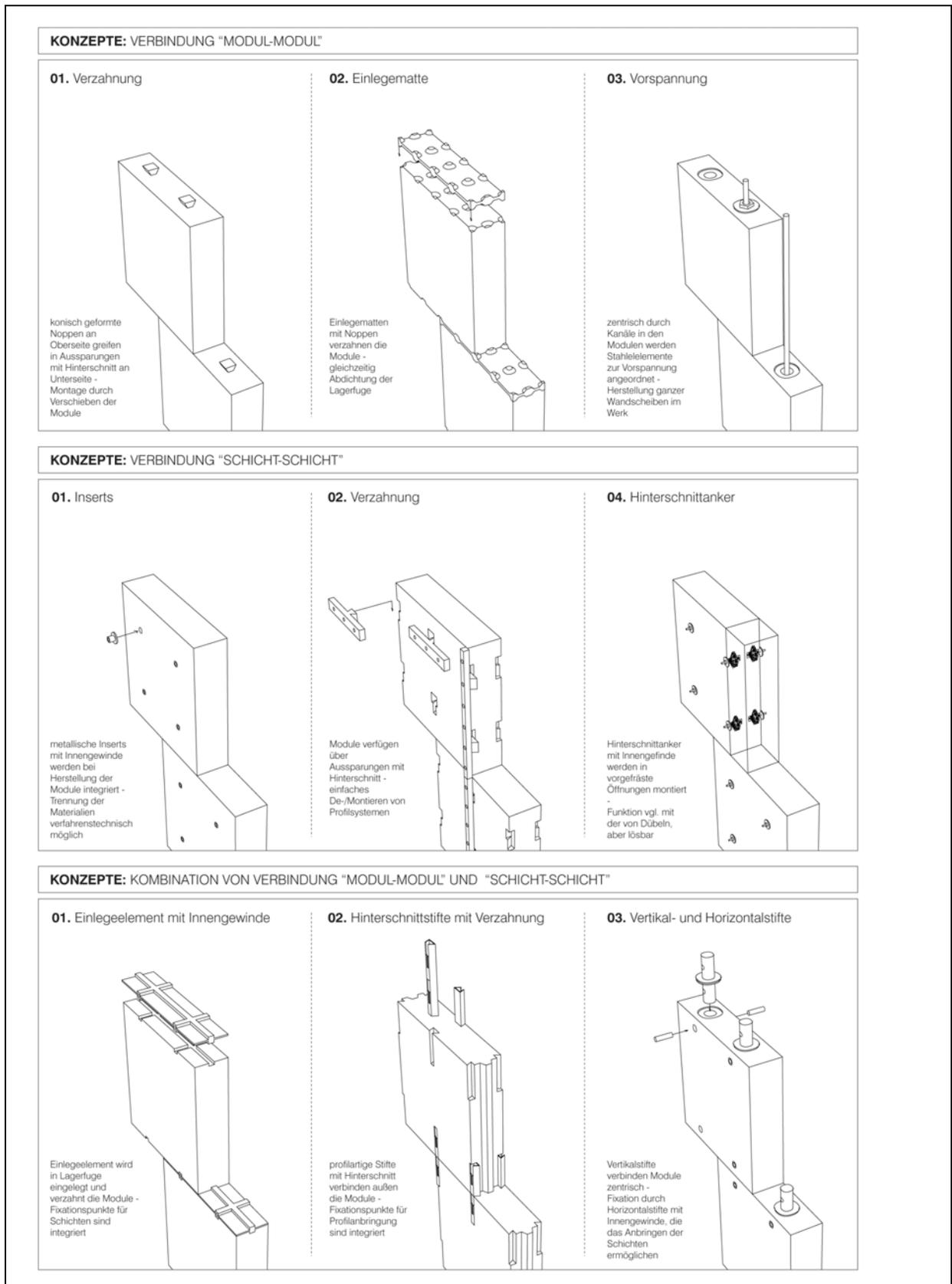
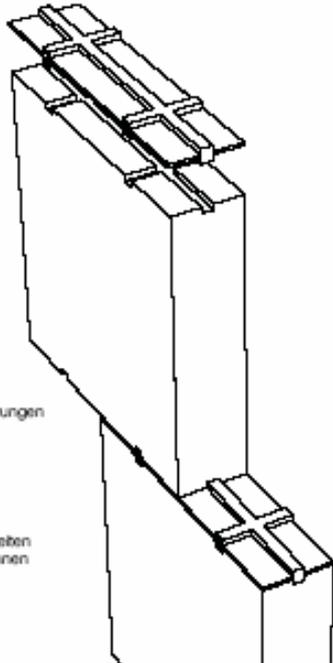


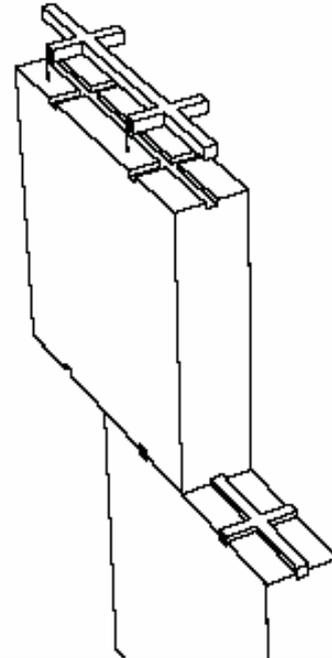
Bild 17 Skizze konzeptioneller Grundprinzipien

01
Matte mit Inserts
 (Kunststoff/Metall)



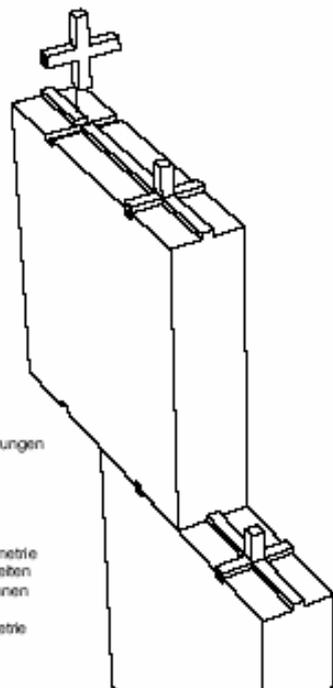
- + unterschiedliche Ausführungen für Flexibilität
- + integrierte Dichtung
- + einfache Steingeometrie
- + gutes Tragverhalten
- evtl. Wärmebrücken
- unterschiedliche Haltbarkeiten
- evtl. problematisches Trennen zw. Metall und Kunststoff

02
Verzahnung
 (Noppen mit Verbindung nach Außen)



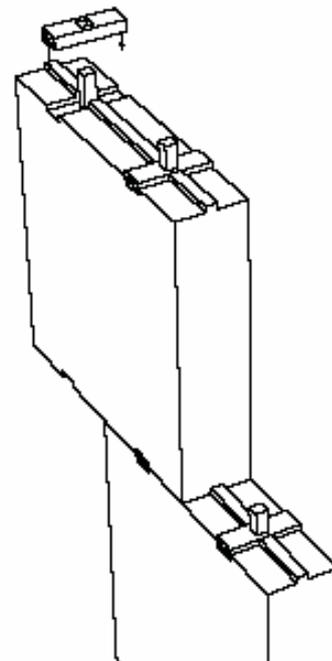
- + siehe 01
- + weniger Material
- siehe 01
- geringe Toleranzen

03
Stifte kreuzförmig
 (Kunststoff/Metall)



- + unterschiedliche Ausführungen für Flexibilität
- + gutes Tragverhalten
- + wenig Material
- evtl. Wärmebrücken
- Dichtung durch Steingeometrie
- unterschiedliche Haltbarkeiten
- evtl. problematisches Trennen zw. Metall und Kunststoff
- kompliziertere Steingeometrie

04
Noppen mit Platten
 (Kunststoff/Metall)



- + Noppen Teil des Steins
- + weniger Material
- siehe 03

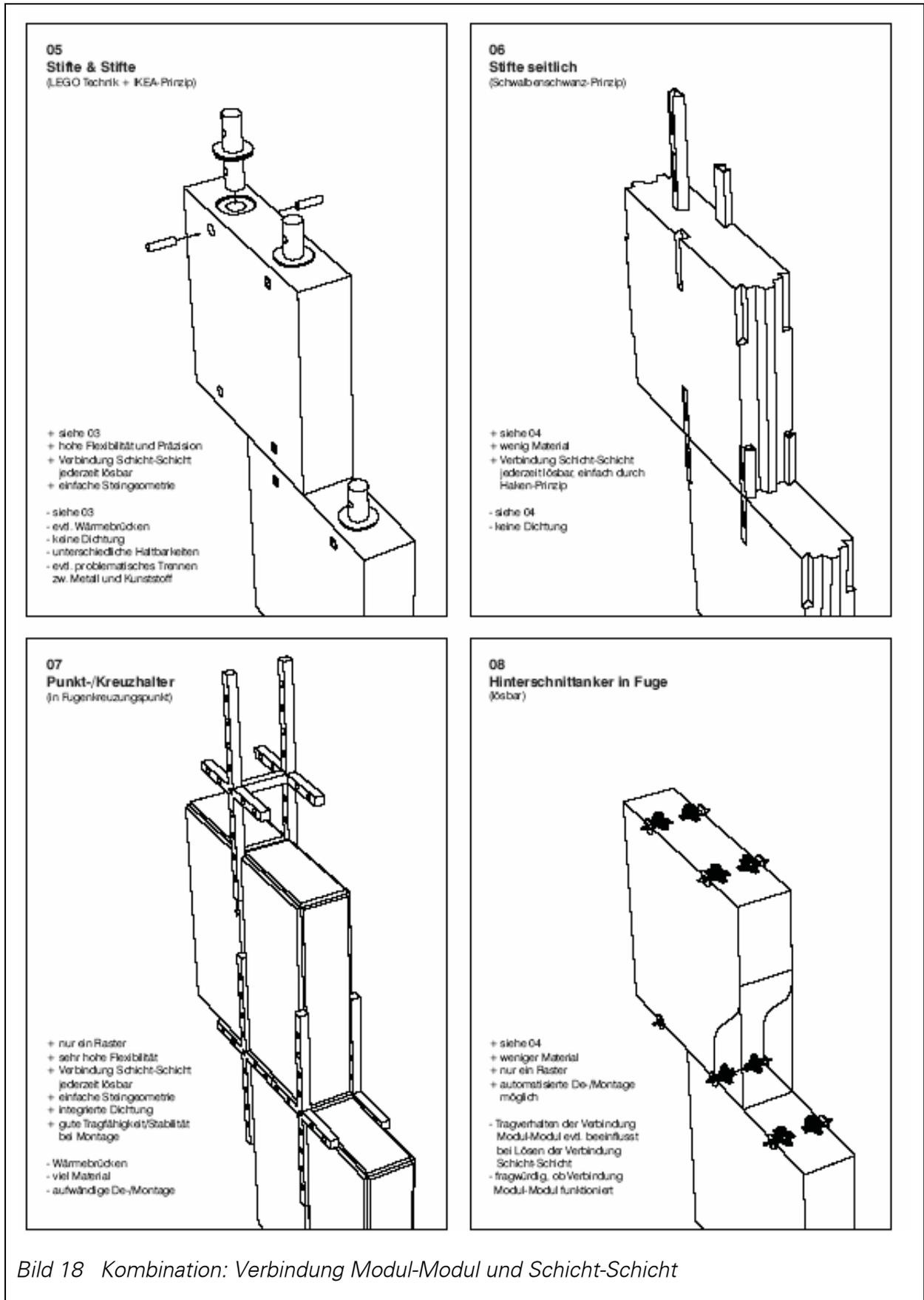


Bild 18 Kombination: Verbindung Modul-Modul und Schicht-Schicht

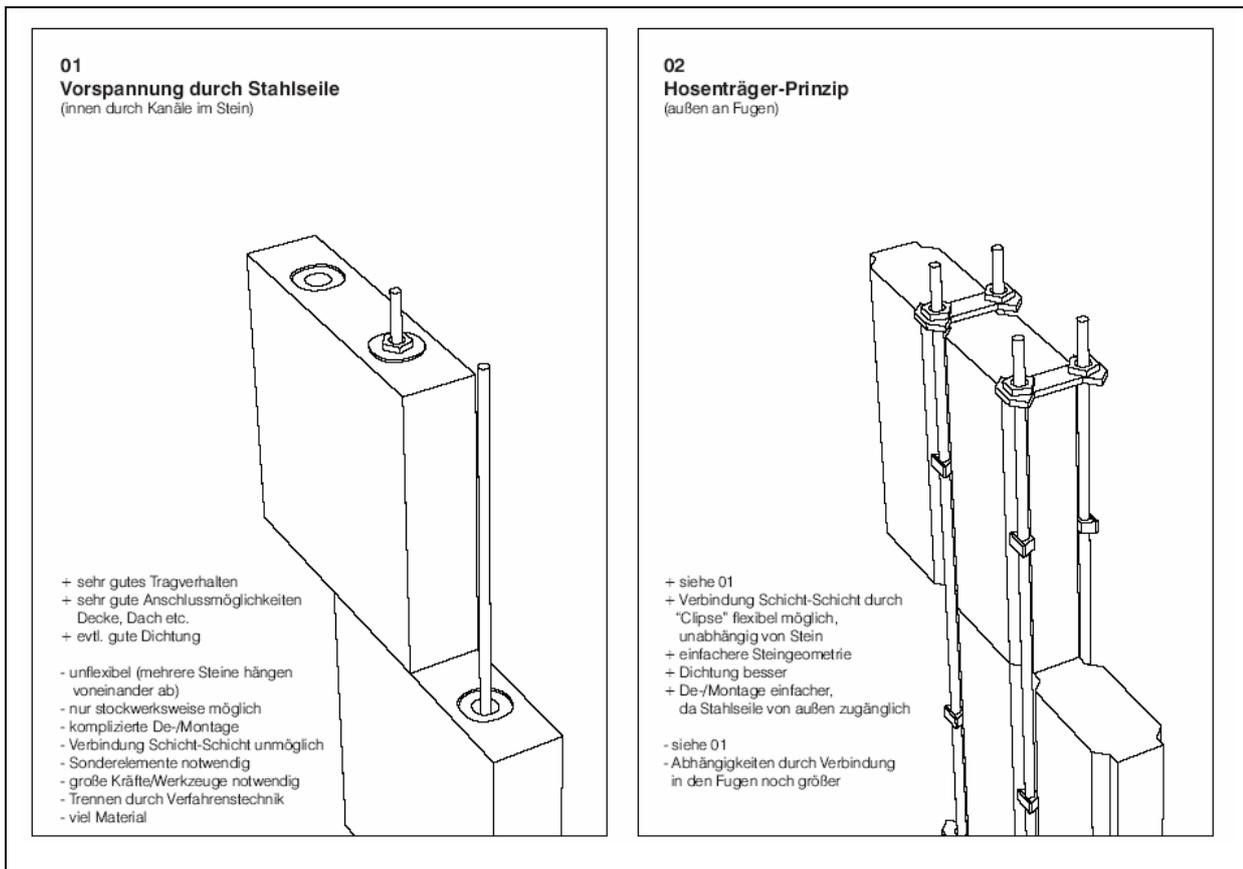


Bild 19 Großmaßstäbliche Verbindung durch Vorspannung

2.6.3. Bewertungsmatrix

Die unter Abschnitt 2.6.2 in Bild 18 und Bild 19 dargestellten schematischen Grundprinzipien weisen entsprechend ihrer Einteilung unterschiedliche Charakteristika auf. Diese wurden fortlaufend anhand der zur Erreichung des Projektziels maßgeblichen Parameter untersucht. Eine entsprechende Bewertungsmatrix (siehe Bild 20) wird im Folgenden aufgestellt. Die einzelnen schematischen Grundprinzipien können sich so gegenübergestellt und anhand der folgenden Kriterien bewertet werden.

- Demontagefähigkeit (zerstörungsfrei möglich)
- Dichtigkeit (Passivhaus-Standard)
- Wärmedämmeigenschaften (Wärmebrückenfreiheit)
- Baustruktur (offen – austauschfreundlich)
- Realisierbarkeit (Stand der Technik/Steingeometrie/Normen)
- Universelle Anwendung (Boden, Wand, Decke, Ecken, Anschlüsse)
- Vorfertigung (Wandscheibe mit Schichtaufbau)
- Tragverhalten (auch während Bau – ohne Auflast)
- Aufwand (Zeit und Kosten für Montage/Demontage)

Eine Gewichtung der Kriterien von 0 (unwichtig) bis 3 (sehr wichtig) wurde vorgenommen, da die Grundprinzipien im Hinblick auf die Erfüllung mancher Kriterien bereits in dieser

schematischen Form ein hohes Potenzial aufzeigen sollten, während andere Kriterien in der weiteren Ausarbeitung noch erfüllt werden könnten. Die Bewertung erfolgte ebenfalls anhand einer Skala von 0 (nicht möglich) bis 3 (sehr gut). Durch die Multiplikation der jeweiligen Werte ergibt sich in der Summe der Produkte eine Gesamtbewertung für jedes schematische Grundprinzip. Der Erreichungsgrad der maximal 54 Punkte zeigt das Potenzial der verschiedenen Varianten auf, welches anhand einer Skala von 0 (kein Potenzial) bis 3 (sehr hohes Potenzial) zusammengefasst wird.

Die Aussage der Bewertungsmatrix ist dabei qualitativer Natur. Die erarbeiteten Grundprinzipien können mit ihrer Hilfe hinsichtlich ihres Potenzials für das weitere Vorgehen besser verstanden werden. Es ist dabei anzumerken, dass es sich bei der Entwicklung dieser Grundprinzipien um einen technischen Entwurfs- und Konstruktionsprozess handelt und eine quantitativ exakte und belastbare Aussage aus diesem Grunde nicht möglich ist.

Als Ergebnis der Bewertung kann festgehalten werden, dass das Prinzip der großmaßstäblichen Vorspannung das größte Potenzial für eine weitere Entwicklung der rezyklierbaren modularen Massivbauweise bietet. Die zentrisch in den, beim „KS - Quadro E“- Stein der Firma Xella bereits vorhandenen, vertikalen Kanälen angeordneten Spannglieder ermöglichen bei sehr hoher Demontagefreundlichkeit gleichzeitig eine hohe Dichtigkeit. Des Weiteren gibt es bereits Ansätze zur Vorspannung von Trockenmauerwerk (siehe Abschnitt 3.5), auf die aufgebaut werden kann. Eine komplizierte Anpassung der bestehenden Steingeometrie erscheint nicht notwendig. Gleichzeitig ist zu erwarten, dass dieses Prinzip als einziges in der Lage ist, auch tragende Deckenelemente konstruktiv durchzubilden und mehrere Module als Wandelemente zusammenzubinden, welche während Transport und Bau ein gutes Tragverhalten aufweisen. Für die Verbindung Modul-Modul wird daher das Prinzip „01 Vorspannung durch Kanäle“ ausgewählt.

Einige der erarbeiteten Grundprinzipien schlagen eine Kombination der Verbindungen Modul-Modul und Schicht-Schicht vor. Insbesondere das Prinzip „05 Stifte & Stifte“ sowie das Prinzip „07 Punkt-/ Kreuzhalter“ erscheinen interessant. Von einer weiteren Erforschung im Rahmen des Projektes ReMoMaB musste allerdings abgesehen werden, da insbesondere die Fertigung der komplizierteren Steingeometrie und die Materialeigenschaften der KS-Steine Probleme vermuten ließen, die im Rahmen dieses Projektes zeitlich nicht auf Umsetzbarkeit (Eingriffe in die Technologie der Steinherstellung) zu prüfen gewesen wären. Eine weitere Entwicklung des Prinzips „07 Punkt-/Kreuzhalter“ erschien zudem wenig wünschenswert, da es durch die gewählte Konstruktion den Charakter des modularen Bauens nur noch bedingt wiederzugeben scheint. Für weitere Forschungen sei daher angemerkt, dass insbesondere das Prinzip „05 Stifte & Stifte“ weiter untersucht werden sollte.

Für die Verbindung Schicht-Schicht wird das Prinzip „02 Verzahnung“ ausgewählt. Dieses weist als einziges ein großes Potenzial hinsichtlich einer universellen Anwendung auf. Das heißt, dass die Modularisierung nicht nur auf die Module selber zutrifft, sondern darüber hinaus auch auf die Verbindungen angewendet werden kann. Ein größtmöglicher Grad an Flexibilität kann dadurch erreicht werden. Die Kreuzform ermöglicht des Weiteren Verbindungen an den Stirnseiten der Steine, welche sowohl für das Anbringen von Komponenten (bspw. Fensterrahmen oder Türen) als auch für das Verbinden ganzer Wandelemente (bspw. Gebäudeaußenecke oder Anschluss Innenwand) herangezogen werden können.

Kombination: Verbindung, Modul-Modul und Sticht-Sticht									
01	02	03	04	05	06	07	08	09	
Matte mit Inserts	Verzahnung	Stifte kreuzförmig	Noppen mit Platten	Stifte & Stifte	Stifte seitlich	Punkt-/ Kreuzhalter	Hinterschmit- anker in Fuge	Vorspannung durch Kanäle	Höseträger- Prinzip
3	2	2	2	2	3	1	2	3	2
3	3	3	2	1	1	0	3	3	3
3	0	1	2	3	3	3	2	2	1
2	2	2	2	2	2	1	2	2	2
2	1	1	0	1	1	0	2	3	0
2	3	3	1	2	2	1	2	0	0
1	1	1	1	2	2	1	2	3	3
1	0	0	2	2	2	2	0	3	3
1	1	1	0	1	1	1	0	2	1
Bewertung (max. 54)	27	32	27	26	36	20	34	48	29
Präferenz	1	2	1	1	2	1	2	3	2

Kriterien	
Demontagfähigkeit <small>(Wiederverwendung möglich)</small>	
Dichtverle <small>(Wasserdicht, Luftdicht)</small>	
Wärmedämmseigenschaften <small>(Wärmedämmwert, U-Wert)</small>	
Baustruktur <small>(System, Ausführung, Details)</small>	
Realisierbarkeit <small>(Planung, Ausführung, Montage)</small>	
Universelle Anwendung <small>(einseitig, beidseitig, beidseitig, einseitig)</small>	
Vorfertigung <small>(Vorfertigungsgrad, Montagezeit)</small>	
Tragverhalten <small>(Nutzlast, Stützlast, Stützweite)</small>	
Aufwand <small>(Gewebe, Material, Montagezeit)</small>	
Legende	
1. unwichtig	4. wichtig
2. mittelwichtig	5. sehr wichtig
3. wichtig	6. nicht möglich
7. unmöglich	8. nicht möglich
9. nicht möglich	10. nicht möglich
11. nicht möglich	12. nicht möglich
13. nicht möglich	14. nicht möglich
15. nicht möglich	16. nicht möglich
17. nicht möglich	18. nicht möglich
19. nicht möglich	20. nicht möglich
21. nicht möglich	22. nicht möglich
23. nicht möglich	24. nicht möglich
25. nicht möglich	26. nicht möglich
27. nicht möglich	28. nicht möglich
29. nicht möglich	30. nicht möglich
31. nicht möglich	32. nicht möglich
33. nicht möglich	34. nicht möglich
35. nicht möglich	36. nicht möglich
37. nicht möglich	38. nicht möglich
39. nicht möglich	40. nicht möglich
41. nicht möglich	42. nicht möglich
43. nicht möglich	44. nicht möglich
45. nicht möglich	46. nicht möglich
47. nicht möglich	48. nicht möglich
49. nicht möglich	50. nicht möglich
51. nicht möglich	52. nicht möglich
53. nicht möglich	54. nicht möglich

AUSWAHL

→ KOMBINATION ←

AUSWAHL

Bild 20 Bewertungsmatrix



3. Rahmenbedingungen und Zielmarken

Im Bauwesen liegen noch keine ausreichenden Erfahrungen zur methodischen Entwicklung von demontierbaren und vollständig rezyklierbaren Konstruktionen vor. Deshalb wird im Zuge der Analyse auf die in der Maschinenbau, Auto- und Elektroindustrie gewonnenen Erkenntnisse zum methodischen Vorgehen bei der Entwicklung von Konzepten für das Bauwesen zurückgegriffen. Im Abschnitt 2 dieses Berichts konnte gezeigt werden, dass dieser Übertrag möglich ist, wenn die für das Bauwesen typischen Eigenheiten beachtet und bei der Konzeption berücksichtigt werden. Eine neue Systematik im konzeptionellen Denken ist dabei Grundvoraussetzung. Klar definierte, bisher feststehende Begriffe, müssen von der Strukturebene her bis hin zum Verbindungsmittel vor dem Hintergrund der Demontierbarkeit und Rezyklierbarkeit in neue Bezüge gestellt werden. Dies gilt insbesondere bei den Schnittstellen zum Technischen Ausbau, da die Austauschzyklen dieser Komponenten besonders stark von den Lebensdauern anderer Cluster abweichen. Die Unterscheidung der Verbindungen in solche, die zur konstruktiv wirksamen Fügung der Module dienen, und solche, die die einzelnen bauphysikalisch relevanten Schichten verbinden, führt zu ersten schematischen Konzepten für Grundprinzipien einer voll rezyklierbaren modularen Massivbauweise.

In den nun folgenden Abschnitten dieses Berichts werden die Grundlagen aus baukonstruktiver und bauphysikalischer Sicht dargestellt, die Rahmenbedingungen im Kontext der gegenwärtigen Regeln der Technik analysiert und die projektspezifischen Zielmarken definiert. Hierauf, und auf den Erkenntnissen aus Abschnitt 2 aufbauend, wird ein Konzept zur Integration der technischen Ausrüstung in Gebäuden entwickelt. Hinsichtlich der Baukonstruktion wird die These aufgestellt, dass Trockenmauerwerk ein großes Potenzial bezüglich der Rezyklierbarkeit von massiven Konstruktionen aufweist. Es wird gezeigt, dass dabei dem vorgespannten Trockenmauerwerk eine besondere Bedeutung zukommt. Entsprechende bauphysikalische und statische Betrachtungen werden unter Abschnitt 3.1.2 und 3.3.5, sowie Abschnitt 3.8 vorgenommen. Die erforderlichen Bauteilversuche und Tests werden unter Abschnitt 6 dargestellt.

3.1. Konstruktive Durchbildung

Um Baustoffe im Stoffkreislauf zu halten, sind diese entsprechend ihren Stoffeigenschaften getrennt zu rezyklieren. Deshalb sind zur Errichtung rezyklierbarer Gebäude demontable Hochbaukonstruktionen notwendig. In Abschnitt 2 wird gezeigt, welche Art und Eigenschaft Konstruktionen besitzen müssen, damit diese demontiert werden können. In den nun folgenden Abschnitten sollen schrittweise demontable Hochbaukonstruktionen entwickelt werden. Zur Entwicklung dieser demontablen Hochbaukonstruktionen ist es wichtig, die Rahmenbedingungen und die Anforderungen, welche für diese Konstruktionen gelten sollen, festzulegen.

Zur Festlegung der Rahmenbedingungen und Zielmarken von demontablen Konstruktionen ist es zunächst wichtig festzustellen, in welchem baurechtlichen Rahmen das (demontable) Gebäude errichtet wird. Da die zu entwickelnden demontablen Konstruktionen die gleichen Qualitätsansprüche vergleichbarer Nutzungen konventionell erstellter Gebäude erfüllen sollen, kann festgestellt werden, dass es sich bei Gebäuden mit demontablen Konstruktionen

nicht um Fliegende Bauten¹ handelt. Infolge kann bei Auswahl und Festlegung der zu erfüllenden Lebensdauer auf die bereits für konventionell errichtete Gebäude vorliegenden Systeme zurückgegriffen werden.

3.1.1. Zur Baukonstruktion

Der Begriff Baukonstruktion kann nach jenem von Schulze [151] bestimmt werden. Demnach ist das Konstruieren „das Vorausbestimmen der Funktion, der Struktur und der Gestalt eines herzustellenden technischen Gebildes einschließlich seiner eindeutigen und vollständigen Darstellung und Dokumentation“. Wobei die Funktion einer Konstruktion „als Wechselwirkung zwischen dem Produkt bzw. dessen Elementen und der Umgebung im künftigen Einsatz beschrieben werden kann.“ Mit der Struktur einer Konstruktion werden Elemente des Produktes und deren Zusammenhänge dargestellt. Die Gestalt wird beschrieben durch:

- Werkstoff
- Form
- Abmessung
- Toleranz

Im Übertrag vom allgemeinen, auf das im Bauwesen benötigte Konstruieren, lässt sich die Formfindung bei Baukonstruktionen, als „Wechselspiel dreier konvergierender Vektoren“ von Topos, Typos und Tektonik gemäß Deplazes [21] beschreiben. Demnach ist die Form das Resultat von Konstruktion und Material.

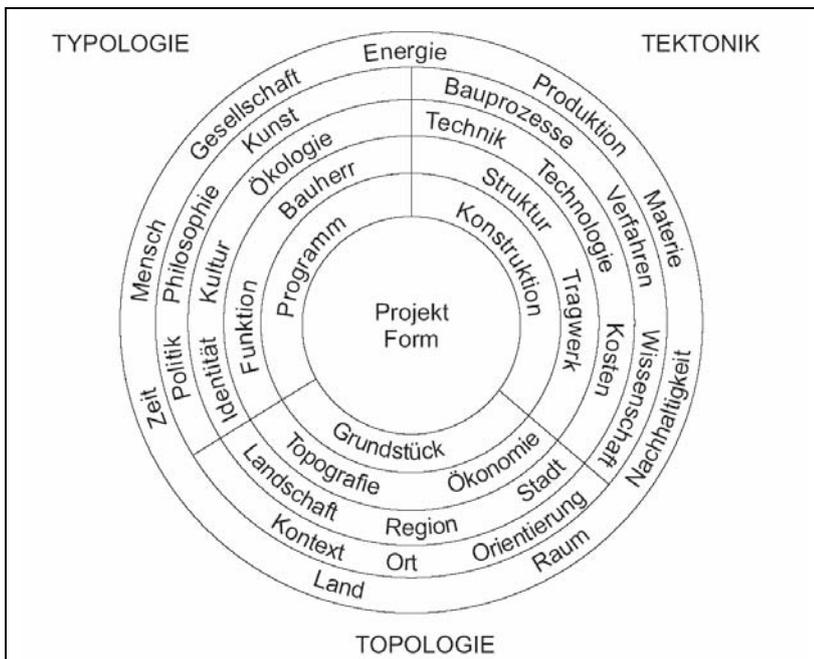


Bild 21 Formfindung im Bauwesen nach Deplazes [21]

¹ "Provisorien" oder "Temporäre Bauten" werden baurechtlich nach „Art und Maß der baulichen Nutzung“ als Fliegende Bauten eingestuft.

3.1.2. Tragwerk und statisches System

Nach Pfeifer [179] ist „ein Tragwerksentwurf immer Teil des Gesamtentwurfs. Damit ist das Tragwerk immer Teil des architektonischen Vokabulars und der Grammatik mittels derer ein Entwurfsgedanke zum Ausdruck gebracht wird. Analog zur Satzbildung fordert der Entwurf einen kontinuierlichen Abgleich zwischen auszudrückenden Gedanken und Grammatik und Wortwahl. Der Entwicklungsprozess des Tragwerks als primäre Struktur eines Gebäudes kann eben so wenig aus dem Entwurfsprozess herausgelöst werden, wie Lexikon und Grammatik dem Sprechenden entzogen werden können.“

Die Grundlagen der Tragwerksplanung, die Sicherheitskonzeption, sowie die Bemessungsregeln sind in DIN 1055-100 angegeben. Grundsätzliches Ziel bei der Planung, Konstruktion und Ausführung ist die Sicherstellung einer angemessenen Zuverlässigkeit gegen Versagen und die Gewährleistung des vorgegebenen Nutzungszwecks für die vorgesehene Dauer unter Berücksichtigung von wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Das Sicherheits- und Bemessungskonzept beruht auf dem Nachweis, dass diese Anforderungen erfüllt sind und sogenannte Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit nicht überschritten werden.

Nach [68] wird in folgende Grenzzustände unterschieden:

- Tragfähigkeit,
- Gebrauchstauglichkeit
- Anforderungen an die Dauerhaftigkeit.

Tabelle 1 fasst die Definitionen der in der Tragwerksplanung allgemein üblichen Begriffe zusammen:

Tabelle 1 allgemeine Begriffsdefinitionen der Tragwerksplanung in Teilen nach [68]

Begriff	Definition
Grenzzustand	Ein Zustand, bei deren Überschreitung das Tragwerk die Entwurfsanforderungen nicht mehr erfüllt.
Einwirkung	E Auf ein Tragwerk einwirkende Kräfte, Lasten etc. als direkte Einwirkung, eingeprägte Verformung wie Temperatur und Setzungen als indirekte Einwirkung
Widerstand	R Durch Materialeigenschaften und geometrischen Größen sich ergebende aufnehmbare Beanspruchungen
Tragwerk	Miteinander Verbundene tragende und aussteifende Bauteile
Tragsystem	Summe der Tragenden Bauteile und ihr Zusammenwirken
Tragwerksmodell	Idealisierung des Tragsystems zur Schnittgrößenermittlung und Bemessung
Platten	In ihren Hauptabmessungen zwei dimensionale Bauteile, deren statische Lastaufnahme und Lastweiterleitung vorrangig orthogonal zur Scheibenebene über Biegung erfolgt
Scheiben	In ihren Hauptabmessungen zwei dimensionale Bauteile, deren statische Lastaufnahme und Lastweiterleitung vorrangig in Scheibenebene über Schub erfolgt

Wesentliche Voraussetzungen für den Entwurf eines Tragwerks ist die Entwicklung eines statischen Systems zur Lastweiterleitung und Standsicherheit von Gebäuden. Voraussetzungen hierfür sind:

- die Nutzungsanforderung – Art der Baulichen Nutzung,
- die Konstruktion, Aussteifung Fugenanordnung – Maß der Baulichen Nutzung,
- der Standort – Baugrund und Klima (Schnee-, Windlasten) und ggf. Sonderlasten.

3.1.3. Lastweiterleitung, Standsicherheit und Aussteifung

Lasten sind Einwirkungen auf Tragwerke, die im Hochbau als Lastbilder aus Einwirkungsnormen, den bauartspezifischen Bemessungsnormen oder gleichwertigen Unterlagen entnommen werden können.

Gemäß DIN 1055 wird in

- horizontale Lasten,
- vertikale Lasten,
- diverse Lastkombinationen unterschieden.

Weiterhin wird, je nach Anwendung und Standort, in gebäudespezifische Eigen-, Nutz, und Sonderlasten differenziert um für den jeweilig konkreten Fall die anzuwendenden Einwirkungen festlegen zu können.

Lasteinwirkung und Ihr Verlauf sind bei der Entwicklung von Mauerwerkskonstruktionen für Gebäude insofern von gesteigerter Bedeutung, als dass es sich bei Mauerwerk aufgrund der schichtartigen Fügung um richtungsabhängige Tragsysteme handelt. Es ist deshalb neben der zweckmäßigen Anordnung der Mauerwerkswände als lastabtragendes Element im Gebäude entscheidend, wie und in welcher Art (Anzahl und Richtung) das Tragsystem Mauerwerk im Bezug zur Mauerschicht belastet wird. Bei der Lastweiterleitung wird unterschieden in vertikale und horizontale Lastweiterleitung.

- **Vertikale Lastweiterleitung**

Die vertikale Lastweiterleitung eines Bauwerks wird durch unterschiedliche Konstruktionsteile vom Dach über die Decken und die Wände bis in die Fundamente geleitet. Die Fundamente leiten alle von oben kommenden Lasten in den Baugrund ab.

- **Horizontale Lastweiterleitung - Aussteifung**

Horizontale Lasten werden über horizontale Aussteifungselemente (Deckenscheiben) in vertikale Aussteifungselemente (Wandscheiben) geleitet.

3.1.4. Gebäudeaussteifung

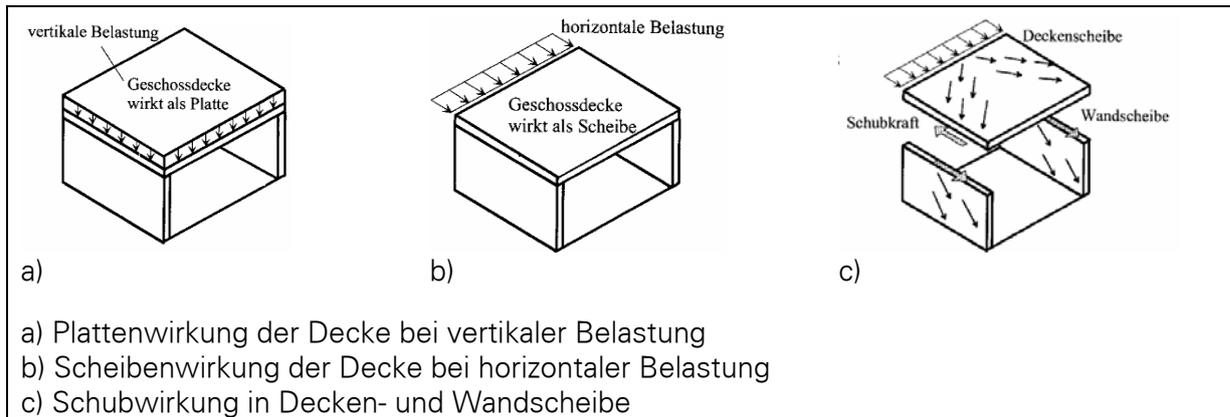


Bild 22 Grundprinzipien der Gebäudeaussteifung

Ein Bauwerk gilt als ausgesteift, wenn planmäßig horizontal angreifende Lasten sicher und ohne große Verformung in den Baugrund abgeleitet werden. Horizontallasten werden durch Wind, einseitigen Erddruck verursacht. Gebietspezifisch können horizontale Lasten auch durch Erdbeben hervorgerufen werden. Das Grundprinzip der Aussteifung beruht auf dem in Bild 22 dargestellten Zusammenwirken von Decken (horizontalen Aussteifungsscheiben) und Wänden (vertikalen Aussteifungsscheiben). Standsicherheitskonzepte bei Gebäuden werden daher nach der geometrischen Ausrichtung der Aussteifungen unterschieden in:

- vertikale Aussteifung
- horizontale Aussteifung

Vertikale Aussteifung

Bei der Anordnung von vertikalen Aussteifungselementen wird in Abhängigkeit von Anzahl und geometrischer Anordnung in statisch instabile, statisch labile und statisch stabile Systeme unterschieden. Ferner wird bei der Aussteifung von statisch bestimmten und statisch unbestimmten Aussteifungssystemen gesprochen.

Statisch bestimmte Aussteifungssysteme sind statisch stabile Systeme bei denen sich die Systemlinien der drei Aussteifungselemente nicht in einem Punkt schneiden und bei der die Horizontallasten der einzelnen Wandscheiben im Gleichgewicht sind.

Statisch unbestimmte Systeme sind zwar statisch stabile Systeme, führen aber aufgrund ungünstiger bzw. zu dichter Anordnung der Aussteifungselemente zu unerwünschten Behinderungen bei der Verformung (meist Schwinden oder Längenänderungen aufgrund von Temperaturänderungen) von Tragwerken. Derartige Zwängungen können auch zu Rissen in Wänden und Decken führen. Bewertet wird das Aussteifungssystem anhand dessen Einordnung in günstige bzw. ungünstige Anordnung der Einzelscheiben.

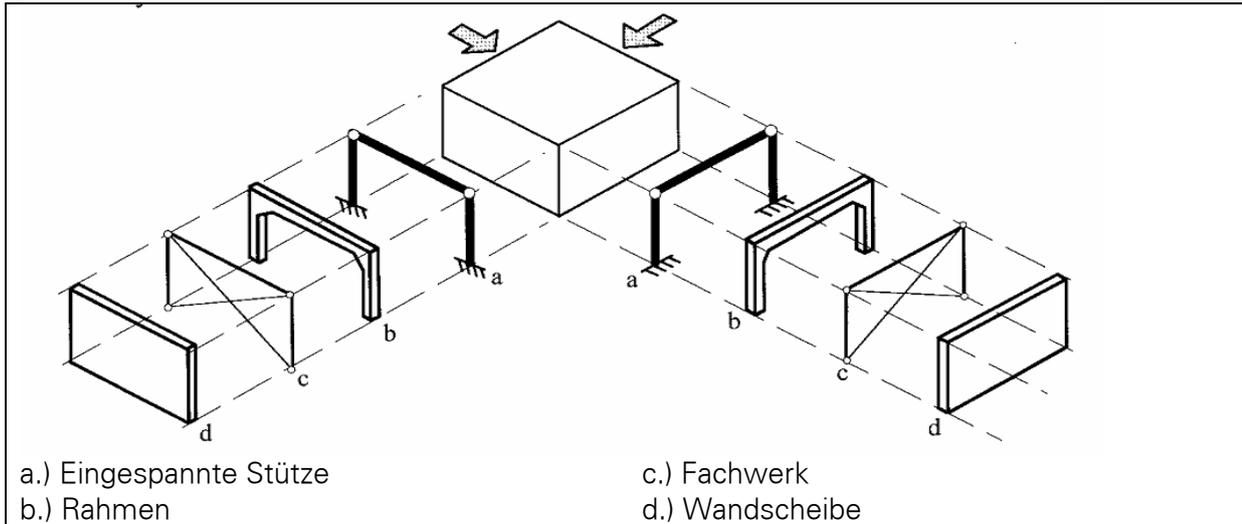


Bild 23 Mögliche Aussteifungselemente

Für die Ausbildung der vertikalen Aussteifung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Bild 23 fasst diese Möglichkeiten zusammen. Im Vorgriff auf die in diesem Bericht dargestellten demontablen Konstruktionen in Mauerwerk wurde betreffs deren Einsatzes als vertikales Aussteifungselement eine grundlegende Vorauswahl getroffen:

Mauerwerkskonstruktionen können als statisch wirksame Scheiben oder als nichttragende Ausfachungen in einer Stabstruktur (Skelettbau) eingesetzt werden. Die Grenzen in der Anwendung sind, bei singulärer Betrachtung der statisch-konstruktiven Einsatzmöglichkeit, aufgrund der im Bauwesen bestehenden langen Entstehungs- und Entwicklungszeit der vorzufindenden Konstruktionen fließend.

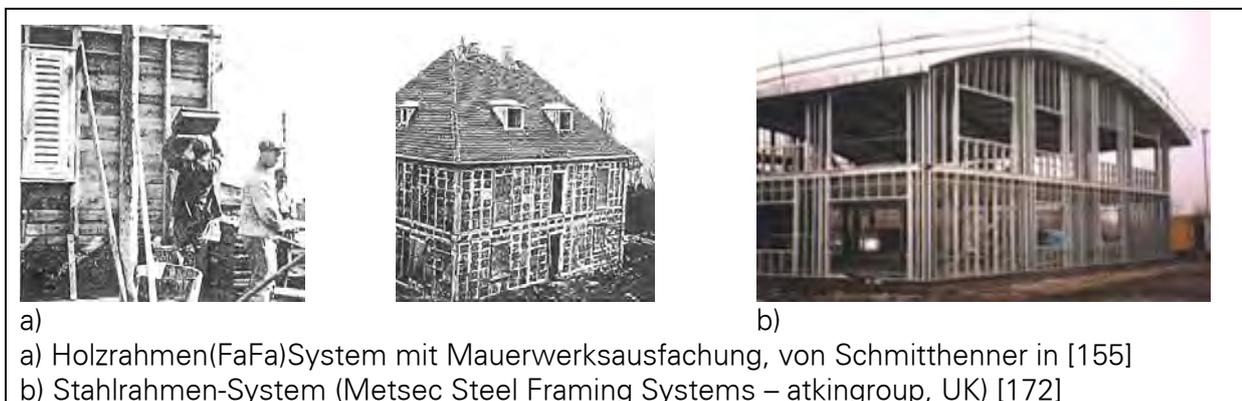


Bild 24 Typische Ausfachungswände, so genannte „Infill Walls“

Im Sinne einer Reduktion der Materialmischung wird im Projekt ReMoMaB [213] in den nachfolgenden Abschnitten von Mauerwerk als statisch eigenständig wirksames Element im Gebäudegefüge ausgegangen. Konstruktionen, bei denen Mauerwerk als Ausfachung ohne statische Funktion verwendet wird, den sogenannten „Infill Walls“ werden aus Gründen der Übersichtlichkeit und der Darstellung von Tragwerk und Konstruktion ausgeschlossen. Zur vertikalen Aussteifung werden daher im Rahmen dieses Projekts aussteifende Wandscheiben in Mauerwerk betrachtet.

Aussteifende Wandscheiben

Aussteifende Wandscheiben müssen ausreichende Auflast erhalten, um dem Kippmoment der Bauteile aus der Horizontallast entgegenzuwirken. Die Standsicherheit ist gegeben, wenn die Exzentrizität der resultierenden Kraft $e \leq b/3$ ist (siehe Bild 25). Aus diesem Grund haben unter anderem Öffnungen Einfluss auf die Steifigkeit einer Wand. Aussteifende Wände besitzen die für die Aussteifung erforderliche Steifigkeit in nur einer Ebene. Deshalb ist eine versetzte Anordnung von aussteifenden Wänden in mehrgeschossigen Gebäuden zu vermeiden.

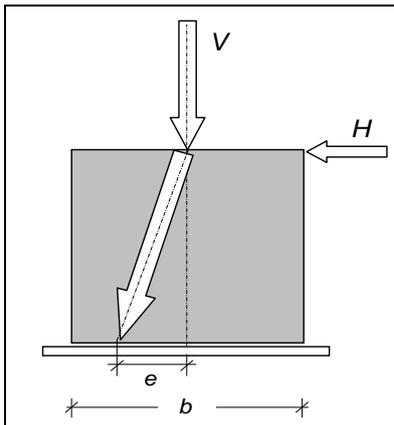


Bild 25 Exzentrizität bei schubbelasteten vertikalen Scheiben (Wände)

Unter Bezug auf die in den Abschnitten 2.2.2 dargestellten allgemein geltenden Bauweisen werden nach Deplazes [21] folgende, eng im Zusammenhang mit der Aussteifung von Mauerwerksgebäuden stehende, Bauweisen genannt:

Tabelle 2 Bauweisen im Mauerwerksbau nach [21]

Bauweise	Definition
Schachtelbauweise (Kammerung)	<ul style="list-style-type: none"> • System aneinandergfügter, allseitig geschlossener Räume • Gleichmäßige Belastung aller Wände und gegenseitiges Aussteifen der Wände unter einander • Fenster und Türen in Einzelöffnungen
Schottenbauweise (Schottung)	<ul style="list-style-type: none"> • parallel - additierte Anordnung mehrerer lastabtragender Wände • System aus quer zur Längsachse des Gebäudes ausgerichteten tragenden Wänden, das über den Deckenverbund mittels aussteifender Längsscheiben oder Kerne ausgesteift wird. • Eingrenzung des Schottenabstandes durch Spannweite der (meist einachsige) gespannten Decke
Scheibenbauweise	<ul style="list-style-type: none"> • freie Anordnung lastabtragender, vertikaler Scheiben (Wände) unter horizontalem Tragwerk – Decke oder Dach. • Raumfügung durch Kombination von Scheiben und nicht tragender Elemente (z.B. Glaswände) • Voraussetzung: horizontale Tragwerke, die den unterschiedlichen Bedingungen der Kraftübertragung gerecht werden können.

Horizontale Aussteifung

Deckenkonstruktionen, die zur Horizontalaussteifung herangezogen werden, müssen als Scheibe wirken. Die klassische Form einer derartigen Scheibenkonstruktion ist eine Stahlbetondecke. Aber auch andere Deckenkonstruktionen können bei entsprechender konstruktiver Ausbildung als Scheibe wirken. Bei Decken ohne Scheibenwirkung ersetzt je nach Konstruktion und Material ein Ringanker bzw. ein Ringbalken die Scheibenwirkung.

Der Ringbalken wirkt als ein Trägersystem das auf Biegung beansprucht wird. Der Ringanker ist ein Zugglied, das dem sich einstellenden Druckboden entgegenwirkt. Bild 26 verdeutlicht die beiden Grundprinzipien.

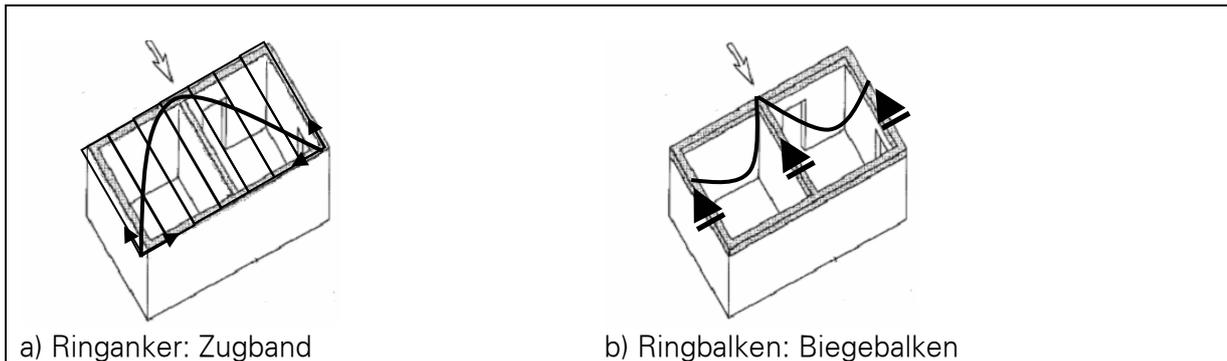


Bild 26 Grundprinzipien der Scheibenwirkung bei Decken

3.1.5. Optimierung von Tragwerken

Zusammenfassend können zur Optimierung von Tragwerken nach Rickenstorff und Berndt [135] folgende Grundsätze aufgeführt werden:

- Die Belastungen und Kräfte sind auf kürzestem Wege in den Baugrund abzuleiten. Stützweiten des Tragwerks sollten daher immer nur so groß gewählt werden, wie es mit Rücksicht auf Erfüllung der unmittelbaren und künftigen Forderungen an das Bauwerk unumgänglich ist. Große Stützweiten haben hohen Baustoffbedarf.
- Die Verwendung von Tragwerken mit ausschließlich Normalkraftbeanspruchung bzw. von Tragwerken, die durch Biegung mit gleichzeitig wirkender Normalkraft beansprucht werden, führt i.d.R. zu baustoffsparenden Lösungen
- Bei Tragwerken mit reiner oder überwiegender Biegebeanspruchung wird der Baustoffaufwand durch den Extremwert des am jeweiligen Tragwerksteil auftretenden Biegemomentes bestimmt.
- Bei Rahmensystemen ist die Rahmenform in den Grenzen der funktionellen und gestalterischen Möglichkeiten der Stützlinie anzunähern.
- Das Tragverhalten des Baugrundes hat ebenfalls Einfluss auf die Wahl des Tragwerkes. Baugrundgutachten sind so früh wie möglich zu erstellen.
- Mögliche Versagensreaktionen im Gesamtkomplex sind zu betrachten.

3.2. Einteilung nach Bauelementen

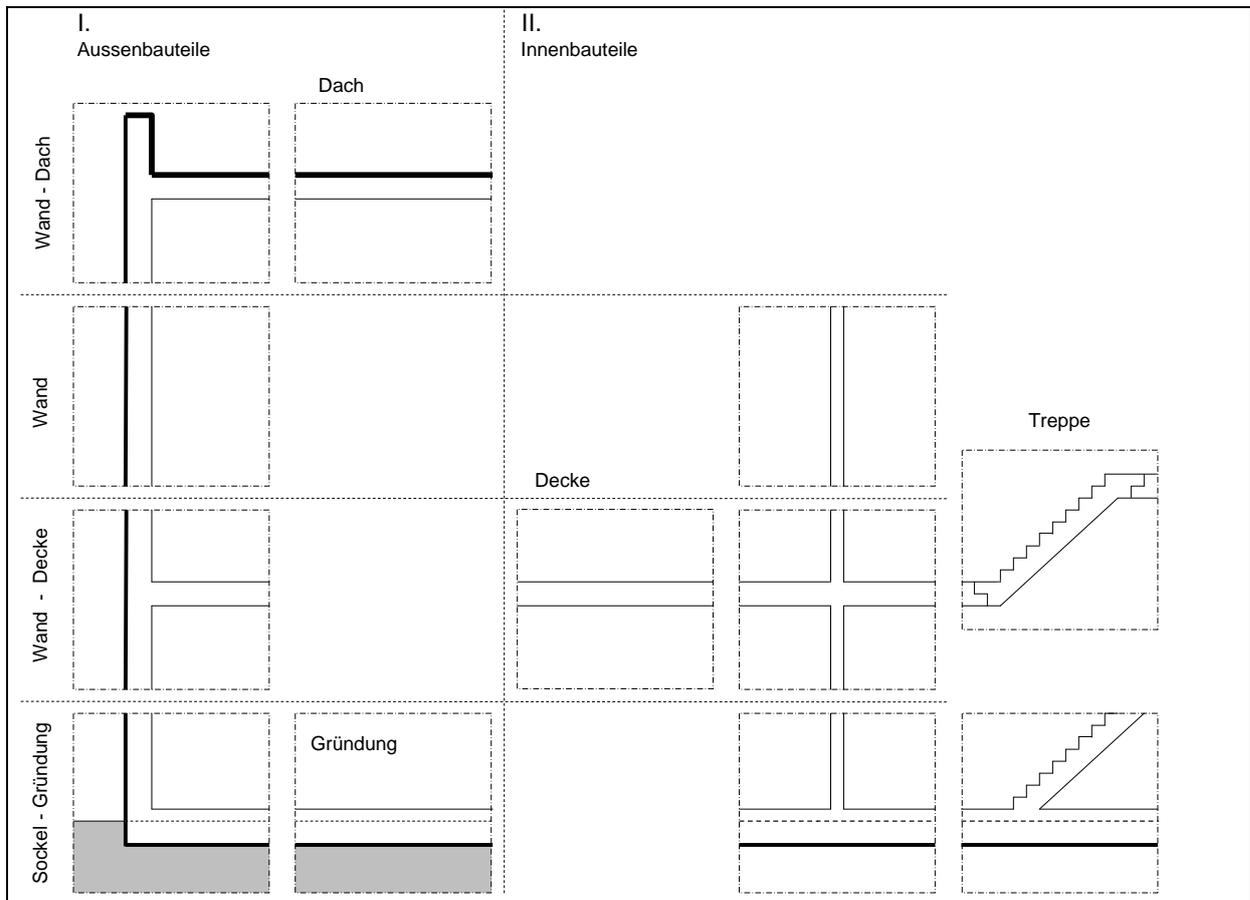


Bild 27 Beispielhafte Darstellung von Gebäudeelementen

Wie in Abschnitt 2.6.1 dargelegt, lässt sich jedes Gebäude systematisch in dessen einzelne Bestandteile ordnen, um im Zuge des recyclinggerechten Planens clusterbezogene Lebenszyklusbetrachtungen erstellen zu können. Zur konstruktiven Durchbildung von Gebäuden werden folglich einzelne Baugruppen des Gebäudes, entsprechend den Gliederungsebenen der DIN 276 [34], in Baukonstruktionen (Kostengruppe 300) und Technische Anlagen (Kostengruppe 400) unterschieden und weiter untersucht.

Die in Bild 27 schematisch dargestellten Bauelemente können als geometrisch-konstruktives „Gerüst“ eines Gebäudes verstanden werden, das je nach Entwurf neu geplant, dimensioniert und dessen Rückbaubarkeit und Recyclingfähigkeit entsprechend der konkreten baulichen Situation nach verschiedenen Aspekten (baurechtliche Einordnung und Zulässigkeit, Erstellungs- und Lebenszykluskosten etc.) neu eingeschätzt werden kann. Den Ordnungsprinzipien aus Abschnitt 2 folgend, lassen sich diese Cluster nach Ihrem Herstellungsverfahren [73] zusammenfassen. Berührungspunkte zwischen der Kostengruppe 300 und Kostengruppe 400 sind - neben den bauphysikalischen Anforderungen im baukonstruktiven Sinne – Durchbrüche, Bauteildurchdringungen und Gebäudefugen, welche es darüber hinaus zu optimieren gilt.

3.3. Außenwand

Übergeordnet werden Wände in tragende und nicht tragende Wände eingeteilt und in Außen- sowie Innenwände unterschieden. Weiterhin wird gemäß DIN 276 [34] zwischen Wand und Bekleidung differenziert. Folgende Betrachtungsgrenzen, werden im Rahmen dieses Projekts [213] definiert:

- bei Außenwänden aus Sichtmauerwerk, die Bauteiloberfläche des Sichtmauerwerkes und
- bei Bekleidungen, die Innen- wie Außenseite der Außenwandbekleidung.

Da eine Entwicklung von einfachen zu komplexen Bauteilen sinnvoll ist, wird zunächst mit Überlegungen zur massiven, tragenden Außenwand (Kostengruppe 330) begonnen. Um Steigtigkeit bei den betrachteten Verbindungen unterschiedlicher konstruktiver Varianten wahren zu können, wird räumlich von der Gebäudeaußenecke bzw. dem Wand-Decken-Knoten ausgegangen (siehe Abschnitt 3.6).

In den letzten Jahren sind immer wieder Veröffentlichungen über Anforderungen, Konstruktion und Ausführung von Mauerwerk u. a. auch im Mauerwerk-Kalender [84][85] erschienen, sodass die Anforderungen an die Außenwand hier in Tabelle 3 stichpunktartig zusammengefasst werden können.

Tabelle 3 Anforderungen an die Außenwand nach [84]

Anforderung	Norm	Beschreibung
Wärmeschutz	DIN 4108-2 [40] EnEV [56]	Gewährleistung von Mindestanforderungen zur Sicherstellung gesunder Wohn- und Arbeitsverhältnisse Reduktion des Energiebedarfs
Feuchteschutz	DIN 4108-3 [41] DIN 18195 [32]	Verhinderung der Durchfeuchtung infolge von Tauwasserbildung Ausschluss der Schimmelbildung Schlagregenschutz Schutz gegen aufsteigende Feuchte und seitlich eindringende Feuchte aus dem Boden
Schallschutz	DIN 4109 [42]	Schutz gegen Außenlärm Schutz gegen Lärm aus anderen Nutzungseinheiten und innerhalb der eigenen Nutzungseinheit Verhinderung von Lärmbelästigung durch technische Gebäudeausrüstung, sowie Maschinen und Geräte
Brandschutz	LBO / MBO [112] DIN 4102-4 [39] DIN 4102-22 [38]	Verhinderung der Brandausbreitung über Brandabschnitte hinaus Sicherung der Trag- und Schutzfunktion im Brandfalle für eine bestimmte Zeit zur Gewährung von Flucht, Evakuierung und Brandbekämpfung Schutz von Sachwerten

3.3.1. Fassaden im Massivbau

Außenwände werden, ungeachtet des Oberflächenmaterials und der beabsichtigten gestalterischen Wirkung, nach folgenden technischen Kriterien eingeteilt:

- nach Art und Lage der Dämmung,
- ob mit oder ohne Dämmschicht,
- in Innen oder Außendämmung,
- nach Art und Anzahl der Schalen und Schichten der Wetterschale,
- ob einschalig oder zweischalig
- ob einschichtig oder mehrschichtig,
- nach Art und Weise der Befestigung der Dämmung auf der tragenden Schale,
- nach Art und Weise der Befestigung der Wetterschale
- nach Art der bauphysikalischen Wirkweise.

Bild 28 stellt exemplarisch massive Außenwandkonstruktion vor. Bild 29 fasst diese in einem Organigramm zusammen.

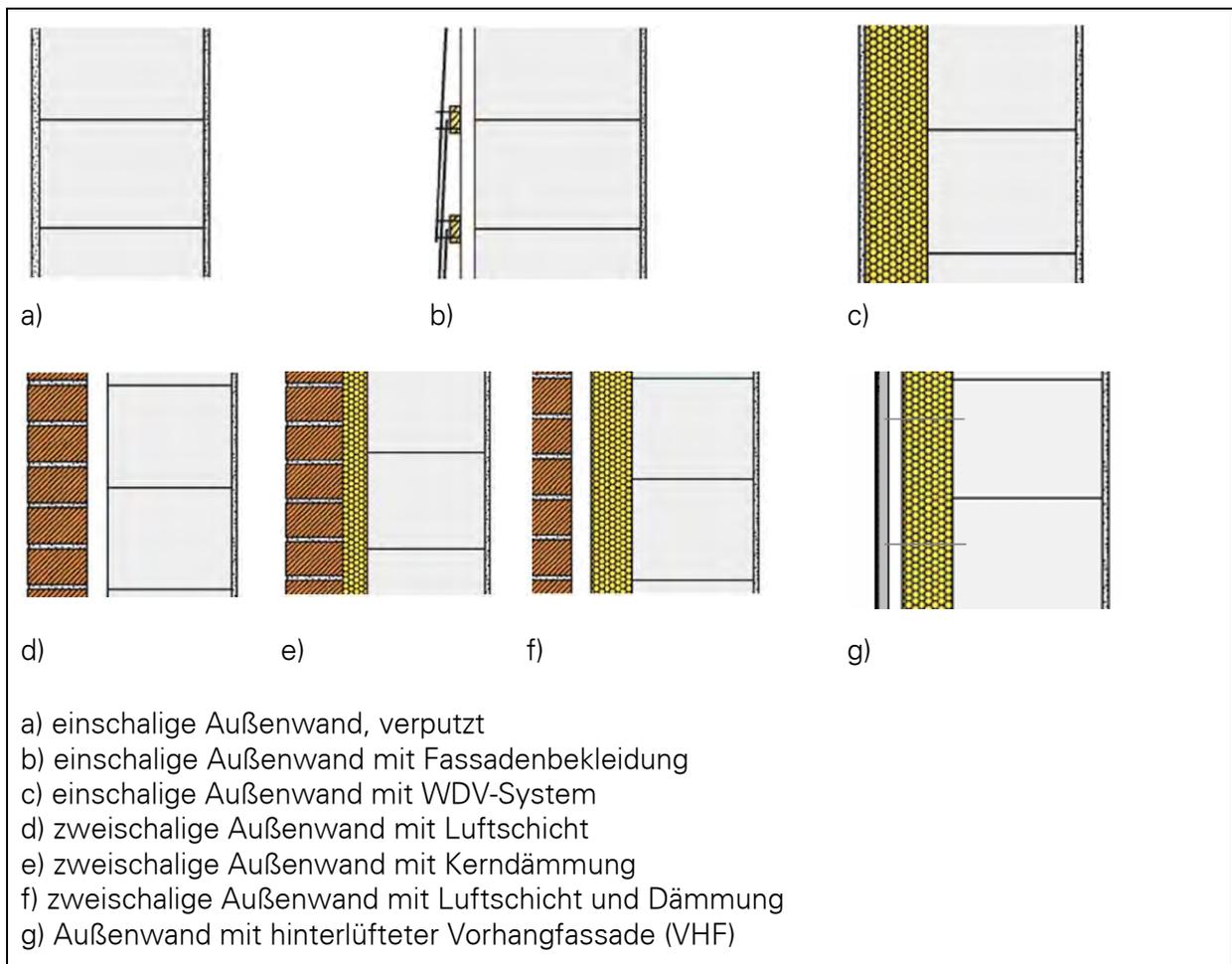


Bild 28 Außenwandkonstruktionen im Mauerwerksbau

3.3.2. Verbindung „Schicht-Schicht“: Vorhangfassade

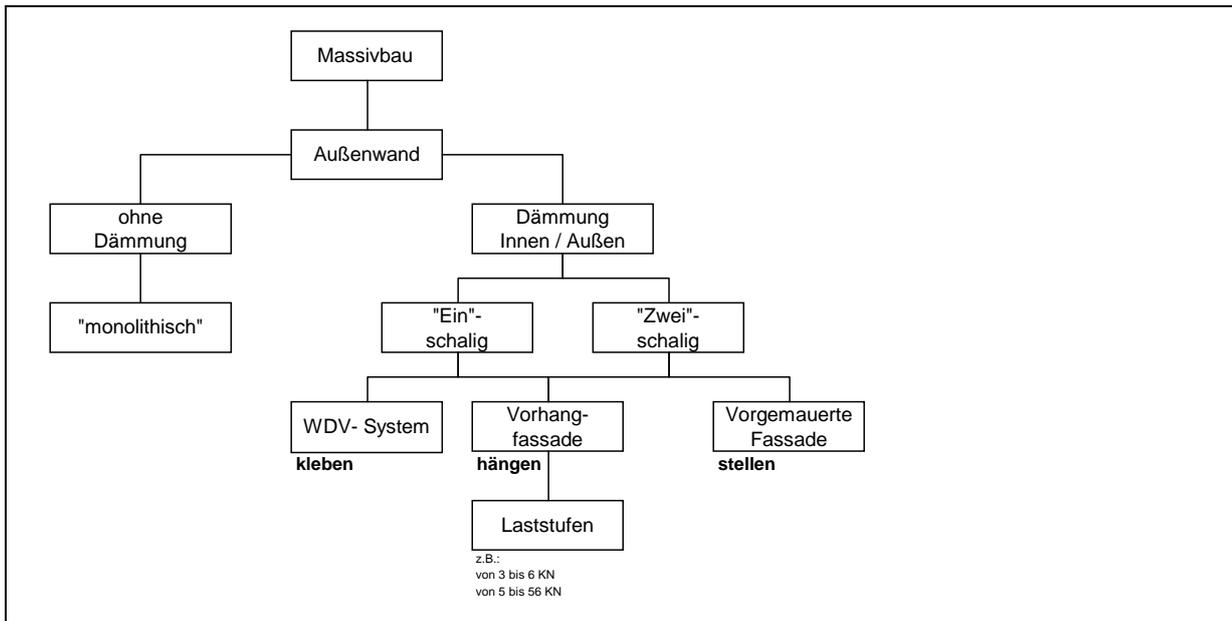


Bild 29 Systemübersicht Fassaden im Massivbau

Unter Bezug auf die in Abschnitt 2.2.2 und 2.3.1 dargelegten Überlegungen zur Differenzialbauweise kann hier auf bereits am Markt existierende hinterlüftete Vorhangfassaden (VHF) Bezug genommen werden.

Sowohl der Grad des Einsatzes von Verbundwerkstoffen als auch der Mörtelanteil in der Fassade ist bei diesem Fassadensystem im Vergleich zu anderen Systemen verhältnismäßig gering. So braucht bspw. die Dämmung bei einigen VHF-Konstruktion [198] nur gedübelt befestigt zu werden.

Zudem liegt mit der von Leufgens, Waldmann, Maas und Zürbes vorgelegten Arbeit [97] der Schluss nahe, dass mehrschichtige Außenwandkonstruktionen gegenüber monolithischen oder einschaligen Außenwänden im Vorteil sind, da sie sowohl höhere Anforderungen an Festigkeit als auch geringere Wärmeleitfähigkeiten mit einer Funktionstrennung von tragender und dämmender Schicht erreichen können.

Dem steht gegenüber, dass bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden (VHF) die Verankerungen den Wärmeschutz durchdringen und somit konstruktive Wärmebrücken entstehen [156]. Die Divergenzen zwischen statischen und bauphysikalischen Anforderungen ergeben Grenzen, innerhalb welcher Konstruktionen sinnvoll umsetzbar sind. Nach Feist [6] werden Ankerverbindungen für VH-Fassaden wie folgt unterschieden:

- ohne Unterkonstruktion
- mit Anker und T-Profil
- mit Anker, T-Profil und Alu-Bekleidung.

Die Ankersysteme werden, ebenso wie bei Stein [156], in perfekt versetzte Anker und baustellengerecht versetzte Anker unterschieden. Dabei wird auf folgende Prinzipien hingewiesen:

- Materialien mit geringem Querschnitt bzw. geringer Wärmeleitfähigkeit wählen:
- Edelstahl
- GFK und Kohlefaser
- Leimholz
- Thermische Trennungen verwenden
- geometrisch optimieren
- minimierte Querschnitte
- Konstruktionen mit hoher Tragfähigkeit und geringem Materialeinsatz
- weniger, aber stärkere Durchdringungen verwenden

Durch hohe Anforderungen an den Wärmeschutz bedingten Verankerungen von hinterlüfteten Fassadenkonstruktionen, in Abhängigkeit vom verwendeten Fassadenmaterial und dessen Gewicht, einen erhöhten konstruktiven Aufwand, sodass bei konstruktiver Ausarbeitung einer Vorhangfassade, spätestens im Rahmen der Ausführungsplanung, die Rückbaubarkeit der verwendeten Baustoffe berücksichtigt werden kann.

3.3.3. Zur Massivwand in Mauerwerk

Mauerwerk ist, nach Wasmuths Lexikon der Baukunst [164] „jede aus natürlichem oder künstlichen Steinen errichtete Einfriedung oder Begrenzung eines Raumes“. Man spricht von einer *trennenden* und *tragenden* Funktion der Massivwand. Bild 30 ordnet Mauerwerk dem Massivbau unter, welches sich vom Betonbau durch seinen Verband aus Stein und Fuge unterscheidet. Es ergeben sich weitere Aspekte von Mauerwerk, die als gliedernd, strukturierend und ornamentierend beschrieben werden.

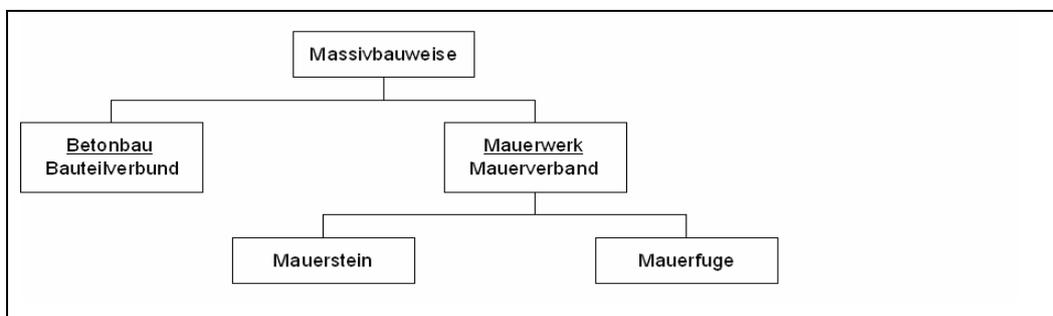


Bild 30 Zuordnung von Mauerwerk als archetypische Massivbauweise

Primäres Element von Mauerwerk, als ein Archetyp des Massivbaus, ist der massive, dreidimensionale Mauerkörper, der durch das Aufschichten von Steinen oder modulartig vorgefertigten Materialien entsteht. Das Fügeprinzip von Mauerwerksbauten kann nach Deplazes und Wieser [21] als Technik des Schichtens beschrieben werden. Dabei gilt für das Mauerwerk, genauso wie bei der Stereometrie (dem Steinschnitt), dass es im Idealfall durch „bloßes Aufeinander-schichten“ der Steine unter Einwirkung der Schwerkraft für die Stabilität des Gebäudes ausreicht. Hinsichtlich der Standsicherheit eines Mauerwerksbaus wird im Prinzip kein zusätzliches Mittel wie Mörtel oder dergleichen benötigt [21]. Die entstehenden Druckkräfte werden von Stein zu Stein durch Kontakt übertragen. Die „Aufschichtung“ ist nicht in der Lage, Zugkräfte zu übertragen. Daraus wird ersichtlich, dass Mauerwerksbauten im statischen Sinne Massivbauten sind, die im Idealfall nur auf Druck beansprucht werden sollten. Zugkräfte können, im Unterschied zu zugfestem Material nicht aufgenommen wer-

den. Mit Bezug zu der in Abschnitt 2.3 gezeigten Kategorisierung der Bauteilverbindungen kann die Bauteilschichtung als lose Auflage durch Kraftschluss bzw. lose Auflage durch Formschluss eingestuft werden.

Diese Fügungen haben ein hohes Potenzial zur Entwicklung rezyklierbarer Bauweisen, da sie einen sehr geringen Löseaufwand besitzen.

3.3.4. Funktion von Mauerstein und Mauerfuge

In Abschnitt 3.3.3 werden Mauerwerkskonstruktionen als Massivbauweisen beschrieben, die als Verband aus Stein und Fuge gebildet werden [21]. Dabei wird der Stein in natürlichen und künstlichen Mauerstein unterschieden. Bei dem künstlichen Mauerstein, der hier vor-dergründig betrachtet werden soll, wird je nach Materialität in keramische (Ton) und mineralisch gebundene Mauersteine (Kalk, Zement, Gips, Glas) unterschieden.

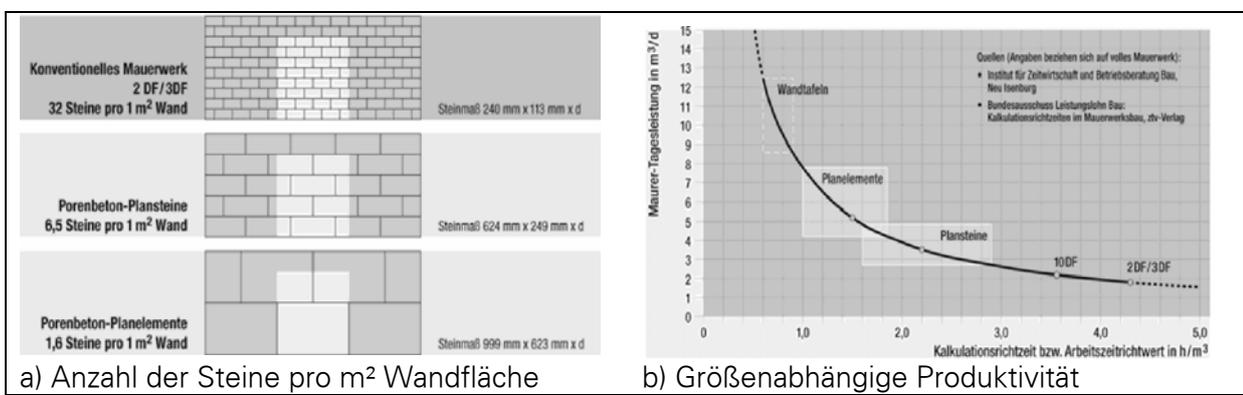


Bild 31 Aspekte des verwendeten Steinformates [204]

Wesentlichen Einfluss in Bezug auf Fugengestalt und Fugenmaterial hat, neben dem verwendeten Steinmaterial, das Steinformat (übliche und übergroße Stein- sowie Blockformate) und dessen Maßhaltigkeit. Die Beziehung zwischen Steinformat, Ebenheit und Fugendicke ist komplex, Gegenstand vieler Studien (siehe Bild 31 und Bild 32) und noch nicht abschließend untersucht.

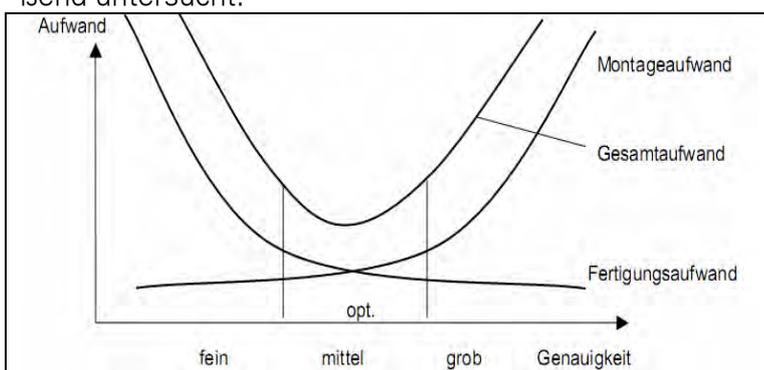


Bild 32 Kosten- und Zeitaufwand in Abhängigkeit von der Genauigkeit [139]

Mauerfugen unterscheidet man nach Fugen mit Mörtel (Gesteinskörnung, Bindemittel und ggf., Zusatzstoffe) und Fugen ohne Mörtel. Darüber hinaus wird bei Mauerwerk mit Mörtel nach dessen Art in unbewehrtes Mauerwerk (mit Dick-, Mittel- oder Dünnbettfugen) und in bewehrtes Mauerwerk (Verbund- oder Vergussmauerwerk) unterschieden. Wesentlich für das Tragverhalten und im tragwerksplanerischen Sinne ist die Beziehung zwischen Stein,

Fuge, Belastungsart und der beabsichtigten Tragwirkung. Bild 33 gibt eine materialunabhängige Übersicht zur Mauerfuge.

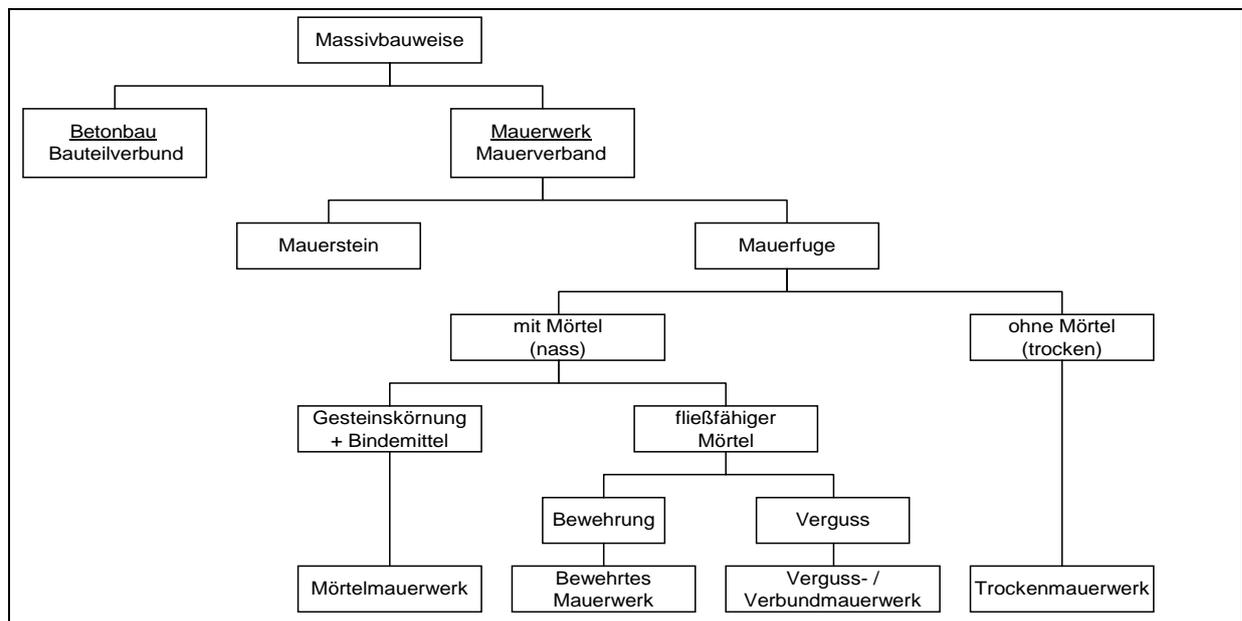


Bild 33 Systemübersicht Mauerfuge

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Mauermörtel neben den bauphysikalischen auch statische Funktionen, wie zum Beispiel die der Lastverteilung, zu erfüllen hat. Durch den Toleranzausgleich werden Spannungsspitzen vermieden. Mauerputz hingegen hat, ungeachtet der ästhetischen Funktion, ausschließlich bauphysikalische Funktionen, welche eng im Zusammenhang mit dem Oberflächenabschluss in Beziehung stehen, zu erfüllen. So ist der vollflächige Auftrag von Außen- und Innenputz zur Gewährleistung von Schlagregen-, Wind-, und Luftdichtigkeit gegenwärtig auch bei mörtellos verlegten Trockenmauerwerken Stand der Technik.

Reduziert man Mauerwerkkonstruktionen auf den Stein mit dessen Fuge als die kleinste mögliche modulare Einheit (siehe Abschnitt 2.1.4) ergibt sich aus dem Vergleich unterschiedlicher Konstruktionsformen im Massivbau beim Mauerwerksbau ein grundsätzlich höheres Potenzial zur Wiederverwendbarkeit, als dies zum Beispiel bei Massivbauweisen in Stahl-Beton der Fall ist, da der Mauerstein nicht zwingend nass-chemisch geklebt und somit das Mauerwerk nicht unlösbar ausgebildet werden muss, um dauerhaft und fest ausgebildet werden zu können. Untersuchungen und konstruktive Modifikationen bei Trockenmauerwerk bieten sich an.

3.3.5. Mechanische Beanspruchungen im Mauergefüge

Wände - Vertikale Scheiben

Hinsichtlich Ihrer mechanischen Beanspruchung werden vertikale Scheibe (Wände) in einachsiger-, oder zweiachsig beanspruchte Bauteile unterschieden (siehe Bild 34).

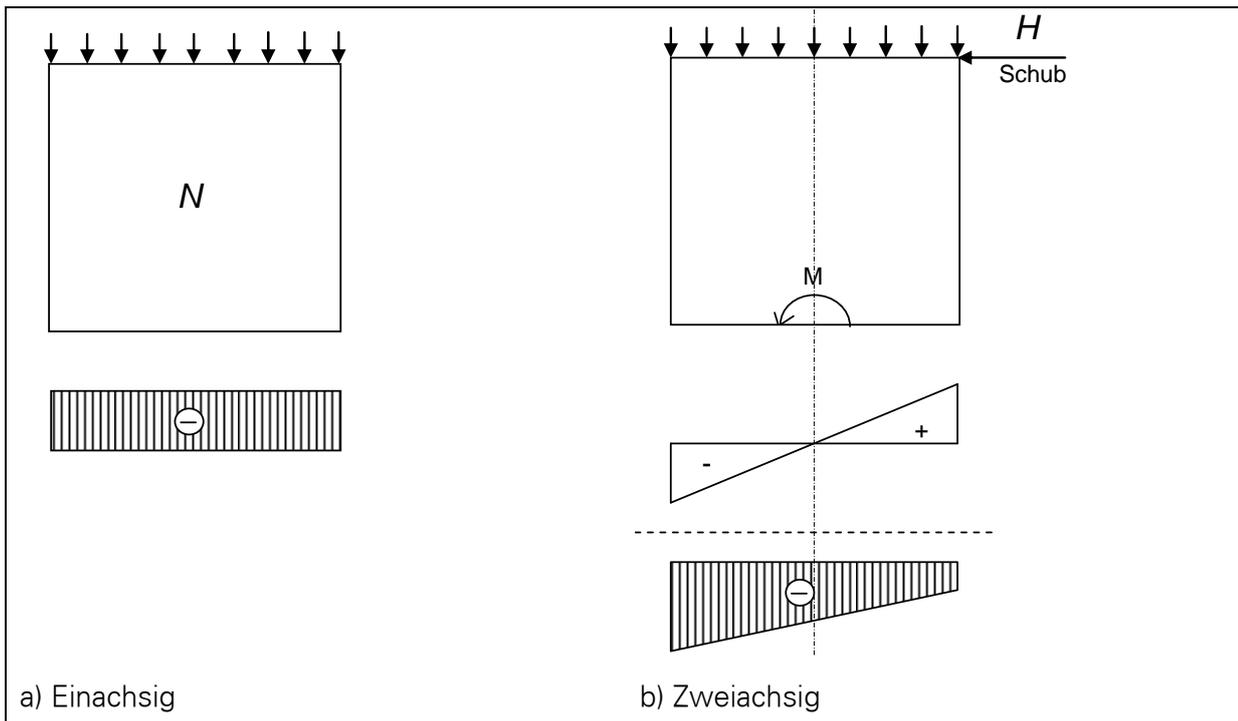


Bild 34 Belastungsarten vertikaler Scheiben (Wände)

Es ergeben sich nachfolgend beschriebene Fälle:

Einachsige Druckbeanspruchung:

Die Vertikale Lastweiterleitung in der Mauerwerkswand (Vertikale Scheiben) stellt den „Regelfall“ einer einachsigen Beanspruchung von Mauerwerken dar und führt zu einer Druckbeanspruchung des Mauerwerks.

Betreffs des grundlegenden mechanischen Verhaltens von druckbeanspruchtem Mauerwerk, sowie die wichtigsten Parameter welche die Druckfestigkeit von Mauerwerk beeinflussen wird in diesem Bericht auf die Arbeit von Hilsdorf [78] zurückgegriffen. Hilsdorf beschreibt in [78] das grundlegende mechanische Verhalten von druckbeanspruchtem Mauerwerk und stellte eine entsprechende Versagenstheorie auf. Diese Versagenstheorie besagt, dass nicht die Druckfestigkeiten der Komponenten, sondern die Beanspruchbarkeit der Mauersteine gegenüber Querkzug die aufnehmbaren Druckspannungen begrenzen.

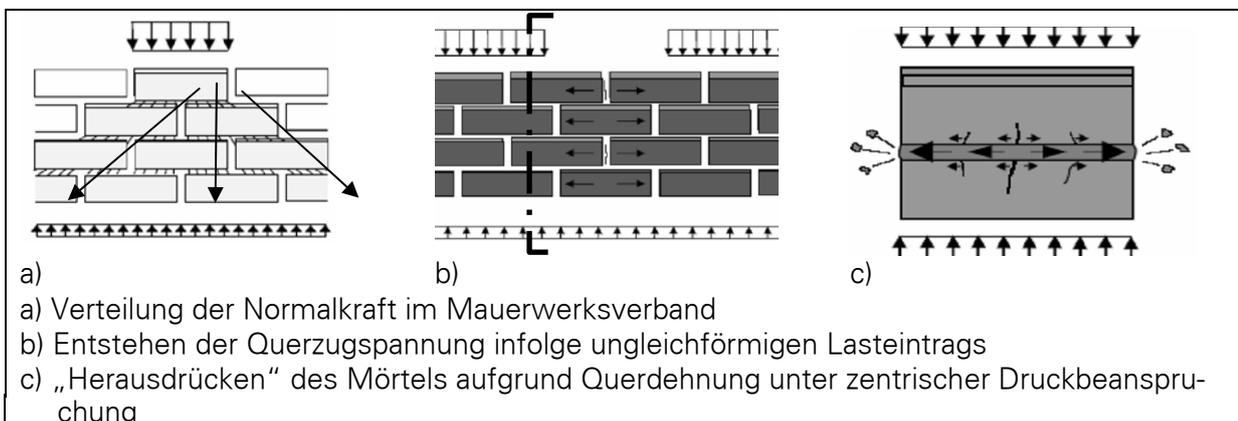


Bild 35 mechanisches Verhalten von druckbeanspruchtem Mauerwerk

Üblicherweise ist die Steifigkeit des Fugenmörtels geringer als die der Mauersteine. Wird Mauerwerk senkrecht zur Lagerfuge unter Druck beansprucht, so wird der Mörtel quergehnt. Die angrenzenden Mauersteine werden jedoch von den darüber und darunter liegenden Steinen über Haftverbundkräfte innerhalb der Grenzflächen behindert (siehe Bild 35). Aufgrund der unterschiedlichen Verformungseigenschaften zwischen Stein und Mörtel entsteht im Mauerwerk ein innerer Spannungszustand. Die Querkzugspannungen senkrecht zur Belastungsrichtung im Stein, die umso größer sind, je größer der Unterschied der Querverformbarkeit der Einzelkomponenten ist, führen bei steigender Beanspruchung zu einem Überschreiten der Steinzugfestigkeit und in der Folge zu vertikalen Rissen. Es entstehen senkrecht stehende, schlanke „Steinsäulen“ im Verband, die bei weiterer Laststeigerung ausknicken, während die eigentliche Druckfestigkeit der Steine noch nicht erreicht ist. Die wichtigsten Parameter, welche die Druckfestigkeit von Mauerwerk beeinflussen, lauten zusammengefasst:

- Druckfestigkeit des Mauermörtels
- Querkzugfestigkeit der Mauersteine
- Verhältnis der Querdehnung von Mauerstein und Fugenmörtel
- Haftverbund zwischen Stein und Mörtel
- Fugendicke (Reduktion verringert Querdehnungen)

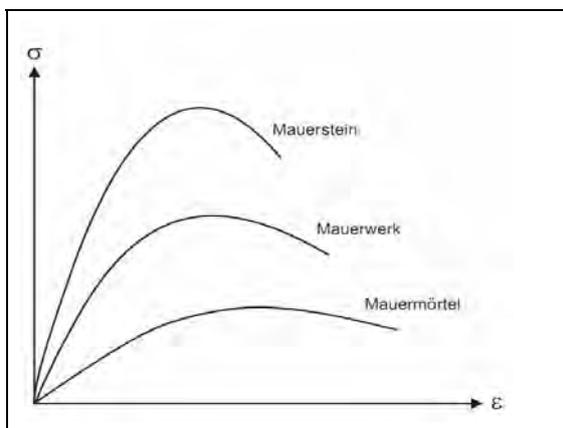


Bild 36 Typische einaxiale Druckarbeitslinien [78]

Einachsige Zugbeanspruchung:

Neben der fundamentalen Bruchtheorie von Hilsdorf für druckbeanspruchtes Mauerwerk sind jene Bruchtheorien von Bedeutung, die die Zugbeanspruchung von Mauerwerk betrachten. Zugspannungen entstehen in Mauerwerksscheiben im Wesentlichen beim Schwinden oder in Folge von Temperaturänderungen von Bauteilen, deren Möglichkeit zur Formänderung durch Randbedingungen behindert ist [68]. Es wird unterschieden in Zug senkrecht und parallel zur Lagerfuge.

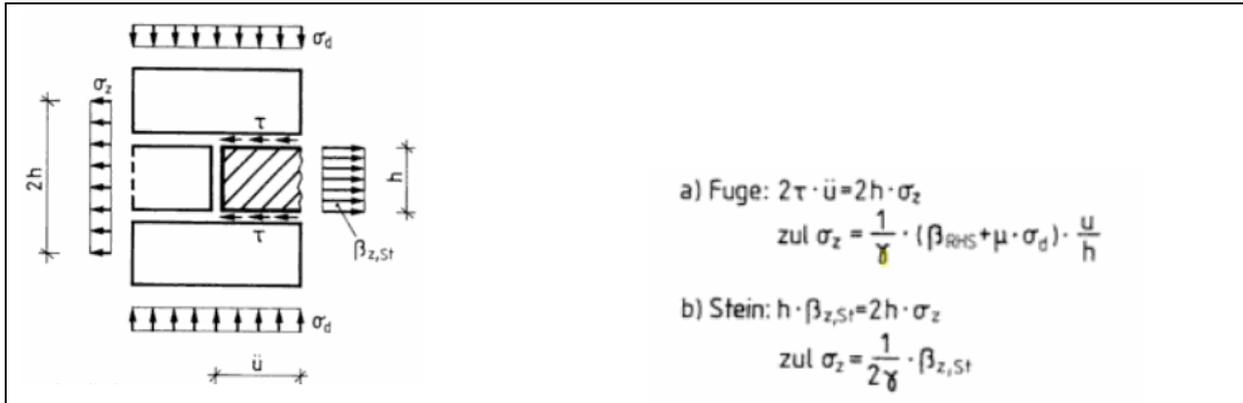


Bild 37 Einaxiale Zugbeanspruchung von Mauerwerk

Senkrecht zur Lagerfuge kann bei tragendem Mauerwerk keine Zugfestigkeit angesetzt werden. Zwar besteht eine Haftung zwischen Stein und Mörtel, jedoch streut dieser Wert wegen vieler Einflüsse stark, sodass bei der Bemessung nicht auf zuverlässige Werte zurückgegriffen werden kann.

Eine Zugfestigkeit Parallel zur Lagerfuge ist je nach Auflast möglich. Es wird in zwei Versagensarten unterschieden:

- Versagen der Lagerfuge
- Versagen der Steine

Zweiachsige Beanspruchung von Mauerwerk

Werden gemauerte Scheiben zur horizontalen Aussteifung von Gebäuden herangezogen, liegt eine zweiachsige Beanspruchung auf Schub-Druck vor (siehe Bild 34)

Infolge der kombinierten Belastung können sich folgende Versagensformen ausbilden:

- Kippen
- Schubgleiten
- Schubversagen
- Druckversagen

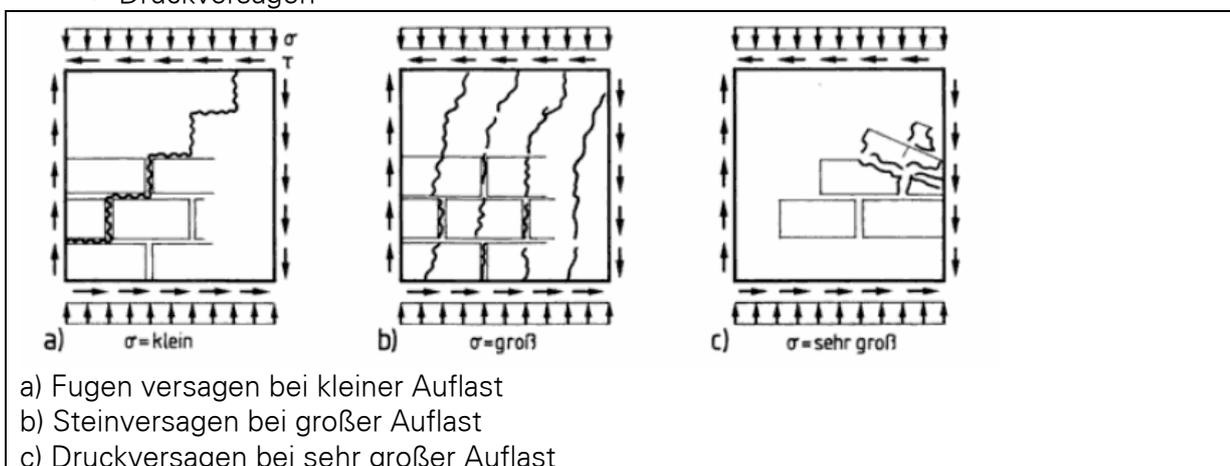


Bild 38 Versagensbilder bei schubbelasteten Mauerscheiben aus [20]

Wesentliche Einflussfaktoren auf die Art des eintretenden Versagensmechanismus sind:

- Zugfestigkeit des Steins
- Zug- und Haftfestigkeit des Mörtels
- Druckfestigkeit des Mauerwerks
- Wandgeometrie
- Randbedingungen der Wandscheibe
- Steinformat und Art des Mauerwerkverbandes
- Größe der Auflast

Zur rechnerischen Beschreibung der Tragfähigkeit von schubbeanspruchtem Mauerwerk existieren zahlreiche Bruchtheorien. In diesem Bericht wird auf die Bruchtheorien von Mann und Müller [101] [102] Bezug genommen, deren Versagenskriterien unter anderem die Grundlage der gegenwärtigen Mauerwerksnormierung bilden. Die Herleitung der einzelnen Versagenskriterien erfolgt durch eine Gleichgewichtsbetrachtung am Einzelstein (siehe Bild 39), wobei davon ausgegangen wird, dass in den Stoßfugen keinerlei Spannungen übertragen werden können.

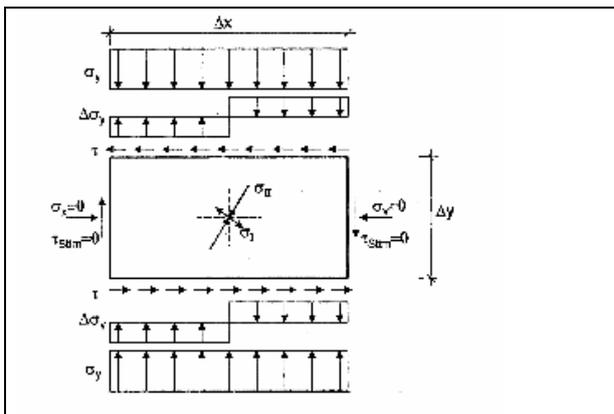


Bild 39 Beanspruchungssituation am Einzelstein nach Mann und Müller [101] [102]

Aus der Gleichgewichtsbetrachtung am Einzelstein werden folgende vier Versagenskriterien abgeleitet:

- Klaffen der Lagerfuge (in der Steinhälfte mit der geringeren Drucknormalspannung)
- Gleiten der Lagerfuge (in der Steinhälfte mit der geringeren Drucknormalspannung)
- Schräges Steinzugversagen (in Steinmitte)
- Mauerwerksdruckversagen (in der Steinhälfte mit der höheren Drucknormalspannung)

Trägt man diese Kriterien gemeinsam in einem σ - τ -Diagramm auf (siehe Bild 40), so ergibt sich ein Hüllkurvenzug, der den zulässigen Spannungsbereich umschließt und die Abhängigkeit des maßgebenden Kriteriums von der Normalspannung illustriert und so die Bruchtheorie grundsätzlich belegt.

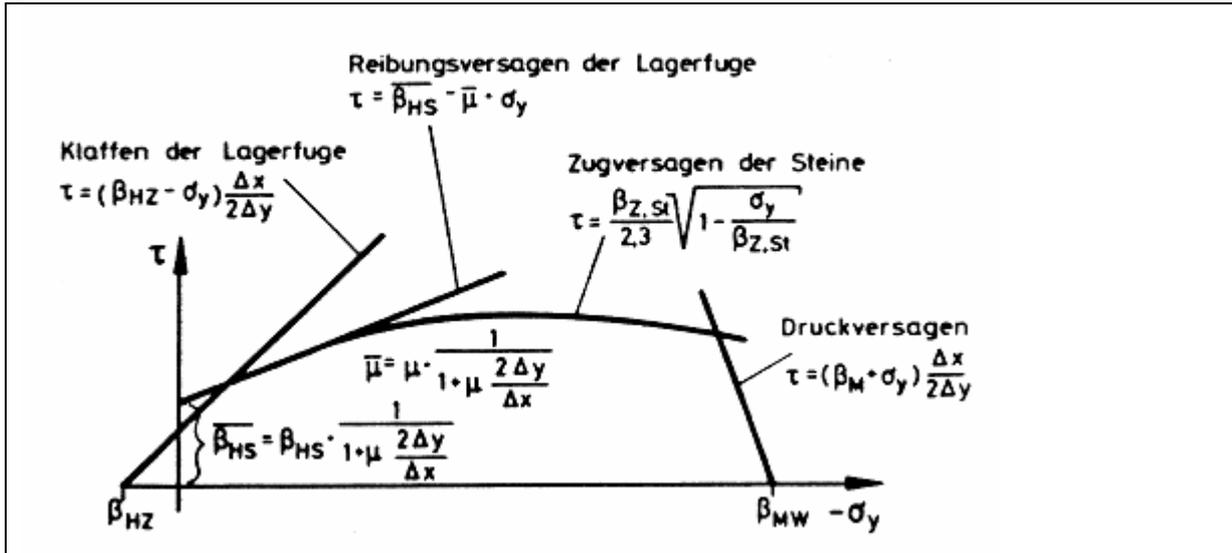


Bild 40 Erweiterte Versagenskriterien nach Mann und Müller [103]

Im Vorgriff auf das im Abschnitt 3.4 vorgestellte Trockenmauerwerk wird festgestellt, daß ein Übertrag der allgemeinen Versagenskriterien von Mann und Müller auf jene von Trockenmauerwerk möglich ist. Detaillierte Aussagen zum mechanischen Verhalten von Trockenmauerwerk finden sich im Abschnitt 3.4.4.

Auf eine zweiachsige Schub-Zug-Beanspruchung, wie sie zum Beispiel bei Erddruckbelasteten Kellerwänden auftreten, wird innerhalb des Projekts ReMoMaB nicht eingegangen.

3.4. Trockenmauerwerk

3.4.1. Eigenschaften und Stand der Technik

Trockenmauerwerk gehört zu einer der ältesten Konstruktionsformen der Menschheit und ist sicher die älteste Mauerwerksart überhaupt [94]. Derzeit wird Trockenmauerwerk bei natürlichen Steinen hinsichtlich der Ausführung in DIN 1053-1 Abschnitt 12 [26] als sogenannte Schwergewichtsmauer in der Garten- und Landschaftsarchitektur erwähnt. Da in Deutschland noch keine umfassenden Erfahrungen mit der Anwendung von konstruktivem Trockenmauerwerk aus künstlichen Steinen vorliegen, ist diese Mauerwerksart nach wie vor in keiner Norm geregelt. Im Sinne der Musterbauordnung (MBO) [112] handelt es sich somit bei Trockenmauerwerk um eine neue Bauart, die noch nicht allgemein gebräuchlich ist. Daher darf Trockenmauerwerk nur dann verwendet werden, wenn seine „Brauchbarkeit“ im Sinne der MBO nachgewiesen ist, sodass bis heute diese Bauart nur über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) in Berlin geregelt wird [94].

Als Material ist bei Trockenmauerwerken von Betonen über Hochlochziegeln bis hin zu Kalzium-Silikat-Mauersteinen alles vorzufinden. Konstruktionsbedingt wird bei Trockenmauerwerk aus künstlichen Steinen die erste Schicht (Kimmschicht) mit Mörtel der Mörtelgruppe MG III vermauert. Alle weiteren Schichten werden dann trocken verlegt. Die Funktion der Kimmschicht lässt sich wie folgt zusammenfassen ([81] [84] S. 158-170 [204]):

- Toleranzausgleich
- Reduktion bzw. Verhinderung von Wärmebrücken
- Reduktion bzw. Verhinderung von Schallbrücken

Da die Kimmschicht darüber hinaus statische Anforderungen gewährleisten muss, kommt meist ein Verbund aus einem lastabtragenden Material mit integrierter Dämmung zum Einsatz. Ausnahme bilden Kimmschichten aus Schaumglas.

Auf folgende wissenschaftliche Arbeiten bezüglich konstruktiven Trockenmauerwerks wird in diesem Bericht Bezug genommen:

- Zur Historie, Stand der Technik und Tendenzen bei Trockenmauerwerk die Arbeit von Glitza [66].
- Bei vorgespanntem Mauerwerk die Grundlagen von Budelmann, Gunkler und Wigger [17], welche anschaulich in [94] zusammengefasst sind.
- Die Dissertation von Schmitz-Riol [143], welche wesentliche Vor- und Nachteile im Hinblick auf Rückbaubarkeit gibt, sowie auf
- Forschungsbericht [90] und Dissertation [104] von Marzahn, welcher darlegen konnte, dass vorgespanntes Trockenmauerwerk, aufgrund des fehlenden Mörtels, sich in der Konsolidierungsphase formschlüssig aneinanderpresst und anschließend wie ein homogenes Material reagiert. Infolge der Steintoleranzen können jedoch auch Spannungsspitzen auftreten, die dann zu einem ähnlichen Querschnittversagen, wie bei Mauerwerk mit Mörtelfuge führen.

Nach Langer [94] finden folgende Trockenmauerwerksysteme Anwendung:

- | | |
|-------------|--|
| Schweden | <ul style="list-style-type: none"> • planebene, planparallele Porenbetonsteine mit Plastikscheiben in Stoß- und Lagerfuge |
| Österreich | <ul style="list-style-type: none"> • planebene, planparallele Hochlochziegel mit kompressiblen Holzleichte-wolleleichtbauplatten (Helton, oder Heraklith) |
| Tschechei | <ul style="list-style-type: none"> • Betonsteine mit kegelstumpfförmigen Noppen in der Lagerfuge und glatten Stirnflächen |
| Niederlande | <ul style="list-style-type: none"> • planebene, planparallele Porenbetonsteine mit Plastikstreifen in Stoß- und Lagerfugen (Nuten) oft mit außenliegender Glasfaserbewehrung |
| Kanada | <ul style="list-style-type: none"> • T-förmige, planebene, planparallele Betonsteine mit in die untere Stein-schicht verlängertem Außensteg • planebene, planparallele Leichtbeton - Hohlblocksteine mit glasfaserbe-wehrtem Putz |
| Deutschland | <ul style="list-style-type: none"> • planebene, planparallele Leichtbetonsteine, mit Zuschlag Naturbims, • planebene, planparallele Porenbetonsteine, mit Nut und Feder • planebene, planparallele Porenbetonsteine, mit Plastikstreifen in Stoß- und Lagerfugennuten |

Marzahn [104] ergänzt:

- | | |
|----------------|--|
| Frankreich | <ul style="list-style-type: none"> • raumhohe Verbundziegelelemente, kalibrierte Stirnseite mit Nut und Feder |
| Schweiz | <ul style="list-style-type: none"> • V-förmige Betonformsteine |
| Großbritannien | <ul style="list-style-type: none"> • Betonzellblöcke mit glatten Stirnseiten planebene, planparallele Lager-fugen |
| Deutschland | <ul style="list-style-type: none"> • Kalksandsteine, glatte Stirnseiten, Lagerflächen mit ein- und austreten-den kegelstumpfförmigen Noppen |

3.4.2. Vorteile



Bild 41 Verlegung der Schichten von Hand

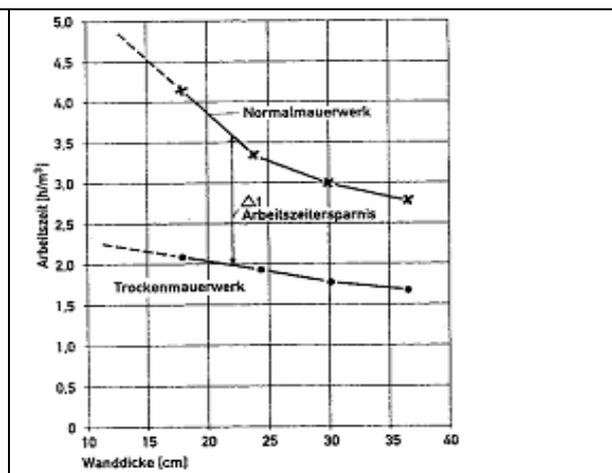


Bild 42 Verarbeitungszeiten im Vergleich [104]

Nach Marzahn [104] ist die hohe Wirtschaftlichkeit der wesentliche Vorteil von Trockenmauerwerk. Diese begründet sich wie folgt:

- Durch Arbeitszeiterparnis, da die Mauersteine lediglich von Hand und ohne Mörtel verlegt werden müssen
- Durch die Möglichkeit, (weitgehend) witterungsunabhängig ein Mauerwerk erstellen zu können, da Trockenmauerwerk, sobald die erste Steinlage (Kimmschicht) verlegt ist, auch bei Frost hergestellt werden kann.
- Dem sinkenden Risiko von Bauschäden, die ihre Ursachen in erhöhter Baufeuchte haben sowie
- der Materialersparnis, insbesondere beim Putzauftrag (innen und außen), da aufgrund der Verwendung sehr maßhaltiger Mauersteine nahezu vollständig auf den Flächen- und Ebenenausgleich in der Putzschicht verzichtet werden kann.

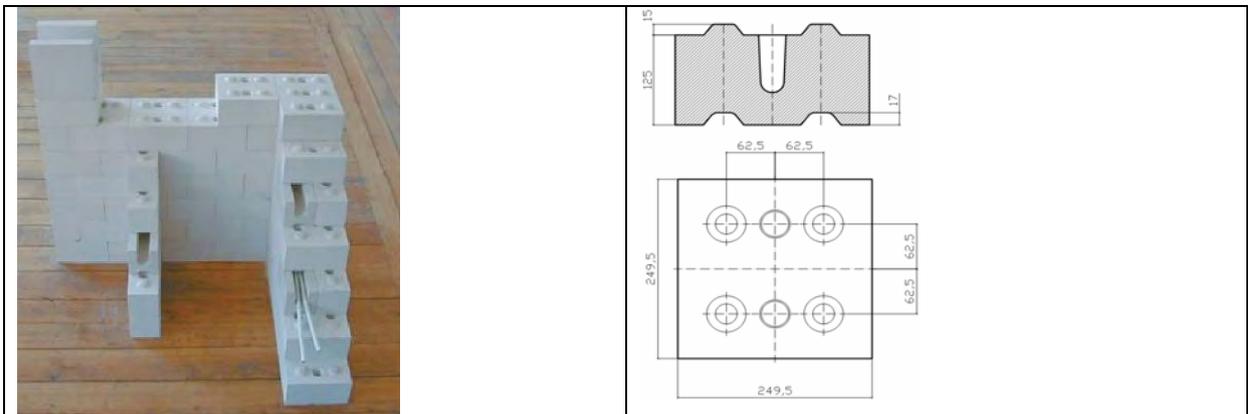


Bild 43 Rastermauerblöcke aus KS [185]

Bild 44 Querschnitt und Aufsicht[209]

Weiterhin kommen sämtliche zuvor genannte Arbeiten [17][90][104][143] zu dem Schluss, dass modulare Trockenmauerkonstruktionen hervorragende Ansätze für ein Bauteilrecycling bieten.

3.4.3. Nachteile

Nachteile lassen sich nach [104] wie folgt zusammenfassen:

- Durch den Wegfall der Mörtelfuge ergeben sich bezüglich der Maßhaltigkeit sowie der Planparallelität und Ebenheit der Lagerflächen der Steine sehr hohe Anforderungen an das Steinmaterial.
- Aufgrund fehlender Verbundfestigkeit fehlt ohne Auflast jegliche Zug-, Schub- und Biegefestigkeit. Deshalb sind eine permanente Auflast, eine Vorspannung oder eine Verzahnung (Noppensteine) entsprechender Bauteile notwendig.
- Im Bauzustand kann unter Umständen eine zusätzliche Abstützung gegenüber Wind und dergleichen erforderlich sein.

3.4.4. Mechanisches Verhalten von Trockenmauerwerk

Das mechanische Verhalten von Trockenmauerwerk unterscheidet sich infolge des fehlenden Mörtels grundlegend von jenem mit Mörtel. Nach *Marzahn* [104] stellt Trockenmauerwerk einen anisotropen Einkomponentenbaustoff dar, der im allgemeinen der Fugenausrichtung folgt. Die Trageigenschaften des Trockenmauerwerks werden vorrangig durch die Eigenschaften der Mauersteine und das Zusammenspiel der Mauersteine im trockenen Mauerwerksverband geprägt. Vermörteltes Mauerwerk hingegen ist ein Verbundbaustoff aus Mörtel und Mauersteinen bei welchem entscheidend die Kombination der Eigenschaften von Mauersteinen und Mauermörtel das Trag- und Verformungsverhalten beeinflussen. Analog zu den Betrachtungen in Abschnitt 3.3.5 wird Trockenmauerwerk in einachsig und zweiachsig beanspruchte Bauteile eingeteilt und nach den entstehenden Spannungen unterschieden. Ferner werden zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens zunächst das Gesamtgefüge und dann das Verhalten des Einzelsteins betrachtet. In Anwendung der in Abschnitt 3.3.5 dargestellten allgemeingültigen Theorie lässt sich für Trockenmauerwerk folgendes zusammenfassen:

Einachsige Beanspruchung von Trockenmauerwerk

Ebenso wie bei vermörteltem Mauerwerk kann Trockenmauerwerk einachsig „auf Zug“ oder auf „Druck“ beansprucht werden. Auch hier stellt die einachsige Beanspruchung auf Druck den Regelfall dar.

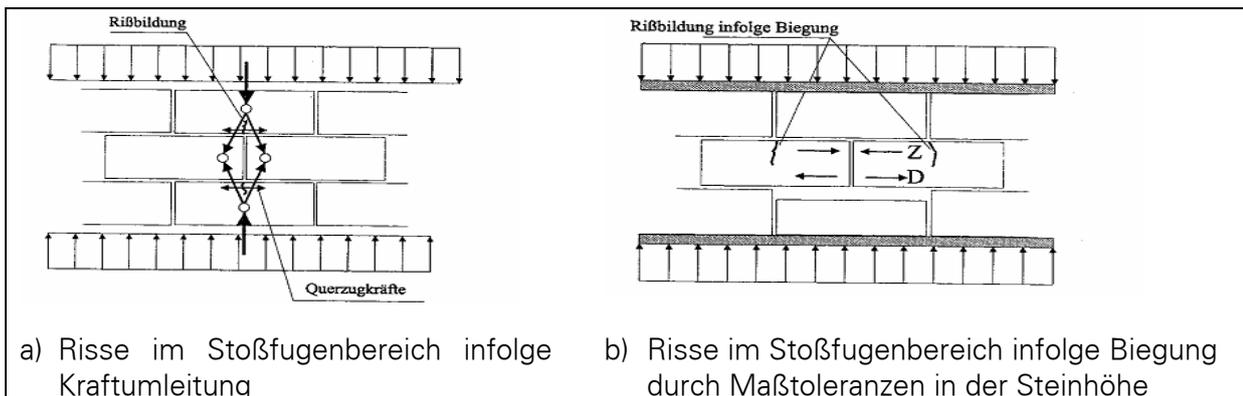


Bild 45 Ursachen der frühen Rissbildung von druckbelastetem Trockenmauerwerk [104]

Druckversuche von *Langer* [94] und *Marzahn* [104] zeigten, dass die Qualität der Lagerfuge bei Trockenmauerwerk entscheidenden Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten hat. Demnach sind die wesentlichen Versagensfaktoren bei Druck:

- Querzug (infolge Kraftumlenkung)
- Biegezug (infolge unterschiedlicher Steinhöhen)

Querzug infolge Druckbeanspruchung tritt sowohl bei vermörteltem als auch bei unvermörteltem Mauerwerk auf. Wohingegen bei vermörteltem Mauerwerk „gewisse“ Zugkräfte über die Fuge - sofern diese vermörtelt ist - hinweg abgetragen werden können, muss beim Trockenmauerwerk der volle Querzug durch die überdeckenden Mauersteine aufgenommen werden (siehe Bild 45a).

Nach *Marzahn* [104] stellt das Versagen aufgrund Maßabweichungen der Einzelsteine den wesentlichen Faktor beim Versagen unter Druck dar. Hierbei bewirken unterschiedliche Steinhöhen in einer Steinlage Biegung im Stein, die den Stein über der Stoßfuge reißen lassen (siehe Bild 45b). Es wird in Risse infolge Maßabweichung in der Steinhöhe, sowie in Risse in Folge Spannungsübertragung durch Unebenheiten der Lagerfuge unterschieden. Lagerfugenebenheiten werden weiterhin nach deren Kontaktbereich in Übertragungen im Mittenbereich und jenen im Randbereich differenziert (siehe Bild 46).

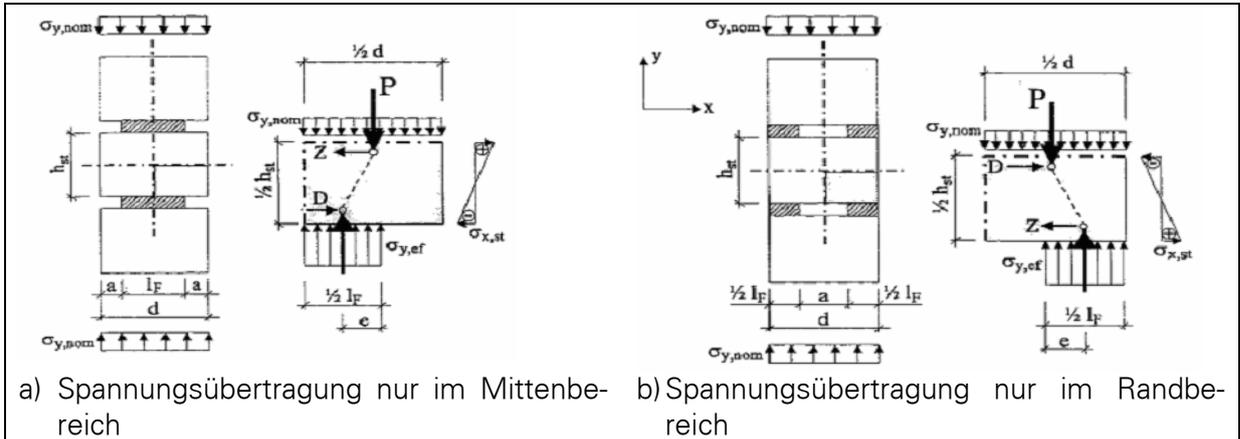


Bild 46 *Zusätzliche Biegezugspannungen im Mauerstein infolge ungleichmäßiger Lagerfugenüberdeckung nach [104]*

Die dabei von *Marzahn* [104] konstatierten Übertragungsbereiche können u.U. eine endliche Größenordnung annehmen. In Abhängigkeit vom Steinmaterial kommt es zu unterschiedlichen Beanspruchungsformen. Handelt es sich um geringfestes Steinmaterial, plastizieren die Spannungsspitzen, bis wieder eine flächige Auflage erreicht wird. Bei festem Steinmaterial treten eher Spaltzugkräfte auf, die zu Rissbildungen über „Bergen“ führen. Diese Beanspruchungsform ist bisher nicht explizit untersucht worden.

Zugbeanspruchung bei Trockenmauern ist ebenso wie bei vermörteltem Mauerwerk je nach Auflast parallel zur Lagerfuge möglich. Aufgrund des fehlenden Mörtels spielt die Rauigkeit eine wesentliche Rolle.

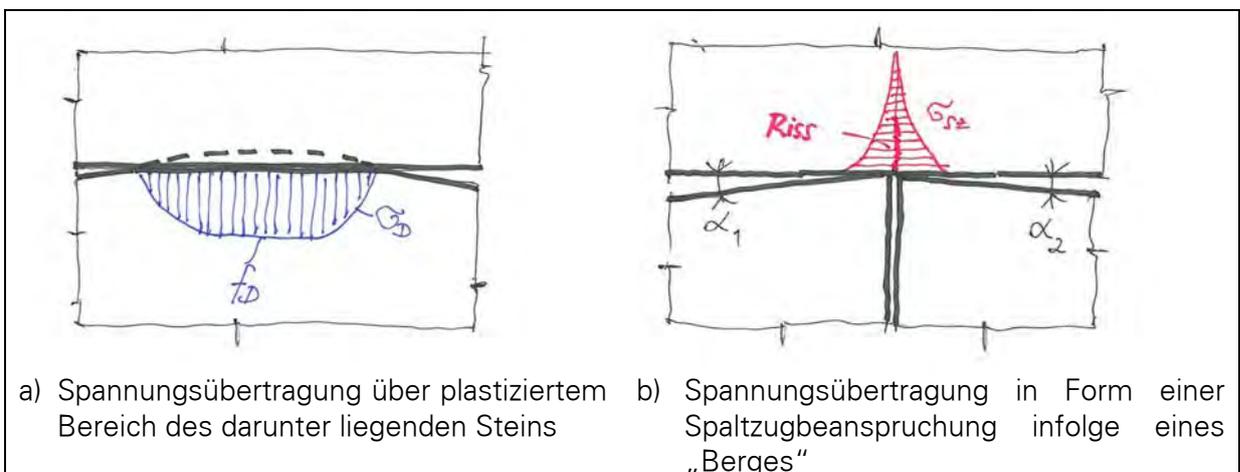


Bild 47 *Beanspruchungen infolge von Flächentoleranzen in der Lagerfuge*

Zweiachsige Beanspruchung von Trockenmauerwerk

Zweiachsige Beanspruchung von Trockenmauerwerk führt wie bei vermörteltem Mauerwerk auch zum Versagen infolge Kippen bzw. infolge Biege-Druck-Versagens. Eine Übertragung der Erkenntnisse aus dem vermörtelten Mauerwerk erscheint unproblematisch.

Stabilitätsversagen bei zentrischer und exzentrischer Normalkraftbeanspruchung

Trockenmauerwerk hat eine vollkommen andere Spannungs-Dehnungs-Linie als vermörteltes Mauerwerk. Bei Trockenmauerwerk tritt zuerst eine gewisse Konsolidierung ein bis die Kraftschlüssigkeit zwischen den Mauersteinen hergestellt ist. Danach steigt der Verlauf an. Der E-Modul ist wesentlich geringer, als bei vermörteltem Mauerwerk, auch wenn man ihn als Anstieg des steileren Kurvenabschnittes definiert.

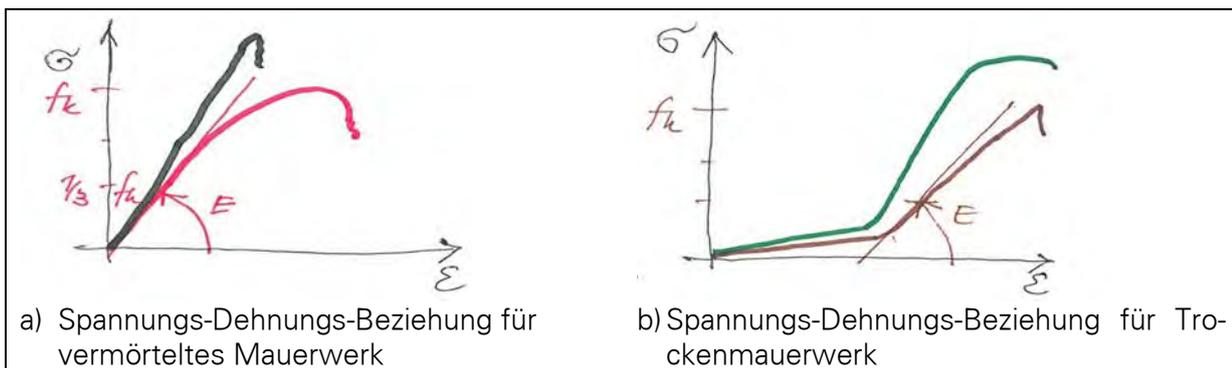


Bild 48 Spannungs-Dehnungs-Linien

Die Übertragung der Erkenntnisse aus dem vermörtelten Mauerwerk steht beim Knicken erst einmal in Frage. Aufgrund des geringeren E-Moduls ist mit größeren Verformungen und damit mit einem zeitigeren Stabilitätsversagen zu rechnen, als bei vermörtelten Fugen. Bei zentrischer Beanspruchung hat die Konsolidierungsphase keinen Einfluss auf das Ergebnis. Bei exzentrischer Beanspruchung führt sie im Vergleich zum vermörtelten Mauerwerk zu größeren Anfangsverformungen (Ausbiegungen), die zusätzliche Anteile nach Theorie II. Ordnung liefern, die wiederum zu zeitigerem Versagen als bei vermörteltem Mauerwerk führen. Dieses Phänomen ist bisher bei Trockenmauerwerk unerkannt geblieben.

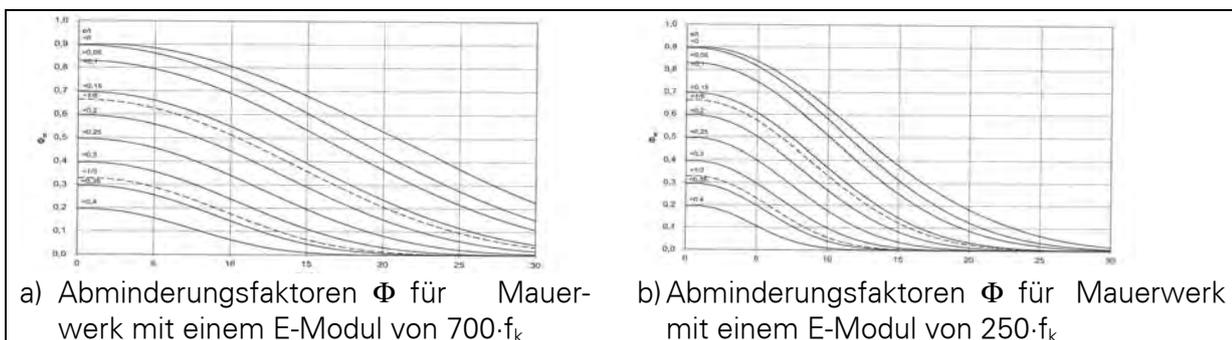


Bild 49 Abminderungsfaktoren Φ infolge Knickens für Mauerwerk

3.4.4.1. Schubversagen

Marzahn [104] stellt die Versagensgründe beim Trockenmauerwerk in Folge Schub zum einen in Folge der Reibung Stein- Stein, zum anderen, in Anlehnung an die Theorie von Mann

und Müller (vergleiche Abschnitt 3.3.5), als ein Versagen in Folge von Stein-Zug ohne Verdrehung dar. Diese Versagensgründe lassen sich wie folgt beschreiben:

Versagen der Lagerfuge infolge Reibung

Aufgrund der Rauheit der Steinlagerflächen lagern Steine im Allgemeinen nicht planebener aufeinander, sondern es stellen sich gewisse Verzahnungen zwischen den Steinen ein. Bei der Übertragung von Schubspannungen vollführen die Mauersteine eine Gleitbewegung in der Ebene der Lagerfuge und zusätzlich eine Bewegung senkrecht zur Lagerfuge. Diese orthogonale Bewegung versucht bei schubbeanspruchten Trockenmauerwerkskörpern eine Volumenzunahme, die man als Dilatanz bezeichnet. Der Vorgang selbst wird als Dilatation bezeichnet (siehe Bild 50) Infolge der höheren Druckspannungen senkrecht zur Lagerfuge erhöht sich der Reibwiderstand und damit die aufnehmbare Schubspannung. Letztlich ist der Reibwiderstand in den Fugen so groß, daß dieser den Schubwiderstand der Mauersteine übersteigt. Es kommt zu einem Bauteilversagen, das durch ein Reißen der Steine gekennzeichnet ist und nicht durch ein Gleiten in den Fugen.

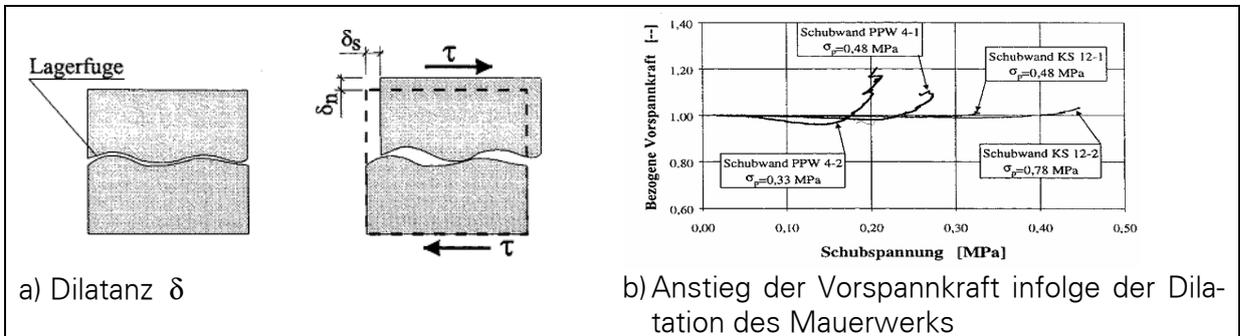


Bild 50 Dilatationsverhalten einer schubbeanspruchten, mörtellosen Lagerfuge [104]

Stein-Zug-Versagen

Stein-Zug-Versagen analog Mann-Müller (vergleiche Abschnitt 3.3.5) tritt bei Trockenmauerwerk ohne Steinverdrehung auf.

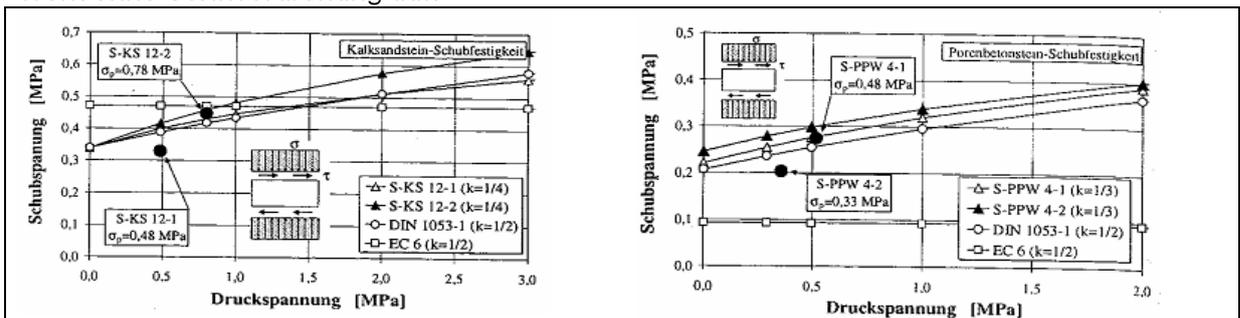


Bild 51 Schubbruchfestigkeiten der Mauersteine im Vergleich (a) Kalksandstein-Trockenmauerwerk (KS 12), (b) Porenbetonstein-Trockenmauerwerk (PPW4) [104]

Die Wandscheibe verhält sich eher wie eine im Bereich der Stoßfugen geschlitzte Scheibe aus homogenem Material. Das Versagen tritt durch Aufreißen in Richtung der Hauptzugspannung auf.

Der Hauptanteil des Versagens bei vermörteltem Mauerwerk hat seine Ursache in der Verdrehung der Steine. Diese fehlt beim Trockenmauerwerk. Insofern liefert die Anwendung der Bemessungsgleichungen aus dem vermörtelten Mauerwerk sichere Ergebnisse.

Schub-Druck-Versagen

Schub-Druck-Versagen tritt dann ein, wenn hohe Druckbeanspruchung und geringe Querkraftbeanspruchung zusammentreffen. Der Versagensmechanismus gleicht dem bei vermörteltem Mauerwerk. Sich einstellende, steil geneigte Druckstreben wollen sich aufrichten. Die Versagensart tritt immer dann auf, wenn eine geringe Steinüberbindung und hohe Steine (z.B. Elemente) vorliegen. Die Bemessungsgleichungen aus dem vermörtelten Mauerwerk sind auf Trockenmauerwerk übertragbar.

Eine Überarbeitung und Überprüfung der Schubtheorie für Trockenmauerwerk war nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens und wäre daher zukünftig wünschenswert.

Plattenschub

Beim Plattenschub tritt reines Reibungsversagen ohne Haft-Scherversagen auf. Die Bemessungsgleichungen aus dem vermörtelten Mauerwerk sind auf Trockenmauerwerk übertragbar [47] [46].

3.4.4.2. Biegezug- und Zug

Nach Marzahn [104] lassen sich die Versagensmechanismen biegebeanspruchten Mauerwerks mit Mörtelfugen auf jene von Trockenmauerwerk übertragen. Dabei kann der Mörteltraganteil vernachlässigt werden.

Biegung parallel zur Lagerfuge mit offenen Stoßfugen

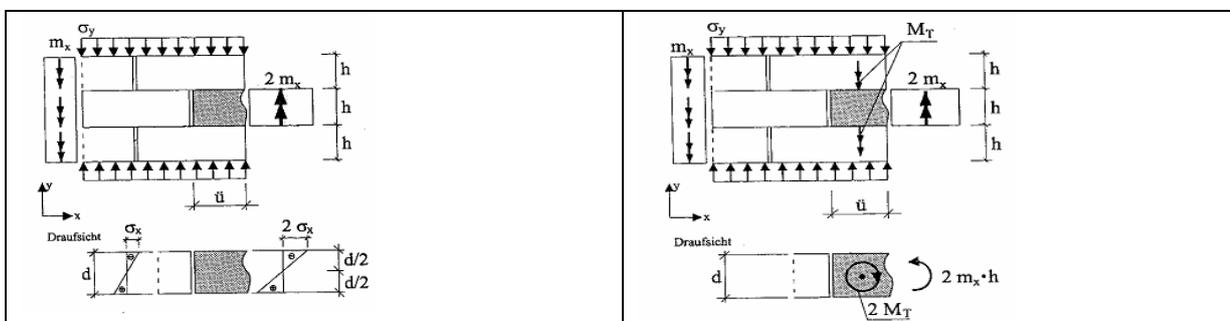


Bild 52 Gleichgewicht am Einzelstein im Versagenszustand des Mauersteins [104]

Bild 53 Gleichgewicht am Einzelstein im Versagenszustand der Lagerfugen [104]

Versagen der Mauersteine

Infolge der offenen Stoßfugen bei Trockenmauerwerk müssen die Biegespannungen an den Stoßfugen über die Lagerfugen umgeleitet werden, so dass die durchgehenden Mauersteine Spannungen aus zwei Schichten aufnehmen müssen. Daher kann die Biegezugfestigkeit der Trockenmauerwerkswand nur halb so groß sein wie die Mauersteine, welche sie bilden (siehe Bild 52).

Versagen des Verbandes

Dadurch, dass Trockenmauersteine knirsch verlegt werden, können kaum Druckkräfte und vor allem keine Zugkräfte senkrecht zur Stoßfuge aufgenommen werden. Dementsprechend

müssen die auf einer Schicht entfallenden Biegemomente M_T über Schubspannungen τ in der Lagerfuge im Bereich der Überdeckungslänge \bar{u} in die angrenzenden Steinschichten übertragen werden. Andernfalls löst sich der Verband auf, weil die Steine als Ganzes aus dem Verband herausgedreht werden. In Bild 53 wird gezeigt, dass der Bruchzustand erreicht ist, wenn die maximale Randschubspannung τ den Schubwiderstand der Fuge, der nur der Reibwiderstand sein kann, erreicht wird.

Biegung parallel zur Lagerfuge mit geschlossenen Stoßfugen

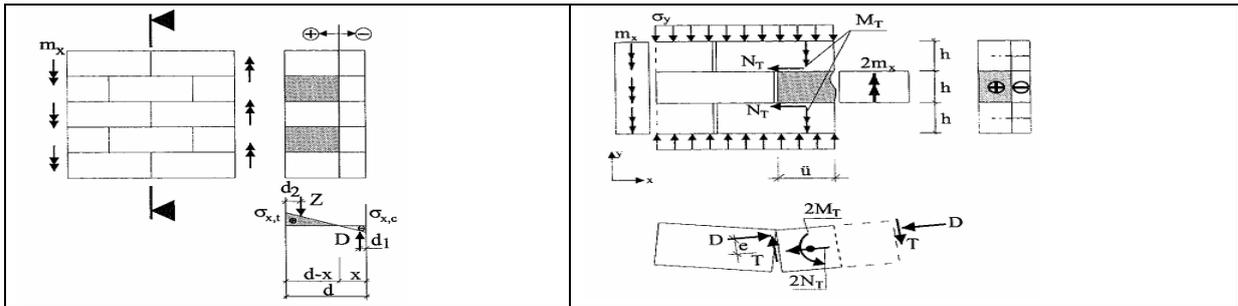


Bild 54 Plattenbalkenwirkung bei Mauerwerk mit geschlossenen Stoßfugen [104]

Bild 55 Gleichgewicht am Einzelstein im Versagenszustand der Lagerfuge [104]

Versagen der Mauersteine

In Bild 54 wird die Biegeverformung der Wand gezeigt. Dies bewirkt, dass der eine Querschnittsteil gezogen und der andere gedrückt wird. Dank der geschlossenen Stoßfuge werden die Biegedruckkräfte im gedrückten Bereich ohne Umlenkungen über die gesamte Wandhöhe weitergeleitet. Im Querschnitt entsteht eine Plattenbalkenwirkung. Mann [99] hat ein Maß für die Druckzonenhöhe x und die Zugzonentiefe $d-x$ gegeben.

Versagen des Verbands

In Bild 55 wird gezeigt, dass wenn Mauersteine eine verhältnismäßig hohe Zugfestigkeit besitzen, diese sich dann ungerissen aus dem Verband lösen können. Dazu wird der Stein aus seiner Lage gedreht und erzeugt in den angrenzenden Lagerfugen Torsionsmomente M_T . Zusätzlich ist durch die Berührung der Steinstirnseiten eine Druckspannungsübertragung möglich. Aus dem Gleichgewicht zwischen der vom Stein aufzunehmenden Zugkraft Z aus zwei Steinschichten ergibt sich eine gleichgroße Druckkraft D , ebenfalls für zwei Schichten. Während Z von einem Stein abgetragen werden muss, kann D auf zwei Steinhöhen verteilt werden, so dass pro Stein eine Druckkraft von nur $0,5 D$ aufgenommen werden muss.

Biegung senkrecht zur Lagerfuge

Das Trag- und Verformungsverhalten wird weitgehend von der Größe der Axiallast geprägt, während der Einfluss der Materialeigenschaften nur eine untergeordnete Bedeutung besitzt. Unter kleinen Normalspannungen kann dem Mauersteinmaterial der Wände nur kleine Biegeverformungen rissfrei aufgezwungen werden. Risse entstehen entlang der Lagerfugen zuerst in den am stärksten beanspruchten Wandbereichen. Der Bruch ist durch Absplittierungen und durch ein Abspalten der Druckzone vom Biegequerschnitt im mittleren Wandbereich gekennzeichnet (siehe Bild 56)

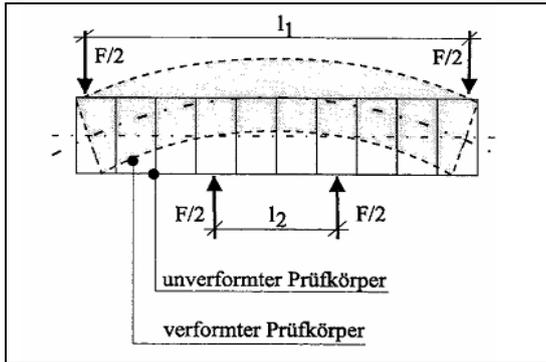


Bild 56 Verformungsfigur (Aufsicht) der biegebeanspruchten Wand [104]

3.4.4.3. Zusammenfassung

In Zusammenfassung der vorliegenden Erkenntnisse kann in wissenschaftlicher Hinsicht gesagt werden, dass eine geschlossene theoretische Darstellung des Bruchverhaltens, sowie ein geschlossenes entsprechendes Bemessungsmodell fehlen. Für die gegenwärtige Anwendung in der Praxis genügt jedoch die aus dem vermörtelten Mauerwerk vorhandene Theorie, wobei die Haftscherfestigkeit entfällt.

3.4.5. Potenzial und notwendige Modifikationen von Trockenmauerwerk

Aufgrund zahlreicher Beschränkungen bei den bauaufsichtlichen Zulassungen für Trockenmauerwerk besteht nach [143] ein großes ungenutztes Potenzial bei der Materialauslastung, welches sich wie folgt darstellen lässt:

- Zur Erzielung schlagregendichter Außenwände wird Trockenmauerwerk verputzt, wodurch der zuvor genannte Vorteil der Demontage- und Rezyklierbarkeit konterkariert ist.
- Zurzeit existiert lediglich zugelassenes Trockenmauerwerk mit Bauteildicken von 175 mm und 240 mm (bzw. 249,5 mm). Rein statisch ist weitaus dünneres und somit kostengünstigeres Trockenmauerwerk realisierbar. Darüber hinaus sind tragende Wanddicken bei zweischaligen Wänden größer 175 mm heutzutage weder im Einfamilienhaus, noch im Geschosswohnungsbau hinnehmbar.
- Für den rationellen Einsatz im Geschosswohnungsbau sind größere Elemente, als zurzeit erhältlich, erforderlich.
- Geschosshöhen von 3,00 m bis 3,50 m sind durchaus auch in Trockenmauerwerk denkbar, jedoch zurzeit nicht zulässig.
- Eine Erweiterung der bisher max. zulässigen Deckenspannweite von 6,00 m auf 7,50 m wäre ein enormer Gewinn und liegt durchaus im Bereich des Möglichen.

Legt man die Erkenntnisse von Marzahn [104] zugrunde, so liegt der Schluss nahe, dass diese Beschränkungen sich durch Vorspannen von Trockenmauerwerk günstig beeinflussen lassen.

3.5. Geschossdecken

3.5.1. Anforderung, Einteilung

Im Allgemeinen unterscheidet man Decken nach der Hauptform in ebene und gekrümmte (gewölbte) Decken, sowie nach dem verwendeten Baustoff. Gewölbte Decken sind vorwiegend druckbelastete Massivdecken, die heute im Zusammenhang mit Bausanierungen oder im Zuge historischer Betrachtungen von Interesse sind. Sie werden an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Neben der generellen Einteilung lassen sich Geschossdecken, ebenso wie Wände (siehe Abschnitt 3.3, Tabelle 3), nach deren Anforderungen an den Raumabschluss einteilen. Diese lassen sich nach folgenden Aspekten gliedern:

- Standsicherheit
- Brandschutz
- Schallschutz
- Wärmeschutz

Darüber hinaus dient die Decke zur Aufnahme der notwendigen Installation. Es wird eine ausreichende Tragfähigkeit bei geringer Durchbiegung und Schwingung, ein wirksamer Schallschutz und Wärmedämmung sowie optische Qualität bei entsprechender Wirtschaftlichkeit erwartet.

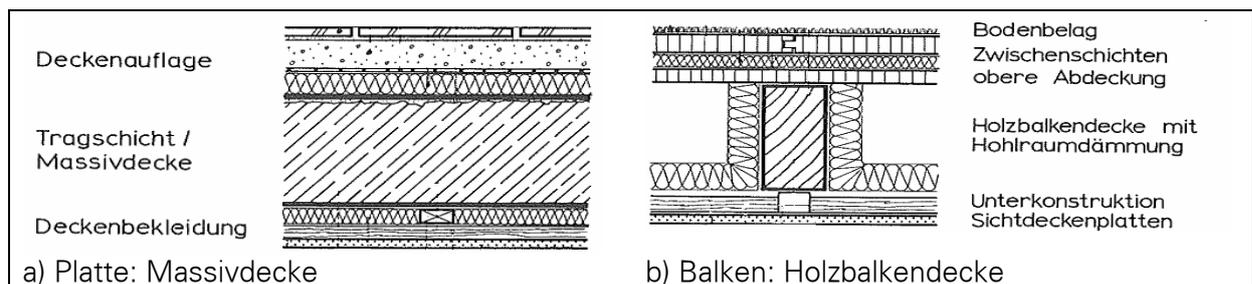


Bild 57 Einteilung von Decken nach Schichtung und Tragwirkung aus [64]

Weiterhin erfolgt eine Einteilung gemäß DIN 4109 nach der sich aus der Nutzung ergebenden Schichtung des Fußboden- und Deckenaufbaus in Deckenauflage, Tragschicht und Deckenbekleidung (siehe DIN 276 Abschnitt 8.2, sowie Bild 57). Ferner ergibt sich eine Einteilung der ebenen Decken nach der räumlichen Anordnung innerhalb der Gebäudestruktur. Es ergibt sich somit folgende Unterscheidung:

- An Erdreich angrenzende Deckenkonstruktionen
- nichttragende Bodenplatten
- tragende Fundamentplatten
- Freitragende (ebene) Deckenkonstruktionen
- Massivdecken
- Holzdecken
- Stahldecken

Da die in Deckenkonstruktionen in Perimeterbereich aufgrund der erforderlichen Abdichtung gesondert untersucht und entwickelt werden muss, wird im Folgenden ausschließlich auf die freitragenden ebenen Deckenkonstruktionen eingegangen. Freitragende ebene Decken

werden gemäß Frick, Knöll, Neumann, Weinbrenner [64] nach ihrer Tragwirkung in Platten, Balken und Plattenbalken unterschieden. Diese werden wie folgt definiert:

Tabelle 4 Einteilung von freitragenden ebenen Deckenkonstruktionen

Decke	Definition
Plattendecken	Platten sind ebene Flächentragwerke, die quer zu ihrer Ebene belastet sind. Sie können linienförmig oder auch punktförmig gelagert sein. Platten können je nach Grundrissanlage ein- oder zweiachsig gelagert sein.
Balkendecken	Balken sind überwiegend auf Biegung beanspruchte stabförmige Träger. Balkendecken sind Decken, die entweder aus unmittelbar nebeneinander gelegten Balken oder aus Balken mit Zwischenbauteilen, die in Längsrichtung nicht tragen, hergestellt werden.
Plattenbalkendecken	Plattenbalken sind stabförmige Tragwerke, bei denen Balken und Platten kraftschlüssig mit einander verbunden sind und welche bei der Aufnahme der Schnittgrößen (Querkraft, Biegung, Schub) zusammenwirken. Die Plattenbalkendecke kann aus einzelnen Trägern oder geschlossenen Plattenbalken ausgeführt sein. Sie ist leichter als die herkömmliche Vollplatte und kann daher für größere Spannweiten und höhere Leisten eingesetzt werden

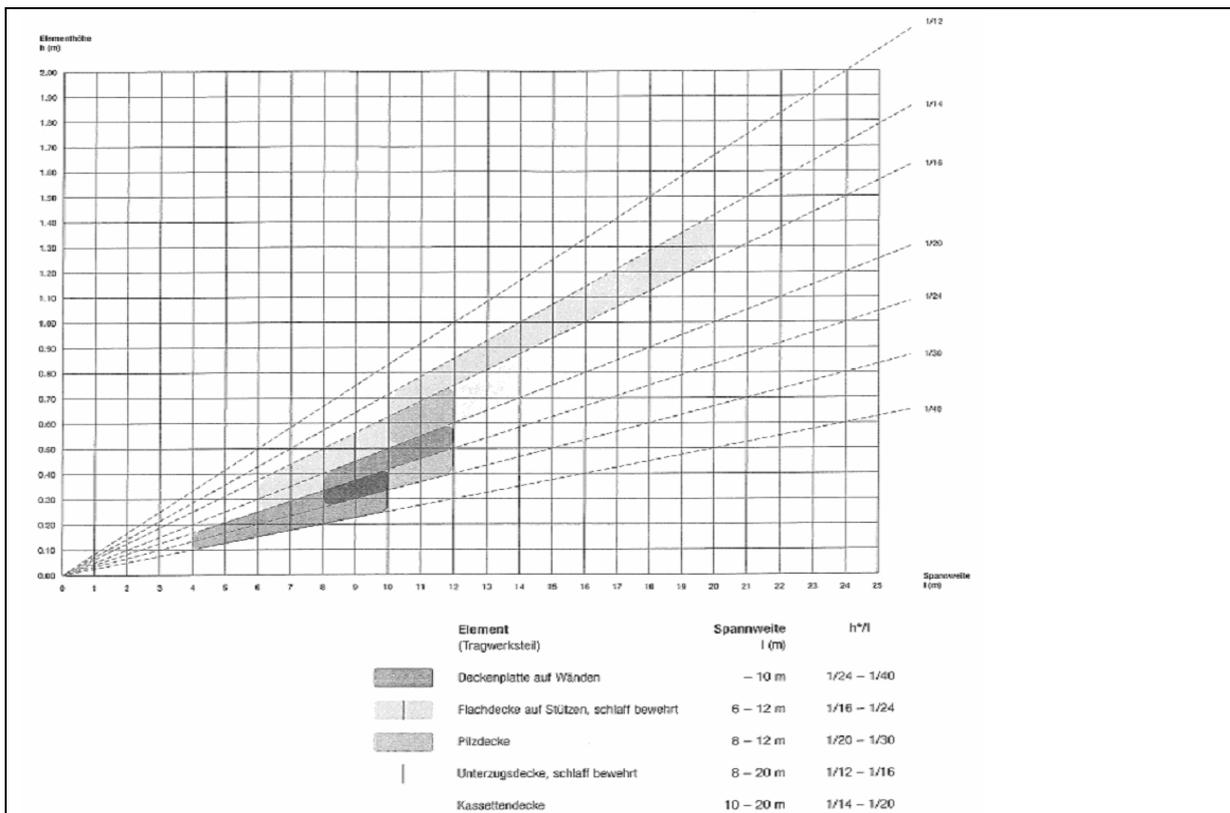


Bild 58 Bezug Element- Spannweite zur Vordimensionierung von Stahlbeton [21]

3.5.2. Massivdecken

Die meisten Geschossdecken werden als ebene Massivdecken hergestellt. Die Baustoffe der Massivdecken (Beton oder Deckenstein) machen sie feuerbeständig, unempfindlich gegen Feuchtigkeit und Schädlinge und daher fast unbegrenzt dauerhaft. Gegenwärtig werden nahezu alle Massivdeckenarten in Verbindung mit Stahlbeton ausgeführt. Nachteile der Massivdecken sind:

- die hohe Last,
- der hohe Feuchtigkeitseintrag und die damit verbundenen langen Stand- und Trocknungszeiten bei der Herstellung,
- die (meist) zur Herstellung benötigte Schalung.

Massivdecken werden nach Frick, Knöll, Neumann, Weinbrenner [64] wie folgt eingeteilt:

Massive Plattendecken

Vollplatten werden in Ortbeton oder mit Deckensystemen in teilweiser oder vollständiger Vorfertigung in einem Verbund aus Beton und Stahl (Armierung) hergestellt. Durch die Vorfertigung werden die oben genannten Nachteile von Massivdecken teilweise kompensiert. Zur massiven Plattendecke zählen:

- Stahlbetonvollplatten diverser Vorfertigungsgrade und Plattendecken aus Porenbeton
- Stahlbeton Hohlplatten
- Stahl – Stein - Decken
- Diverse Pilzdecken
- Glas-Stahlbetondecken

Massivbalkendecken

Die Suche nach Massivdecken, die ohne Schalung hergestellt werden können, hat zu Decken geführt, die von mehr oder weniger dicht nebeneinander liegenden, meist vorgefertigten Massivbalken getragen werden. Die Massivbalken können die Form von Stahlbetonbalken, profilierten Stahlbetonträgern, Stahlbeton-Hohlbalken, Ziegelhohlbalken oder Stahlträgern haben. Vorteile neben der nicht benötigten Schalung sind die hohe Tragfähigkeit der Decke und die geringe Baufeuchte bei der Herstellung.

Werden bei Balkendecken Zwischenbauteile verwendet, so können diese, im Gegensatz zu den bei der Stahlbeton-Rippendecke verwendeten Füllkörpern, statisch mitwirken.

Sollen die Zwischenbauteile statisch nicht mitwirken, oder sind sehr hohe horizontale Lasten, die eine hohe Queraussteifung erfordern, aufzunehmen, so hat eine Ortbetonplatte mit einer Dicke $h < 5$ cm und einer entsprechenden Bewehrungslage die tragende Funktion des Zwischenbauteils zu übernehmen. Der Übergang zwischen der tragenden Funktion und nicht tragenden Funktion der Zwischenbauteile ist „fließend“ und in der Gesamtheit noch nicht vollständig wissenschaftlich untersucht. Folglich ist die Unterscheidung zwischen Balkendecken und Plattenbalkendecken im Besonderen im Stahl-Stahlbetonbau ebenso „fließend“ und unter anderem auch geschichtlich bedingt. (siehe hierzu Abschnitt 3.5.3).

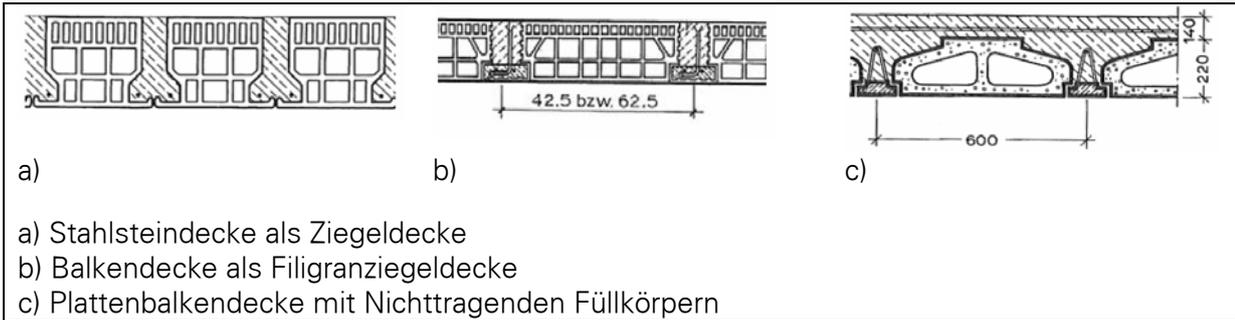


Bild 59 Gegenüberstellung diverser Massivdecken mit Deckensteinen [64]

Massive Plattenbalkendecken

Zur massiven Plattenbalkendecke zählen:

- Stahlbeton Plattenbalken in diversen Vorfertigungsgraden (vorgefertigter Balken, teil vorgefertigte Platte etc.) mit und ohne Voute, mit und ohne diverse Füllkörper etc.
- Stahlbeton Rippendecke in diversen Vorfertigungsgraden
- Trapezstahl- und Stahl-Stahlbetonverbunddecken

3.5.3. Stahl – Stein - Decken

Im Zuge der Recherchen zu Massivdecken mit möglichem Potenzial zur Demontage wurde festgestellt, dass zu Beginn des 20. Jahrhunderts, nahezu zeitgleich mit der Entwicklung des Stahlbetonbaus, eine sehr hohe Varianz an Eisen- bzw. Stahl - Stein -Decken unterschiedlicher Typologien in Gebrauch waren. Diese wurden Ende des 19. Jahrhunderts, im Zuge der durch die Industrialisierung stattfindenden Urbanisierung zunehmend eingesetzt, da sie gegenüber den bis dahin üblichen Holzbalkendecken einen höheren Brand- und Schallschutz sowie eine geringere Gefahr der Schwamm- und Schimmelbildung aufwiesen.

Historische Entwicklung

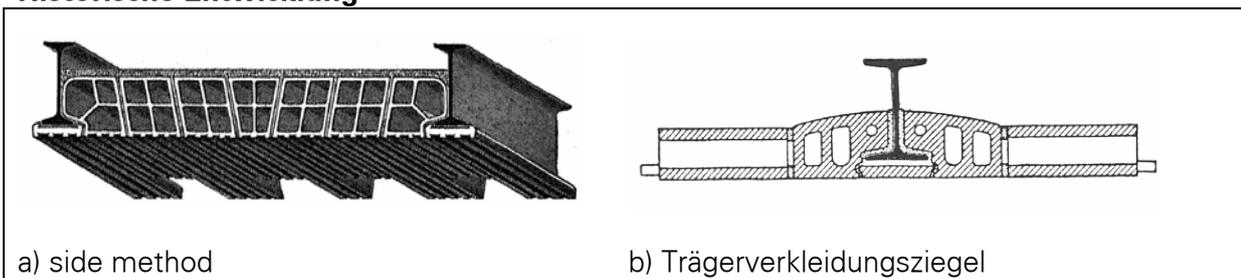


Bild 60 Weiterentwicklung von Ziegeldeckenkonstruktionen [62]

Nach verheerenden Stadtbränden Anfang der siebziger Jahre des 19. Jahrhunderts in Boston und Chicago, bei denen die bis dahin als feuersicher geltenden eisernen Deckenkonstruktionen zerstört wurden, entwickelte man Ziegeldeckenkonstruktionen, bei denen die eisernen Träger mit Ziegelelementen umkleidet und so vor Brand geschützt wurden.

Diese Konstruktionen fanden auch in Europa viel Beachtung und gaben Anlass zu eigenen Entwicklungen auf diesem Gebiet. Nach Fischer [62] lassen sich die zwischen 1892 und 1925 entwickelten Konstruktionen wie folgt kategorisieren:

- Bauform der Decke,
- Art und Form des verwendeten Materials,
- Art und Weise der Herstellung,
- Konstruktion,
- Tragverhalten.

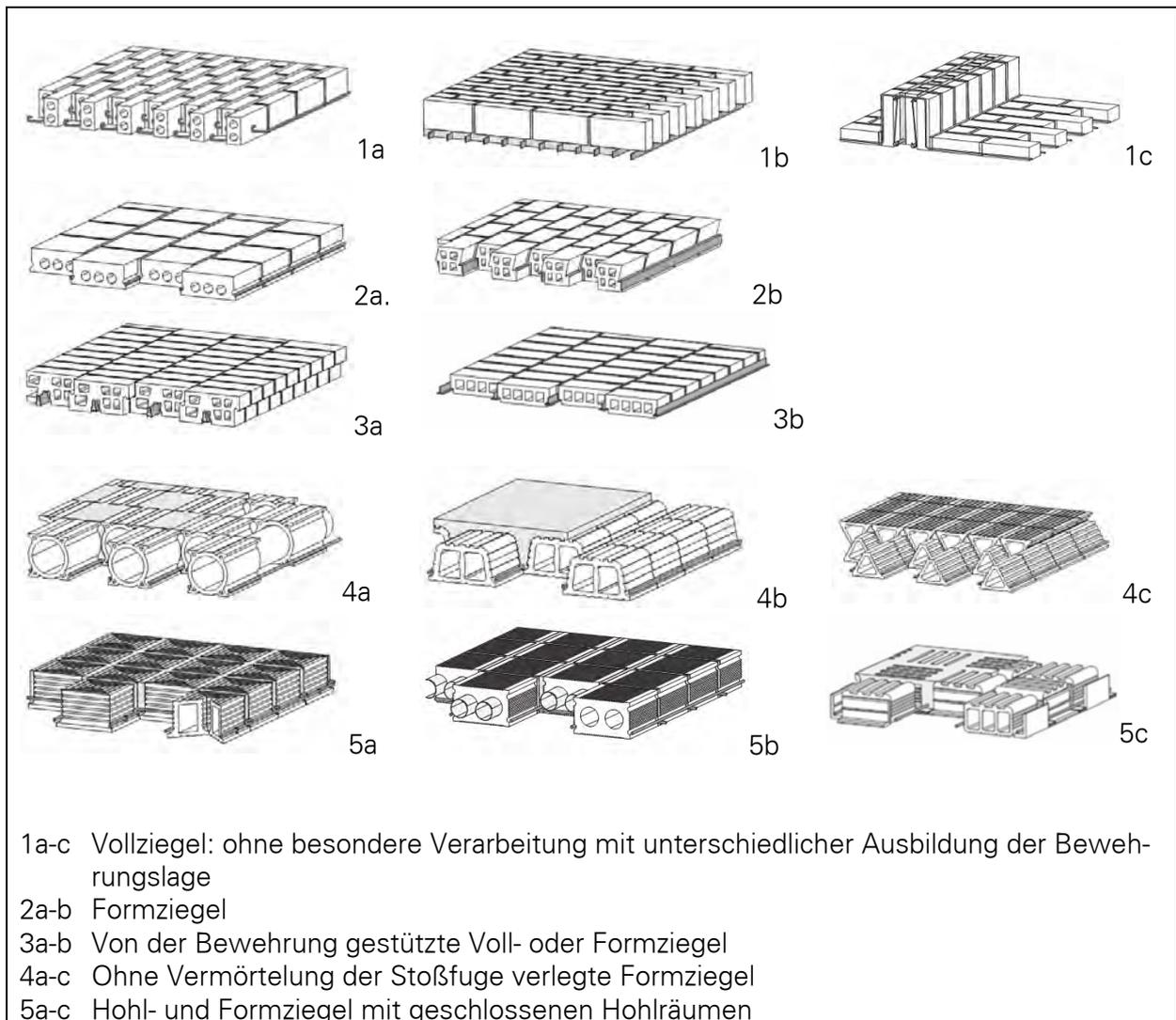


Bild 61 Typische Eisen – Stein - Decken in der Kategorisierung nach Fischer [62]

Bereits gegen Ende des 19. Jahrhunderts konnte man auf erste Eisen –Stein - Deckensysteme zurückgreifen, die allen Bauaufgaben hinlänglich genügten. Dennoch waren diese Systeme im Detail verbesserungswürdig. Im Mittelpunkt der Bestrebungen der Konstrukteure stand neben der Verbesserung der Tragfähigkeit sowie der architektonischen Qualität auch die Verringerung der Herstellungskosten.

Darüber hinaus kam es neben der Weiterentwicklung bereits vorhandener Systeme zur Herausbildung von Decken, die sich in ihrem Tragverhalten von den beschriebenen Systemen

gänzlich unterschieden. Teilweise kam es zur Entwicklung ganz neuer Deckenarten wie bspw. kreuzweise bewehrte Steineisendecken und Füllkörperrippendecken (siehe Bild 62).

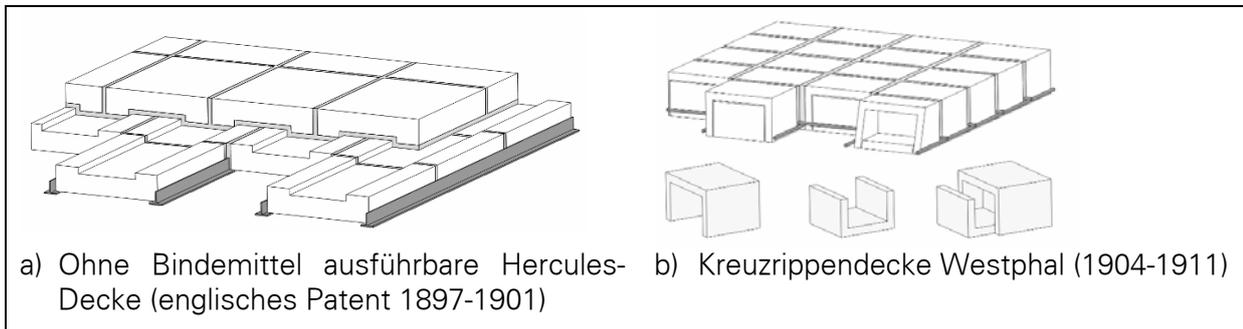


Bild 62 Deckenarten aus [62]

Nach 1910 ist eine Stagnation in der Anwendung und Entwicklung der Steineisendecken zu verzeichnen. Diese Phänomene sind unter anderem darauf zurückzuführen, dass zunehmend zusätzliche Druckschichten auf die Ziegellage betoniert wurden (vergleiche Abschnitt 3.5.2.) Damit ging aber ein konstituierendes Merkmal der Steineisendecken, deren Hauptmerkmal die alleinige Aufnahme der Druckspannungen durch die leichten Ziegel war, allmählich verloren [62].

3.5.4. Potenzial und notwendige Modifikationen von Stahl – Stein - Decken

Im Zuge der Entwicklung rezyklierbarer Deckenkonstruktionen bietet es sich an, geeignete Systeme dieser Zeit aufzugreifen und vor dem Hintergrund sortenreiner Trennbarkeit hinsichtlich Ihrer Trennbarkeit weiterzuentwickeln.

Unter Bezug auf die in Abschnitt 2.3.2 definierten Bauteilverbindungen kann bei den Massivdecken die Stahl – Stein - Decke als eine Massivkonstruktion mit einer guten Lösbarkeit der Einzelkomponenten eingestuft werden. Ebenso wie beim Trockenmauerwerk ist die Verbindung vorwiegend durch Kraftschluss infolge loser Auflage gekennzeichnet.

Ferner stellt der Einsatz von Steinmaterial in der Decke, welches auch in der Wand verwendet wird, eine Reduktion der am Bau verwendeten Materialien dar. Dies erhöht die Effizienz hinsichtlich einer sortenreinen Trennbarkeit des gesamten Gebäudes.

3.6. Der Wand – Decken – Knoten

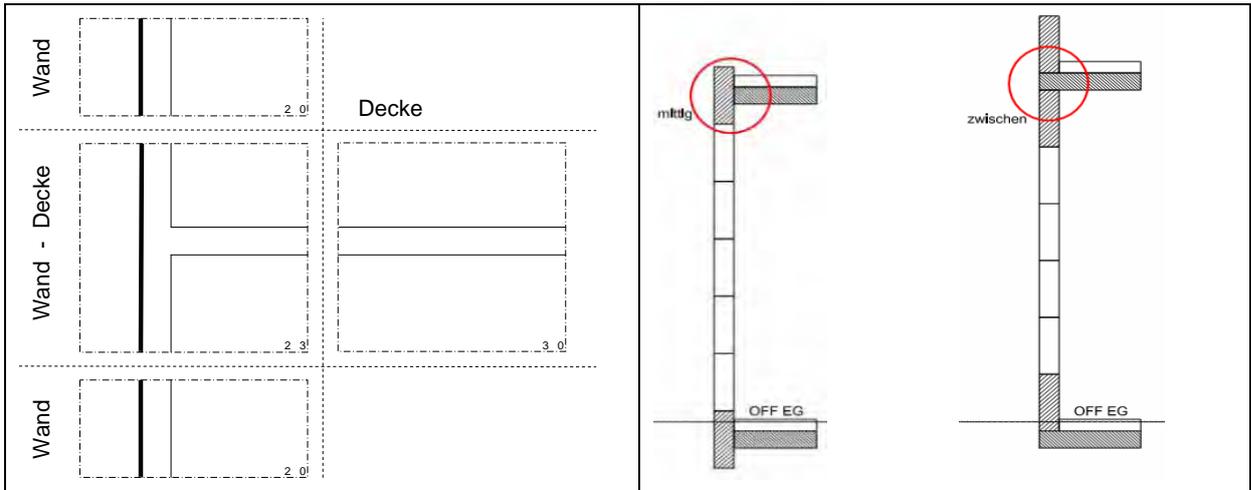


Bild 63 Wand-Decken-Knoten

Bild 64 Spannungsabhängige Fügung

Der sogenannte Wand-Decken-Knoten ergibt sich aus der räumlichen Fügung der ebenen Decke im Bereich der lotrecht aufgehenden Wand (siehe Bild 63). In Abhängigkeit der Deckenspannrichtung, Belastung, Wand- und Deckenkonstruktion und dem jeweiligen Aufbau sowie dem Dämmkonzept, ergibt sich die mögliche Fügung als Folge des seitlichen Raumabschlusses, bspw. der Decke vor einer durchlaufenden Wand (Bild 64a), oder aber aus der tragwerksplanerischen Notwendigkeit zur Lagerung der Decke auf der Wand. Die Wand wird durch die Decke „unterbrochen“. Es ergibt sich für die Wand die Notwendigkeit zur Ausbildung eines Deckenaufagers (Bild 64b). Die Auflagersituation kann im Deckenfeld oder aber am Deckenrand entstehen. In beiden Auflagersituationen ergeben sich sowohl für die Decke, als auch für die Wand sehr unterschiedliche Anforderungen.

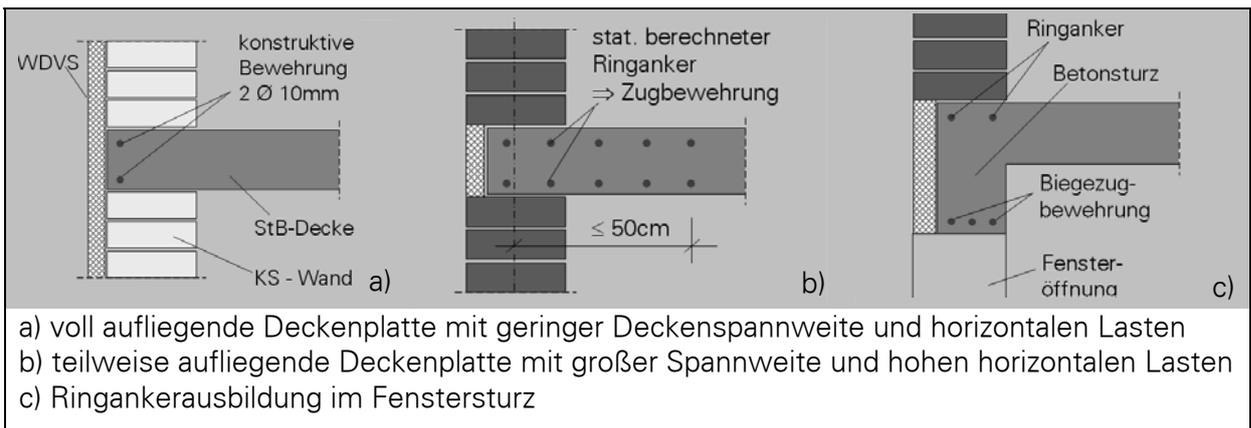


Bild 65 Statische Gesichtspunkte der Deckenausbildung im Deckenauflager [106]

Für die Decke am Deckenrand, die hier aufgrund der erhöhten bauphysikalischen Anforderungen genauer beschrieben werden soll, ergibt sich ferner die Möglichkeit, voll (Bild 65a) oder aber nur teilweise (Bild 65b) auf der Wand zum aufliegen zu kommen. Vorschläge zur Ausformung des Wand-Decken-Knoten werden unter anderem im Beiblatt 2 zur DIN 4108

gegeben. Das sowohl in bauphysikalischer, wie tragwerksplanerischer Hinsicht anspruchsvolle Detail besitzt Potenzial zur Forschung und Entwicklung (siehe Bild 66).

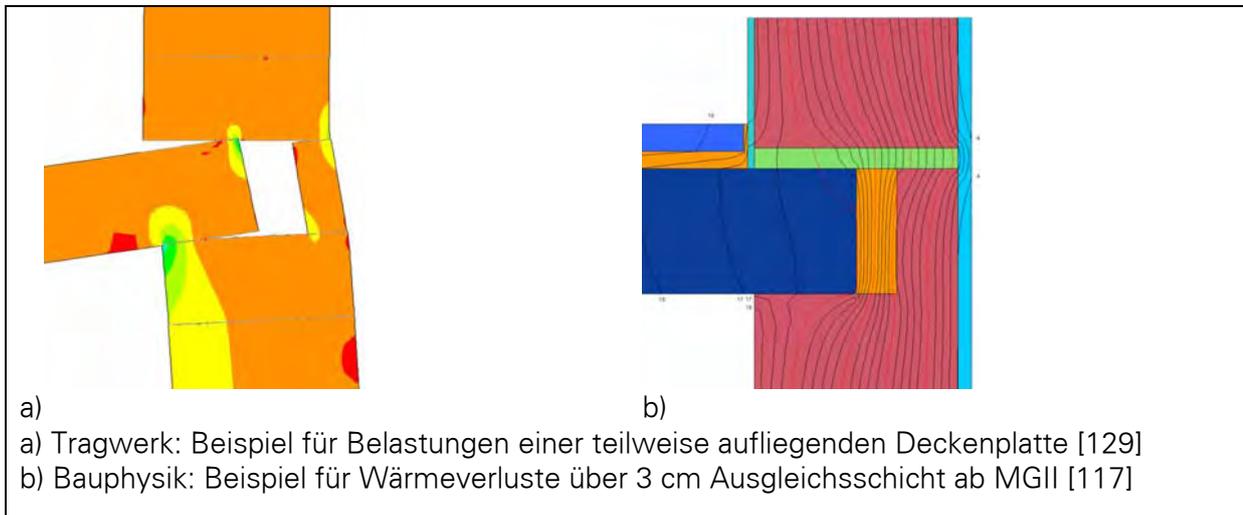


Bild 66 Anforderung im Wand – Decken – Knoten

Zu beachten gilt dass im Bereich des Wand-Decken-Knotens zur Sicherung der Plattenwirkung der Decke ein Ringbalken oder ein Zuganker erforderlich ist (siehe Abschnitt 3.1.4). In der Regel werden Ringbalken aus Stahlbeton ausgeführt, da man über Verguss relativ einfach Decken mit Plattenwirkung herstellen kann und sämtlichen geometrischen wie statischen Anforderungen im Knoten gerecht wird (siehe Bild 65).

Im Zuge der Entwicklung von demontablen Konstruktionen sind unvergossene Ringanker notwendig. Ausführungen in Holz, Stahl oder bewehrtem Mauerwerk bekommen daher einen gehobenen Stellenwert und kommen als Alternative zur Stahlbetondeckenplatte in Frage, sofern sie die im Knoten wirkende Biegung berücksichtigen.

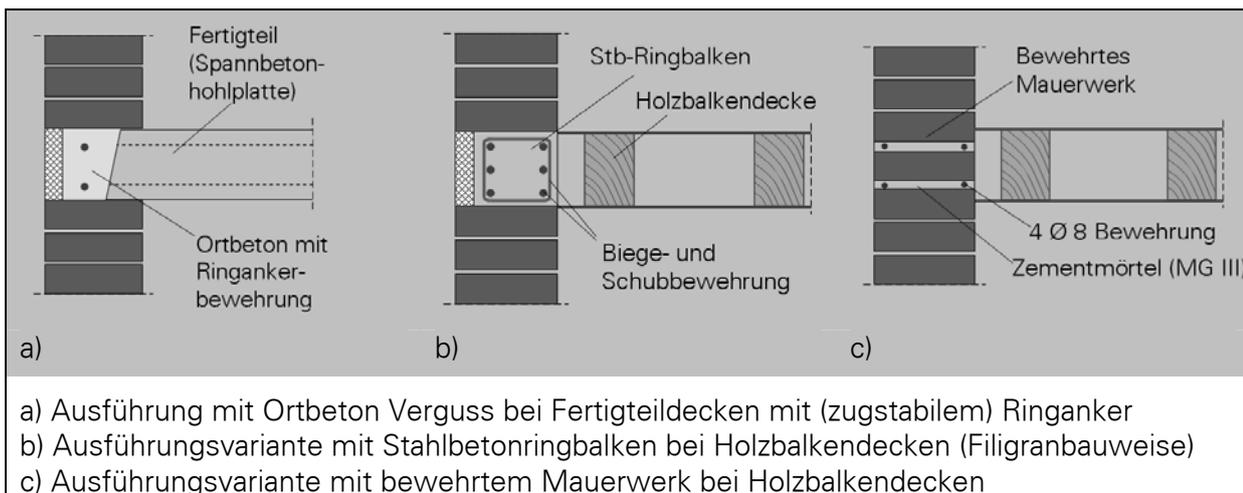


Bild 67 Ausführungsvarianten im Deckenaufleger [106]

Weiterhin werden Ringbalken unter Decken ohne Scheibenwirkung angeordnet um die obere Wandhalterung des Mauerwerks sicher zustellen.



Bild 68 Ringankerausbildung bei Porenbeton-Deckenplatten [204]

Wesentliche Einflussfaktoren sind:

- Lastgröße und Lastverhältnis von Horizontal- und Vertikallasten
- Auflagerart und Auflagerbreite
- Steifigkeit der Wand und die Anordnung von Öffnungen.

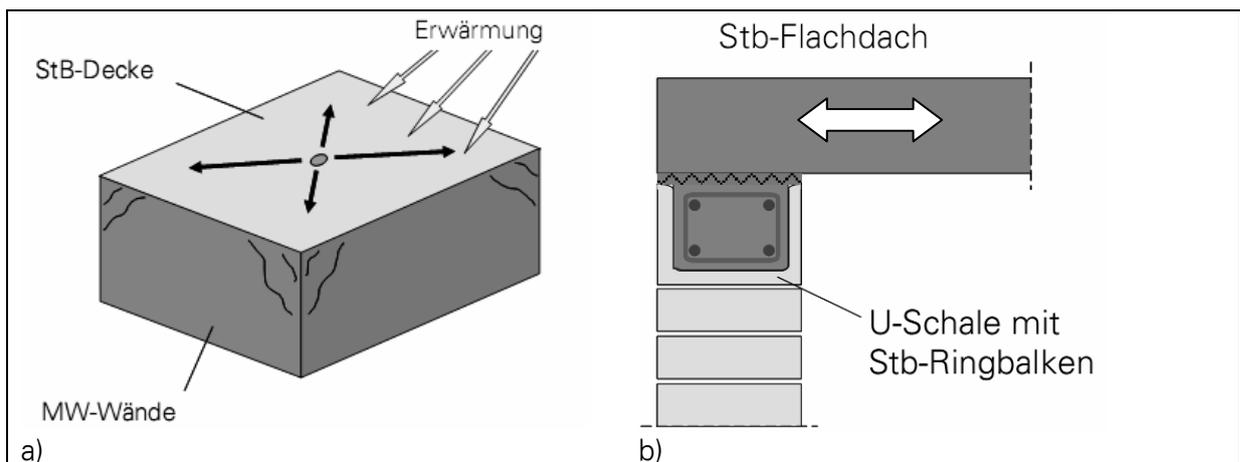


Bild 69 gleitende Schicht zwischen Ringbalken und Stahlbetondecke [204]

Ferner werden Ringbalken für Mauerwerkswände unter Flachdächern aus Stahlbeton angeordnet, um eine gleitende Schicht zwischen Ringbalken und Stahlbetondecke ausbilden zu können. Diese ist notwendig, um Schäden infolge Spannungen aufgrund unterschiedlicher Dehnung von Mauerwerk und Stahlbeton zu vermeiden. Somit lässt sich die Wirkweise des Ringbalkens wie folgt zusammenfassen:

- Entkoppelung gegenüber der Decke
- Verstärkung des oberen Abschlusses der Wand

3.7. Vorspannung

Nach Schlaich [141] ist „das Vorspannen einer der geistreichsten und wirkungsvollsten Tricks des Ingenieurs, um das Tragverhalten von Konstruktionen in gewünschter Weise zu beeinflussen.“

Obwohl „der Gedanke der Vorspannung ura² ist“ (Leonhardt 1973 in Ploch [96]), finden sich heute noch in der Fachliteratur sehr uneinheitliche und auch widersprüchliche Darstellungen und Erklärungen für die Vorspannung. Je nach Anwendung sind manche der Definitionen nur in einem begrenzten Bereich oder nur unter bestimmten Annahmen gültig. Gängige Sichtweisen sind:

- Vorspannung als Folge einer äußeren Last - obwohl sie durch eingeprägte Verformungen hervorgerufen wird.
- Vorspannung als das, was übrig bleibt, wenn alle äußeren Lasten entfernt werden.
- Vorspannung als einen Lastfall „ständiger Einwirkungen“

Ploch [123] schlägt folgende Definition für alle mechanisch vorgespannten Tragwerke vor: „Vorspannen ist das kontrollierte Einprägen von Verformungen mit dem Ziel, das Verhalten des Tragwerks günstig zu beeinflussen.“ Im Massivbau werden vorgespannte Konstruktionen nach dem zum Einsatz kommenden Material, nach ihren Einzelelementen und nach dem angewendeten Spannvorgang unterschieden.

Einzelelemente der Vorspannung

Einzelelemente, die zur Erzeugung von vorgespannten Massivbauteilen notwendig sind:

- (Zug) Stäbe
- Gewindestäbe
- Glatte Stäbe
- Verankerung
- Ankerplatten
- Kugelbundmuttern oder auch Konusmutter
- Muffen
- Hüllrohre und Korrosionsschutz

Bild 70 gibt einen Überblick über die Einzelelemente eines im Mauerwerk gängigen Vorspannsystems [206] [207]. Maßgebliche Größen zur Auswahl und Bemessung des Systems sind:

- Geometrie der Ankerplatte
- Dicke des Bauteils
- sowie die berechnete Vorspannkraft

² z.B. Vorspannung zur Abdichtung von Fässern etc.

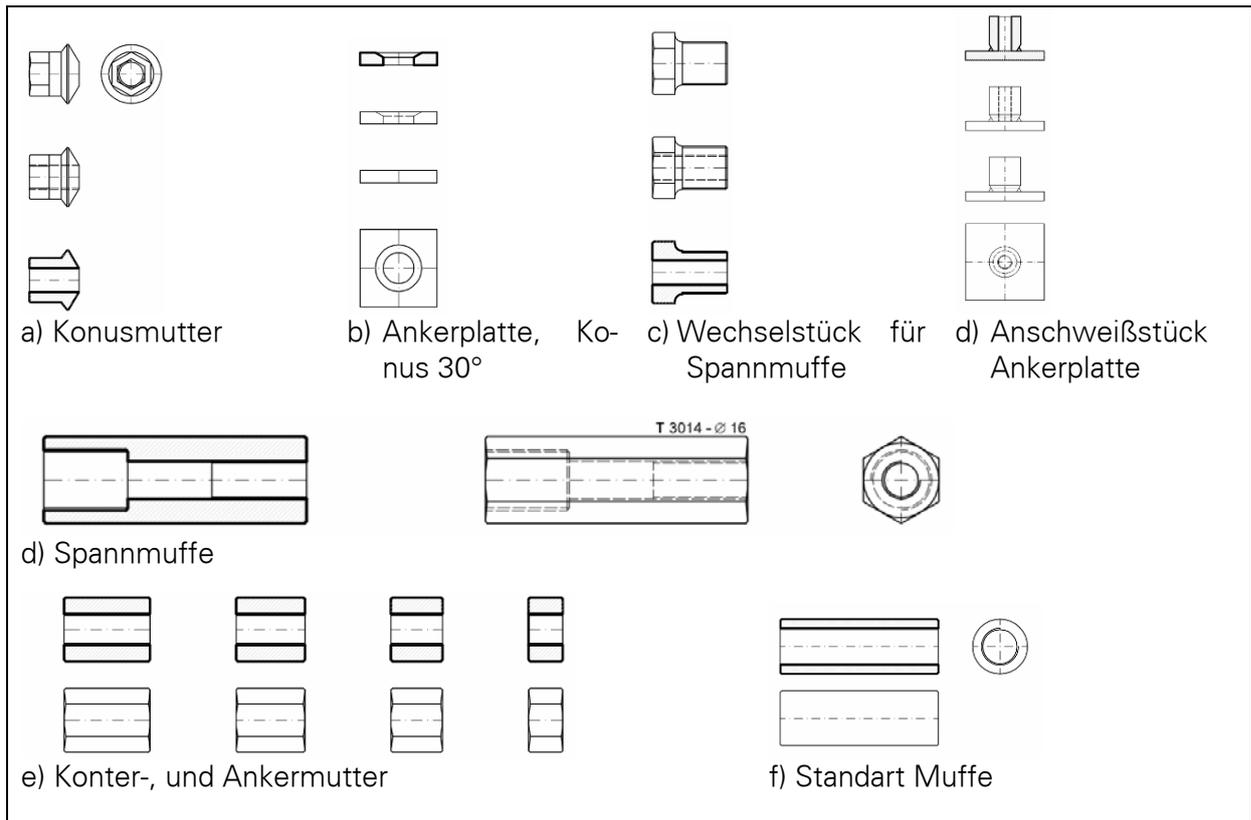


Bild 70 Einzelemente zur Vorspannung von Mauerwerk [206] [207]

Methoden – Spannvorgang

Wesentliche Leitlinie für die technischen Zulassungen zur Anwendung von Spannverfahren in Deutschland und Europa ist die ETAG 013 [58]. Die Zulassungen des jeweiligen Systems legen die zulässigen Spannkräfte fest und regeln insbesondere auch konstruktive Details für die Ausbildung der Verankerungsbereiche. Neben Angaben zu Zusatz- und Wendelbewehrung werden darin auch die minimalen Achsabstände benachbarter Spanngliedverankerungen bzw. die minimalen Randabstände angegeben [65]. Darüber hinaus werden Vorgaben für die Bemessung, den Auf- und Einbau, den Spannvorgang und die Kontrolle des gesamten Verfahrens gegeben. Grundsätzlich dürfen Zusammenbau und Einbau nur von dafür qualifizierten Spezialunternehmen durchgeführt werden. Der Zusammenbau und Spannvorgang umfasst folgende Arbeitsschritte:

- Zusammenbau Spannanker
- Zusammenbau Festanker
- Spannvorgang
- Die Spannspindelmuffe wird zur Hälfte auf das Stabende aufgeschraubt.
- Eine Presse, die sich auf die Ankerplatte abstützt, wird abgesetzt und die Zubehörteile für die Presse werden auf den Stab geschraubt
- Der Stab wird gespannt
- Während des Spannvorgangs wird die Kugelbindemutter laufend nachgedreht. Die aufgebrachte Kraft wird durch Nanometer - Ablesung überwacht und in das Spannprotokoll eingetragen.

Lage der Spannstelle und Arten der Spannungserzeugung

Die gegenwärtig am meisten angewendete Methode zur Erzeugung von Vorspannung ist jene des kontrollierten Ziehens am (im vorzuspannenden Bauteil) arretierten Zug- bzw. Ankerstab (siehe Bild 71a). Dazu wird mittels einer an der Bauteilaußenkante angesetzten Spannpresse am Ankerstab gezogen. Der Ankerstab wird dabei im Bereich des Spannankers über die Kugelmundmutter (Konusmutter) verlängert und in die Spannpresse gelegt. Vorteile bei dieser Methode sind einerseits die gute Zugänglichkeit und andererseits die einfache Überwachung. Die Prüfung erfolgt i.d.R. durch Messung des Spannwegs.

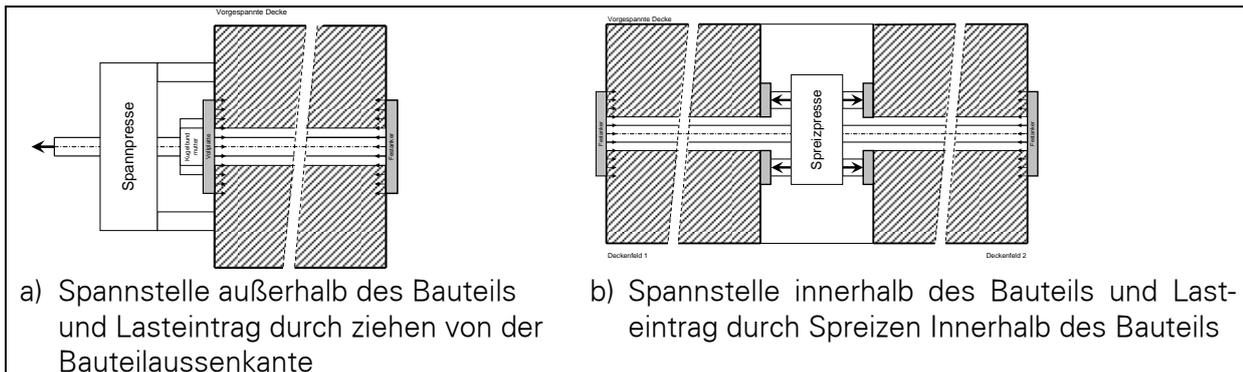


Bild 71 Prinzipskizzen zur Lage der Spannstelle und Art des Lasteintrags der Vorspannung

Eine Alternative hierzu bildet das Einprägen der Vorspannung durch ansetzen einer Spreize innerhalb des Bauteils. Dabei wird das Bauteil an einer definierten Stelle geteilt und durch eine Spreize gegen die, durch den Zugstab verbundenen Festpunkte gedrückt. Die Vorspannung wird quasi „indirekt“ auf den Zugstab aufgebracht. Diese Methode ist aufgrund der mit der notwendigen Bauteilteilung verbundenen eingeschränkten Zugänglichkeit aufwendiger. Sie wird nur dort angewendet, wo ein Ansetzen der Pressen von außen nicht möglich ist. Diese Art der Einprägung kann als ein spannen „von innen“ bezeichnet werden, wie sie unter Anderem aufgrund des kreisförmigen Grundrisses bei Kuppeln der Fall ist.

3.7.1. Vorspannung im Mauerwerksbau

Im Mauerwerksbau kommt Vorspannung sowohl bei der Sanierung von Bestandsgebäuden, als auch beim Neubau zum Einsatz. In Deutschland hat sich der Einsatz von vorgespanntem Mauerwerk bei Neubauten aufgrund der restriktiven Gesetzgebung bisher nicht durchgesetzt, weswegen bei der Übersicht der am Markt existierenden Systeme, sowie den ausgesuchten Beispielen vorwiegend auf europäische und internationale Beispiele zurückgegriffen wird.

Einsatzbereiche bei historischen Gebäuden

Vorspannung von Mauerwerk wird bei der Sicherung historischer Gebäude zur Behebung rissbedingter Schäden angewendet. Sie kommt zum Einsatz, wenn Injektion und Vernadelung alleine nicht im gewünschten Umfang zur Konsolidierung des Mauerwerks führt [75]. Wie auch im Stahlbetonbau, kann die Vorspannung von Mauerwerk mit und ohne Verbund ausgeführt werden. Als Spannanker können alle Spannstähe, die eine bauaufsichtliche Zulassung besitzen und in der DIN 4227 aufgeführt sind, eingebaut werden. Faltenhauser [59] führt aus: „Bei der Instandsetzung alter Mauerwerkskonstruktionen verwendet man Spannanker die i.d.R. einen Durchmesser von 15 bis 36 mm bei einer Festigkeitsklasse von

885/1080 und 835/1030 haben. Die aufgebrachte Vorspannkraft liegt im Bereich von 150-250kN. Die Verankerung des Spanngliedes erfolgt durch Ankerkörper aus Stahlbeton oder Stahl oder durch Verbundwirkung. Durch die punktuelle Einleitung der Kräfte aus dem Ankerkörper wird das Mauerwerk senkrecht oder parallel durch eine Teilflächenpressung beansprucht. Diese Teilflächenpressung hinter dem Ankerkörper ist nach DIN 1053 Teil 1 [...] nachzuweisen.

Einsatzbereiche im Neubau: vorgefertigte Mauertafeln im Industrie- und Gewerbebau

Neben dem Einsatz von Vorspannung bei der Sanierung historischer Gebäude kommt vorgespanntes Mauerwerk bei vorgefertigten Mauertafeln im Bereich des Industrie- und Gewerbebaus zum Einsatz. Beim Vorspannen von Kalksandstein kann somit auf die Forschungen von González, Gunkler, Budelmann und Husemann [67] zurückgegriffen werden. Dort sind neben den technischen Parametern auch Vor- und Nachteile, Methoden und Vorgehensweisen bis hin zur Anwendung im Systembau anschaulich dargelegt.

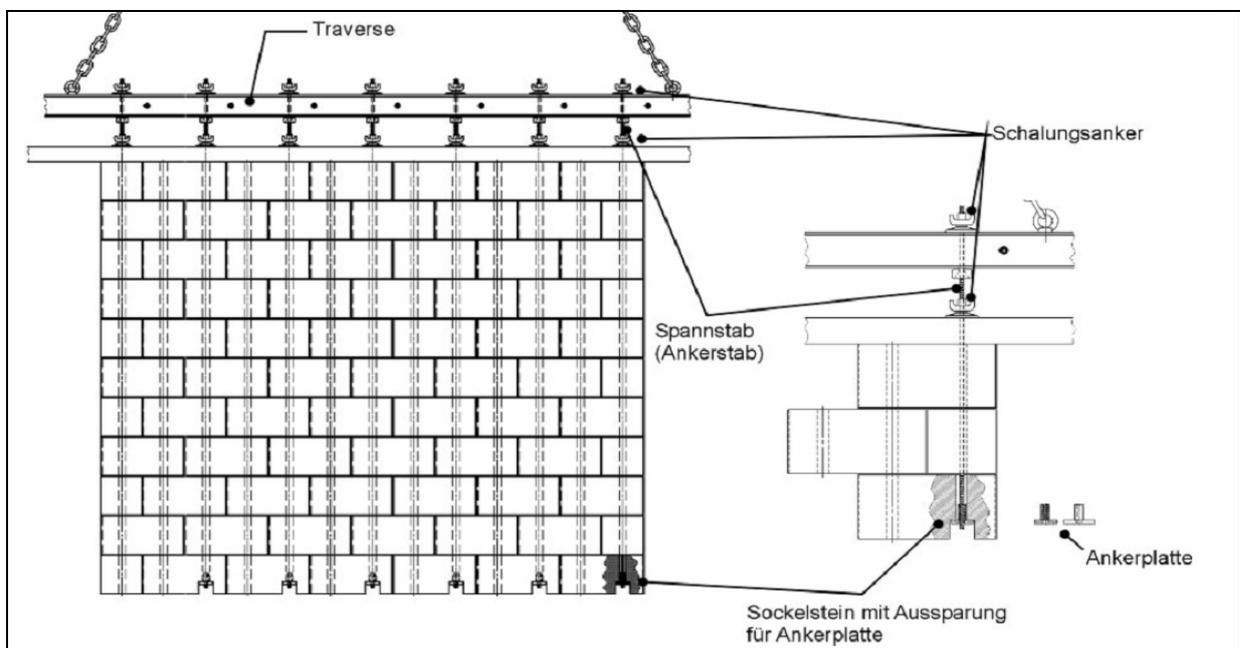


Bild 72 Beispielhafte Anwendung von vorgespanntem Mauerwerk im Industrie- und Gewerbeneubau [67]

Themenschwerpunkte, die mit der Entwicklung von vorgespannten Mauerwerkskonstruktionen im Zusammenhang stehen, können u.A. nach [67] wie folgt zusammengefasst werden:

- Transport, Lagerung Montage
Auf praxisrelevante Aspekte wie Transport, Lagerung und Montage der „empfindlichen“ Spannstähle wird detailliert eingegangen.
- Material
Spannglieder aus glasfaserverstärkten Kunststoffen, HLV-Spannglieder etc. Im Zusammenhang mit thermischen Anforderungen werden Ansätze zur Vorspannung u.A. mit monolithischem Mauerwerk gegeben
- Knicken
Die Beziehung Formstabilität vs. Knicken wird dargestellt und so die Grenzen der Materialertüchtigung erläutert.

- Mehrkosten
Eine grundsätzliche Aussage zu entstehenden Mehrkosten für Material- und Personalkosten zur Erzeugung der Vorspannung wird gegeben. Demnach gleichen sich Mehrkosten bei Verwendung von nichtrostenden Spannstählen (z.B. St700/850) aus.

Einsatzbereiche im Neubau: Einfamilienwohnhaus

Ein exponiertes Beispiel zur Anwendung von vorgespanntem Mauerwerk im Wohnungsbau kann mit dem Wohnhaus von Wendell Burnette in Phoenix, Arizona von 1995 [168] gegeben werden. Darüber hinaus zeigt die Art des Einsatzes von vorgespanntem Mauerwerk deren besondere Eignung zur Schottenbauweise (siehe Abschnitt 3.1.4). Dach- und Geschossdecken des langgestreckten Baukörpers sind mit zwei parallelen Reihen aus vorgespannten Wänden biegesteif verbunden.

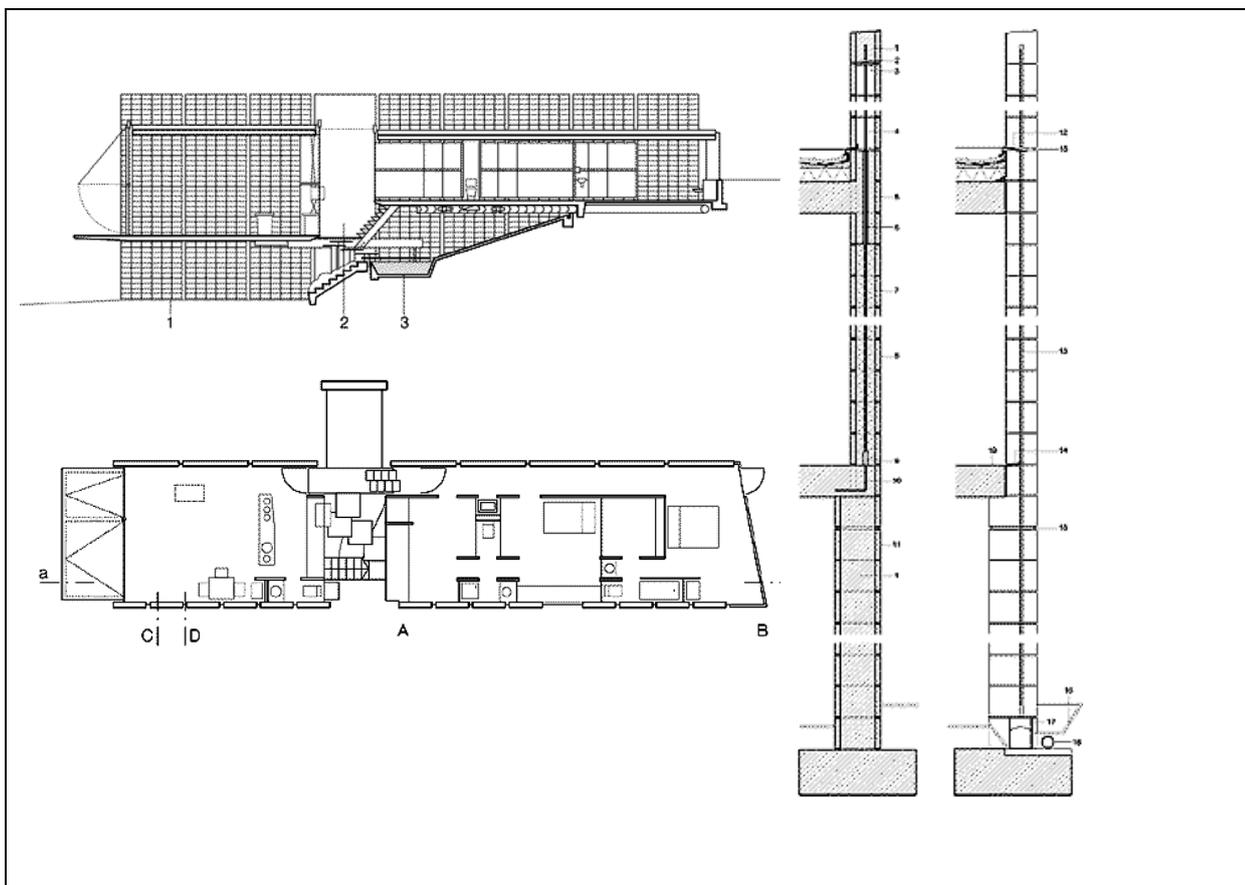


Bild 73 Wohnhaus in Phoenix, Arizona von Wendell Burnette 1995 mit vorgespanntem Mauerwerk in Schottenbauweise [168]

Einige Wände stehen aus der Reihe abgerückt und ragen mehr als 8 m über die Gründung hinaus. Auf die Anordnung von aussteifenden Quer-(Schub-)Wänden konnte aufgrund der Vorspannung verzichtet werden.

3.7.2. Vorspannung ohne Verbund

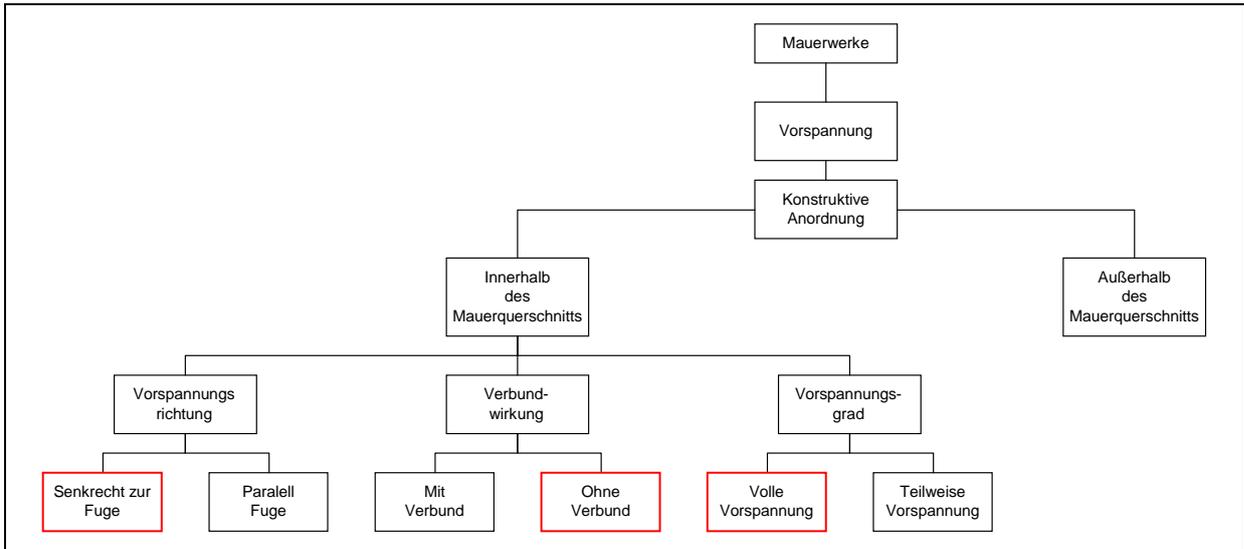


Bild 74 Arten der Vorspannung im Mauerwerksbau

Bild 74 gibt einen Überblick über die im Mauerwerksbau eingesetzten Vorspannungsarten. Beim Projekt ReMoMaB ist ein volles Vorspannen, senkrecht zur Lagerfuge ohne Verbund geeignet und daher prädestiniert weiterentwickelt zu werden. Grundsätzlich wird beim Vorspannen ohne Haftverbund das Spannglied in einem Bohrloch oder in einer dafür vorgesehenen Ebene, mit dem umgebenden Mauerwerk geführt. Die Zugänglichkeit zum Spannglied muss entsprechend der Art der Vorspannung und des Systems für Kontrollzwecke, zum Nachspannen oder Auswechseln der Spannglieder gegeben sein. Der Korrosionsschutz der Spannglieder wird durch Fett in Verbindung mit PE-Ummantelung hergestellt (siehe Bild 75).

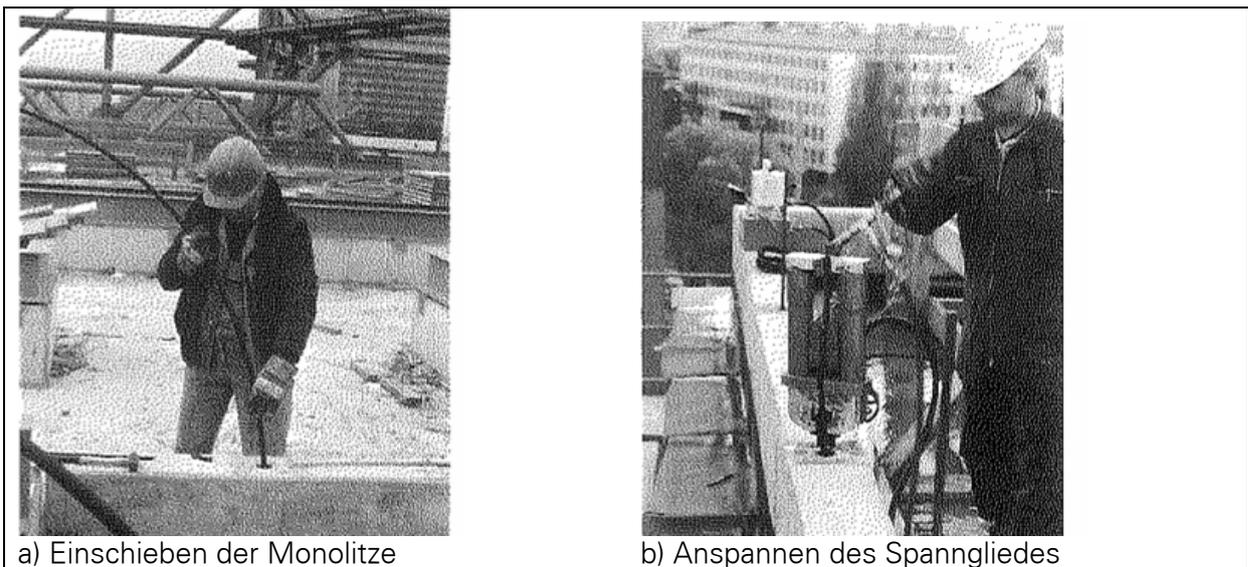


Bild 75 Einsatz von Mauerwerksvorspannung im Neubau [75]

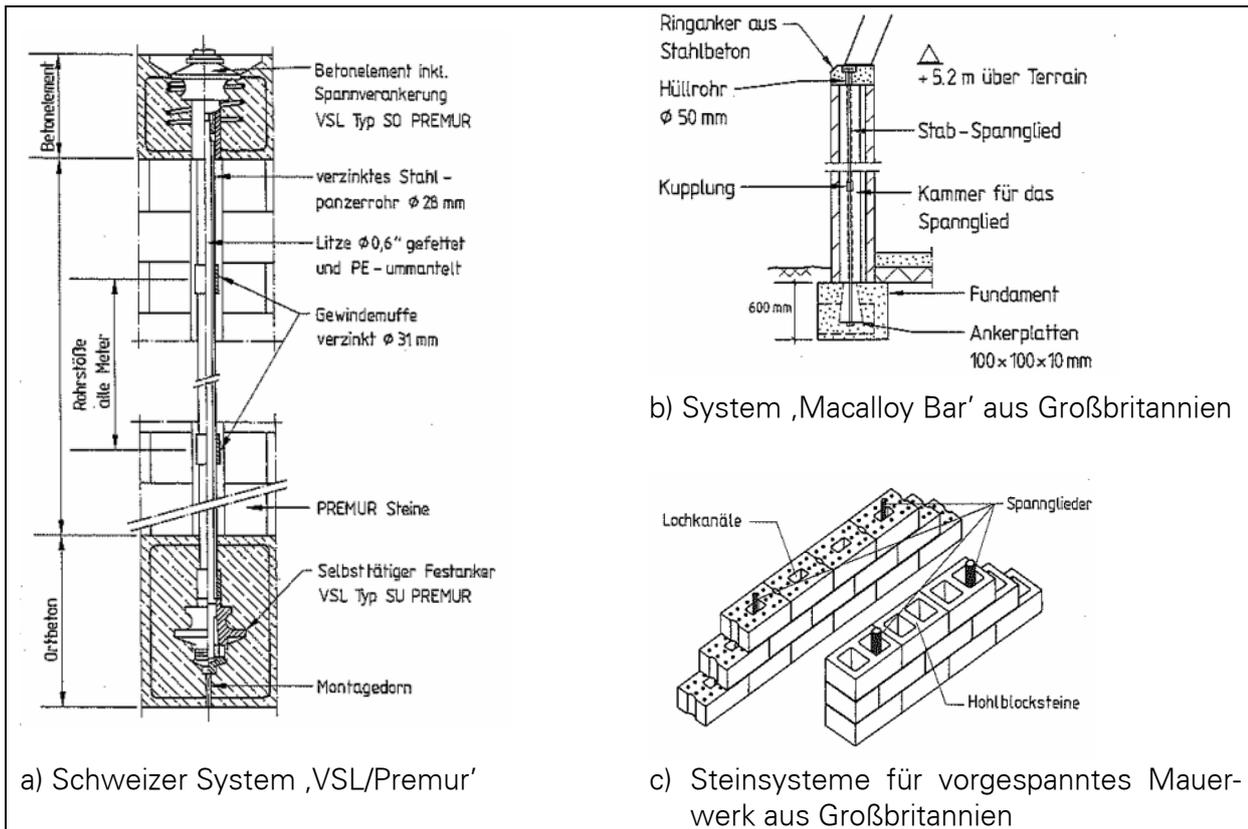


Bild 76 Beispiele europäischer Vorspann-Systeme aus [104]

3.7.3. Notwendige Modifikationen an bestehenden Systemen

Vorgespannte Mauerwerkswände

Die gegenwärtig am Markt existierenden lose vorgespannten Mauerwerkskonstruktionen bedürfen hinsichtlich Ihrer Demontage weiterer Modifikationen. Diese können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei den gegenwärtig am Markt existierenden Spannsystemen wird der Mauerwerksverband mit Mörteln in Normalbettstärke ausgeführt. So wird eine gleichmäßige Lastverteilung in der Lagefuge sichergestellt und punktuelle Spannungsspitzen im Verband vermieden. Hier kann die Funktion des Mörtelbetts unter Hinweis auf die von König, Marzahn, Langer (siehe Abschnitt 3.4) durchgeführten Versuche mit vorgespanntem Trockenmauerwerk aufgrund der erhöhten Ebenheiten des Trockenmauerwerks ersetzt werden.
- Bestehende Systeme verwenden Stahlbetonbalken im Bereich der Spannverankerungen um die Vorspannung effizient zu verteilen. Statt eines Stahlbetonbalkens kann z.B. ein Profilstahl (IPE –Walzprofil etc.) eingesetzt werden.

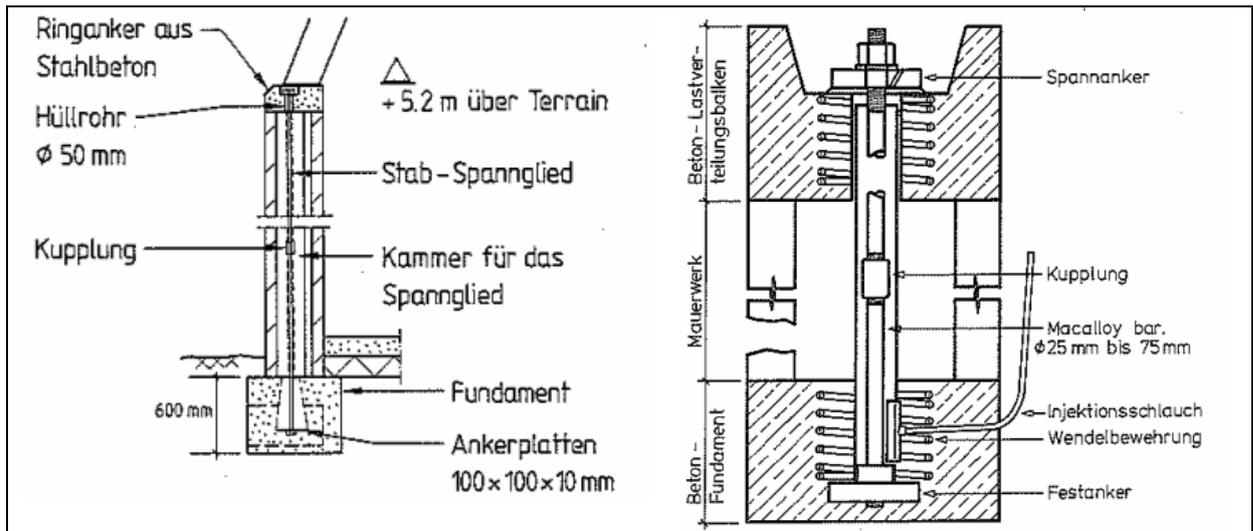


Bild 77 Spannverfahren System ‚Macalloy Bar‘ aus Großbritannien [75]

Weitere Aspekte zur Modifikation ergeben sich aus dem Spannvorgang selbst:

- Während des Spannvorgangs wird das Gewinde der Festhaltemutter verformt. Aus arbeitssicherheitstechnischen Aspekten ist ein lösen der Verschraubung nur unter Vorspannung z.B. durch halten der Auflast möglich.
- Ein Nachspannen der Spannglieder „von Außen“ ist nur bis zum endgültigen Abtrennen der Stabüberstände möglich [137]. Deswegen empfiehlt sich ein Spannen „von Innen“ (siehe System ‚Macalloy Bar‘ Bild 77). Untersuchungen zum Vorgehen bei einer zerstörungsfreien Demontage von vorgespannten Konstruktionen sind bisher noch nicht wissenschaftlich ausgewertet. Die Frage, wie die Vorspannung zerstörungsfrei entspannt werden können, wird daher im Versuch nachgewiesen

Vorspannen von Steindecken

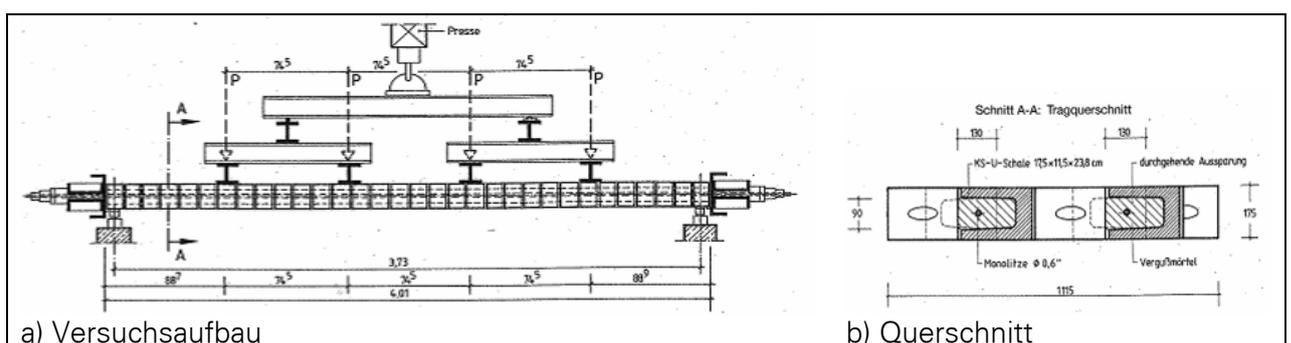


Bild 78 Prüfung vorgespannte Mauerwerkswand aus [75]

Bild 78 legt, ungeachtet der Art des Versuchs, den Schluss nahe, dass das Prinzip der Vorspannung der Wand auch auf die Decke übertragbar ist.

Neben der Tatsache, dass sämtliche Vorspannsysteme für Ankerkörper im Verbund mit Stahl und / oder Stahlbeton zugelassen sind, ist der Einsatz von Vorspannung im Mauerwerk bis-

her nur für Wände vorgesehen und auch nur dafür zugelassen. Im Sinne einer Reduktion der zum Einsatz gebrachten Materialien- und Konstruktionsweisen sollten weitere Untersuchungen eine Erweiterung des Anwendungsbereichs von vorwiegend normalbelasteten Bauteilen wie der Wand auf solche, die vorwiegend auf Biegung belastet werden, wie z.B. die Decke, zum Gegenstand haben.

Erste Überlegungen zur Durchbildung solcher vorgespannter Decken aus Mauersteinen sind aus Schweden bekannt (Bild 79) [8]. Jedoch ist bei diesen Konstruktionen ein Verguss mit Beton vorgesehen, was ihre Eignung hinsichtlich Demontabilität und sortenreiner Trennung einschränkt.

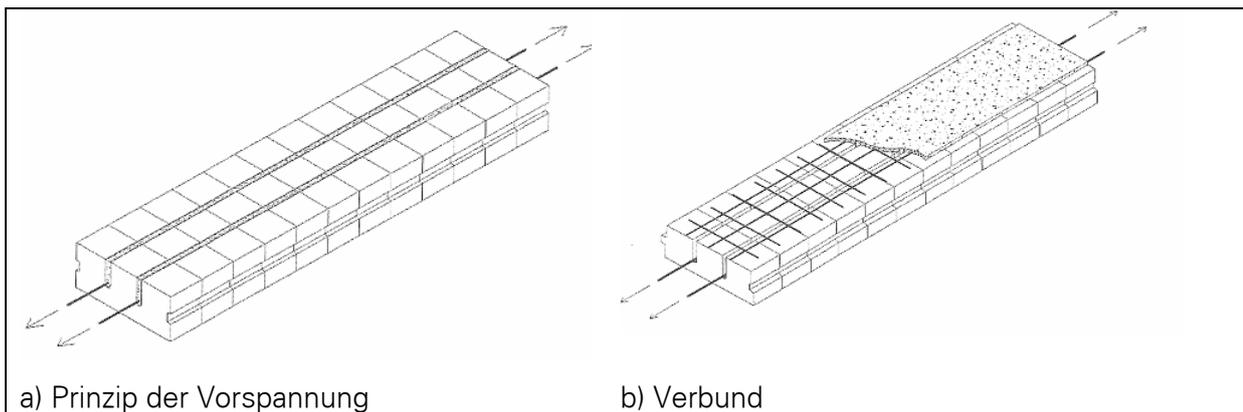


Bild 79 *Vorgespannte Decken aus Mauersteinen [8]*

3.7.4. Rückschlüsse für die zu entwickelnde Konstruktion

Im Ergebnis der untersuchten Vorspannsysteme lassen sich folgende Rückschlüsse für die zu entwickelnde Konstruktion ziehen:

- Die Vorspannung wird ohne Materialverbund, als sogenannte Vorspannung ohne Verbund vorgeschlagen.
- Der komplette Ankerkörper ist als eine Konstruktion in Stahl zu entwickeln; geschweißte Verbindungen sind zu vermeiden.
- Die Führung der Spannglieder erfolgt zentrisch im Stein.
- Das zum Einsatz kommende Spannsystem wird zunächst ohne Maßnahmen zum Korrosionsschutz geplant. Die Spannstähle liegen im wesentlichen im Innenraumklima, das noch durch eine gewisse KS-Überdeckung abgepuffert wird. Bei Feuchträumen und für die Spannstellen sind dazu noch Überlegungen notwendig. Der Korrosionsschutz für die verbundlose Vorspannung wäre im Rahmen einer gesonderten Forschungsvorhabens noch detailliert zu betrachten.
- Aus Kostengründen (Breitenanwendung) wird Baustahl z.B. BSt 500 eingesetzt.

3.8. Energie- und Versorgungskonzept

3.8.1. Zielmarke und Zieldefinition

Ausgangspunkt bei der Konzeption des Energie- und Versorgungskonzeptes ist der Zielwert Nullenergiegebäude sowie die Forderung nach bestmöglicher Rezyklierbarkeit. Nach der Definition von „Nullenergiegebäuden“ des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) [191] heißt dies, dass im Jahresverlauf sowohl der Primärenergiebedarf (Q_p) als auch der Endenergiebedarf (Q_e) vollständig durch die im Gebäude bzw. unmittelbar auf dem Grundstück erzeugte Energie ausgeglichen werden müssen. Dabei sind die End- und Primärenergiebedarfswerte für Wohnungsbeleuchtung, Haushaltsgeräte und -prozesse mit einzubeziehen. Die Primärenergiefaktoren werden gemäß DIN V 18599 angesetzt. Das Nullenergieniveau ist erreicht, wenn gilt: $\sum Q_p = 0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ sowie $\sum Q_e = 0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Wird im Laufe des Jahres mehr Energie erzeugt als verbraucht, ist das Plusenergieniveau erreicht. In diesem Fall gilt: $\sum Q_p < 0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ sowie $\sum Q_e < 0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Für die konstruktive Durchbildung und Entwicklung der Module im Projekt ReMoMaB resultieren aus dieser Zielmarke hohe Ansprüche an das Energiekonzept und die bauphysikalische Umsetzung. Insbesondere für die Gebäudehülle erfordert die gewünschte Kombination aus guter Rezyklierbarkeit und anspruchsvoller energetischer Performance neue Lösungsansätze.

3.8.2. Strategie zur Erreichung des Nullenergiestandards

Um die Zielmarke Nullenergiegebäude zu erreichen, wird in einem vierstufigen Verfahren Schritt für Schritt optimiert.

Die erste Optimierungsebene bezieht sich auf die Gebäudegeometrie, die Ausrichtung sowie die Verteilung der Fensterflächen. Da es im Projekt ReMoMaB zunächst um die Entwicklung von Grundprinzipien eines rezyklierbaren Modulbausystems geht, wird diese Ebene für den aktuellen Bearbeitungsstand ausgeklammert.

Im zweiten Schritt wird durch eine Optimierung der Gebäudehülle eine Reduktion der Transmissionswärmeverluste auf Passivhausniveau angestrebt. Die daraus resultierenden bauphysikalischen Anforderungen werden in Abschnitt 3.8.3 beschrieben.

Durch eine Optimierung der Gebäudetechnik in Schritt drei kann der Energiebedarf weiter reduziert werden.

Hierbei setzt das angesetzte System auf eine hoch effiziente Luft-Wasser-Wärmepumpe. Im letzten Optimierungsschritt wird der verbleibende Energiebedarf durch erneuerbare Energien gedeckt, sodass im Jahresverlauf mindestens eine ausgeglichene Energiebilanz entsteht. Dies soll durch die Integration von einer leistungsstarken Photovoltaik-Anlage auf dem Dach und in der Fassade erfolgen.

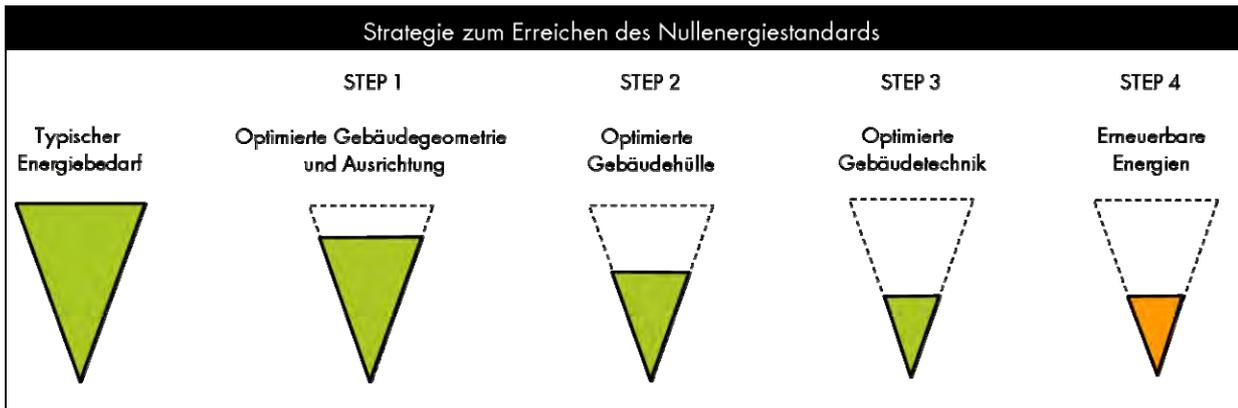


Bild 80 Optimierungsstrategie

3.8.3. Bauphysikalische Anforderungen an die Gebäudehülle

Das vorgestellte Energiekonzept basiert auf einem rein luftgestützten Heizsystem mit dem Ziel, Installationsleitungen zu sparen und dadurch die Rezyklierbarkeit und Modularität zu erhöhen. Allerdings resultieren daraus erhöhte bauphysikalische Anforderungen an die Gebäudehülle, die erfüllt sein müssen. Die Luftheizung ist nur bis zu einer maximalen Heizlast von 10 W/m^2 realisierbar. Daher müssen die Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste auf ein Minimum reduziert werden.

Für die Gebäudehülle werden Wärmedurchgangskoeffizienten auf Passivhausniveau angestrebt mit weitestgehend wärmebrückenfreien Anschlussdetails [193]. Dies gilt in besonderem Maße auch für die Unterkonstruktion der opaken Fassaden, die einen nennenswerten Einfluss auf den gesamten Wärmedurchgangskoeffizienten der Außenwand hat. Durch thermische Entkoppelung, Optimierung der Ankerquerschnitte und Verwendung von Materialien mit thermisch günstigen Eigenschaften kann der Wärmebrückenzuschlag auf ein Minimum reduziert werden.

Die angestrebte Luftdichtheit (n_{50}) der Gebäudehülle soll ca. $0,6 \text{ h}^{-1}$ erreichen. Dies stellt im Zusammenhang mit der gewünschten Modularität und Demontierbarkeit eine besondere Herausforderung dar. Üblicherweise wird die Luftdichtheit durch innen- oder außenliegende Putzschichten, Verklebungen oder andere nasse Fügetechniken hergestellt. Da diese Optionen zugunsten einer sortenreinen Demontierbarkeit entfallen müssen, gilt es, neue Verbindungstechniken zu entwickeln.

Eine vergleichbare Situation besteht bei der Befestigung möglicher Feuchtebarrieren. Auch hier gilt es, typischerweise geklebte Folien durch Klemm-, Press- und Klickverbindungen zu befestigen und dadurch eine sortenreine Trennbarkeit zu erhalten. Die bauphysikalischen Zielwerte für die Gebäudehülle lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Wärmedurchgangskoeffizienten
- opake Bauteile (Wand, Dach): $0,10$ bis $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$
- transparente Bauteile (inkl. Wärmebrücken): $0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$

- Luftdichtheit (n_{50}): $\leq 0,6 \text{ h}^{-1}$
- Jahresheizwärmebedarf: $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$
- maximale Heizlast: 10 W/m^2

3.8.4. Anforderungen an die technische Gebäudeausrüstung

Die Anforderungen an die technische Gebäudeausrüstung (TGA) unterscheiden sich stark von herkömmlichen Wohngebäuden, bei denen die Projektziele Modularität, gute Demontierbarkeit und stoffliche Rezyklierbarkeit keine Rolle spielen. Folgende Anforderungen ergeben sich für die Integration der TGA:

- maximale Flexibilität und Modularität in Bezug auf das Konstruktionsraster sowie auf die Austauschcluster und Funktionsanpassungen,
- gute Demontierbarkeit und Revisionierbarkeit einzelner Komponenten,
- stoffliche Rezyklierbarkeit der verbauten Materialien,
- Reduktion der Materialmasse und der Materialvielfalt,
- Minimierung des Installationsaufwands,
- höchste Anforderungen an die energetische Performance der TGA.

Einen besonderen Stellenwert hat hierbei die Frage der Leitungsführung. Die erforderlichen Durchdringungen zahlreicher Bauteile sowie die gewünschte flächenbündige und unauffällige Integration in bestehende Gebäudeelemente stehen häufig im Widerspruch zu einer einfachen Rückbaubarkeit und sortenreinen Trennbarkeit.

3.8.5. TGA-Konzept

Die Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung werden für die weitere Beschreibung in die Bereiche

- Raumlufttechnik (Luftheizung)
- elektrische Installationen
- wasserführende Systeme gegliedert.

Die Verteilung bzw. Leitungsführung wird in eine vertikale und in eine horizontale (geschossweise) Komponente unterteilt, um dadurch ein maximales Maß an Flexibilität leisten zu können.

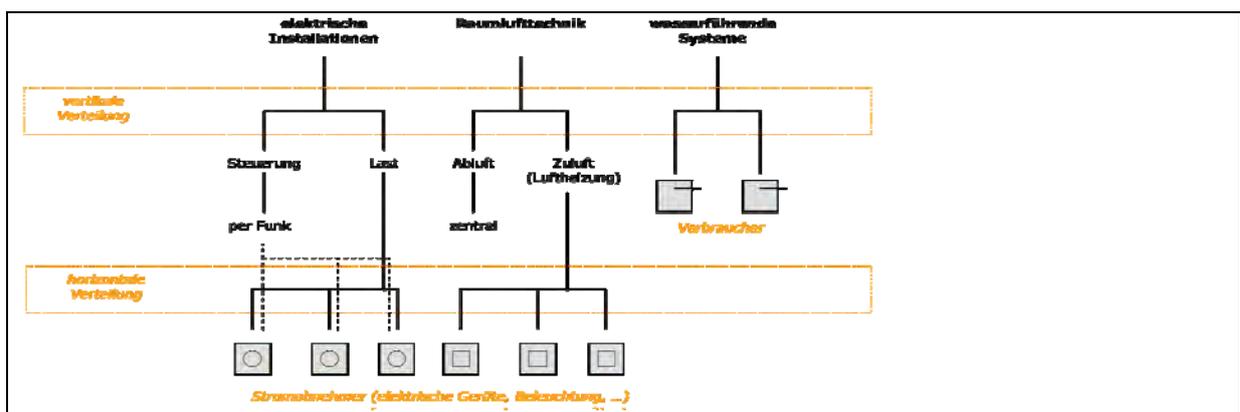


Bild 81 Systematische Darstellung des TGA-Konzepts

3.8.6. Raumlufthechnik und Gebäudekonditionierung

Der Lüftungsanlage bzw. der Raumlufthechnik kommt im angedachten TGA-Konzept eine zentrale Bedeutung zu. Einerseits soll die erforderliche Heizlast vollständig durch eine Luftheizung gedeckt werden. Andererseits hilft die Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung dabei die Lüftungswärmeverluste zu verringern und einen kontrollierten Luftwechsel sicherzustellen und Schimmelbildung im Gebäude zu verhindern.

Durch die Beschränkung auf ein rein luftgestütztes System für die Heizung kann der Installationsaufwand reduziert werden, ein zusätzliches Wärmeverteilsystem wird überflüssig. Wasserführende Systeme können auf den Kernbereich bzw. den zentralen Schacht beschränkt werden (WC, Bad und Küche). Die durch diese Reduktion an Verteilersystemen erzielten Vereinfachungen kommen der Modularität sowie der Recyclingfreundlichkeit sehr entgegen. Allerdings ist eine Luftheizung nur unter eng gesteckten Rahmenbedingungen realisierbar.

Anforderungen für den Betrieb der Luftheizung

Um eine Luftheizung umsetzen zu können müssen einige Grundvoraussetzungen erfüllt sein, ohne die ein wirtschaftlicher und komfortabler Betrieb nicht möglich ist:

- Heizlast maximal 10 W/m^2 Bis zu dieser Grenze macht ein rein luftgestütztes System Sinn. Die kritischen Größen sind dabei die Zuluftmenge und die Temperatur. Die Luftmenge sollte ausschließlich auf Basis des hygienischen Luftwechselbedarfs dimensioniert werden. Ein Erhöhen der Luftmenge ist zu vermeiden, da sonst mehr Energie für die Luftförderung verbraucht wird und ein starkes Austrocknen der Luft stattfindet. Die bestehenden Kenndaten setzen diese Vorgabe um.
- Luftwechselrate auf Basis des hygienischen Luftwechsels $= 0,5 \text{ h}^{-1} = \text{ca. } 25 \text{ m}^2/\text{Pers.}$
- Luftdichtheit $\leq 0,6 \text{ h}^{-1}$ Bei Gebäuden mit geringerer Dichtigkeit geht vermehrt Wärme verloren, was wiederum die Heizlast steigen lässt.

Wärmeerzeugung für die Konditionierung der Zuluft:

Für die Wärmeerzeugung der erforderlichen Heizlast kommen verschiedene Systeme in Frage, die jedoch stark mit dem konkreten Gebäudeentwurf sowie dem Standort in Verbindung stehen. Daher können an dieser Stelle nur grundsätzliche Vorschläge für ein Wärmeerzeugungssystem gegeben werden, welche im Zusammenhang mit einem konkreten Gebäudeentwurf überprüft werden müssen.

Die zu erwartende maximale Heizlast kann wie folgt überschlagen werden:

- bei 140 m^2 (z.B. bei ReMoMaB Musterhaus Abschnitt 7.8.1)
 $140 \text{ m}^2 * 10 \text{ W/m}^2 = 1,4 \text{ kW}$
- bei 50 m^2 Einraumhaus
 $50 \text{ m}^2 * 10 \text{ W/m}^2 = 0,5 \text{ kW}$

Zusätzlicher Wärmebedarf besteht für die Warmwasserbereitung, welche im Jahresmittel ungefähr dieselbe oder sogar eine höhere Energiemenge als die Heizung erfordert. Diese Werte können jedoch im Rahmen des Forschungsprojekts für eine Auslegung der Anlagen nicht herangezogen werden, spielen aber für die konzeptionelle Entwicklung eine untergeordnete Rolle. Im Folgenden wird ein grundlegender Systemvorschlag gegeben.

Vorschlag für das Wärmeerzeugungssystem:

- Kompaktgerät Luft/Wasser Wärmepumpe, Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- z.B. Kompaktgerät aerosmart der Firma Drexler und Weiss Systembeschreibung (siehe auch [177])

Die Abluft, deren Wärme in der Wärmerückgewinnung der Lüftung bereits teilweise auf die Zuluft übertragen wurde, enthält mehr nutzbare Wärme als die Außenluft. Diese vorhandene Energie wird mit Hilfe der Kleinstwärmepumpe nutzbar gemacht und vorrangig dem Warmwasser zugeführt, wofür die Wärmepumpe jedoch nur wenige Stunden täglich benötigt wird. Der große Rest steht für die Raumheizung in Form von erwärmter Zuluft zur Verfügung. Der Inhalt des Warmwasserspeichers wird zur Gänze durch die Wärmepumpe erwärmt. Dabei wird im dualen Betrieb – also Warmwasser und Raumheizung – die so genannte Enthitzungswärme verwendet, quasi ein Abfallprodukt der Wärmepumpe. Dadurch wird eine hohe Effizienz erreicht.

Da aufgrund der Anforderungen an Modularität und Rückbaubarkeit kein Erdkanal gebaut werden soll um die Außenluft vorzutemperieren, muss diese an extrem kalten Wintertagen elektrisch vorgewärmt werden. Die dafür benötigte elektrische Energie kann jedoch mit der PV-Anlage kompensiert werden und gefährdet das Zielniveau „Nullenergiegebäude“ nicht.

Eine Kühlung des Gebäudes ist in diesem System nicht vorgesehen. Bei sorgfältiger Planung kann jedoch durch Maßnahmen wie zum Beispiel einen automatischen, außenliegenden Sonnenschutz, Nachtauskühlung, Phase Change Materials in der Abhangdecke und einem optimierten Fensterflächenanteil auch ohne Kühlung ein ganzjährig angenehmes Raumklima erzeugt werden. Die Kombination des Systems mit einer thermischen Solaranlage wird unter den eng gesteckten Rahmenbedingungen des Projekts nicht angestrebt. Die vorhandene Fläche soll stattdessen vollständig mit PV-Modulen bestückt werden.

Zusammenfassung der wesentlichen Systemkomponenten der Wärmeerzeugung:

- Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- Raumtemperierung ausschließlich per Luftheizung
- Wärmepumpe (Luft/Wasser) mit Frostschutzheizung
- Warmwasserspeicher

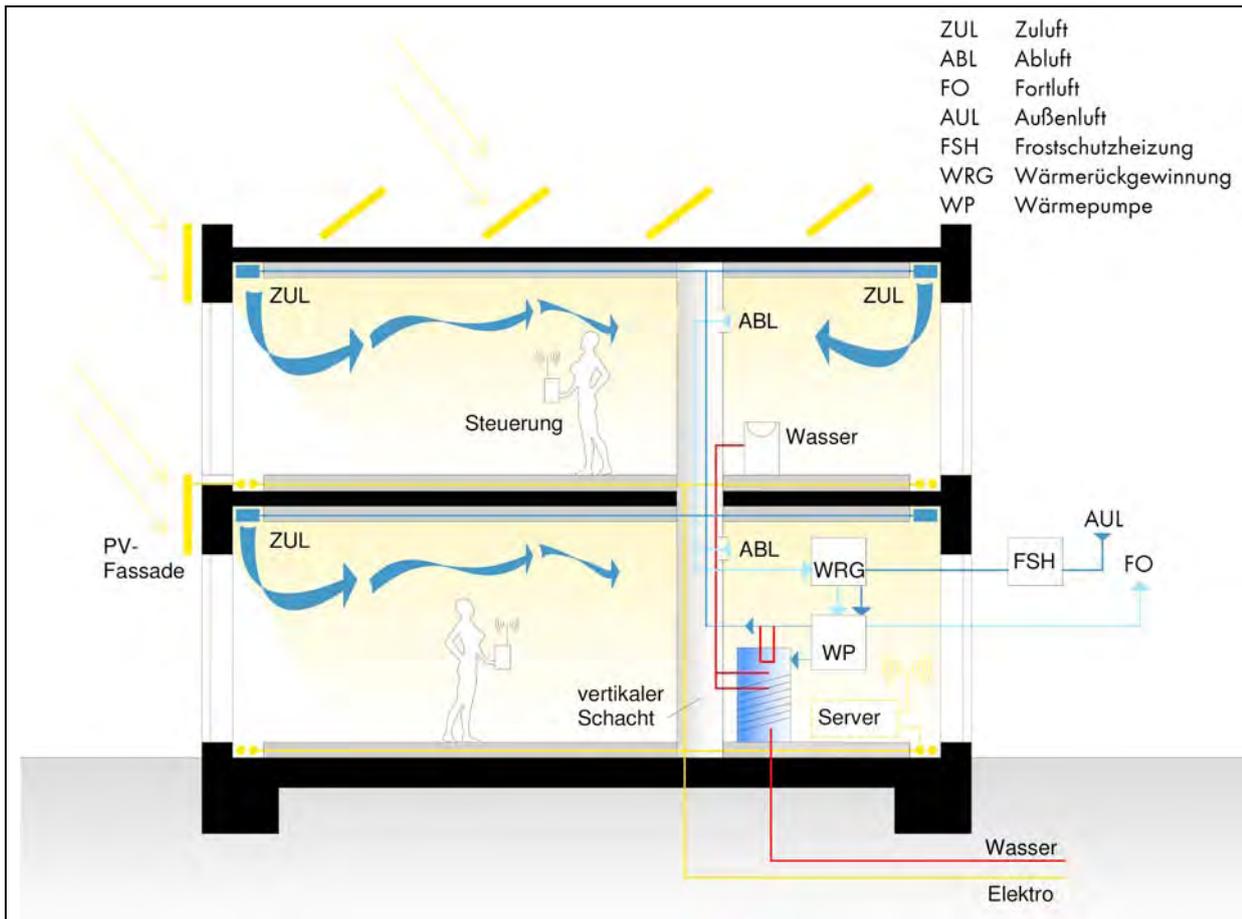


Bild 82 Grafische Darstellung des TGA-Konzepts



Bild 83 Beispiel: Kompaktgerät aerosmart XLS, Drexel und Weiss [177]

3.8.7. Elektrische Installationen

Der Zweck elektrischer Installationssysteme ist es, Energie mit Hilfe eines verzweigten Leitungssystems zu den einzelnen Verbrauchern im Gebäude zu bringen. In neuen Gebäuden übernehmen diese Leitungssysteme zunehmend auch Aufgaben zur Steuerung und Gebäudeautomation, was zu immer aufwändigeren Leitungsführungen und Verkabelungen führt [95]. Für das ReMoMaB - Projekt müssen einerseits alle Möglichkeiten einer modernen Ge-

bäudeautomation bereitgestellt werden, andererseits soll die Leitungsführung so einfach und flexibel wie möglich sein, um den Projektstandards an Rezyklierbarkeit und Modularität zu entsprechen.

Konventionelles Installationssystem

Bei einem konventionellen elektrischen Installationssystem wird sowohl die Versorgung (Lastverteilung) als auch die Steuerung über die Leitungen des 230 Volt Netzes geleistet. Dabei kann ein Verbraucher nur durch das Unterbrechen bzw. Schließen eines Stromkreislaufs aus- oder angeschaltet werden. Mit den zunehmenden Anforderungen an die Steuerung elektrischer Geräte, die über das bloße An- und Ausschalten hinausgehen, stößt dieses System jedoch an seine Grenzen (siehe Bild 84a).

Elektroinstallation mit Bussystem (z.B. KNX - Standard)

Um den zunehmenden Anforderungen und Funktionen elektrischer Geräte gerecht zu werden wurde das Prinzip entwickelt die elektrische Energie und die Steuerung der Geräte in zwei getrennten Leitungssystemen zu führen. Diese so genannten Bussysteme enthalten zusätzlich zu den Stromleitungen ein weiteres Leitungsnetz, welches die Informationen der Steuerung verteilt und sämtliche Befehlsgeber (Sensoren) mit allen Befehlsempfängern (Aktoren) verbindet. Dieses Installationssystem beinhaltet außerdem die Möglichkeit, alle Befehle über einen zentralen Server verwalten zu lassen (Gebäudeautomatisation). Für die Rezyklierbarkeit und die Modularität führen diese zusätzlichen Leitungen jedoch zu einem erheblichen Mehraufwand und machen den Demontageprozess extrem aufwändig und kompliziert (siehe Bild 84b).

Elektroinstallation mit DigitalStrom

Das DigitalStrom Prinzip kann als eine Weiterentwicklung des Bussystems verstanden werden. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass sowohl die Steuerinformationen als auch die elektrische Energie über dasselbe Leitungsnetz geführt werden, wie dies bspw. von „Powerline“- Systemen bekannt ist. Hierzu besitzt jeder Aktor und jeder Sensor einen winzigen Chip der die digitalisierten Steuerinformationen aus dem hausinternen Stromnetz in Steuerimpulse umwandelt. Das System erlaubt es auch, umfangreiche Informationen wie Temperatur oder CO₂ –Gehalt von Sensoren zu einem zentralen Server zu leiten. Gegenüber den Bussystemen können aufwändige Verkabelungen gespart werden. Zusätzlich ist das System sehr flexibel und kann auch in bestehende Installationsnetze integriert werden (siehe Bild 84c und Bild 85).

Funkgestütztes Installationssystem (EnOcean , Alpha EOS)

Noch einen Schritt weiter gehen funkgestützte Systeme wie zum Beispiel die durch EnOcean [178] bzw. AlphaEOS [170] entwickelten. Das Herzstück bildet ein zentraler, funkgestützter Hausserver. Dieser kommuniziert im MHz-Bereich mit energieautarken Schaltern und Sensoren sowie mit den Verbrauchern die ebenfalls mit funkgestützten Steuerungseinheiten versehen sind. So müssen im Gebäude lediglich Versorgungsleitungen installiert werden, alle Informationen zur Steuerung werden per Funk übermittelt. Durch die energieautarke Bauweise der Sensoren können zusätzliche Leitungen gespart werden. Lichtschalter können bspw. vollkommen autark, ohne jeden Leitungsanschluss montiert werden. Ihre Betriebsenergie erzeugen Sie durch piezoelektronische oder solare „Energieharvesting“-Elemente. Derartige Systeme können äußerst flexibel auf bauliche Veränderungen reagieren. Der minimierte Aufwand an Leitungen verbessert die Rezyklierbarkeit und die Anpassungsfähigkeit enorm. (siehe Bild 84d und Bild 86).

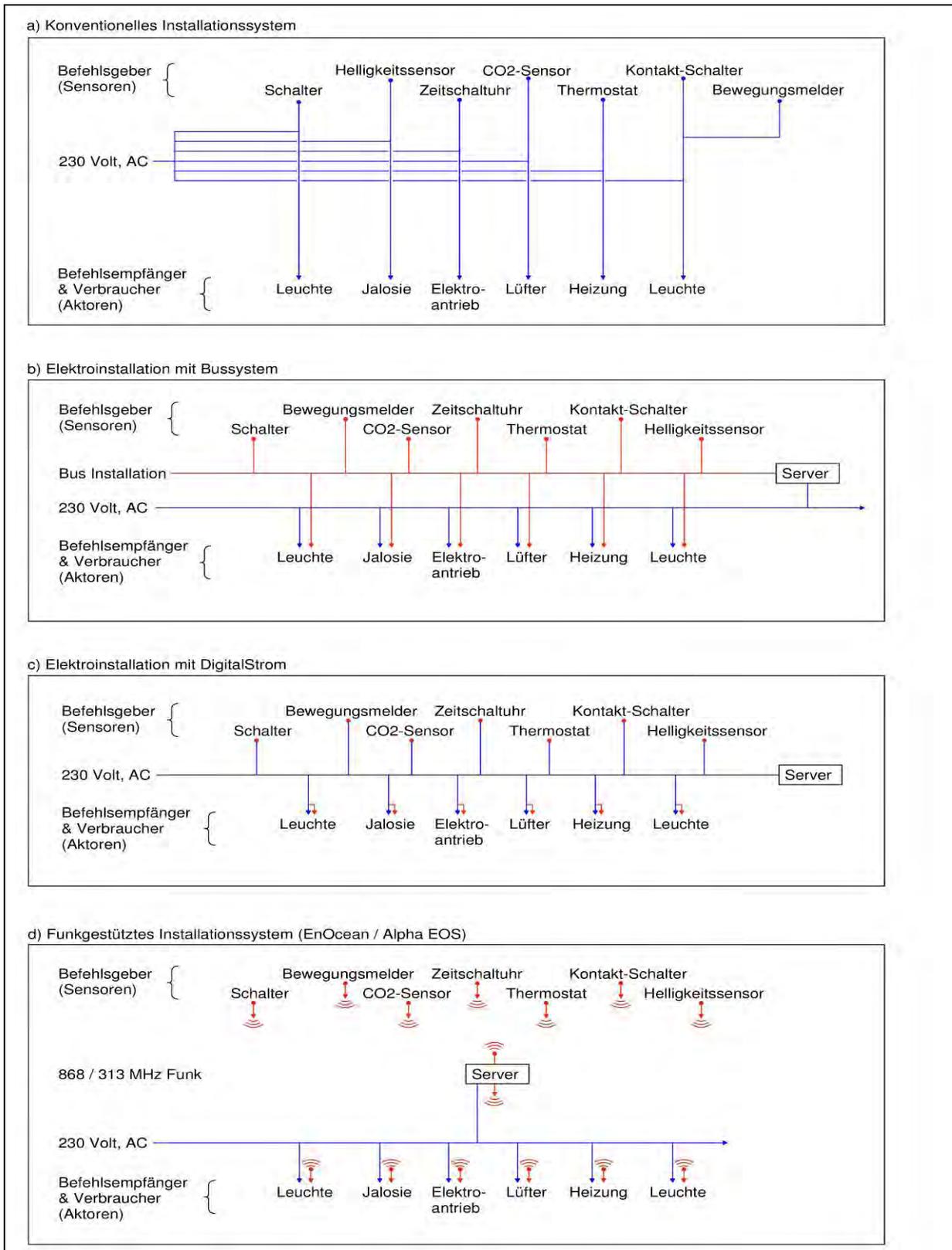


Bild 84 Gegenüberstellung verschiedener Installationssysteme

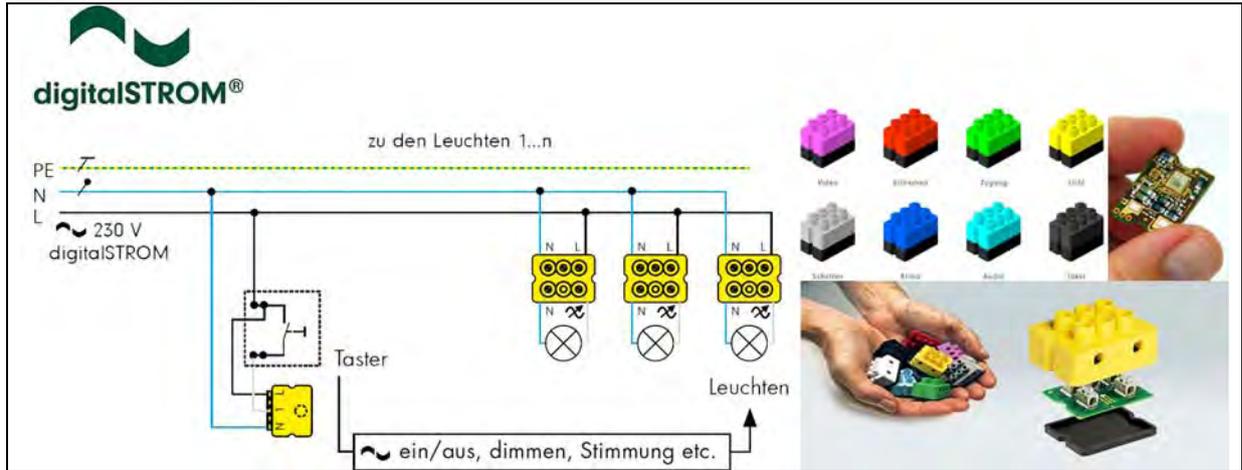


Bild 85 Digitalstrom Komponenten [176]

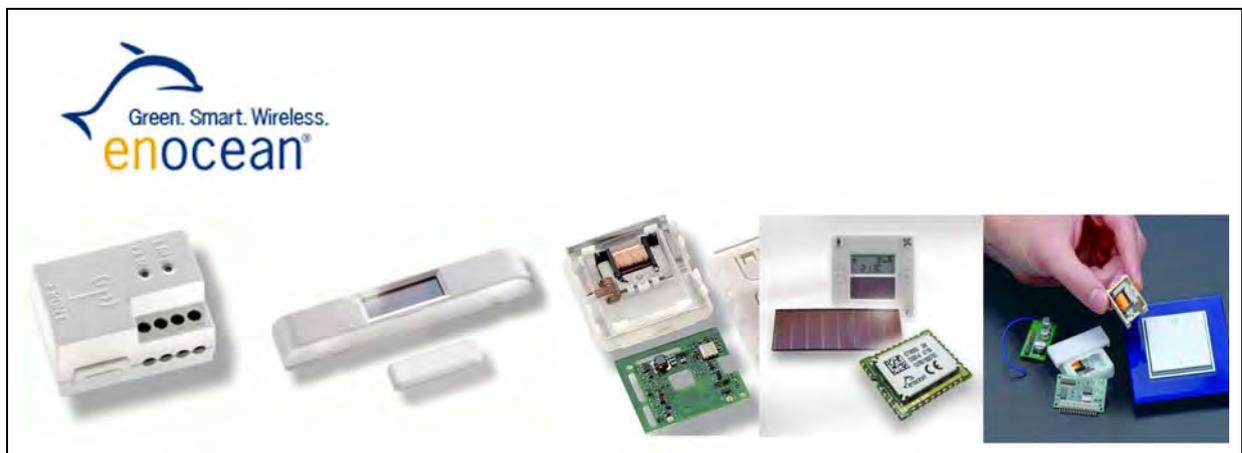


Bild 86 EnOcean Komponenten, v.l.n.r.: Empfangsmodul, energieautarker Sensor, piezoelektronischer Bewegungsenergiewandler, Solarbetriebene Steuerung, Lichtschalter [178]

Folgerungen für ReMoMaB:

Das in 3.8.7 d) vorgestellte System bietet die mit Abstand besten Voraussetzungen für die Umsetzung der Projektziele Modularität, Flexibilität und Rezyklierbarkeit. Für die weitere Bearbeitung wird daher die Verwendung dieses Installationssystems vorgeschlagen. Faktoren die außerhalb der definierten Projektziele liegen, wie Kosten oder die aktuelle Nutzerakzeptanz, spielen für diese Empfehlung keine Rolle.

Anforderungen an die Leitungsführung

Für die Versorgung der Stromverbraucher sind trotz der funkgestützten Steuerung Leitungen für die Lastverteilung erforderlich. Im Folgenden wird ein kurzer Abriss über die Möglichkeiten bestehender Systeme und des Optimierungsbedarfs in Bezug auf die Rückbaubarkeit gegeben. Hierzu wird in vertikale und horizontale (geschossweise) Leitungsführung unterschieden.

Vertikale Leitungsführung

Die vertikale Leitungsführung von Geschoss zu Geschoss erfolgt idealerweise in einem zentralen Schacht. An diesen Schacht ist auch der Technikraum angebunden, welcher den Hausanschluss und sämtliche Anlagen der Gebäudetechnik enthält. Bei einem eingeschossigen Gebäude entfällt dieser Schacht und die horizontale Verteilung setzt direkt am Technikraum an.

Horizontale Leitungsführung

Die horizontale Leitungsführung erfolgt geschossweise. Die Leitungen jedes Geschosses greifen unabhängig auf die übergeordnete Struktur im zentralen Schacht zurück. Im herkömmlichen Wohnungsbau erfolgt die elektrische Erschließung wie in Bild 87 dargestellt raumweise als „auf Putz“, „im Putz“, oder „unter Putz“-Installation.

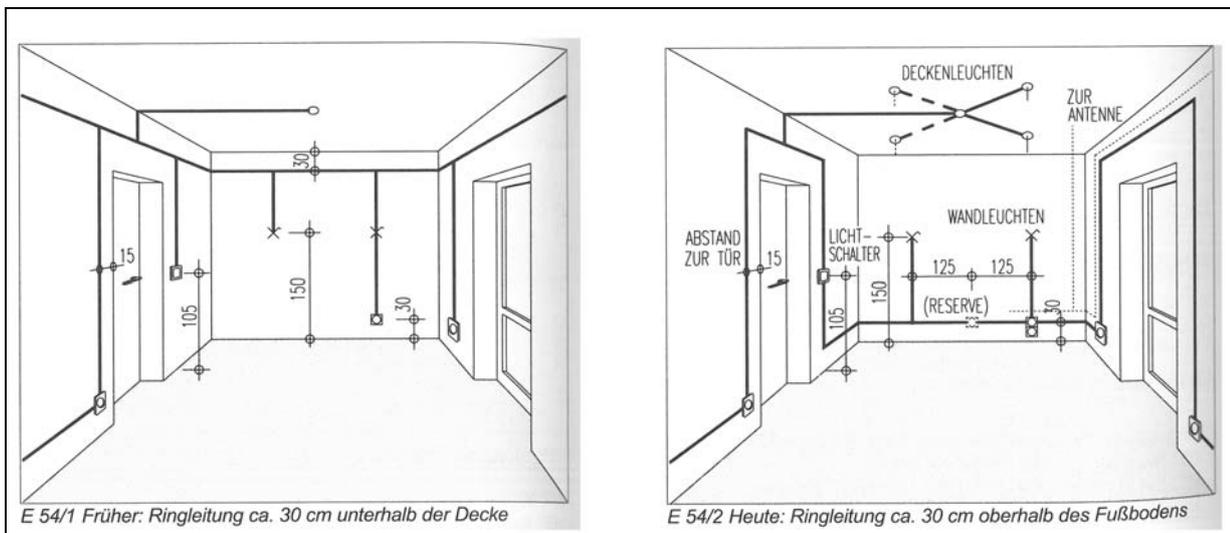


Bild 87 Anordnungsmöglichkeiten der elektrischen Installationen nach DIN 18015-3 [122]

Diese Putz-Installationsweisen können jedoch nicht die gestellten Anforderungen an Modularität, Flexibilität und Rezyklierbarkeit erfüllen. Aufputzinstallationen, die innerhalb dieser Gruppe noch die größte Flexibilität bieten, erfüllen nicht die angestrebte ästhetische Qualität. Ein leicht veränderbares, variables und modulares Installationssystem ist als Projektziel jedoch erforderlich.

Bestehende Systeme sehen sechs mögliche Positionen für die geschossweise, variable Leitungsführung vor [122], siehe auch Bild 88:

- Abgehängte Decke
- Doppelbodensysteme
- Fensterbankkanalsysteme
- Aufbodenkanalsystem
- Sockelleistenkanalsysteme
- Unterflurkanalsysteme

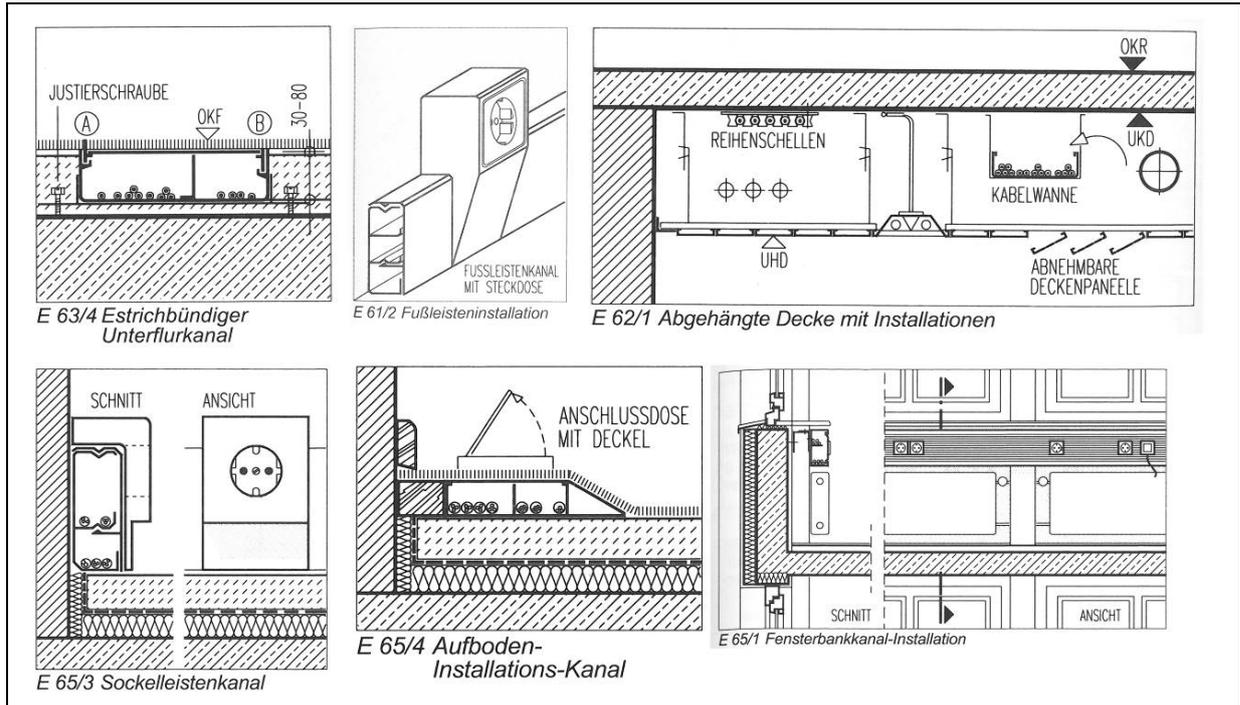


Bild 88 Verschiedene Möglichkeiten zur Anordnung variabler Leitungsführung (unvollständig) gemäß [122]

Trotz der erhöhten Flexibilität und Anpassungsfähigkeit gegenüber der traditionellen Leitungsführung sind diese Systeme unzureichend zur Erfüllung der ReMoMaB - Projektziele. Vorschläge zur Integration in das ReMoMaB System werden daher in Abschnitt 3.8.5 aufgeführt.

Verbindungssysteme für elektrische Installationen

Ein weiterer Teilbereich, der die Flexibilität elektrischer Installationen stark einschränkt sind die gebräuchlichen Verbindungssysteme. In diesem Zusammenhang bieten Flachkabel und Piercingelemente eine interessante Alternative:

Die Verwendung von Flachkabeln in Verbindung mit der Piercingtechnologie ermöglicht nach Prochiner [125] einen einfachen und flexiblen Zugang von Stromabnehmern zu den Ringleitungen im umlaufenden Kanal im Leitungsnetz. Zugangspunkte können ohne komplizierte Neuverkabelung oder Abisolierung in einen bestehenden Stromkreis integriert werden. Flachkabel haben den Vorteil, dass alle Leitungen eine vorformulierte Lage in einem Kunststoffband haben, durch die Applikation einer Piercingdose wird mit Hilfe von Spitzschrauben ein Kontakt hergestellt.

So können bspw. Steckdosen flexibel nachgerüstet werden oder Leuchten an verschiedenen Stellen in einen Stromkreis eingebunden werden.

Es existieren verschiedene Systeme:

- Flachkabeltechnik (technofil) Woertz, Spitzschrauben für Kontakt
- System Gesis Wieland, Steckersystem (v.a. Büro u. Gewerbebau)

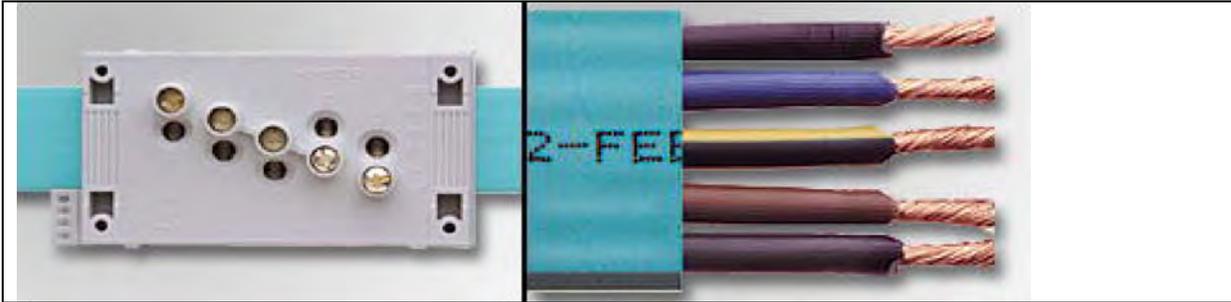


Bild 89 Flachkabel mit Piercingelement aus [125]



Bild 90 Piercingdose mit integriertem Steckdosenanschluss aus [125]

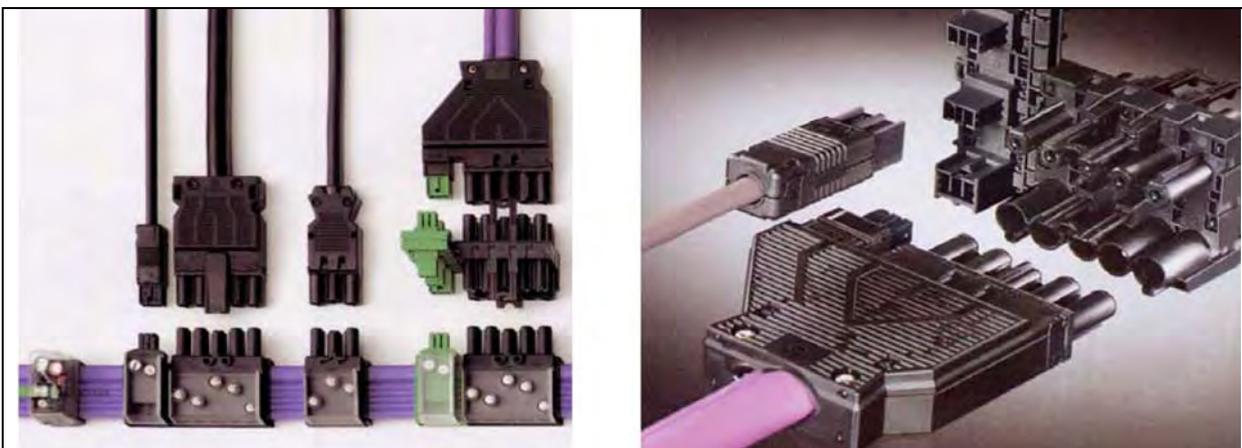


Bild 91 System Gesis Wieland aus [125]

Schnellverbindersysteme

Diese Schnellverbindertechnologie wurde entwickelt in dem Forschungsprojekt „Zukunftsorientierte Fertigungs- und Montagekonzepte im industriellen Wohnungsbau“ von Prochiner [125]. Dabei handelt es sich um Verbinder die vor allem im Holzbau für Anschlüsse zwischen Wandteilen eingesetzt werden. Der Schnellverbinder zeigt die Verbindungsmöglichkeit für Elektroleitungen.



Bild 92 Enercon Schnellverbinder von MUNITEC [190]

3.8.8. Wasserführende Systeme / Sanitär

Anforderungen

Die wasserführenden Systeme beschränken sich innerhalb des entwickelten TGA - Konzepts auf die Versorgung der Nasszellen (WC und Bad) sowie der Küche und etwaiger Hauswirtschaftsräume. Diese Räumlichkeiten sind um den zentralen Kern angeordnet, so dass ausschließlich eine vertikale Verteilung und keine horizontale Verteilung auf den Geschossen erforderlich ist. Aufgrund des rein luftgestützten Heizsystems ist kein zusätzliches wasserführendes Verteilsystem für die Heizung nötig.

Trinkwarmwasserbereitung

Gemäß den Angaben aus der EnEV 2009 kann zunächst ein Jahreswärmebedarf von 12,5 kWh/m²a angesetzt werden. Die bisherigen Erfahrungen haben aber gezeigt, dass in der Realität eher mit 15 kWh/m²a zu rechnen ist. Auf die zuvor genannten Beispiele bezogen würde dies 2.100 kWh/a (bei 140m²) bzw. 750 kWh/a (bei 50m²) entsprechen.

Die Warmwassererzeugung erfolgt ausschließlich mittels der vorgestellten Luft/Wasser Wärmepumpe. Ein Warmwasserspeicher mit ca. 200-300l Fassungsvermögen wird in das System integriert. Zur Sicherheit enthält dieser einen elektrischen Heizstab, um auch bei erhöhter Entnahme eine sichere Versorgung zu gewährleisten

Leitungsführung der wasserführenden Systeme

Folgende Leitungssysteme müssen getrennt geführt werden:

- Kaltwasser (KW)
- Warmwasser (WW)
- Abwasser (AW)

Auf eine Zirkulationsleitung kann durch die Anordnung aller Wasserverbraucher am zentralen Schacht verzichtet werden. Eine zusätzliche Leitung mit Regenwasser ist für die Toiletten-

spülung und die Waschmaschine denkbar. Ob dies lohnenswert ist, hängt wesentlich von der Größe des Gebäudes ab und muss im konkreten Fall entschieden werden. Folgende Nutzungsbereiche müssen im zu entwickelnden Gebäude an die Wasserversorgung angeschlossen werden und sind daher am zentralen Schacht anzuordnen:

- Küche
- Bad
- WC
- Hauswirtschaftsraum / Waschküche

Geräte/ Abnehmer:

- Waschbecken (KW, WW, AW)
- WC (KW, -, AW)
- Dusche / Badewanne (KW, WW, AW)
- Waschmaschine (KW, -, AW)
- Spülmaschine (KW, -, AW)

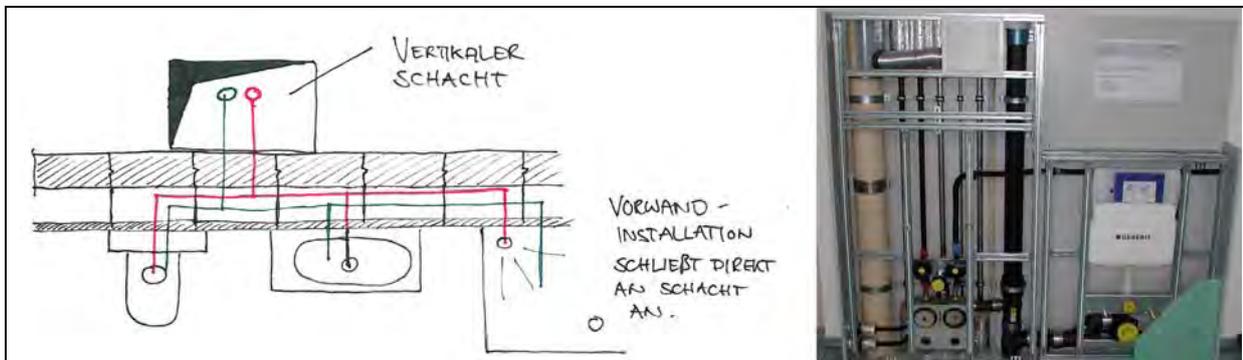


Bild 93 Vorwandinstallation schließt direkt an zentralen Schacht an [180]

Verbindungssysteme für Sanitär

Die Leitungen der Sanitärinstallationen werden üblicherweise mit nicht lösbaren Schweißverbindungen oder Pressfittings verbunden. Diese Vorgehensweise wurde eingeführt, um die Gefahr von Leckagen auf ein Minimum zu reduzieren. Diese Art der Installation ist von wenig Flexibilität und Modularität geprägt und eher auf Sicherheit getrimmt.

Neben der Wahl rezyklierbarer Materialien ist in diesem Bereich der Einsatz von flexiblen und lösbaren Verbindungen das Projektziel. Einige Hersteller wie bspw. Geberit (siehe Bild 94) haben sich bereits mit der Entwicklung neuer Verbindungssysteme beschäftigt (Geberit Pushfix). Dieses System ist zwar nicht lösbar, die Montage ist aber durch das Stecksystem einfach und flexibel möglich.



Bild 94 *Herkömmliche Pressfittings und Geberit Pushfix [180]*

Typische Materialien für die Wasserleitungen sind:

- Edelstahlrohr (teuer, starr, rezyklierbar)
- Kupferrohr (starr, rezyklierbar)
- Verbundrohr (flexibel, biegsam, bedingt rezyklierbar)

Ein weiteres System sind die in [125] vorgestellten Schnellverbinder-elemente. Diese sind für die Verbindung von vorfabrizierten Halbfertigelementen, z.B. Wandplatten, entwickelt wurden:

Aquacon ist ein Schnellverbinder-element (bis zu 20mm Rohrdurchmesser) zur Wasserführung und Sanicon für Rohre mit größerem Durchmesser. (Durchmesser 50mm für Spüle, Waschbecken, Dusche und Badewanne; Durchmesser 90 mm für Sammelleitungen und Lüftungsrohre).



Bild 95 *Sanitärverbinder Aquacon und Sanican von [190]*

3.9. Zusammenfassung Abschnitt 3

3.9.1. Rückschlüsse

Allgemein:

- Durch Übertrag der in Abschnitt 2 erarbeiteten Überlegungen aus den Bereichen Maschinen- bzw. Automobilbau auf das Bauwesen werden Ansätze für demontables Bauen abgeleitet. Der Anwendungsbereich dieser demontabler Konstruktionen wird gegenüber temporären Gebäuden unterschieden. Die theoretisch erarbeitete Systematik aus der Fügung Modul-Modul und Schicht-Schicht findet Anwendung in einem geometrisch-konstruktiven „Gerüst“ eines Gebäudes das nach und nach, auch durch andere Forschungsarbeiten in diesem Bereich ergänzt werden kann. Eine schrittweise Entwicklung demontabler Konstruktionen ist möglich.
- Anhand von Organigrammen wird eine Übersicht der im Bauwesen gängigen Konstruktionsweisen und Fügemethoden gegeben und eine Vorauswahl möglicher, bzw. in Frage kommender Konstruktionen getroffen. Im Ergebnis der Recherchen kann festgestellt werden, dass sowohl beim Rohbau der Fassade, als auch beim gebäude-technischen Ausbau Konstruktionsformen existieren, die Ansätze zur Weiterentwicklung hinsichtlich Demontierbarkeit bieten. In diesem Zusammenhang zeigt sich, dass die Eigenschaft zur Demontage von der Primärstruktur hin zur Oberfläche abnimmt. Es wird ein Gegensatz zwischen der Anforderung nach Beständigkeit gegenüber Verschleiß einerseits und den Anforderungen in Folge der Lösbarkeit der Verbindungen andererseits festgestellt.
- Für die im weiteren Verlauf vorgesehene exemplarische Entwicklung einer demontablen Hochbaukonstruktion wird der erforderliche Rahmen festgelegt. Ausgehend von der theoretisch erarbeiteten Systematik werden die tragende Außenwand, die Geschosdecke und die Schnittstelle im Wand-Decken-Knoten entwickelt. Letzterer soll detailliert untersucht werden.

Baelemente und Baukonstruktionen:

Wand

- Trockenmauerwerk ist eine Art von Massivbaukonstruktion, welche in hohem Maß dafür geeignet ist, als demontierbare Konstruktion eingesetzt zu werden. Diese Konstruktionsart besitzt ein großes ungenutztes Potenzial, welches durch den Einsatz von Vorspannung, der Optimierung der Geometrie und wesentlicher Bauteilschlüsse verbessert werden kann.
- Vorgehängte hinterlüftete Fassaden eignen sich aufgrund ihres konstruktiven Aufbaus (Differentialbauweise) und der ihnen zugrunde liegenden Verbindungstechnik besonders zur Weiterentwicklung hin zu demontablen Fassaden.
- Durch den Wegfall von nassem Außen- und Innenputz und Ersatz durch eine Trockenkonstruktion erhöht sich der Bedarf zur Entwicklung alternativer, demontabler Gebäudeabdichtungen im Mauerwerksbau.

Decke und Wand - Decken – Knoten

- Stahl – Stein - Decken werden als Massivkonstruktionen mit hohem Potenzial zur Entwicklung demontierbarer Massivdecken eingestuft. Der Einsatz des Steinmaterials der Wand in der Decke stellt ein nennenswertes Potenzial zur Reduktion der am Bau verwendeten Materialien dar.

- Der Wand-Decken-Knoten ist sowohl in bauphysikalischer, wie tragwerksplanerischer Hinsicht ein anspruchsvolles Detail. Aufgrund der Tatsache, dass in diesem Detail nahezu sämtliche Schnittstellenanforderungen zusammentreffen, wird dieses Detail zur weiteren Betrachtung ausgewählt.

Vorspannung

- Mit Vorspannung ohne Verbund lassen sich modulare und dauerhafte Verbindungen realisieren, die lösbar sind. Um diese besser demontieren zu können, bedürfen die gegenwärtig vorzufindenden Vorspannsysteme Modifikationen und zugleich Vereinfachungen, die eine Breitenanwendung im Mauerwerksbau ermöglicht.
- Der Einsatz der Vorspannung erhöht die Nutzerakzeptanz von Trockenmauerwerk, da damit eine einfache Rückbaumöglichkeit durch Dritte ausgeschlossen werden kann.

Tragwerk

- Die planerischen Grundlagen zur Errichtung einer Primärstruktur werden definiert und auf die weiterzuentwickelnde Konstruktionsweise im Mauerwerk angewendet. Dabei wird auf die wesentlichen Funktionen und Beanspruchungen von Stein und Fuge im Mauergefüge eingegangen.
- Die Primärstruktur bestimmenden Merkmale von Tragwerken werden untersucht. Dabei stellen Aussteifungswände (Scheiben oder Kerne) Fixpunkte im Gebäudegrundriss dar, die aufgrund der clusterbezogenen Dauerhaftigkeit des Tragwerks eine wesentliche Schnittstelle beim Entwerfen und Konstruieren von demontablen Gebäuden darstellen.

Bauphysik

- Zur Entwicklung demontabler Konstruktionsweisen werden die bauphysikalischen Rahmenbedingungen definiert. Eine Strategie zur Erreichung des Nullenergiestandards wird entwickelt.
- Die sich aus den bauphysikalischen Rahmenbedingungen ergebenden Anforderungen an die Gebäudehülle und an die technische Gebäudeausrüstung werden festgelegt. Im Weiteren Vorgehen können grundsätzliche Annahmen zur Bauteilschichtung und Auslegung von technischen Anlagen getroffen werden.

Technischer Gebäudeausbau

- Eine Übersicht der im Bauwesen vorzufindenden Ver- und Entsorgungssysteme (HLSE: Heizung, Lüftung, Sanitär, Elt.) mit deren Anlagentechnik wird medienbezogen gegeben und Ihre Demontierbarkeit untersucht.
- Durch systematisches Ordnen der vertikalen und horizontalen technischen Erschließung lassen sich sämtliche Leitungsteile des technischen Ausbaus ressourcensparend fassen. Ein Ordnungssystem zum planerischen Vorgehen, sowie eine Methode zur medienbezogenen Zusammenfassung ist somit gegeben.
- Eine weitstgehende Trennung von Rohbaumodul und Ausbau wird vorgeschlagen.
- Funkgestützte Systeme übernehmen die komplette Steuerung und machen eine Reduktion der Leitungstrassen auf die eigentlichen Versorgungsleitungen möglich.

3.9.2. Übertragung in ein Baukastensystem

Ausgehend von der im Forschungsantrag formulierten Zielstellung Grundprinzipien für ein vollständig rezyklierbares Einfamilienhaus in Massivbauweise zu entwickeln [213] wurden Wand- und Deckenkonstruktionen, unter Verwendung von Kalksandsteinplanelementen entworfen, welche zu einem frei konfektionierbaren und wiederverwendbaren Baukastensystem zusammengestellt werden können. Mittels trockener Fügung lassen sich tragenden Bauteilschichten individuell definieren, in dessen Folge dauerhafte, wie auch lösbare Verbindungen entstehen. Diese Verbindungen können wie folgt beschrieben werden:

Durch lose eingelegte Spannstähle wird Vorspannung auf ein modulares System aus trocken gefügten Kalksandsteinelementen ausgeübt, um es hinsichtlich seiner statischen (Formstabilität) und seiner bauphysikalischen Eigenschaften (Dichtigkeit der Fugen), sowie seiner Rezyklierbarkeit (Demontagefähigkeit) zu optimieren. Das Wirkprinzip ist Reibung. In Übertrag des gewählten statisch-konstruktiven Prinzips auf infrage kommende Gebäudegeometrien ergibt sich eine für den Mauerwerksbau übliche Fügung von Wand und Decke (Wand-Decken-Knoten). Bild 96 veranschaulicht die Anwendung dieser Fügung.

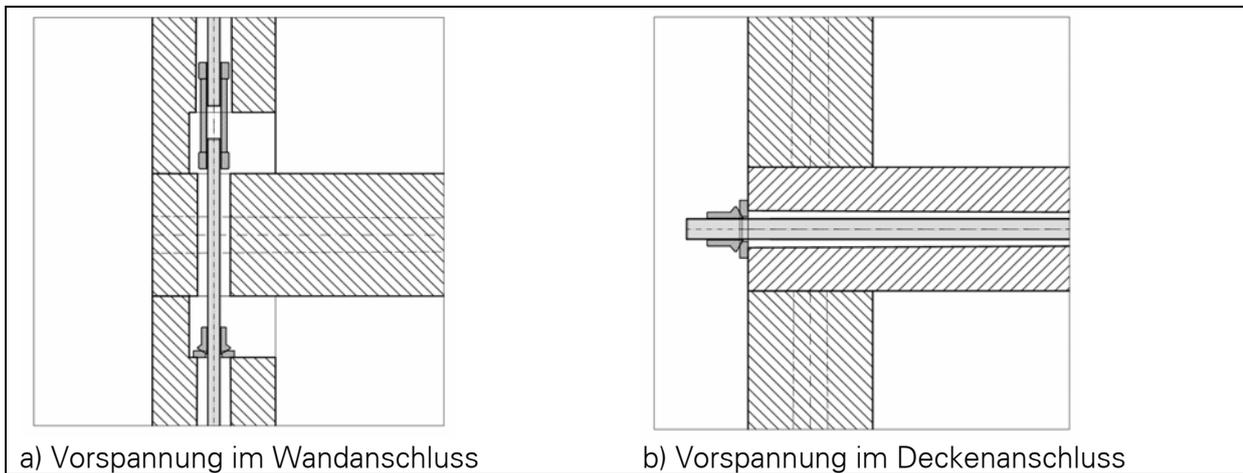


Bild 96 Ideenskizze: Wand-Decken-Knoten

Die sich aus der großmaßstäbliche Modul-Modul-Verbindung (siehe Abschnitt 2.6.2) ergebenden Vorteile lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Durch lose eingelegte Spannstähle soll die Tragfähigkeit von Trockenmauerwerk, insbesondere dessen Biege- und Schubbeanspruchung erhöht werden, sodass

- auf den Einsatz von geklebten bzw. betonierten Schubwänden verzichtet werden kann - Reduktion der zum Einsatz gebrachten Materialarten in Wänden,
- schlankere Wände bei gleicher Tragfähigkeit verwendet werden können – Flächen, und Raumgewinn,
- durch das Aufbringen einer kontinuierlichen, regelbaren Auflast, ein zusammenfügen („überdrücken“) der Lagerfuge erreicht wird und somit auf die Verwendung von Mörtel aus statischen Gesichtspunkten verzichtet werden kann.

Darüber hinaus lässt sich neben der Erfüllung der Wiederverwendbarkeit bzw. der sortenreinen Trennbarkeit folgende These formulieren:
 Durch Übertrag dieser großmaßstäblichen Modul-Modul-Verbindungsart von der Wand auf die Geschossdecke wird eine Reduktion der am Bau verwendeten Materialarten erzielt und so die Effizienz des Fügeprinzips erhöht. Bild 97 gibt einen Überblick über die mögliche Ausformung einzelner Elemente und Knoten und somit einen Überblick über die mögliche Bandbreite eines solches Baukastensystems.

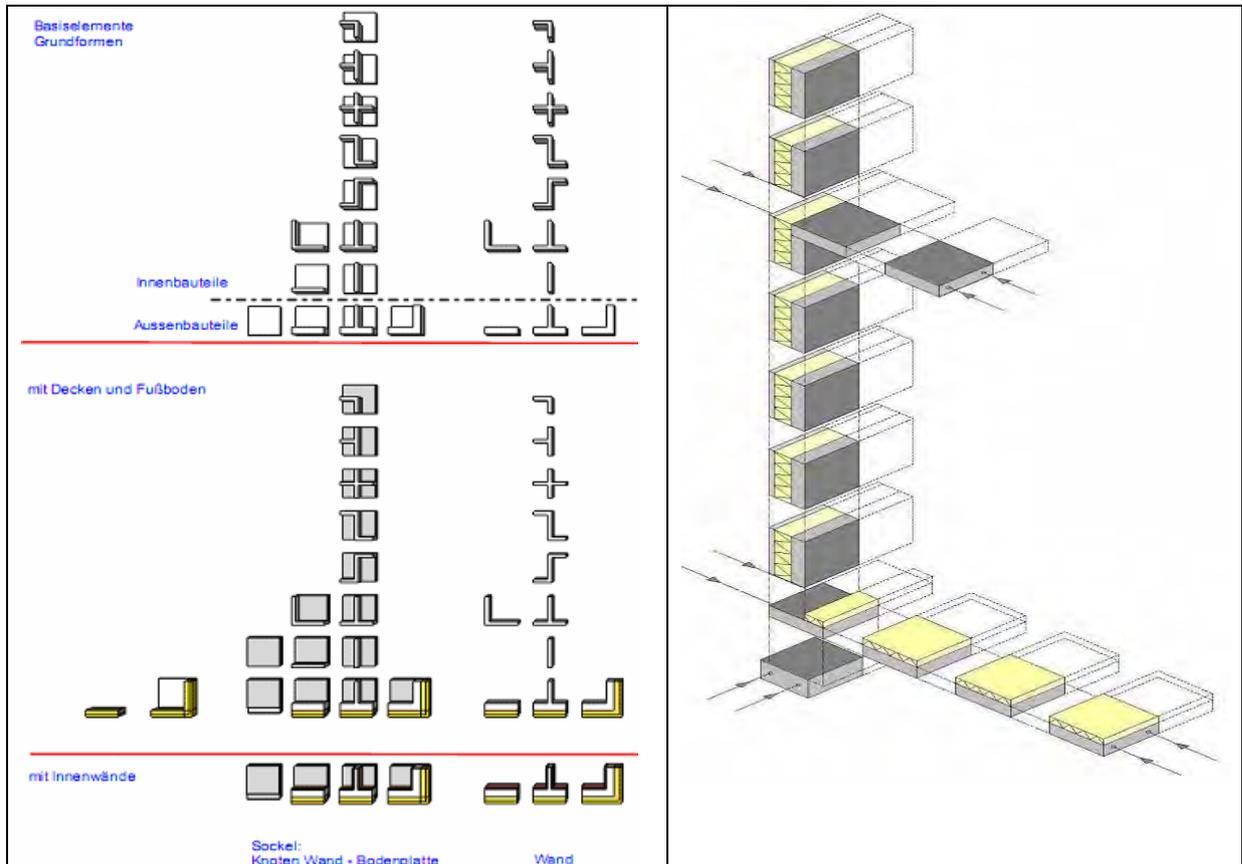


Bild 97 Baukastensystem

Bild 98 Modul – Anordnungen

In Bild 98 wird beispielhaft die Fügung von Baugruppen aus individuell zusammenstellbaren Einzelmodulen vertikal aufgehender und horizontal ausgerichteter Bauteile dargestellt. Mittels Vorspannung werden die vorkonfektionierten Sondermodule verbunden. Auf ähnliche Weise sollen alle anfallenden Verbindungen, wie bspw. der Dachanschluss, Tür- und Fensteröffnungen, Innenwandanschlüsse etc. realisiert werden. Die individuelle Kombinierbarkeit erlaubt hierbei größtmögliche Flexibilität in der Strukturierung des Gebäudes. Je nach Anforderung an das horizontal bzw. vertikal ausgerichtete Bauteil, sowie entsprechend statischer und dynamischer Belastung sowie je nach Wandaufbau kann in den Wänden die Möglichkeit der Vorspannung genutzt werden.



4. Ausarbeitung und theoretische Untersuchung ausgewählter Varianten

4.1. Ansätze

Im Weiteren werden zwei Ansätze für demontable Hochbaukonstruktionen in Varianten vorgestellt. Diese wurden parallel zur Recherche und der theoretischen Ausarbeitung entwickelt. Die Darstellung erfolgte anhand von Handskizzen, CAD-Zeichnungen und Modellen. Es liegt eine große Bandbreite und eine Vielzahl von Ansätzen vor, die im Zuge der Projektbearbeitung entstanden. Diese sind im Anhang aufgeführt. Im Sinne einer systematischen Entwicklung von Grundprinzipien gemäß der Aufgabenstellung wurden zwei konstruktive Ansätze gewählt, die im Folgenden näher untersucht werden.

In Abschnitt 4.2, 4.4 und 4.5 werden jene Aspekte dargestellt, die beiden Ansätzen gemein sind. Diese beziehen sich auf die eingesetzten Baustoffe, Materialien, Elemente der Vorspannung, wie auch den Wand-, Decken-, und Fassadenaufbau. Unter Bezug auf die in Abschnitt 3.9.1 gezogenen Rückschlüsse wird der Wand-Decken-Knoten untersucht. In Abschnitt 4.6 erfolgt eine grundsätzliche Gegenüberstellung beider Varianten und in den Abschnitten 4.7 und 4.8 eine Detaillierung beider Ansätze.

4.1.1. Ansätze für die Außenwand

Die unter Abschnitt 2 und 1 dargelegten Untersuchungen zeigen, dass es prinzipiell zwei Ansätze für die Außenwand gibt. Einerseits einen elementbezogenen Ansatz, andererseits einen Lösungsansatz, der den Regeln der Modularisierung folgt. Entsprechend der unter Abschnitt 2.6.1 getroffenen Definitionen steht beim elementbezogenen Lösungsansatz die Betrachtung einer ganzen Wandscheibe im Vordergrund während der modulare Lösungsansatz auf der untergeordneten Ebene der Steine bzw. Module angesiedelt ist.

4.1.2. Modularer Ansatz

Der modulare Lösungsansatz verfolgt das Ziel, eine möglichst maximale Flexibilität zu erreichen. Dies bezieht sich sowohl auf die Verbindung Schicht-Schicht als auch auf die Verbindung Modul-Modul. Eine größtmögliche Freiheit in der Wahl der Modulgrößen, der Öffnungsanordnungen und der Gebäudeform wird durch diesen modularen Ansatz erzielt. Ebenso ermöglicht er eine größtmögliche Freiheit in der Kombination weiterer Komponenten und Schichten, da über ein gesamtes Wandelement hinweg in geringen Abständen (ca. 500mm) Fixationspunkte für Verbindungen existieren. Diese können sowohl in den Lager- als auch in den Stoßfugen angeordnet werden. Dieses System kann ebenso für den Fußboden und Deckenaufbau verwendet werden und benötigt im Idealfall keinerlei weitere Unterkonstruktion, die außerhalb der Ebene des konstruktiven Wandelements liegt. Ein weiterer großer Vorteil des Ansatzes liegt darin, dass alle Komponenten, also die Module gleichermaßen wie die Verbindungsmittel, nach dem Rückbau vollständig für jedes weitere Bauprojekt, welches dem gleichen System folgt aber durchaus in Form, Größe und Gestalt vollständig

anders geartet sein kann, direkt wiederverwendet werden können. Durch den verfolgten Ansatz des Gleichteileprinzips ist dies möglich.

Allerdings geht mit diesen Vorteilen auch eine Reihe von Nachteilen einher. So ist der erwartete Aufwand für Montage und Demontage und die damit einhergehende Anzahl der Arbeitsschritte aufgrund der Kleinteiligkeit und Menge der Komponenten recht hoch. Auch kann festgestellt werden, dass mit der Maximierung der Flexibilität gleichzeitig auch ein Überangebot an Möglichkeiten einhergeht. Das bedeutet, dass ein modularer Lösungsansatz für die Summe der Anforderungen über Projektgrenzen und Lebenszyklen hinweg Vorteile aufzeigt, gleichzeitig bei jedem spezifischen Bauprojekt aber Nachteile mit sich bringt. Beispielhaft sei hier auf die sehr hohe Anzahl der Fixationspunkte verwiesen. Sie ermöglichen die Verwendung von Modulen mit einer Größe von mindestens 125x125x125mm bis zu höchstens 500x125x500mm, was für eine Breitenanwendung von großem Vorteil ist. Gleichzeitig ist aber auch davon auszugehen, dass zu einem überwiegenden Anteil die große Menge der Fixationspunkte ungenutzt bleibt. Dies trifft sowohl auf die Verbindung der Module als auch auf das Anbringen weiterer Unterkonstruktionen für den Schichtaufbau zu. Die Vielzahl der Verbindungen könnte sich so neben dem erhöhten Aufwand nachteilig auf die Wärmedämmeigenschaften (aufgrund von Wärmebrücken) der Wand und die verwendete Menge an Ressourcen und grauer Energie auswirken. Des Weiteren besteht bei größeren Wandöffnungen das Problem, dass diese ohne Sonderbauteile tragwerkstechnisch wohl nicht realisierbar sind.

4.1.3. Elementbezogener Ansatz

Ein elementbezogener Ansatz setzt genau hier an. Er legt den Fokus auf die Vorteile, die sich auf der nächstgrößeren Maßstabebene des Elementes ergeben. Diese liegen in erster Linie auf einem effizienten Ablauf von Montage und Demontage, da (vergleichbar zum Fertigbau) die Module bereits werkseitig zu tragenden Wand- und Deckenscheiben (Elementen) zusammen gefügt werden. Hiermit geht der weitere Vorteil einher, dass nur dort Stahlelemente eingesetzt werden, wo diese aufgrund der tragwerkstechnischen Ansprüche im Zuge der Vorspannung auch benötigt werden.

Die Verbindung der weiteren Schichten ist somit nicht auf dem Maßstab der Module, sondern lediglich an den oberen und unteren Randbereichen ganzer Elemente möglich. Eine weitere Unterkonstruktion außerhalb der Elementebene wird benötigt, um die Befestigung der Schichten zu gewährleisten. Die Dichtigkeit der Stoß- und Lagerfugen muss ebenfalls durch eine gesonderte Maßnahme (bspw. einer außenseitig angebrachten Folie) sichergestellt werden. Der konstruktive Teil der Wand hingegen bleibt im Gegensatz zum modularen Ansatz frei von überflüssigen Stahleinlagen.

Nachteilig wirkt sich dieser Ansatz evtl. aus, wenn es nach der Demontage darum geht, die verwendeten Komponenten für ein neues, in seiner Größe, Form und Gestalt andersartiges Projekt direkt wiederzuverwenden. Die demontierten Komponenten verfügen über Eigenschaften – insbesondere Abmessungen – die projektspezifisch gewählt wurden und deshalb evtl. nicht für ein weiteres Projekt geeignet sind. Es muss daher elementbezogen eine gewisse Varianz an Komponenten vorgehalten werden, die trotz des elementbezogenen Ansatzes eine größtmögliche Flexibilität der gebauten Umwelt zulässt, um eine Breitenanwendung realistisch erscheinen zu lassen. Der Vorschlag für ein im Grundriss modularisiertes Musterhaus (siehe Abschnitt 7.8) zeigt hier einen der möglichen Lösungswege auf. Alterna-

tiv kann davon ausgegangen werden, dass verfahrenstechnische Zwischenschritte im Zuge des Rezykliervorgangs benötigt werden (bspw. Einschmelzen, brechen und neu Fertigen).

4.2. Gemeinsame baukonstruktive Elemente

4.2.1. Geometrische Festlegungen

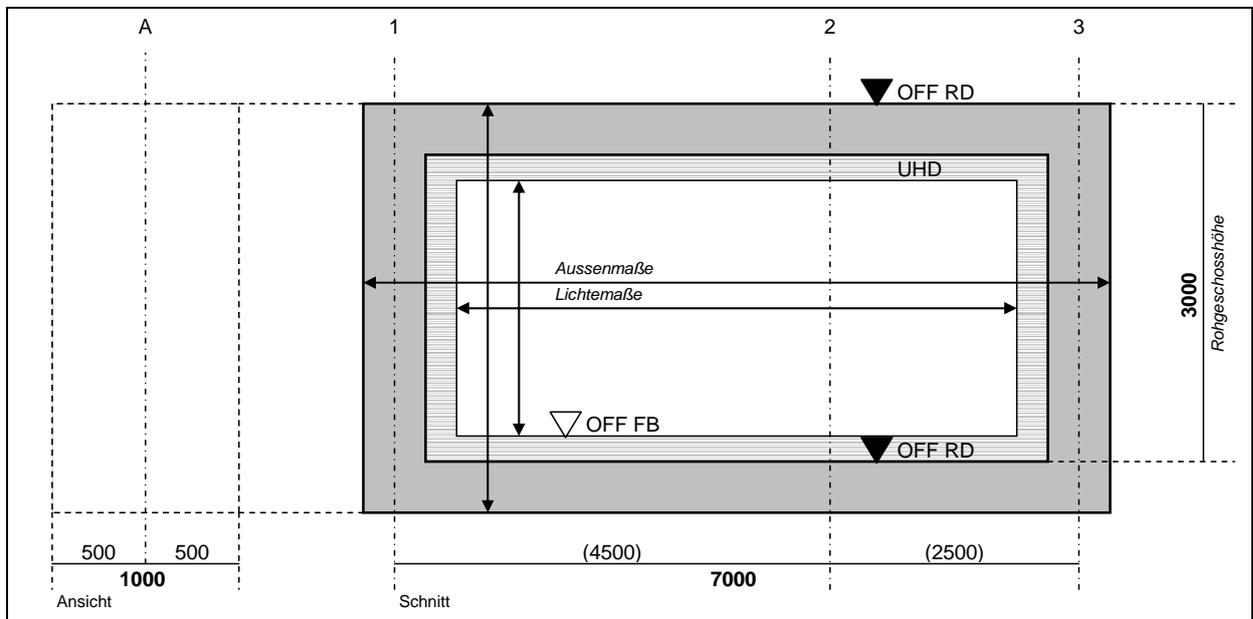


Bild 99 Geometrische Festlegungen zur einheitlichen Darstellung beider ausgewählter Varianten

Zur Beschreibung des Bauteilaufbaus beider ausgewählter Varianten werden zunächst geometrische Festlegungen getroffen. Im Sinne einer einheitlichen Darstellung der konstruktiven Details wurde eine typische Anordnung von Wand und Decke anhand feststehender Achsmaße und Rohgeschosshöhen zu einem Mustergeschoss gemäß Bild 99 gewählt. In beiden Fällen wird von einer Deckenspannweite mit Achsmaß von 7000 mm und einer Rohgeschosshöhe von 3000 mm ausgegangen. Zur Darstellung der Fassade ist eine Breite von 1000 mm festgelegt.

4.2.2. Zum verwendeten Stein

KS - Basisbauteil

Ausgangsbasis für das zu entwickelnde Modul bildet ein Kalksandsteinplanelement gemäß Zulassung Z-17.1-551 aus dem so genannten Quadro Bausystem [208], dessen unmodifizierte Eigenschaften hier zusammenfassend dargestellt werden sollen.

Kalksandsteine werden üblicherweise in den Druckfestigkeitsklassen 12 und 20 hergestellt. Die Werte beziehen sich auf den kleinsten zulässigen Einzelwert der Druckfestigkeit in N/mm². Aufgrund der hohen Festigkeitswerte lassen sich sehr schlanke und dennoch hochtragfähige Wandkonstruktionen realisieren [204].

- Die Höhe der in Dünnbettfuge zu versetzenden Elemente beträgt 498 bzw. 623 mm,
- der Stoßfugenabstand 500 mm.
- Der Lochanteil in Lagerfugenrichtung beträgt max. 15 %.
- Das Vermauern erfolgt aufgrund des hohen Steingewichts (über 25 kg) mit dem Versetzgerät, zur weiteren Steigerung der Arbeitsleistung werden die Rasterelemente üblicherweise im „Doppelpack“ versetzt
- Zur unproblematischen Herstellung von Mauerverbänden ohne Zuschnitt der Steine auf der Baustelle werden Ergänzungsformate mit $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ oder $\frac{3}{4}$ der Steinelänge angeboten.
- Die Elemente werden für verschiedene Wandstärken von 115, 150, 175, 200, 240, 300 oder 365 mm hergestellt.

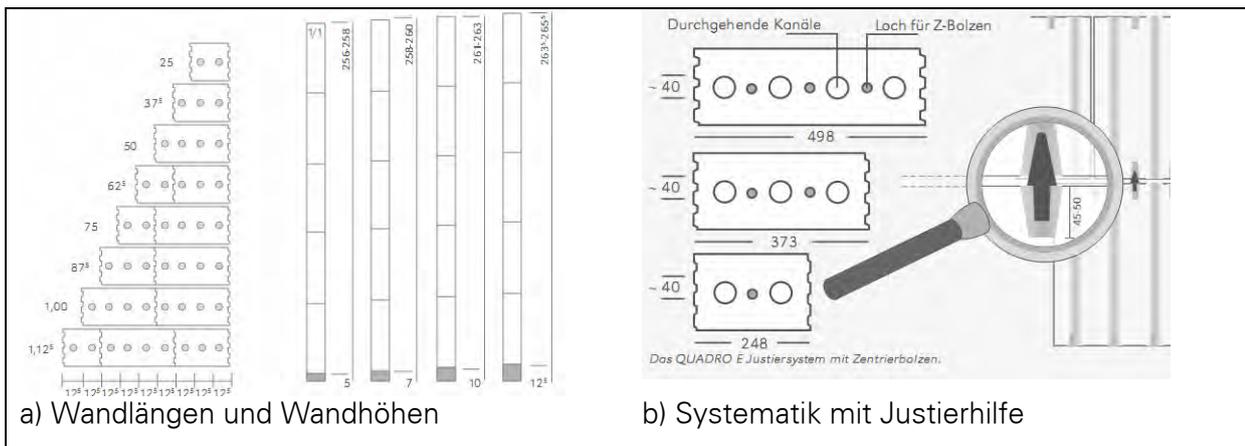


Bild 100 KS-QudaroE nach [204] gemäß [208]

Zur vereinfachten Verlegung von Elektroleitungen sind Plansteine und Rasterelemente mit Elektrokanälen (KS-E) auf dem Markt, in welche im Abstand von 12,5 cm senkrechte Kanäle eingearbeitet sind. Zum Verlegen einer Leitung können diese z. B. mit einem Dosenbohrer angebohrt werden. Das nachträgliche Einfräsen von Wandschlitzern in senkrechter Richtung erübrigt sich somit, wodurch Arbeitszeit eingespart und ein einheitlicher Putzgrund gewährleistet wird [204].

Die Idee, den KS-QudaroE als Basisbauteil für das Projekt ReMoMaB zu verwenden, resultiert aus der Überlegung, ein bereits existierendes Planelementwandssystem so zu modifizieren, dass es als vorgespanntes Trockenmauerwerk fungieren kann.

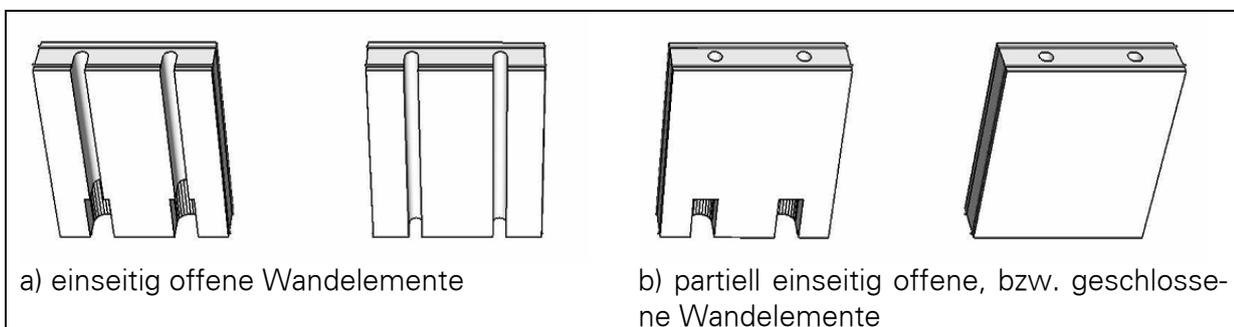


Bild 101 Varianten zur Modifikation am Wandfußpunkt zur Einführung der Anker

Ein Teil der E-Kanäle im Basisbauteil soll so umgestaltet werden, dass sie sich zur Aufnahme der Spannstähle eignen. Bild 101 zeigt eine Auswahl an Varianten der möglichen Modifikationen des Wandfußes um dort den Zugstab einführen, bzw. befestigen zu können. Die Bandbreite der Verlegung reicht von einem offen in der Wand geführten Spannstahl bis hin zur komplett geschlossenen Führung im Kanal. Dabei stehen sich Überlegungen zur Funktion der Wand mit definierten Anforderungen und baupraktische sowie technologische Überlegungen konträr gegenüber.

Gegenüberstellung KS Trockenmauerwerke und KS-QuadroE

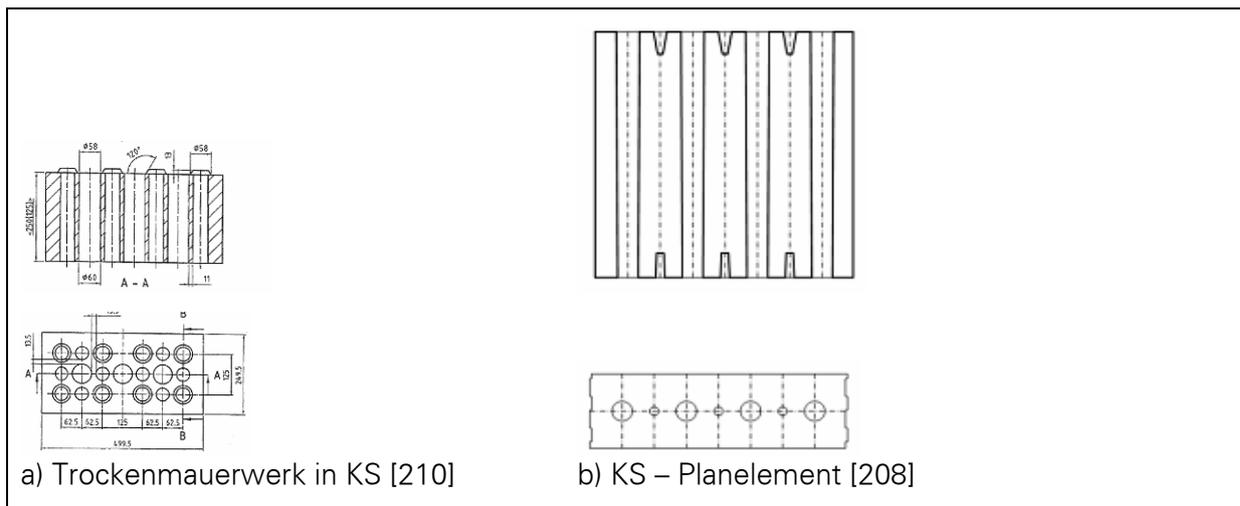


Bild 102 Gegenüberstellung der beiden verwendeten Mauersysteme

Vergleicht man die in Abschnitt 3.4 vorgestellten Trockenmauersysteme mit dem vorgesehenen Basisbauteil KS-QuadroE [208], so können folgende grundsätzliche Abweichungen festgestellt werden:

- Die Steinproportionen sind konträr: breit und liegende zu schal und stehend
- Beim System KS-QuadroE [208] werden Gebäudeecken sowie der Anschluss von Innenwänden an die Außenwände in Stumpfstoßtechnik hergestellt. Bei Trockenmauerwerk werden diese Anschlüsse im Verband erstellt.
- Der Stein wird sich, im Gegensatz zu den herkömmlichen Trockenmauern aufgrund der Größe nicht mehr von Hand verlegen lassen (bei gewählter Rohdichte von 1,8 kg/dm³ ergibt sich ein Modulgewicht von rund 100kg).
- Die Maßtoleranzen weichen bedeutend ab (siehe Tabelle 5)

Tabelle 5 Maßtoleranzen im Vergleich

	KS-QuadroE [208]	Trockenmauerwerk [210]
Klasse	TLMP	-
Ebenheit	≤ 1,0 mm	0,2 mm
Planparallelität	≤ 1,0 mm	0,2 mm

4.2.3. Schichtung – Konstruktive Aufbauten

Betreffs der Schichtung ist es naheliegend, die Schichtabfolge positionsweise (von Innen nach Außen und von oben nach unten) durch Nennung der Schichtdicke und der Materialität der einzelnen Schichten zu beschreiben.

Codierung der Schichtung

Gegenwärtig wird auf eine Schichtdarstellung mit eindeutiger Codierung verzichtet, da eine Evaluierung und Festlegung auf ein bestimmtes Bauteilcodierungssystem zum Stand der Überlegungen verfrüht ist. Dieses wird jedoch spätestens im Zuge einer konkreten Gebäudeplanung nötig, da mit zunehmender Komplexität der Bauteilverknüpfung (Abdichtungsebene, Wartungs- und Demontageebenen) und clusterbezogene Überlegungen, die Entwicklung eines geeigneten Code-Systems unumgänglich ist.

Im Rahmen dieses Forschungsberichts sollte der Hinweis auf Notwendigkeit zur wissenschaftlichen Untersuchung von Themen wie bspw. der Entwicklung einer geeigneten Bauteilcodierung für demontable Konstruktionen, deren zeitversetzte Aufrufbarkeit und die Wiederauffindbarkeit der verbauten Materialien und der Identifikation der Konstruktionsweise genügen.

Schichtung der Wand

Für beide, in den Abschnitten 4.7 und 4.8 näher beschriebene Varianten, wurde im Sinne der Vergleichbarkeit beider Varianten, die gleiche Schichtung im Wandaufbau gewählt. Die Beschreibung des Schichtaufbaus der Wand erfolgt in Tabelle 6 im Sinne abnehmender Dampfdichtigkeit des Materials von Innen nach Außen. Aufgrund der hohen Ebenheit der Steine wird abweichend ein Luftspalt von 35 mm statt der planmäßig 40 mm angenommen.

Tabelle 6 Schichtaufbau Wand, grob

-	Schicht [Bezeichnung]	Stärke [mm]	Material-, Produktbeschreibung [Bemerkung]
1.	Innenwandbelag	35	2x12.5 mm Fermacellplatte [205] auf 15 mm Hutprofil [89] (stehende Luftschicht)
2.	Tragschicht (unbemessen)	150	Teilweise vorgespannter Kalzium-Silikat-Stein, vergleichbar KS-Planelemente [208]
3.	Wärmedämmung	300	Mineralwolldämmung, Rockwool [195]
4.	Hinterlüftung	35	
5.	Fassadenbekleidung auf Unterkonstruktion	10	Bekleidung, offen, frei wählbar Edelstahl-Stabwerk Firma mCon [187]
6.	zur Rundung	Frei	max. Toleranz

Schichtung der Decke

Für beide, in den Abschnitten 4.7 und 4.8 näher beschriebene Variantene wurde im Sinne der Vergleichbarkeit beider Varianten die gleiche Schichtung im Deckenaufbau gewählt. Die Beschreibung des Schichtaufbaus der Decke erfolgt in Tabelle 7 von oben nach unten.

Tabelle 7 Schichtaufbau Decke, grob

-	Schicht [Bezeichnung]	Stärke [mm]	Material-, Produktbeschreibung [Bemerkung]
1.	Fußbodenbelag	10	Frei wählbar
2.	Trockenestrich	20	Modifiziertes Fermacell Estrichelement
3.	Trittschalldämmung	10	Fermacell Estrichelement Holzfaserplatte [205]
4.	Ausgleichsschüttung		z.B. Blähton, frei wählbare Schütthöhe [184]
5.	Rieselschutz, lose verlegt		Baupappe an den Stößen 100 mm Überlappend
6.	Tragschicht (unbemessen)	150	Vorgespannter Kalzium-Silikat-Stein vergleichbar KS-Planelemente [208]
7.	Deckenbelag auf Unterhangdeckensystem	50	20 mm Fermacellplatte [205] auf Haupt-Nebenträger aus CD 27/60-Profilen [89], frei wählbare Abhängehöhe
6.	zur Rundung	Frei	max. Toleranz

4.2.4. Statisch - Konstruktiver Ansatz

Auf Eigenschaft und Anwendung von Trockenmauerwerk sowie auf den Einsatz und die Art von Vorspannung im Mauerwerksbau wurde bereits in den Abschnitten 3.4 und 3.7 eingegangen. Gründe für den statisch-konstruktiven Ansatz Vorspannung bei Trockenmauerwerk einzusetzen, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Zur Sicherung der Schubaussteifung.
- Zur Reduktion der Bauteilstärke durch Erhöhen der Formstabilität, dadurch schlankere Wände bei gleicher Tragfähigkeit.
- Zur Verbesserung der Nutzerakzeptanz.

Maßgebliche Faktoren, die die Tragfähigkeit und die bauphysikalische Wirkweise der Außenwand beeinflussen, sind:

- Die Ebenheit des Steins auf Verteilung der Normallast und der Vorspannung im mörtellosen Mauerverband.
- Rohdichte des Stein (Steinfestigkeit)
- Verteilung der Vorspannung im Bereich des Mauerkopfs (ohne Verwendung von Betonbalken)

Auf die in Abschnitt 3.3.5 vorgestellte Beanspruchungsart kann zum Beispiel ohne Weiteres auf die Versagenstheorien von Mann und Müller [103] Bezug genommen werden, da Haftzug- und Haftscherfestigkeit aufgrund des fehlenden Mörtels im Mauergefügeverbund nicht berücksichtigt werden.

Vorgespannte Schubwände

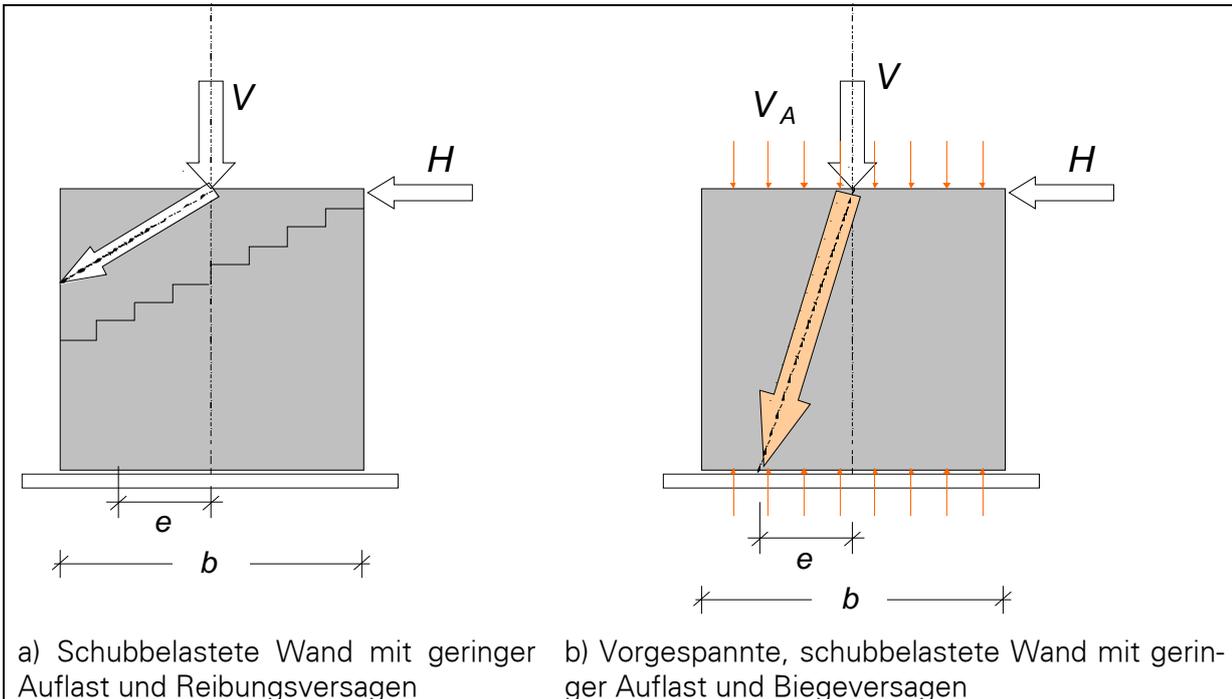


Bild 103 Grundprinzip: Ersatz von Auflast durch Vorspannung zur Erhöhung der Reibung

Bild 103 verdeutlicht das Grundprinzip der regelbaren Auflast mittels Vorspannung. Durch das Aufbringen einer Auflast werden die Reibkräfte erhöht, wodurch die aufnehmbare Querkraft signifikant erhöht wird und die Wand ein monolithisches Tragverhalten aufweist.

Zentrisch vorgespannte Stein – Decke

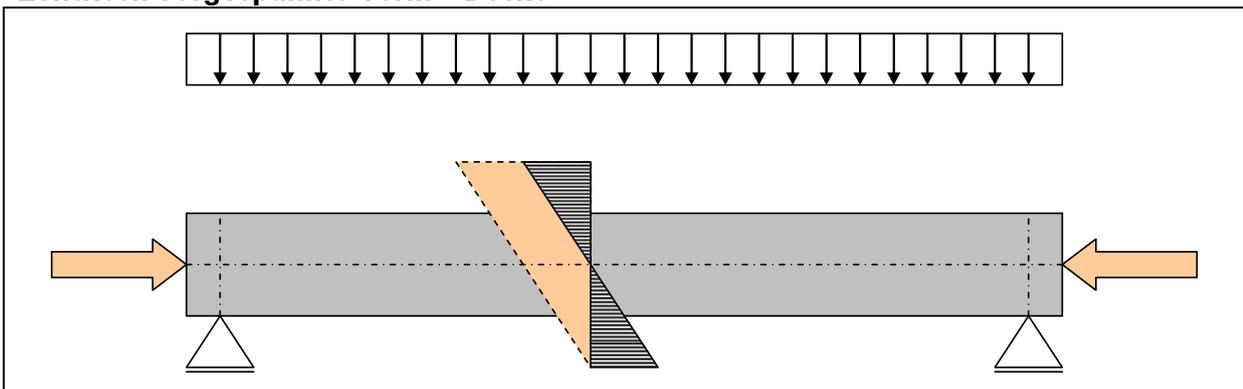


Bild 104 Wirkprinzip loser vorgespannter Steindecken

In Bild 104 wird das auf Reibung basierende Wirkprinzip der ohne Verbund vorgespannten Steindecken demonstriert. Das Grundprinzip bei den vorwiegend auf Biegung beanspruchten Decken beruht auf der Kompensation der Deckenzugspannung durch zentrisch angeordneten Druck.

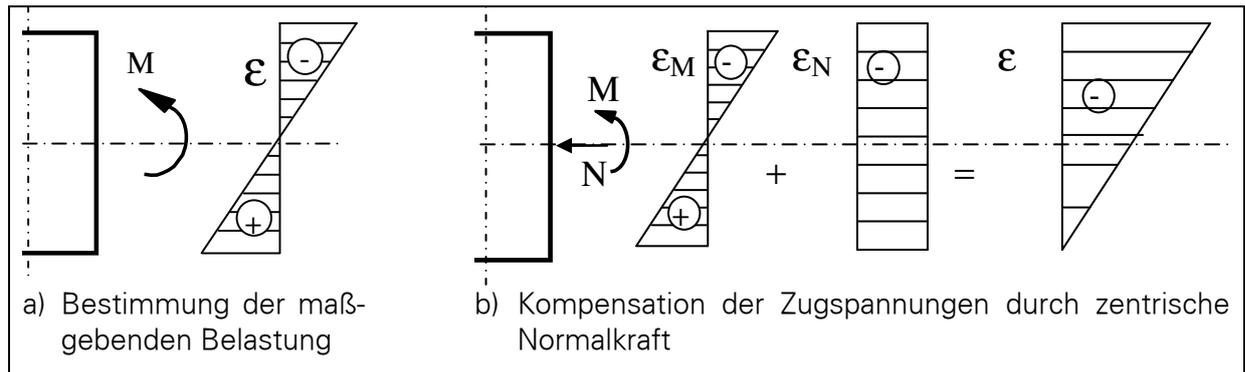


Bild 105 Prinzip der Kompensation von Deckenzugspannungen

Die zentrische Vorspannung hat ihren Grund in der Beschränkung der Steinvialt und in der universellen Verwendbarkeit. Ab einer bestimmten Spannweite sind höhere Festigkeiten als Steinfestigkeitsklasse 20 erforderlich. Das Vorgehen bei der ingenieurmäßigen Bemessung der Vorspannung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Bestimmung der maßgebenden Belastung
- Berechnung des maßgebenden Biegemoments
- Bestimmung des Dehnungszustands
- Ermittlung der Kriechverluste und der Verluste infolge Schlupf
- Kompensation der Zugspannungen durch zentrische Normalkraft unter Berücksichtigung von Kriech- und Schlupfverluste, dadurch keine Zugspannungen im Querschnitt
 1. Nachweis der Druckzone
 2. Nachweis der Vorspannkraft des Spanngliedes
- Dekompressionsnachweis

Die Nachweisführung kann damit sehr einfach gehalten werden.

Untersuchungen am numerischen Modell: Laststellungen

Im Vorfeld weiterer Untersuchungen und Variantenausbildungen erfolgte eine Verifikation der theoretischen Überlegung zur zentrisch vorgespannten Decke anhand einer Untersuchung an einem numerischen Modell in ANSYS. Die Basis hierfür bilden Annahmen und Bemessungsgrößen gemäß Tabelle 8 und Tabelle 9.

Tabelle 8 Annahmen

Bezeichnung			
1.	Spannweite:	L	3,20 [m]
2.	Rohdichte:	R	22,00 [kN/m ³]
3.	Deckenhöhe:	H	0,15 [m]
4.	Lasten:		
4.1	Ausbauast:	g ₁	1,21 [kN/m ²]
4.2	Verkehrslast:	Q	1,50 [kN/m ²]

Tabelle 9 Bemessungsergebnisse Ergebnisse

Bezeichnung			
1.	Bemessungslast	e_d	8,30 [kN/m ²]
	Biegemomente	M_{Ed}	10,70 kNm/m)
	Querkraft	V_{Ed}	13,30 kN/m

Unter Berücksichtigung von Kontaktfugen und unterschiedlich großer Vorspannkräfte wurden im Modell (ANSYS) die Einwirkungen unterschiedlicher Laststellungen auf der Deckenplatte untersucht.

Ergebnis

Bild 106 und Bild 107 zeigen Versagensbilder der Decke in Folge verschiedener vertikaler Belastung bei unterschiedlicher Vorspannung. Diese Versagensbilder können nur dann vermieden werden, wenn sichergestellt wird, dass der gesamte Deckenquerschnitt unter Druck steht.

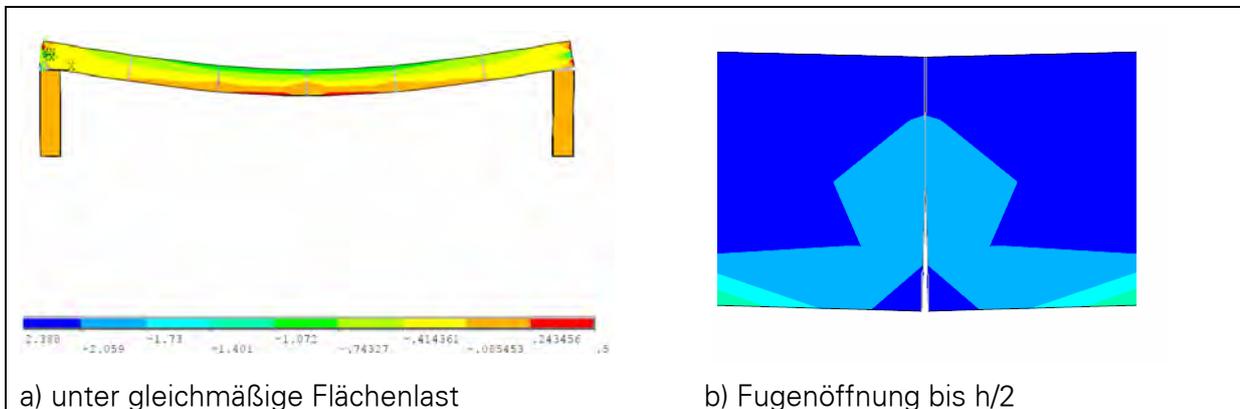


Bild 106 Deckenverformungen

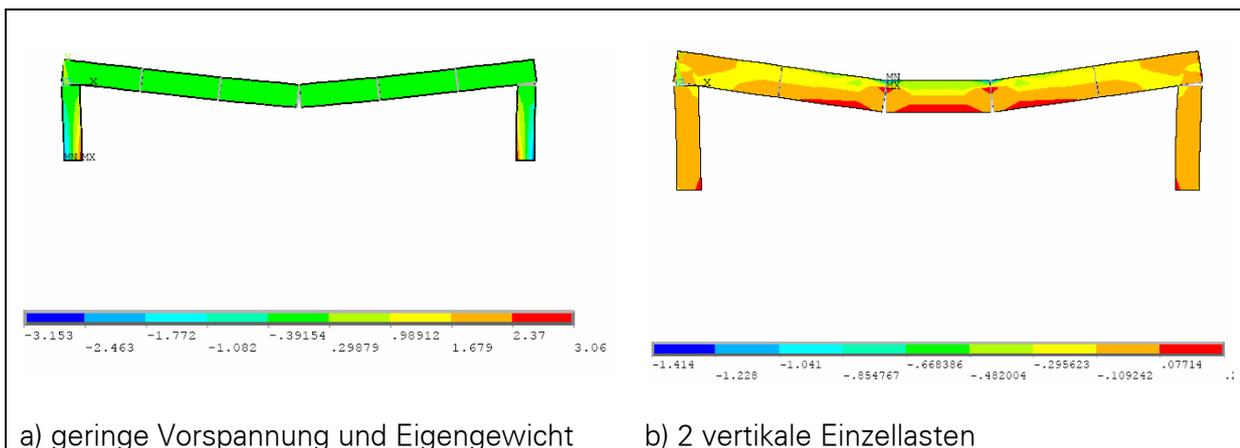


Bild 107 Unterschiedliche Fugenöffnung und Gelenkbildung infolge unterschiedlicher Belastung

Im Ergebnis der Modellierung kann gezeigt werden, dass das gewählte Wirkprinzip authentisch ist und sich zur konstruktiven Weiterbearbeitung eignet. Detaillierte Bauteiltests können auf Basis des vorgestellten numerischen Modells, ausgearbeitet werden.

4.3. Erläuterungen zur Gebäudestatik des Prototypenhauses

Um realitätsnahe Bauteilbelastungen für die Breitenanwendung zu untersuchen wurde eine Gebäudestatik auf Basis des im Ausblick (Abschnitt 7.8) vorgestellten Entwurfs erstellt. Die Statik wurde im XLS - Format erstellt und so variable gehalten, dass mögliche geometrische Änderungen adaptiert werden können.

4.3.1. Geometrische Konstruktive Vorgaben

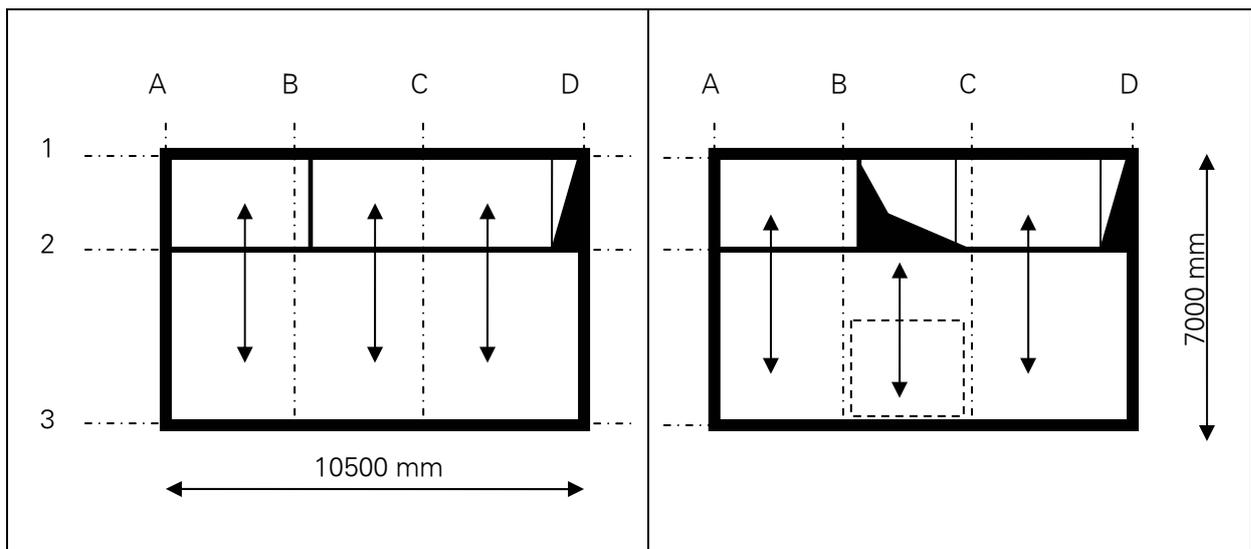


Bild 108 Decke über Oberschoß (OG)

Bild 109 Decke über Erdgeschoss (EG)

Folgende Vorgaben Festlegungen und Fragestellungen flossen in die Statik ein:

- Die Decken wurden als vorgespannte KS Decken ohne Verbund festgelegt. Alternativ sollte ein Deckeneinhangsystem aus Stahlträgern mit eingeschobenen unbewehrten Beton- bzw. KS - Planelementen untersucht werden. Folgende Vorgaben getroffen:
 - Rohdeckendicke von $d = 150 \text{ mm}$
 - Annahme: vorgefertigte Decken Größe $3500 / 7000 \text{ mm}$.
 - Bautenstände werden nicht betrachtet
- Die Wände wurden ebenso als lose eingelegte Spannstähle vorgespannte Wände ausgelegt. Dabei wurden folgende Vorgaben getroffen:
 - Dicke der tragenden Wände:
 - Tragende Außenwand $d = 150 \text{ mm}$
 - Tragende Innenwand $d = 115 \text{ mm}$
 - Nachweis der Vorspannung
 - Statik
 - Transport
- Die Gründung wurde als tragende Bodenplatte (Flachgründung) ausgelegt.
- Fenster und Türen wurde als Raumhoch angenommen. Somit war bei allen Öffnungen mit deckengleichen Unterzügen zuarbeiten.

- Die Innenwände im Oberschoß wurde als nichttragend angenommen
- Verwendete Normen
 - Lasten DIN 1055 Teil 1 bis 5, sowie Teil 100
 - Decken EC 6 – bewehrtes Mauerwerk; Alternativ: alte DIN 1053 Teil 100

Die Deckenhöhen wurden, vorbehaltlich Änderung aus dem TGA Konzept, wie folgt festgelegt:

- Oberfläche des fertigen Fußbodens (OFFF): 100 mm
- Oberfläche der Rohdecke (OF RD): 150 mm
- Unterfläche der Unterhangdecke (UF UHD): 100 mm

Es ergeben sich somit folgende, in Bild 110 dargestellte Höhen für die statische Betrachtung.

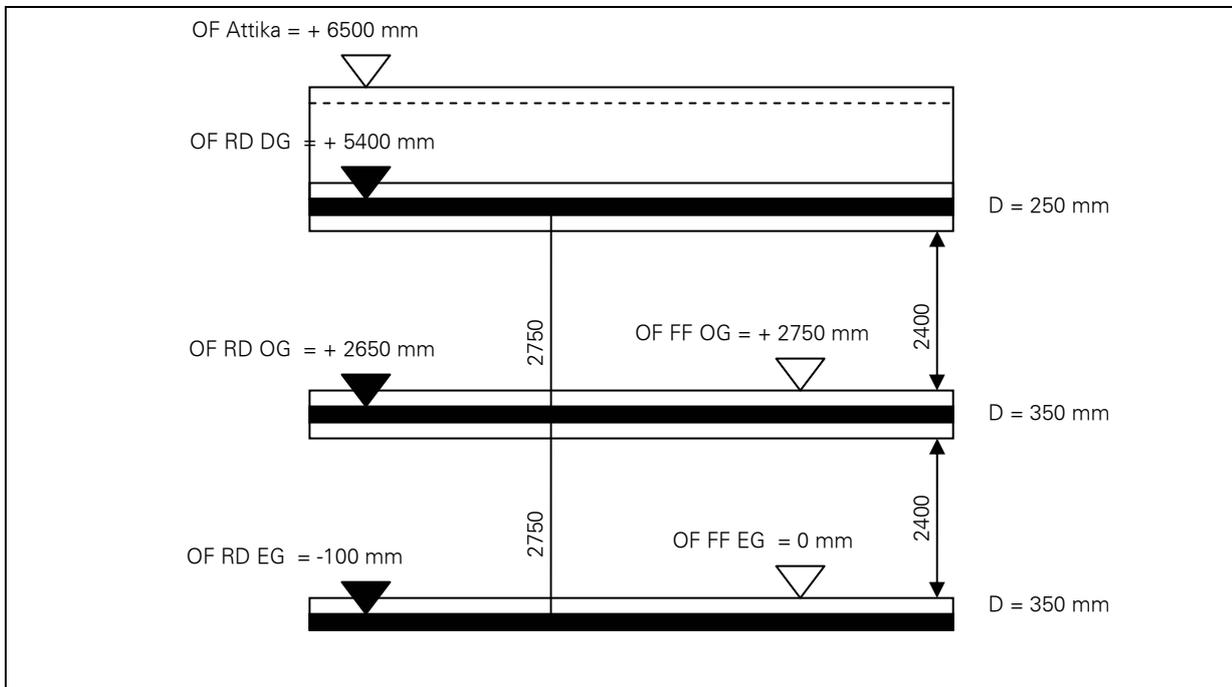


Bild 110 Roh- und Ausbauhöhen

4.3.2. Lasten

Aus den baukonstruktiven Aufbauten und der spezifischen Nutzung ergeben sich Lasten gemäß Tabelle 10.

Tabelle 10 Lastzusammenstellung

Lasten			
1.) Dach (DG)			
1.1) Eigenlasten			
Flachdach		Innenliegend entwässertes Warmdach, analog Flachdach - System FDT	
Auflast	50 mm	Kiesschüttung	1,00 [kN/m ²]
Dachabdichtung 2-Lagig	15 mm	Alternativ: 50 / 50 / 2.5 cm Betonplatten im Splittbett 1.Lage: Schutzbelag, lose verlegt, Stöße 100 mm überlappend 2.Lage: Abdichtung, Klettverschluß, lose verlegt, Stöße verschweißt	0,04 [kN/m ²]
Wärmedämmung	250 mm	mineralisch, trittfest, lose verlegt	0,25 [kN/m ²]
Gefälledämmung	50 mm	mineralisch, trittfest, lose verlegt, Höhenangabe im Mittel	0,05 [kN/m ²]
Dampfbremse	1 mm	PE - Folie, Lose verlegt	0,02 [kN/m ²]
Ausgleichsschüttung	14 mm	Mineralische Schüttung, lose verlegt, Höhenangabe im Mittel	0,03 [kN/m ²]
Rohdecke			
KS - Decke	240 mm		4,32 [kN/m ²]
Unterdecke	75 mm	Unterdeckensystem "2S11" FEMACELL Unterdecke 2X10 mm GF-Platten, auf Grund- und Tragprofil aus CD-Profil 60/27/06	0,27 [kN/m ²]
Abhanghöhe	25 mm	Lichtesmaß zum Rohbau (vorbehaltlich TGA)	
Gesamthöhe	720 cm	Eigenlasten aus Aufbau - Zwischensumme	5,98 [kN/m ²]
Zuschläge			
Installation		Abhängung bzw Auflage von bzw auf Decke / Dach	0,80 [kN/m ²]
PV-Anlage			2,50 [kN/m ²]
Summe Eigenlasten			9,28 [kN/m²]
1.2) Verkehrslasten			
Wartung		Zwei Personen	2,00 [kN/m ²]
Schneelast		Schneelast (Höhe < 200m ü NN, Schneezohne II)	0,34 [kN/m ²]
Summe Verkehrslasten			2,34 [kN/m²]
2.) Geschoßdecke (OG)			
2.1) Eigenlasten			
Fußboden		schwimmend verlegt, Nasszellen werden gesondert betrachtet	
Bodenbelag	10 mm	Linoleum	0,13 [kN/m ²]
Estrich	30 mm	Trockenestrich: "2E32" FEMACELL Estrich-Element, mit 2 x 10 mm GF-Platten, auf 10 mm MiWo (verdichtet)	0,24 [kN/m ²]
Ausgleichsschüttung	59 mm	Trockenschüttung (incl. Höhenausgleich z.B. Bad) min 10 mm max 60 mm	0,24 [kN/m ²]
Rieselschutz	1 mm	Baupappe lose verlegt, Stöße überlappt	0,01 [kN/m ²]
Rohdecke			
KS - Decke	240 mm	Vorgespannte KS - Decke	4,32 [kN/m ²]
Unterdecke	75 mm	Unterdeckensystem "2S11" FEMACELL Unterdecke 2X10 mm GF-Platten, auf Grund- und Tragprofil aus CD-Profil 60/27/06	0,27 [kN/m ²]
Abhanghöhe	25 mm	Lichtesmaß zum Rohbau (vorbehaltlich TGA)	
Gesamthöhe	440 mm	Eigenlasten aus Aufbau - Zwischensumme	5,21 [kN/m ²]
Zuschläge			
Installation		TGA Abhängung und Auflage auf Decke	0,80 [kN/m ²]
Trennwand		Nichttragende Innenwände	0,80 [kN/m ²]
Summe Eigenlasten			6,81
2.2) Verkehrslasten			
Nutzlast		Wohnräume mit Decken ohne ausreichende Querverteilung	2,00 [kN/m ²]
Summe Verkehrslasten			2,00 [kN/m²]
3.) Bodenplatte (EG)			
3.1) Fußboden			
Bodenbelag	10 mm	schwimmend verlegt, Nasszellen werden gesondert betrachtet Linoleum	
4.) Windlast			
		Windlast, Windzone 2, Binnenland, h<10 m	0,52 [kN/m ²]

4.3.3. Statisches System

Decken

Die Decke über OG ist über zwei Felder durchgehend gespannt, wodurch für das Biegemoment drei maßgebende Schnitte entstehen (Feld 1, Stütze, Feld 2). Durch die zentrische Vorspannung und den symmetrischen Querschnitt hat die Decke im Feld und über der Stütze die gleiche Tragfähigkeit. Maßgebend werden daher das betragsmäßig größte Biegemoment und die größte Querkraft in der Deckenplatte über OG.

Die Decke über EG ist ebenfalls ein Zweifeldsystem mit dem Unterschied, dass zwischen Achse B-C durch die Treppenöffnung in der Deckenplatte lokal nur eine Einfeldplatte vorhanden ist. Infolge des fehlenden 2. Feldes und der daraus ausfallenden Randeinspannung, kommt es in diesem Bereich zu den betragsmäßig größten Biegemomenten in der Platte, welche als maßgebend für die statische Berechnung verwendet wurden.

Unterzüge

Die Unterzüge über den Öffnungen bestehen aus zwei gegenüberstehenden U-Profilen, welche aus der Deckenlast auf Biegung und Querkraft beansprucht werden.

Wände

Der Nachweis der Wände erfolgt auf Teilflächenpressung aus den Unterzügen sowie auf Lastausmitte infolge Randeinspannung und Windlast. Bei dem Nachweis der Biegung werden aufgrund der Kombination der Nutzlasten aus Decke und Dach mit Windlast insgesamt 18 Lastfälle unterschieden.

Weiterhin wurde eine Wandvorspannung beachtet, welche zur Stabilisierung der Wand beitragen soll.

Beim Nachweis auf Querkraft treten für die Wände in Gebäudequerrichtung die größten Beanspruchungen auf, da nur 2 wirksame Schubscheiben vorhanden sind. Die Kraftresultierende aus Wind liegt um 10% der Gebäudelänge neben der Achse zur Berücksichtigung ungleichmäßiger Anströmintensitäten.

Fundament

Bei der Ausbildung des Fundamentes wurden zwei Varianten untersucht. In Variante 1 sieht das Haus auf einem zentrisch vorgespannten Plattenfundament aus KS-Plansteinen mit $h=30\text{cm}$. Variante 2 ist ein vorgespanntes Streifenfundament mit ebenfalls 30 cm Höhe.

4.4. Bauphysikalische Aspekte der Untersuchungen

4.4.1. Wärmeschutz und Tauwasserfreiheit

In den eingangs definierten Kennwerten (siehe Abschnitt 3.8) wurde für die opaken Außenwände eine Ausführung auf Passivhausniveau festgelegt, um die Zielgröße Nullenergiegebäude zu erreichen. In diesem Zusammenhang wurde ein Wärmedurchgangskoeffizient von $\leq 0.12 \text{ W/m}^2\text{K}$ festgelegt sowie eine tauwasserfreie und luftdichte Konstruktion gefordert. Die in Bild 111 aufgezeigte Berechnung nach DIN 4108 (Glaser-Verfahren) weist die Tauwasserfreiheit des Außenwandaufbaus sowie das Erreichen des geforderten Wärmedurchgangskoeffizienten nach. Die bauphysikalischen Anforderungen an die Luftdichtheit können nur durch physische Tests bestätigt werden.

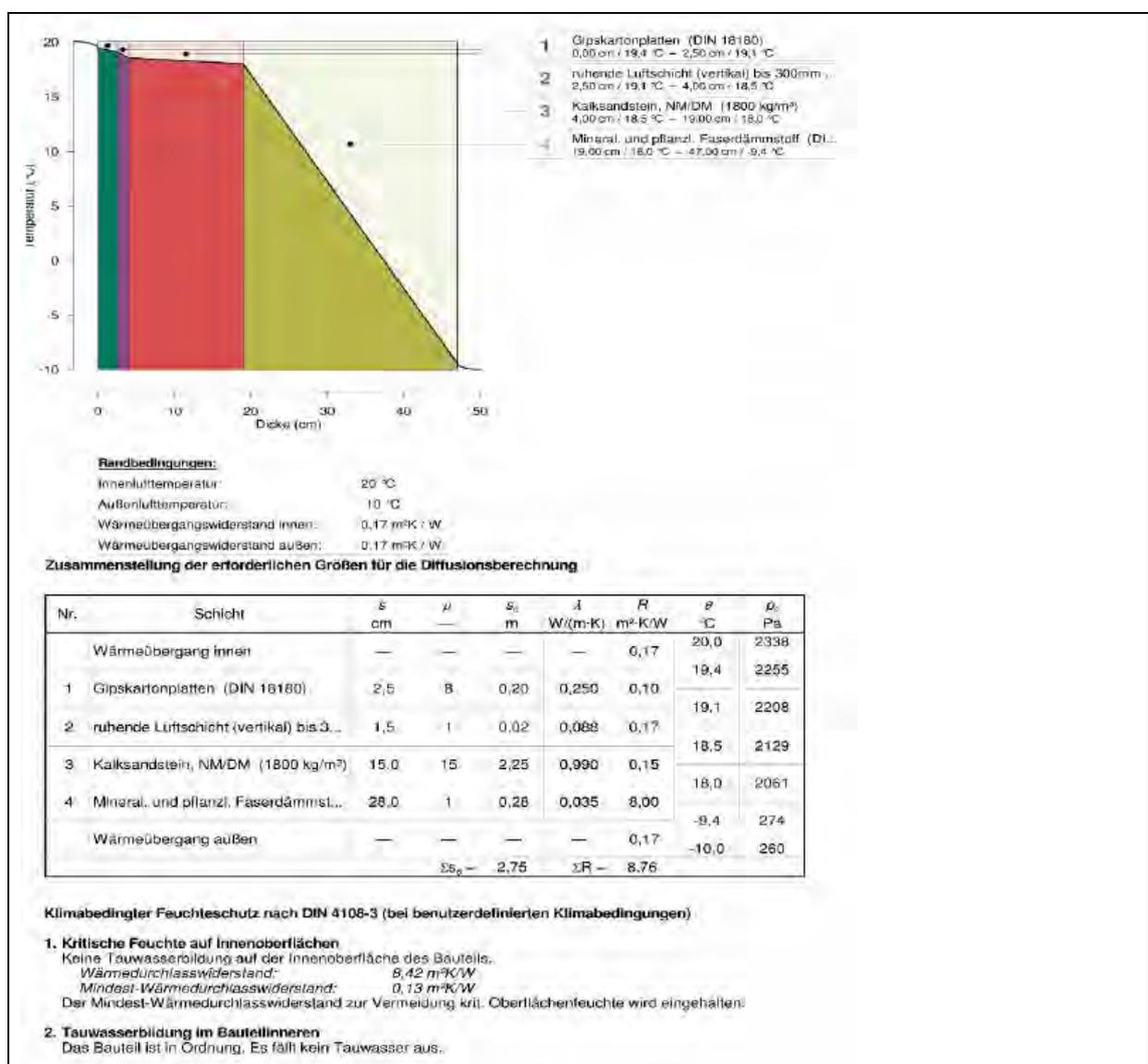


Bild 111 Auszug der Berechnungen nach DIN 4108

4.4.2. Wärmebrückenfreie Unterkonstruktion

Um die gewünschte Demontagefreundlichkeit zu gewährleisten, wurde eine Fassadenkonstruktion in Differentialbauweise gewählt. Üblicherweise stellen diese Unterkonstruktionen, die bei vorgehängten hinterlüfteten Fassaden unerlässlich sind, nicht zu vernachlässigende Wärmebrücken dar. Die resultierenden U-Werte können dadurch um bis zu 15% verschlechtert werden [146]. Wärmebrückenfreie Unterkonstruktionen, die auf Materialalternativen wie den GFK/Alu-Verbund setzen, kommen wegen der schlechten Rezyklierbarkeit von GFK-Kompositen nicht in Frage.

Die Wärmebrücke muss folglich ausschließlich durch eine Reduktion der wärmeübertragenden Querschnittsfläche sowie durch dem Ersatz des wärmeleittechnisch ungünstigen Aluminiums durch Edelstahl erfolgen.

Die gewählte Unterkonstruktion der Firma mCon aus Edelstahl-Stabwerken zur Lastabtragung in der Dämmebene verursacht nur minimale Wärmeströme und kann daher als wärmebrückenfrei bezeichnet werden, da ein Wärmebrückenzuschlag von ca. $0,01\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ resultiert (siehe Passivhauszertifikat der Produktlinie) [194].

Die Abhangkonstruktion fügt sich ideal in das modulare Konstruktionsraster ein, ist unproblematisch wiederverwendbar und als Monostoffbauteil (Edelstahl) zusätzlich hervorragend stofflich rezyklierbar.

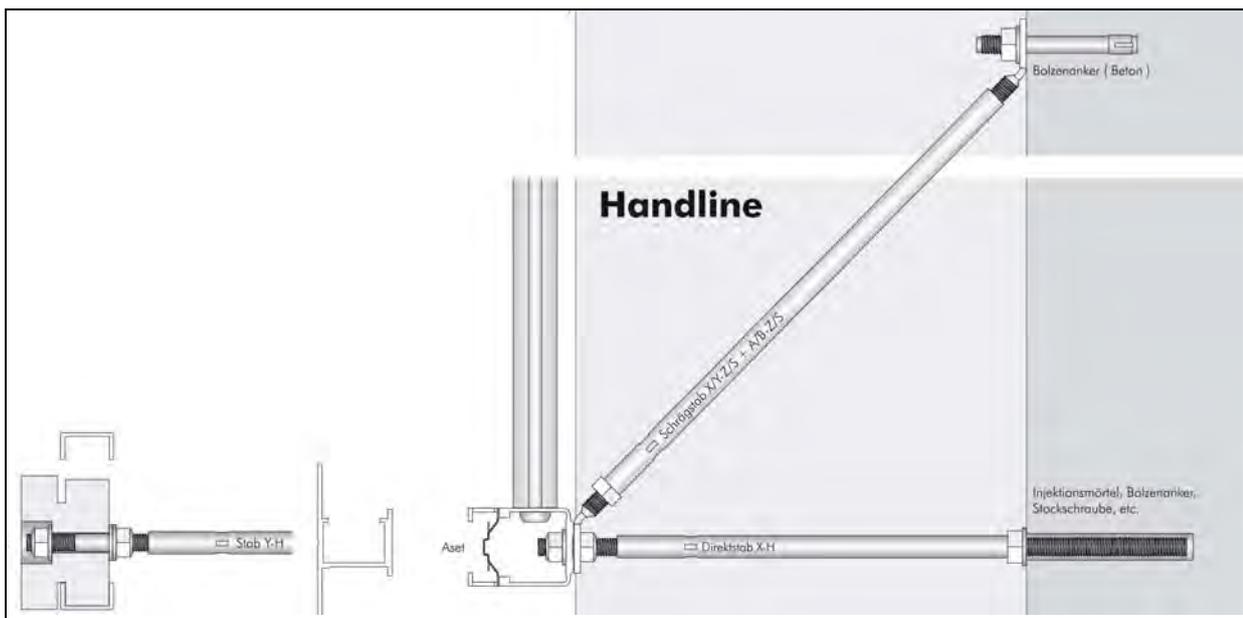


Bild 112 Beispiel: Wärmebrückenfreie Unterkonstruktion von mCon [187]

4.5. Integration der TGA - Installationen im Wand Decken Knoten

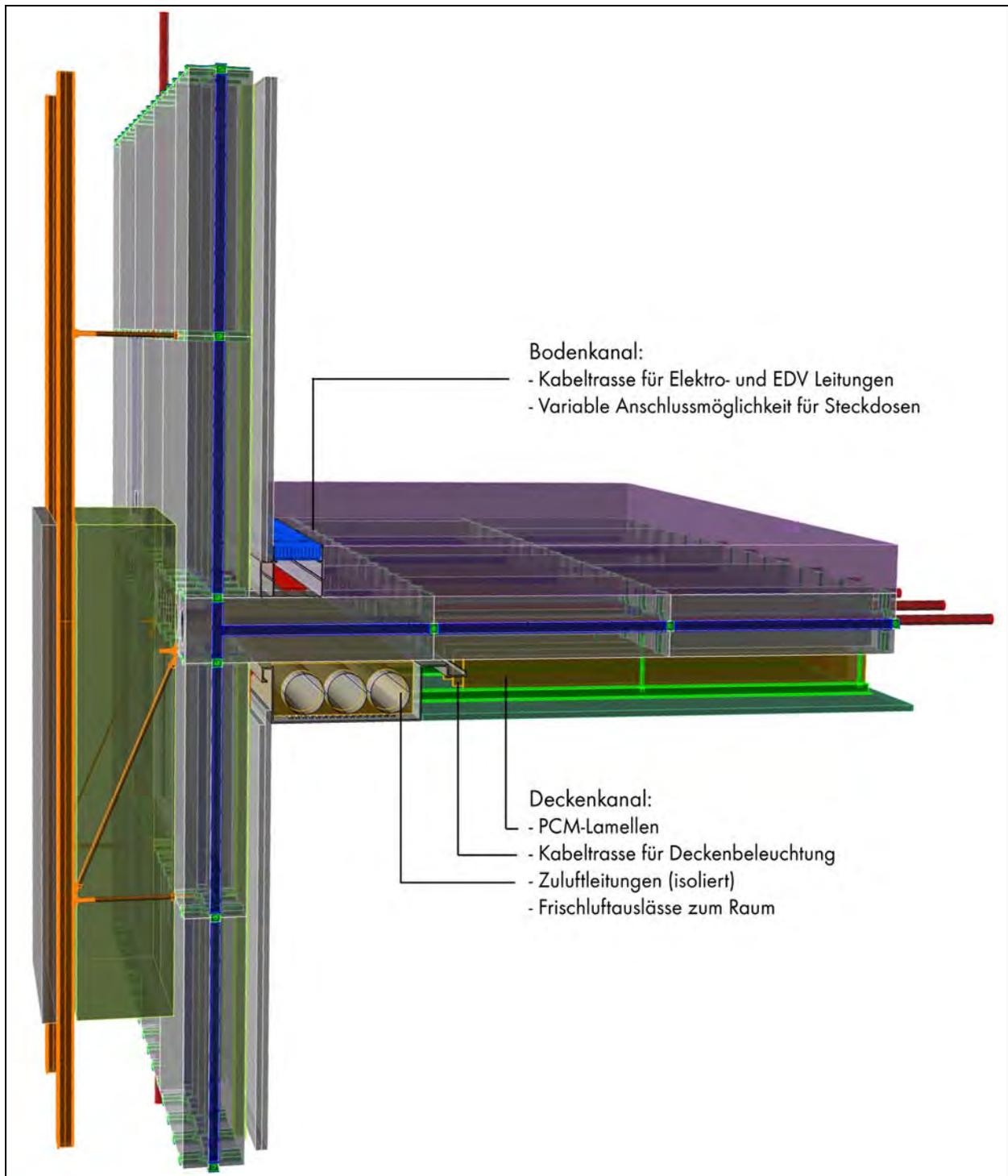


Bild 113 *Skizzenhafte Darstellung der Integration der Installationskanäle in den Wand-Decken-Knoten*

Während die vertikale Verteilung der Versorgungs- und Steuerungsleitungen der technischen Gebäudeausrüstung konzentriert in einem zentralen Schacht erfolgen kann und somit für die Anpassungs- und Rückbaufähigkeit unproblematisch ist, stellt sich die horizontale Verteilung deutlich aufwendiger dar.

Da sich das Projekt ReMoMaB auf Gebäudearten kleineren Ausmaßes konzentriert, kann vorausgesetzt werden, dass jeder Raum nennenswerter Größe an eine Außenwand grenzt. Aus dieser Gegebenheit, eröffnet sich die Möglichkeit, an der Schnittstelle zwischen den Geschossdecken und den Außenwänden umlaufende Kanäle zu integrieren. Diese haben automatisch einen direkten Zugang zu sämtlichen Räumen ohne dabei die Raumstruktur im Gebäudeinneren zu beeinflussen. Dieses System bietet dadurch ein Maximum an Flexibilität und Anpassungsfähigkeit im Bezug auf die Raumaufteilung und Änderungen bei der Raumnutzung.

Das in Bild 113 und 106 schematisch dargestellte System ist vollkommen flächenbündig und formschlüssig in den Wand-Decken-Knoten integriert und besteht jeweils aus zwei Kanälen. Der erste Kanal befindet sich im Bereich der abgehängten Decke und führt die Zuluftleitungen sowie eine Elektrotrasse für die Beleuchtung, der zweite Kanal in der Ebene des Bodenaufbaus führt sämtliche elektrischen Installationen sowie ggf. Leitungen der EDV.

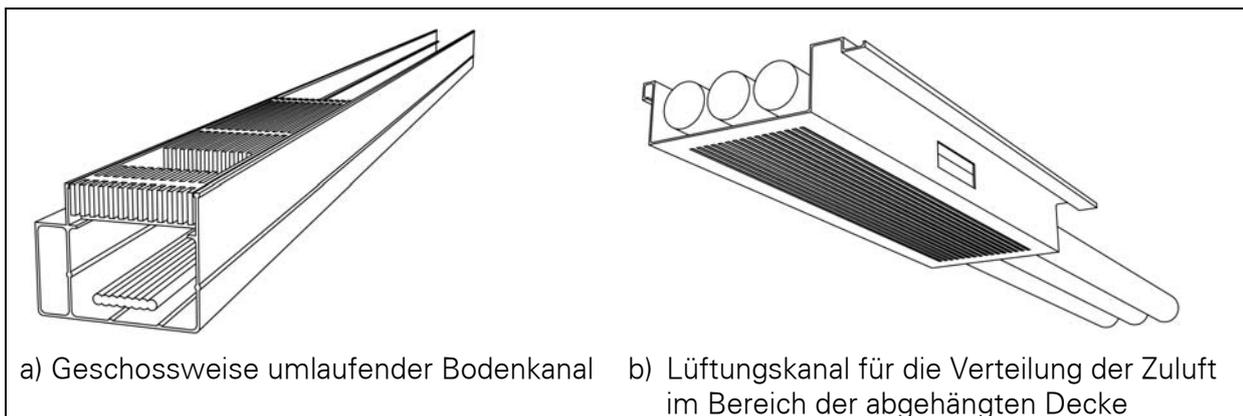


Bild 114 Leitungsführung Zuluft, sowie Stromkreis für Beleuchtung

4.5.1. Deckenkanal: Leitungsführung Zuluft, sowie Stromkreis für Beleuchtung

Sämtliche Räume werden wie zuvor beschrieben ausschließlich mittels vortemperierter Zuluft beheizt (Luftheizung). Die warme Zuluft gelangt vom Technikraum über den zentralen Schacht in die Geschosse und wird dann mittels des umlaufenden Deckenkanals zu den jeweiligen Räumen transportiert. Dieser besteht aus einem u-förmigen extrudierten Aluminiumprofil, in welches die gedämmten Lüftungsrohre lose eingelegt werden. Der Durchmesser der Lüftungsrohre ist maßgeblich für die Bauhöhe der abgehängten Decke verantwortlich. Ein möglichst flacher Kanal ist wünschenswert. Da der Querschnitt des Lüftungskanals das Seitenverhältnis von 1:3 nicht unterschreiten sollte, wurde auf ein System mit drei unabhängigen Luftkanälen gesetzt. Diese bieten zusätzlich die Möglichkeit, verschiedene Räume regelungstechnisch variabel zu belüften. Die Modullänge der Aluminiumprofile ist auf die Modulmaße der Kalksandsteine abgestimmt. Sonderelemente haben eine Aussparung an der Unterseite um Luftauslässe anzuschließen. Somit wird maximale Flexibilität sowohl bei der Kanalkonstruktion wie auch bei der Verteilung der Luftauslässe erzeugt. Die Abluft

wird nicht in allen Räumen abgeführt sondern geschossweise durch direkt am zentralen Schacht gelegene Räume (Bad, WC, Küche). Eine entsprechende Luftdurchlässigkeit zwischen den Räumen muss gewährleistet werden, damit das Druckgefälle zwischen Räumen mit Zuluft und Räumen mit Abluft zu dem gewünschten Luftaustausch führen kann.

Einige Aluminiumprofile des Deckenkanals haben zusätzlich zum Luftauslass an der Unterseite eine Perforation an der Seitenfläche zur Abhangdecke, um einen direkten Luftauslass in die mit PCM-Lamellen bestückte Abhangdecke zu ermöglichen (siehe Bild 114 b). Dadurch können Phase-Changing-Materials in der Abhangdecke direkt durch die konditionierte Luft „aufgeladen“ werden. Die Luft strömt danach weiter in den Raum. Durch das Einbringen von zusätzlicher Speichermasse in Form von Phase-Changing-Materials wird die Wärmespeicherfähigkeit des Gebäudes zusätzlich erhöht. Neben den PCM-Lamellen im Zwischenraum der abgehängten Decke kann auch die Abhangdecke selbst aus PCM-haltigem Gipskarton ausgeführt werden (z.B. Micronal). Mittels einer direkten Durchströmung des Deckenzwischenraums mit konditionierter Luft, die aus den seitlichen Auslässen des umlaufenden Kanals kommt, wird die zusätzliche thermische Masse direkt aktiviert.

Zusätzlich enthält der Deckenkanal noch die Möglichkeit eine Versorgungsleitung für die Deckenbeleuchtung zu integrieren. Dadurch können aufwändige Verkabelungen vom Bodenkanal Richtung Decke, die sonst bspw. für Deckenleuchten erforderlich wären, gespart werden.

Werden alle Leuchten auf dem jeweiligen Geschoss mittels LED-Leuchtmitteln ausgestattet, bleibt die elektrische Leistungsaufnahme auf einem derart niedrigen Niveau, dass ggf. die Deckenleuchten des ganzen Geschosses an einem Stromkreis hängen können.

Durch diese Verteilungsart werden Durchdringungen der Decken überflüssig, das System bleibt modular. Es ist zu prüfen ob eine bauliche Kombination der Ringleitung mit dem umlaufenden Lüftungskanal vorgenommen werden kann, um die Installation zu vereinfachen. Außerdem muss überprüft werden, ob dies baurechtlich zulässig ist (da nach Norm jeder Raum einen separaten Stromkreis haben muss).

4.5.2. Bodenkanal: elektrischer Kreislauf für Steckdosen und Geräte sowie EDV

Sämtliche weiteren Leitungen für Steckdosen, Geräte und andere Stromverbraucher sowie ggf. EDV-Leitungen werden im Bodenkanal geführt. Dieser im Sockelbereich umlaufende Unterflurkanal ist flexibel an jeder Stelle zugänglich. Mittels Piercingelementen (siehe Bild 90) können beliebig Steckdosen oder Geräte angebracht werden. Die Zahl der Stromkreise hängt von der Größe des Gebäudes ab, kann jedoch ausschließlich nach dem Bedarf ermittelt werden, da die Steuerung unabhängig per Funk erfolgt. Großgeräte mit mehr als 2000W erhalten einen separaten Stromkreis.

Die Kanalgröße ist so ausgelegt, dass auch zu einem späteren Zeitpunkt jederzeit nachgerüstet werden kann (siehe Bild 114)

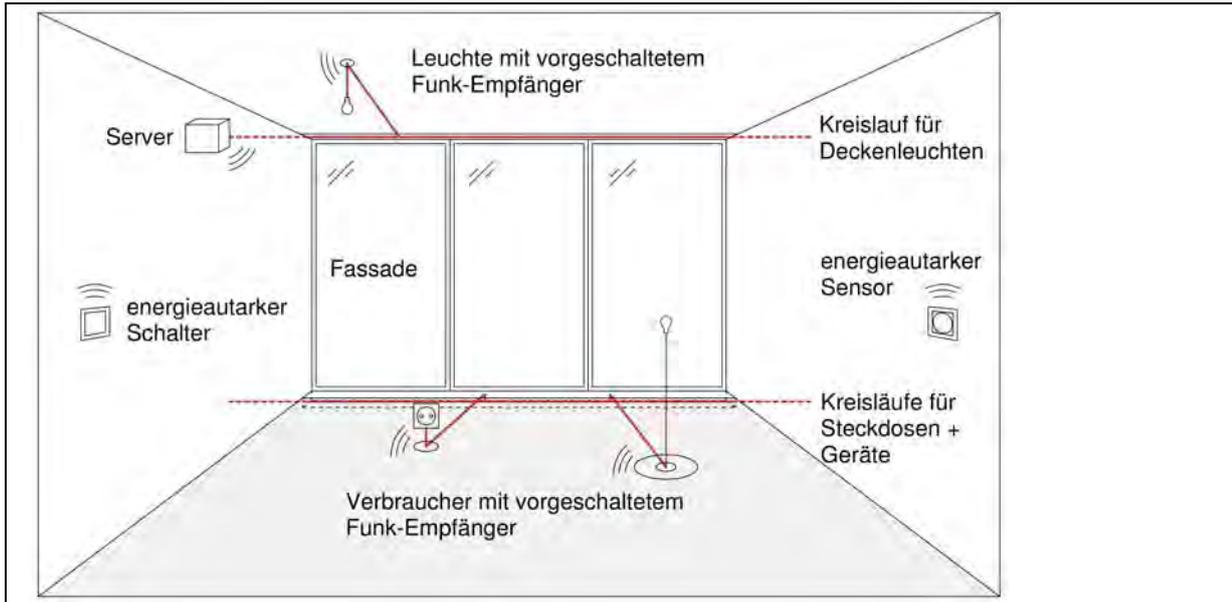
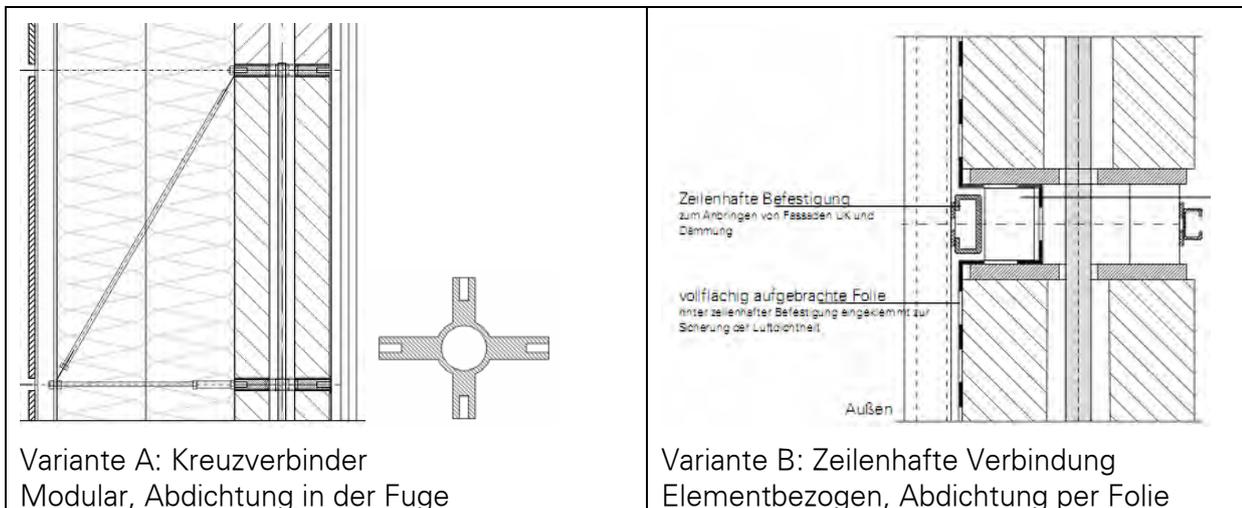


Bild 115 Anordnung der Installationsleitungen in zwei umlaufenden Kanälen an der Fassade

4.6. Variantenbildung und -vorstellung



Variante A: Kreuzverbinder
 Modular, Abdichtung in der Fuge

Variante B: Zeilenhafte Verbindung
 Elementbezogen, Abdichtung per Folie

Bild 116 Entwickelte Varianten aus Vorgespannten KS-Steinen, die sich vollständig demontieren lassen am Beispiel des Wand-Decken-Knotens

4.6.1. Variante A: Vorspannung mit „modular-kreuzartiger“ Verbindungsart

Die ausgearbeitete Variante A basiert auf dem unter Abschnitt 4.1.2 erläuterten modularen Ansatz und verbindet die unter Abschnitt 2.6.3 ausgewählten Grundprinzipien. Dem Ansatz der Differentialbauweise folgend, findet hierbei eine Funktionstrennung statt. Das Prinzip „02 Verzahnung“ wird entsprechend weiter ausgearbeitet und übernimmt in erster Linie die Aufgabe der Verbindung Schicht-Schicht. Das Prinzip „01 Vorspannung durch Kanäle“ ver-

bindet hingegen die einzelnen Module miteinander zu ganzen Wandelementen. Die Wahl dieser beiden Grundprinzipien führt im Zuge der weiteren Ausarbeitung zu der Möglichkeit, neben der sinnvollen Funktionstrennung, zusätzliche positive Synergie-Effekte der beiden Prinzipien zu erzielen. So wurden diese nicht getrennt voneinander optimiert, sondern parallel so weiterentwickelt, dass sie sich gegenseitig in ihren Funktionen unterstützen. In Abschnitt 4.7.1 wird dieser Prozess näher erläutert.

4.6.2. Variante B: Vorspannung mit „elementbezogen-linearer“ Verbindungsart

Die unter Abschnitt 4.1.2 dargestellten Vor- und Nachteile eines modularen Ansatzes auf der einen und eines elementbezogenen Ansatzes auf der anderen Seite lassen den Schluss zu, dass ein großmaßstäblicherer Ansatz auf der Ebene eines Elementes den heute im Bauen üblichen Verfahrensweisen sehr gut gerecht werden kann. Ebenso minimiert ein solcher Ansatz die Anzahl der Verbindungsmittel und damit den Aufwand für Montage und Demontage. Der Fokus bei diesem sog. „elementbezogen-linearen“ Ansatz liegt dabei auf der tragwerkstechnischen Lösung des vorgespannten Trockenmauerwerks sowohl in vertikaler als auch in horizontaler Ebene. Die Verbindung Schicht-Schicht wird unter dieser Prämisse erst in einem sekundären Schritt behandelt, bei welchem auf heute bereits existierende Produkte auf dem Markt zurückgegriffen wird. Über den Projektverlauf stellte sich heraus, dass die größten Herausforderungen des ReMoMaB - Ansatzes in dem sog. „Wand-Decken-Knoten“ lagen, da hier die Spannglieder der Vertikalen und der Horizontalen zusammenkommen. Gleichzeitig müssen die vertikalen Wandscheiben über diesen Knotenpunkt hinweg mittels einer Kopplung der Spannglieder verbunden werden. Die Variante B identifiziert diese Herausforderung als Ausgangspunkt der weiteren Forschung.

4.7. Ausarbeitung und Detaillierung: Variante A

Im Folgenden wird die Variante A vorgestellt und weiter ausgearbeitet. Unter Abschnitt 4.7.1 wird zunächst die grundlegende Entwicklung der sogenannte „Kreuzverbinder“ veranschaulicht. Während hieran anschließend eine Auswahl von Illustrationen die Forschungsarbeiten exemplarisch veranschaulichen und einen Einblick in die Variantenentwicklung liefern, wird die final ausgewählte Variante A unter Abschnitt 4.7.3 in technischen Zeichnungen dargestellt. Untersuchungen zur statischen Bemessung, zu den bauphysikalischen Eigenschaften, zum Innenausbau und zur Integration der Technischen Gebäudeausstattung folgen. Mit der Ausarbeitung des Wand-Decken-Knotens unter Abschnitt 4.7.4 werden die grundlegenden Überlegungen abgeschlossen und visualisiert.

4.7.1. Entwicklung von „Kreuzverbindern“

In Bild 117 ist die Vorgehensweise hierbei als evolutionäre Folge von Entwurfsschritten dargestellt. Ausgehend von dem bereits auf dem Markt existierenden Modul „KS - Quadro E“ der Firma Xella wird zunächst die Vorspannung innerhalb der vertikalen Kanäle näher untersucht.

Hierbei wurde festgestellt, dass bei der heute gängigen Baupraxis (auch ohne Vorspannung) zur sachgerechten Verlegung der ausgewählten Mauersteine sog. „Zentrierhilfen“ zum Einsatz kommen (Zwangspressung). Diese übernehmen die Aufgabe, für eine exakte Mauerung und entsprechend geringe Toleranzen zu sorgen. Sie sind monofunktional, stellen ein ge-

sondertes Material innerhalb des konstruktiven Teils der Wand dar und benötigen einen eigenen Arbeitsschritt sowie eine extra hierfür modulierte Steingeometrie.

In einem ersten Schritt wurde diese stiftförmige durch eine ringförmige Zentrierhilfe ersetzt, die in die Achse der ohnehin vorhandenen Vorspannkanäle versetzt wurde. Durch die Übereinstimmung der Achsen des Vorspannglieds und des Zentrierrings ermöglicht letzterer ein vereinfachtes Positionieren der Spannglieder ohne Verkanten und schützt diese gleichzeitig vor Feuchtigkeit, die am ehesten in der Lagerfuge an den Stahl gelangen könnte. Des Weiteren entsteht so innerhalb eines Moduls eine klare modulare Ordnung: Ein Modul der Länge 500 mm lässt sich somit in 4 x 125mm Abschnitte unterteilen, was große Vorteile hinsichtlich der flexiblen Anordnung der Module mit sich bringt (vergleiche Abschnitt 2.6).

In einem zweiten Schritt wurde der Zentrierring als Ausgangspunkt der Verbindung Schicht-Schicht aktiviert. Durch seine Lage in Steinmitte und die Verzahnung sowohl mit einem unteren als auch mit einem oberen Modul wird erwartet, dass er für das Anbringen weiterer Komponenten (bspw. der Unterkonstruktionen für den äußeren Fassadenaufbau) sehr gut geeignet ist. An ihn wurden aus diesem Grund zunächst nach Innen und Außen gerichtete zylindrische Komponenten angeordnet, die zur jeweiligen Außenseite hin mit einem Innengewinde ausgestattet sind. Sie ersetzen somit den heute im Mauerwerksbau noch üblichen Dübel, welcher mittels Bohrung unwiderruflich in den Stein eingesetzt wird. Mit der entwickelten Komponente besteht nun die Möglichkeit, alle weiteren Schichten ohne Eingriff in die Steinsubstanz anzubringen. Dies fördert nicht nur die Sortenreinheit der Module sondern insbesondere deren Unversehrtheit, welche zu einem hochwertigen Recycling in Form einer direkten Wiederverwendung führt.

In einem dritten Schritt wird vorgeschlagen, die Komponenten aus einem einzigen Formstück zu fertigen. Da die Stückzahl dieser Komponenten entsprechend groß sein wird, würde ein solcher Ansatz den Fertigungs- und vor allem den Montage- und Demontageprozess stark rationalisieren. Darüber hinaus würde die Störanfälligkeit verringert und evtl. Komplexitäten aufgrund von verschiedenen Gewinderichtungen eliminiert. Im Kontext sehr langer Lebenszyklen im Bauwesen wäre dieses Formstück also entsprechend robust, um auch über viele Jahrzehnte hinweg während der Nutzung, während der De- und Remontage und auch während weiterer Lebenszyklen voll funktionstüchtig zu bleiben. Je nach Materialwahl könnte in diesem Zuge auch das Problem der Wärmeleitung unterbunden werden.

In einem vierten Schritt wird das beschriebene Prinzip auch auf die Längsrichtung des Moduls, also in Achsenmitte der Wandscheibe, angewendet. Somit entsteht ein so genannter „Kreuzverbinder“. Dieser bietet die beschriebenen Fixationspunkte auch an der Stirnseite der Module an und erlaubt zusätzlich die Kopplung der einzelnen Kreuzverbinder untereinander, was ebenso zu einer besseren Abdichtung der Lagerfuge führt. Ziel dieses Schrittes ist es, mit diesem Grundprinzip ebenso das Anbringen weiterer Gebäudekomponenten wie bspw. Fensterrahmen oder Türrahmen sowie die Verbindung einzelner Wandelemente sowohl an Gebäudeaußenecken als auch beim Anschluss von Innenwänden zu ermöglichen.

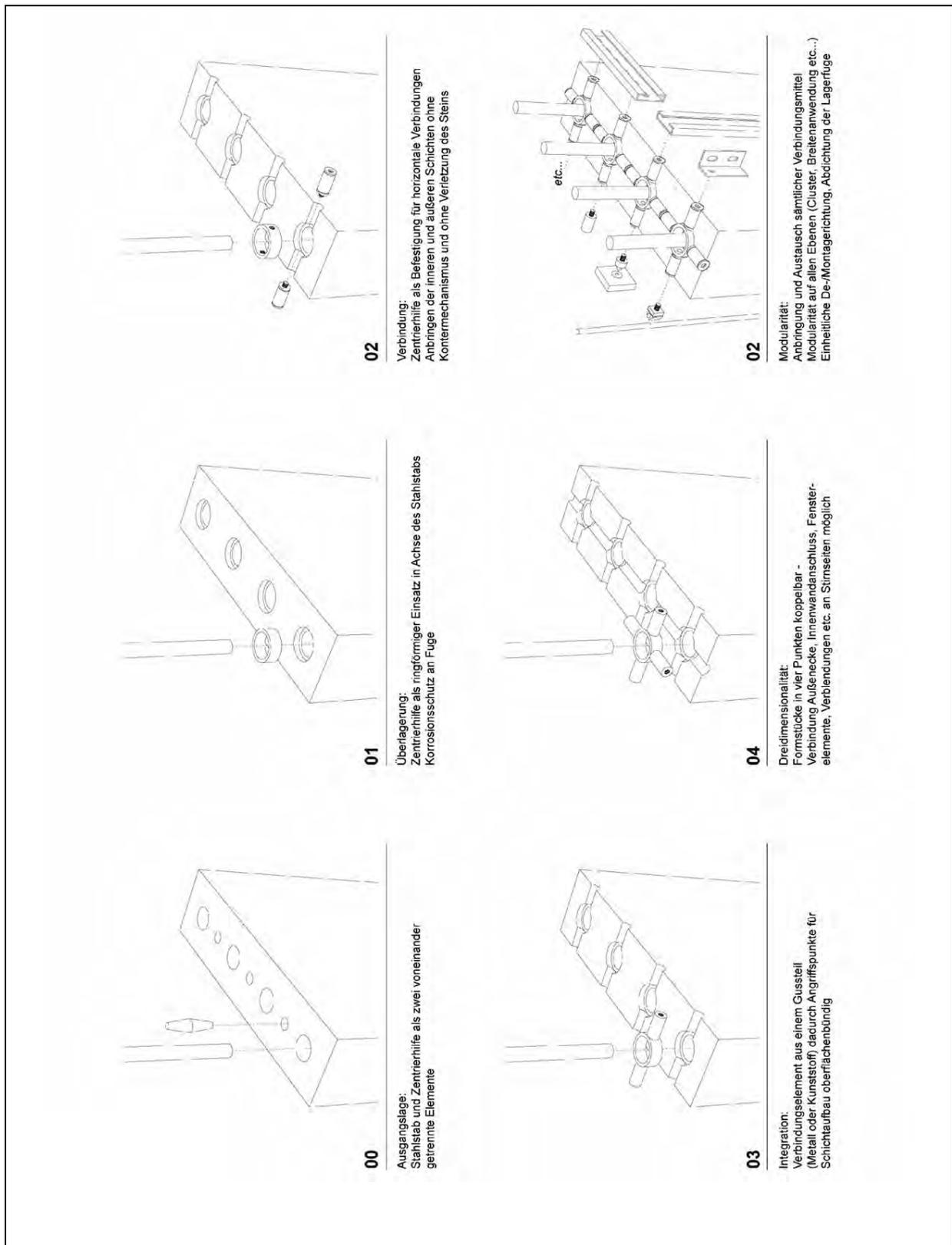


Bild 117 Evolutionsschritte in der Entwicklung von Kreuzverbindern

Die Ober- und Unterseite des Moduls erhält eine der Geometrie der Kreuzverbinder entsprechende negative Modellierung, die idealerweise beim Pressvorgang der Steine durch entsprechende Formstücke erzielt werden kann. Hierauf wurde bei der Wahl der Geometrie geachtet. Im Rahmen des Forschungsprojektes ReMoMaB war aus Kostengründen diese, den realen Bedingungen entsprechende Fertigungsweise leider nicht möglich. Um Versuche durchführen zu können und Erkenntnisse über das Verhalten des Materials Kalksandstein zu erhalten, wurde die Steingeometrie mit Hilfe einer CNC-Fräse durch die Firma Xella entsprechend hergestellt. Um bei den praktischen Tests allerdings die realen Bedingungen abbilden zu können, wurde die Geometrie so angepasst, dass sie der durch Pressverfahren herstellbaren Geometrie entspricht.

Der fünfte Schritt, der in Bild 117 dargestellt ist, zeigt vier Kreuzverbinder und vier Vorspannelemente in eingebautem Zustand innerhalb eines Moduls der Größe 500 x 125 x 500 mm. Exemplarisch wird an der Außen- und Innenseite aufgezeigt, welche Möglichkeiten sich in Bezug auf die Verbindung Schicht-Schicht ergeben. Auf beiden Seiten lassen sich bereits auf dem Markt befindliche Systeme anbringen. Darüber hinaus besteht auch die Möglichkeit, Clip- oder Magnetverbindungen (insbesondere für den Innenausbau) zu verwenden. Bspw. könnten so auch Elektro-Kabel in einem schmalen Zwischenraum zwischen dem tragenden Wandelement und der raumseitigen Verkleidung geführt werden.

4.7.2. Übersicht zur Entwicklung anhand von Studien

Im Zuge der weiteren Entwicklung wurden im Rahmen des Forschungsprojektes umfangreiche Studien zu folgenden Themenschwerpunkten innerhalb der Variante A vorgenommen:

- Dichtung der Stoßfugen (Anordnung der Vorspannglieder, Verzahnung, Dichtungsbänder)
- Anordnung der Module (Kreuzverband, Läuferverband)
- Anzahl der Vorspannglieder (Steingeometrie, Flexibilität bei Wiederverwendung)
- Anschluss der Decke an die Wand (Anbindung, Einbindung, Versatz)
- Flexibilität des Kreuzverbinders (Schraub- und Steck- / Innen- und Außenverbindungen)
- Kopplung der Vorspannglieder (Aufwand und Abläufe)
- Sondermodule an Wand-Decken-Knoten (Anzahl und Geometrie, Wand und Decke)
- Fertigung, Transport und Handling (vollautomatische Mauermaschinen, Elemente)

Im Folgenden werden diese Themen anhand von Illustrationen auszugsweise kurz dargestellt (s. Bild 118 bis Bild 128). Auf eine detaillierte Erläuterung wird im Rahmen des Endberichts verzichtet, da die ausgewählte Variante die wesentlichen Erkenntnisse dieser Studien beinhaltet. Diese wird unter Abschnitt 4.7.3 bis 4.7.4 ausführlich dargestellt.

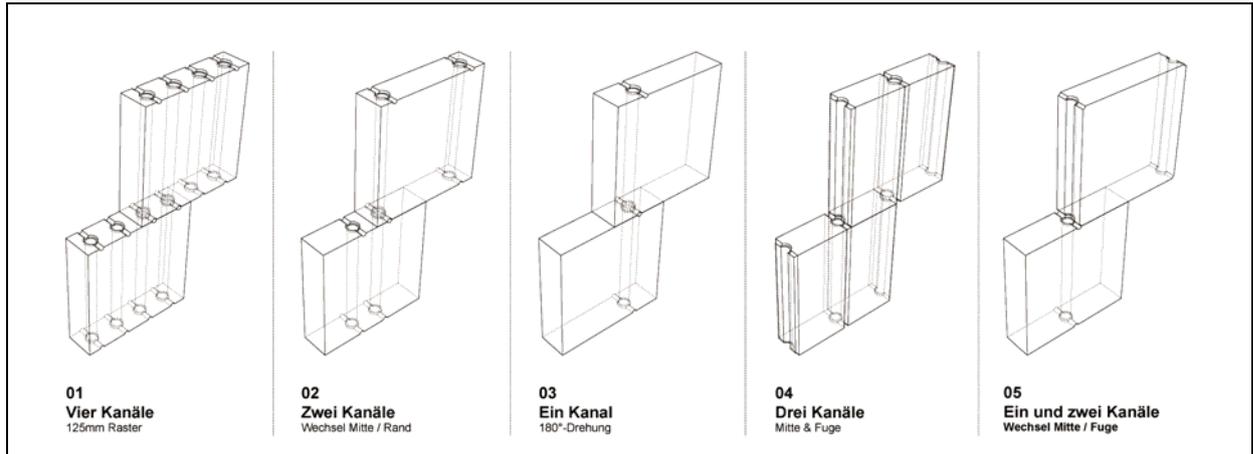


Bild 118 Studie zur Position der Kanäle in Abhängigkeit von der Anzahl der Module

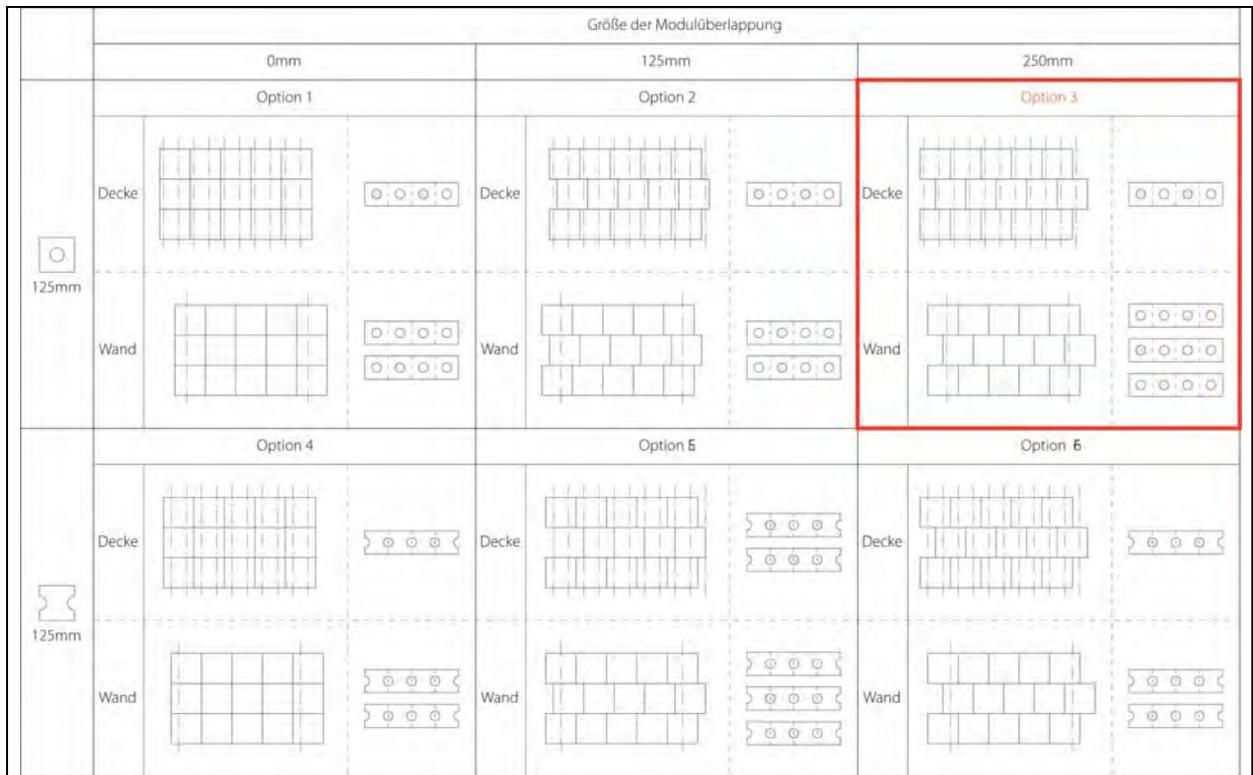


Bild 119 Studie zur Anordnung der Module im Wand- und Deckenelement

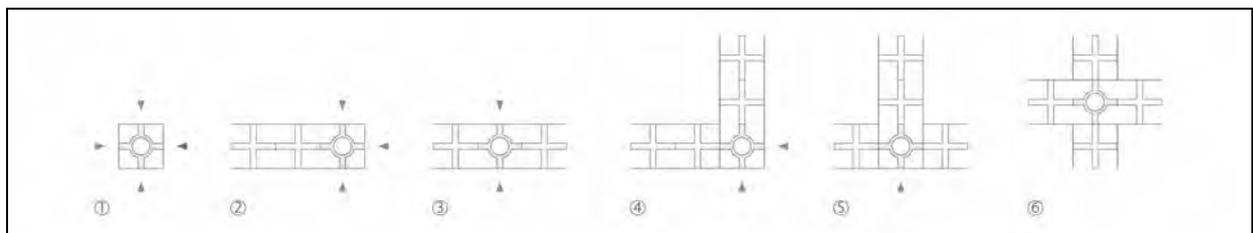


Bild 120 Studie zu verschiedenen Verbindungsarten mittels des „Kreuzverbinders“

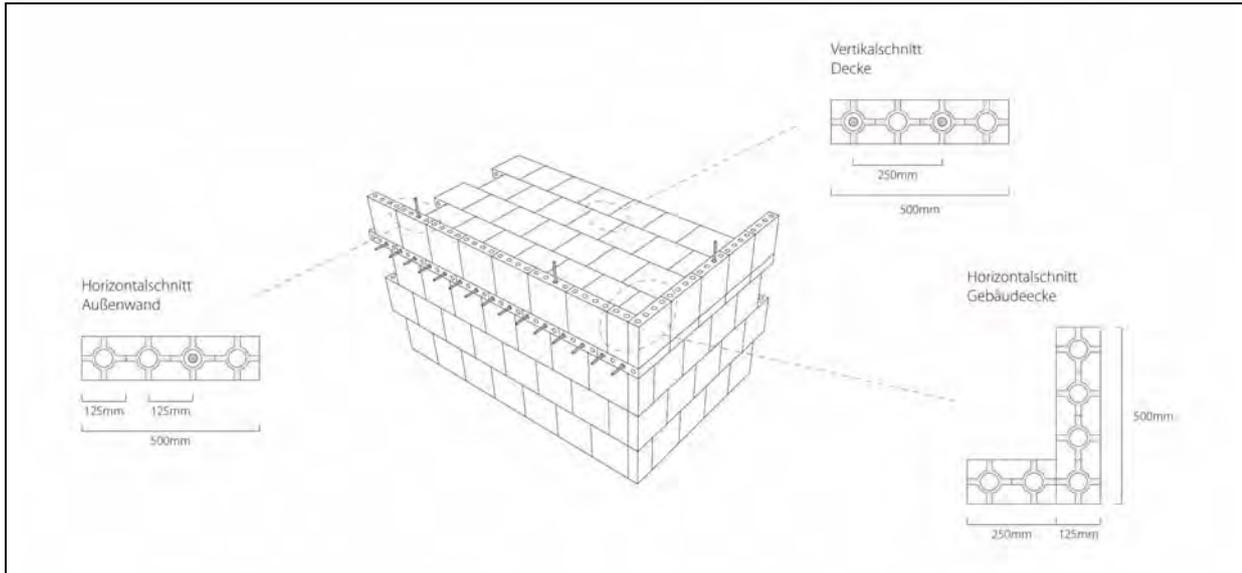


Bild 121 Studie zur Anordnung und Minimierung der Vorspannglieder

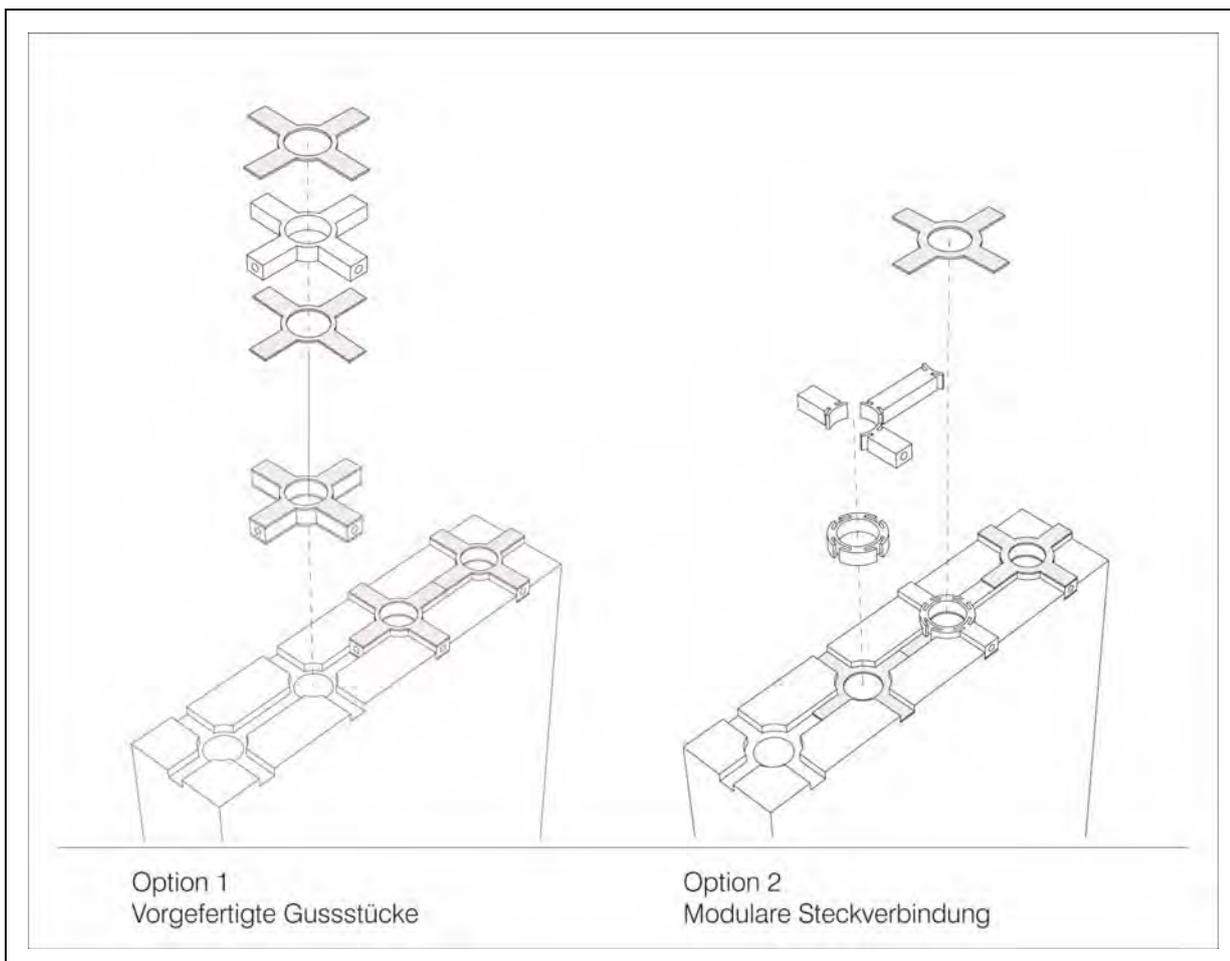


Bild 122 Studie zur Flexibilisierung des „Kreuzverbinders“

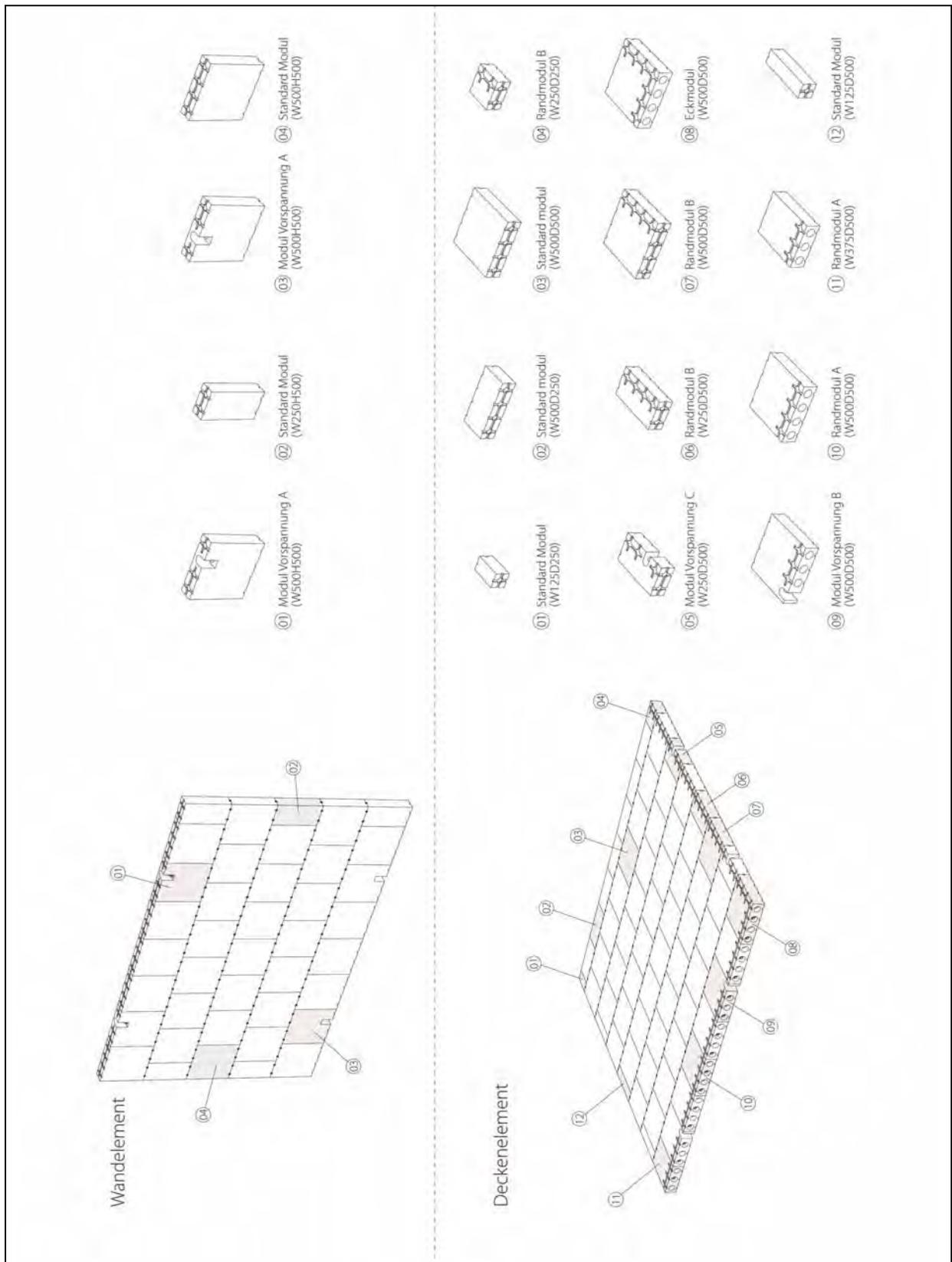


Bild 123 Studie zur Minimierung der verschiedenen Modultypen

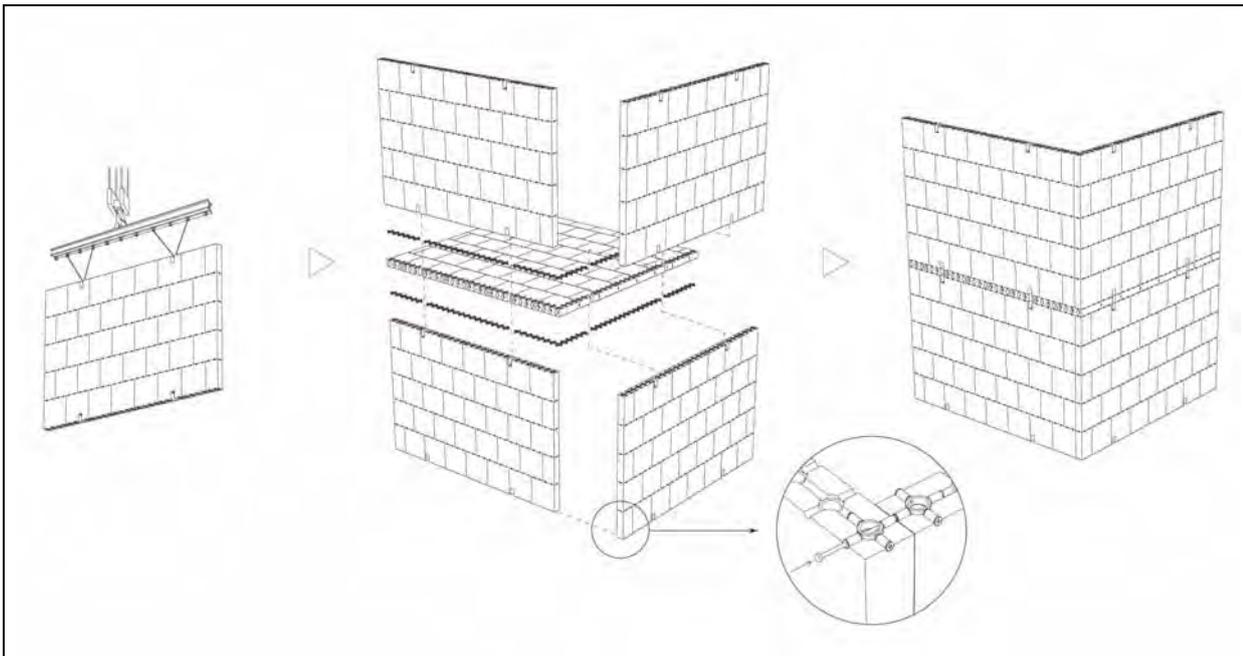


Bild 124 Studie zur Elementanlieferung und Montage

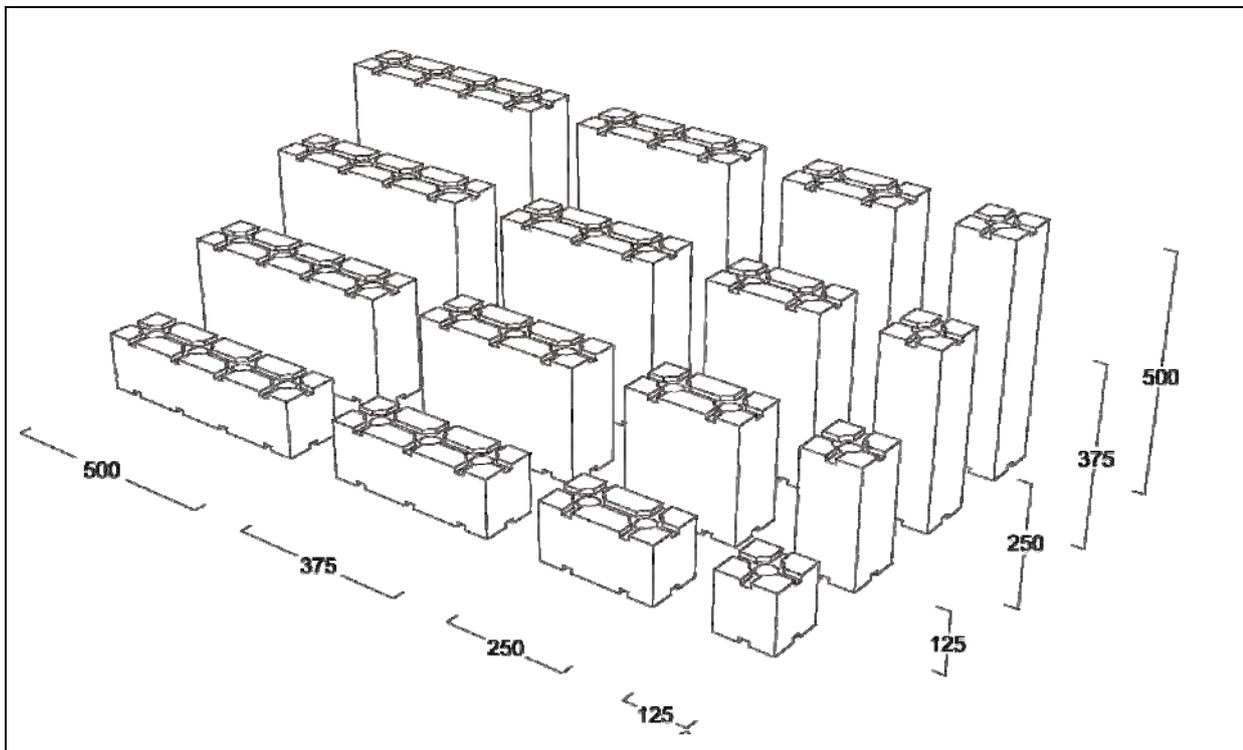


Bild 125 Studie zur Anzahl der Grundmodule (ohne Sondermodule zur Vorspannung)

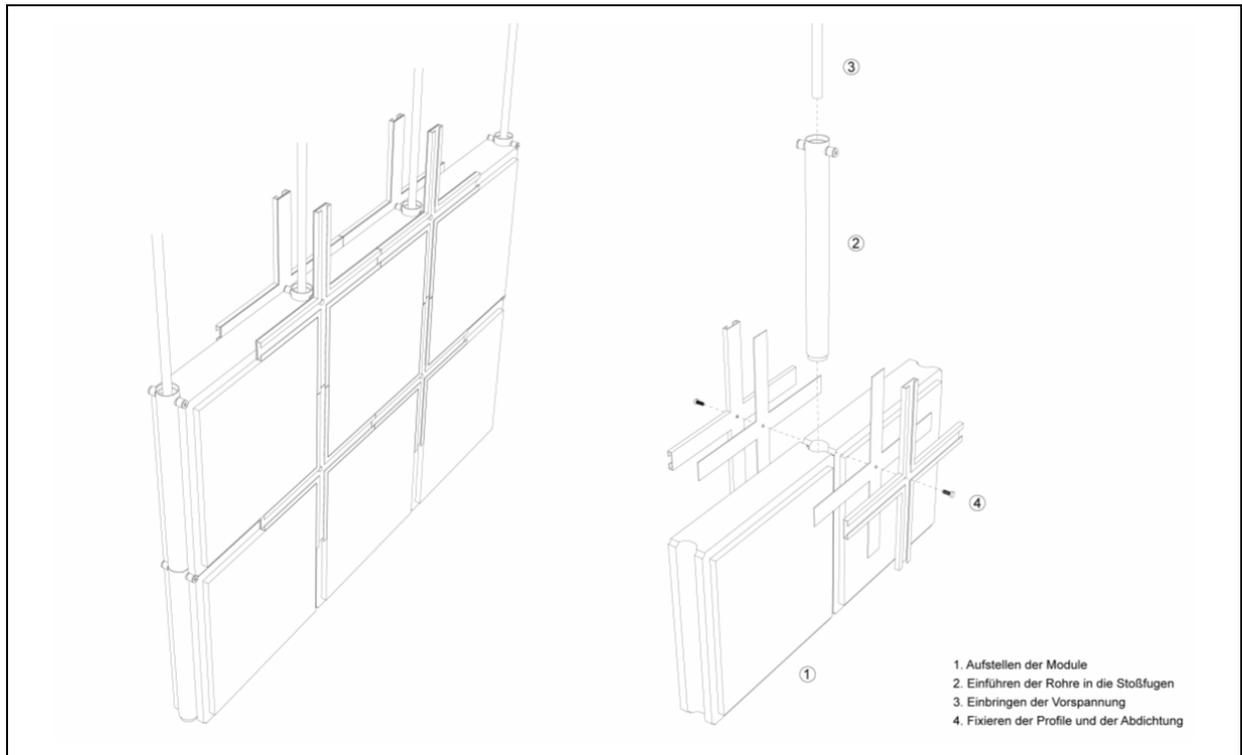


Bild 126 Studie zur Abdichtung der Stoßfugen – Anordnung der Vorspannglieder in Stoßfugen

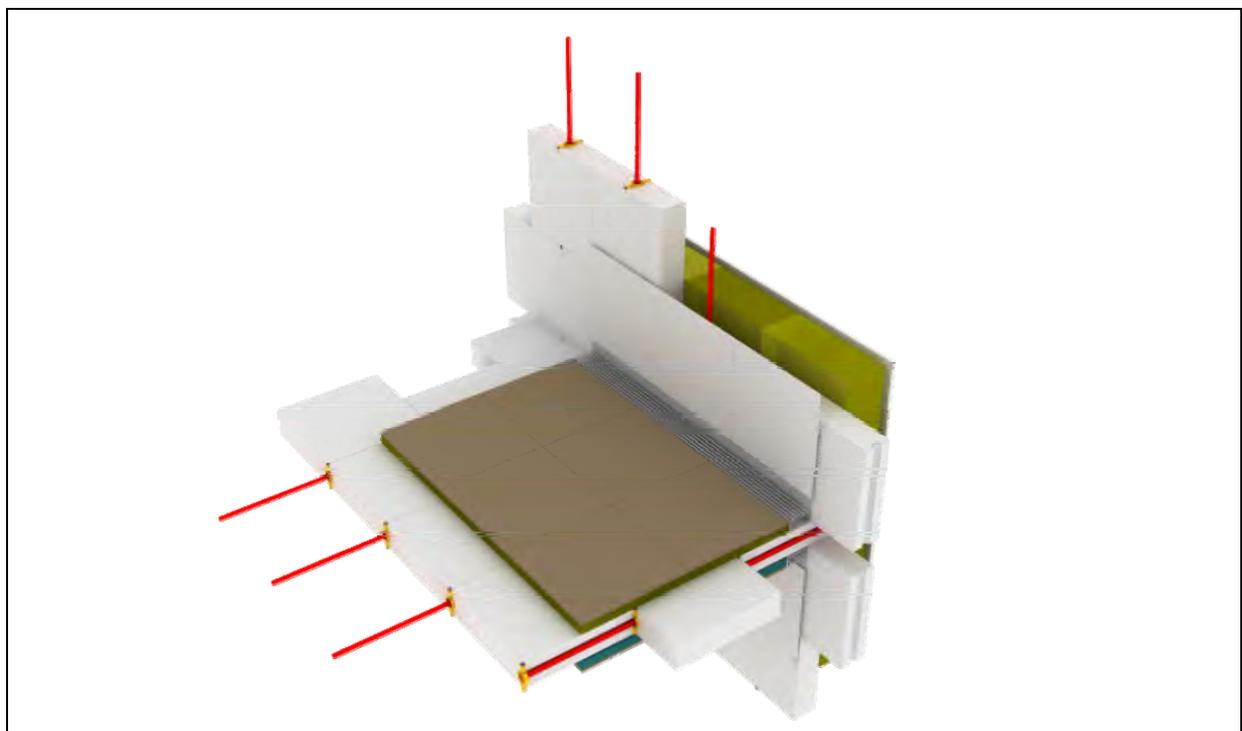


Bild 127 Studie zur Integration von Fassadenaufbau, Innenausbau und TGA

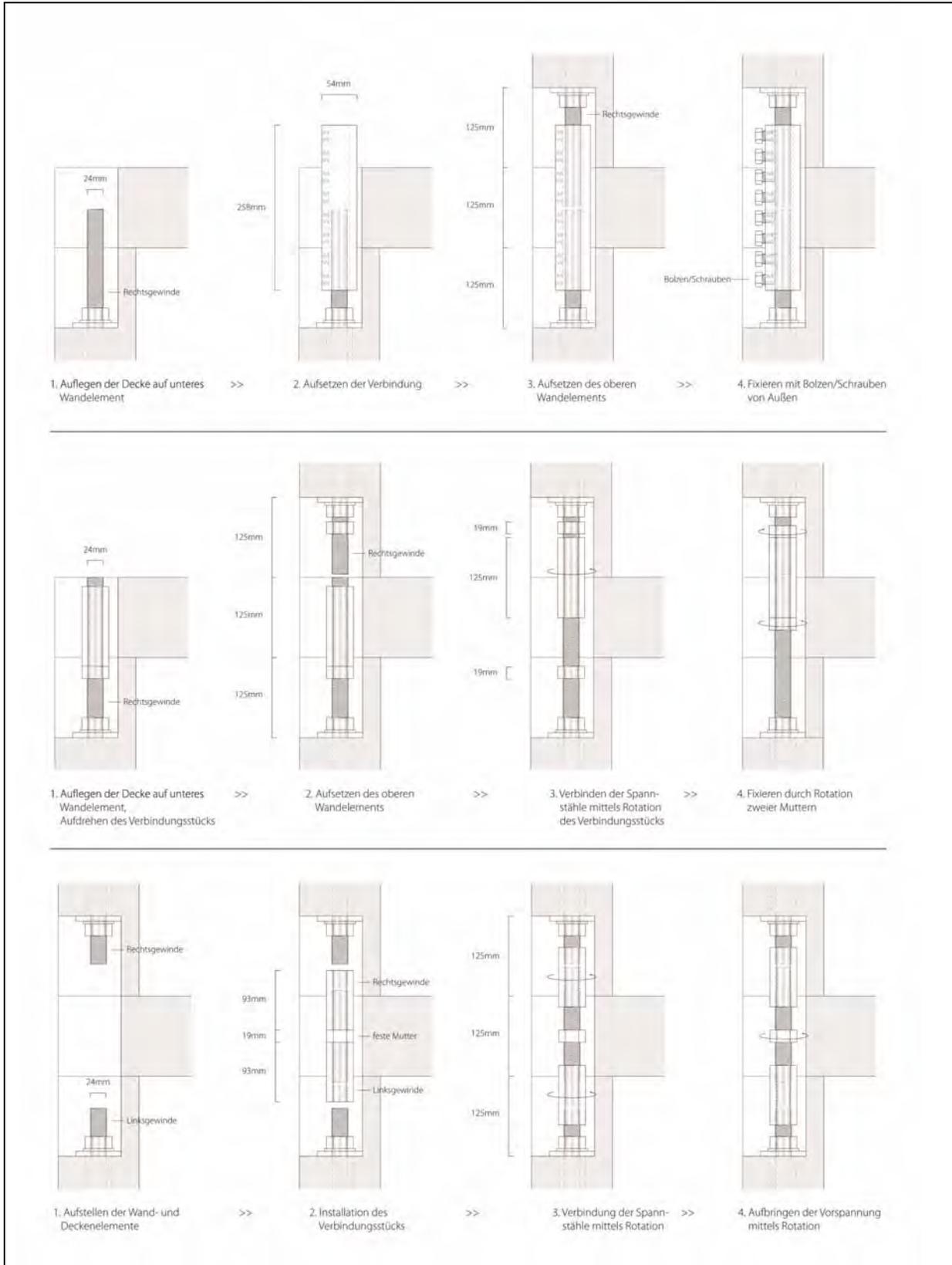


Bild 128 Studie zur Kopplung der Vorspannung am Wand-Decken-Knoten – 3 Optionen

4.7.3. Fassadenschnitte und Detailzeichnungen

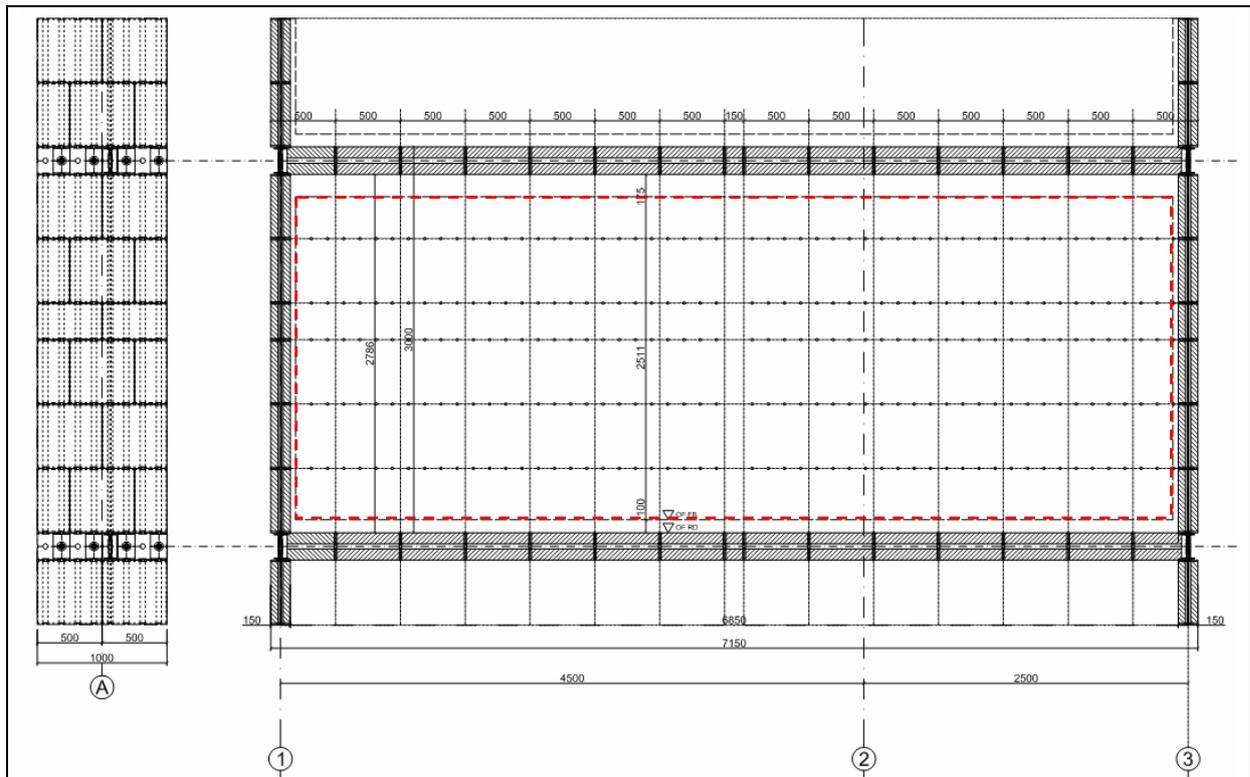


Bild 129 Übersicht Mustergeschoss „Kreuzverbinders“

In Übertrag der geometrischen Vorgaben aus Abschnitt 4.1.1 kann in Bild 129 gezeigt werden, dass die Fügung mittels Kreuzverbindern an sämtlichen untersuchten Modul- und Elementstößen in gleicher Weise erfolgt. Es liegt eine, in Abhängigkeit der verwendeten Modulgröße, gleichmäßige Verteilung des Verbindungsmittels vor (siehe Abschnitt 4.1.2 modularer Lösungsansatz). Weiterhin wird sowohl das Modul, als auch die Verbindung Wand – Decke durch ein in gleicher Art ausgeformtes Verbindungsmittel realisiert. Eine derart ausgeformte Verbindung wird im Folgenden als stetige Verbindung bezeichnet.

Die Anpassung des Elements an die geometrischen Vorgaben erfolgt innerhalb der jeweiligen Baugruppe (Element) durch den Einsatz bestimmter Module - siehe die beispielhaft farbig hervorgehobenen Module in Bild 129. Dabei kann die Anordnung und Lage der betreffenden Module innerhalb der Baugruppe frei gewählt werden. Der notwendige Ausgleich von Toleranzen erfolgt am Verbindungsmittel und somit zwischen jedem Modul.

Beim Modularen Ansatz ergibt sich durch den Kreuzverbinder ein für das jeweilige Element (Baugruppe) typisches, regelmäßig flächiges Raster an Anbindungspunkten. Eine vollständige Trennung von Primär- (Tragwerk, Rohbau) und Sekundärstruktur (Bekleidung, Ausbau) wird möglich. Diese Trennung lässt sich durch farbiges Hervorheben der geschlossen umlaufenden Ausbaulinie (Strichlinie in Bild 129) zeigen.

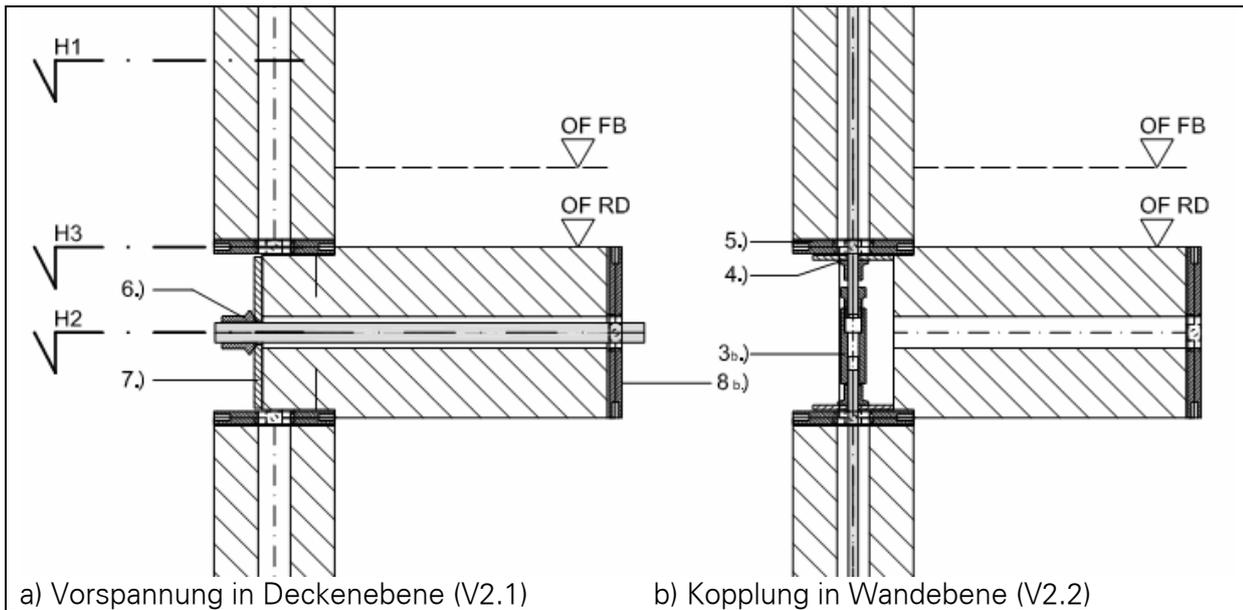


Bild 130 Detail-Vertikalschnitte: Statisch-Konstruktive Fügung im Wand-Decken-Knoten

In Bild 130 und Bild 131 kann die Stetigkeit der Fügung im Wand-Decken-Knoten aufgezeigt werden. Die zur Erzeugung und Aufrechterhaltung der Vorspannung verwendeten Bauteile, wie Ankerplatten, Spannstäbe, Verbindungs- und Spannmuffen der jeweiligen Elemente werden, unabhängig vom Modul, entsprechend der benötigten Zugänglichkeit angeordnet und bilden so, eine das Element umfassende „großmaßstäbliche Verbindung“ (vergleiche Abschnitt 2.6.2, Bild 19), welche an die jeweilige statische Situation (Druck, Biegung etc.) angepasst werden kann. Dieses Prinzip eignet sich besonders für eine Schottenbauweise, wie sie bspw. unter Abschnitt 3.7.1 in Bild 73 dargestellt ist.

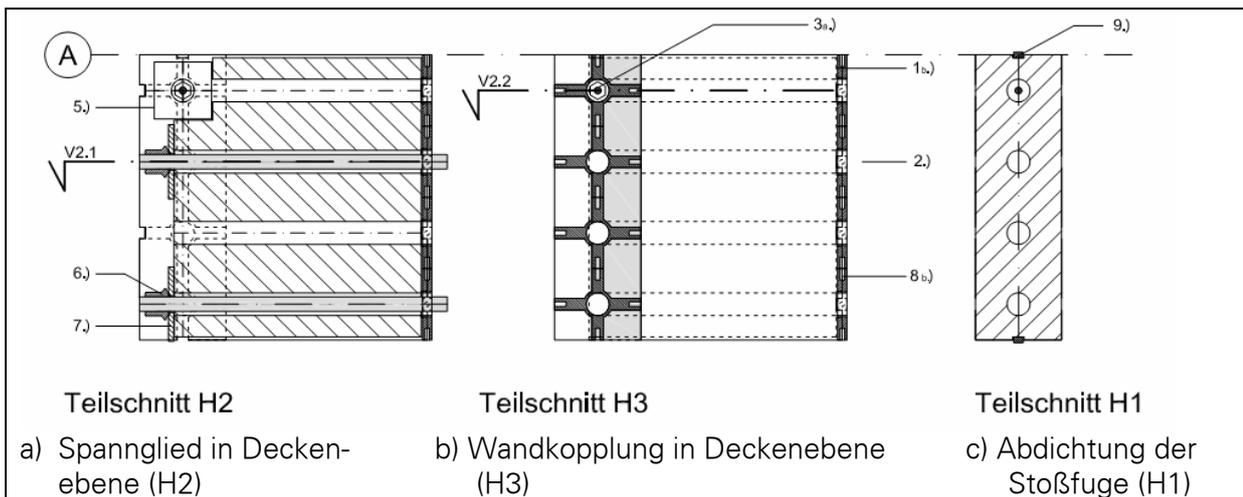


Bild 131 Darstellung Einzelmodule mit Anordnung der Kreuzverbinder im Horizontalschnitt

Zur Entwicklung eines für Öffnungen in der Primärstruktur angepassten Vorspannsystems (Ersatzsystem für Tür- und Fensterstürze) können modulimmanente Lösungen gefunden werden (siehe Bild 132).

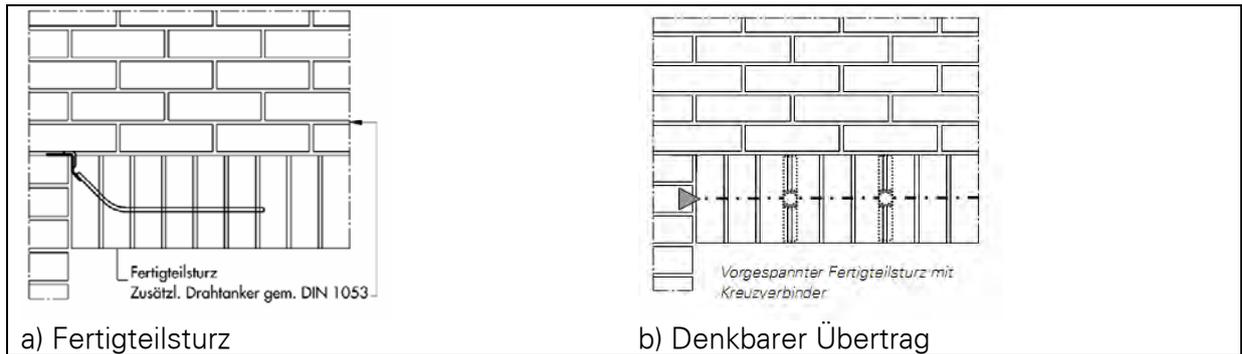


Bild 132 Mögliche Realisierbarkeit von Öffnungen im Bauteil beim Kreuzverbinder

Im Rahmen der modularen Fügung hat der Kreuzverbinder mehrere Funktionen zu erfüllen, welche es im Zuge einer Weiterentwicklung des Kreuzverbinders betreffs Dimensionierung und Auslegung des Detailaufbaus zu berücksichtigen gilt. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Sicherstellung der statischen Erfüllung aller an die Verbindung gestellten Anforderungen:
- aus den Anforderungen des Elements als ganzes und
- aus der Verbindung der Module untereinander innerhalb der Elements (Wand, Decke, Dach, Fundament etc.).
- Abdichtung sämtlicher entstehender Element- wie Modulfugen.
- Gewährung des Anschlusses von Folgeschichten wie Fassade, Innenwandbekleidung, Unterhangdecke (UHD), Fußboden, sowie lineare oder punktuelle Anbindungsmöglichkeiten zur Befestigung von Ausbauelementen (zum Beispiel Türen, Fenster) und dem Technischen Ausbau.

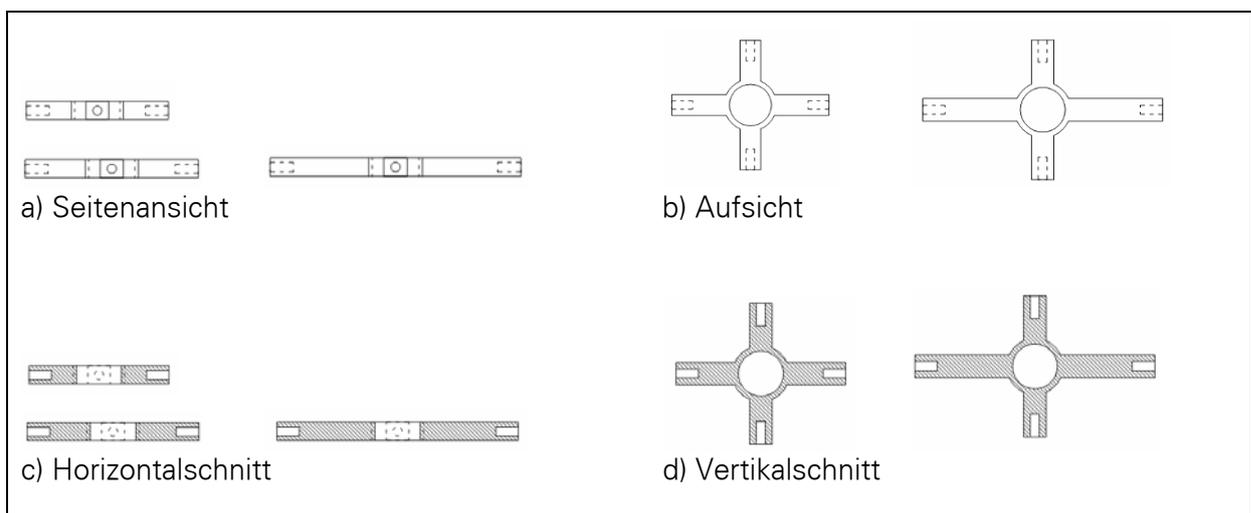


Bild 133 Detail: modul- und bauteilabhängige Geometrie der Kreuzverbinder

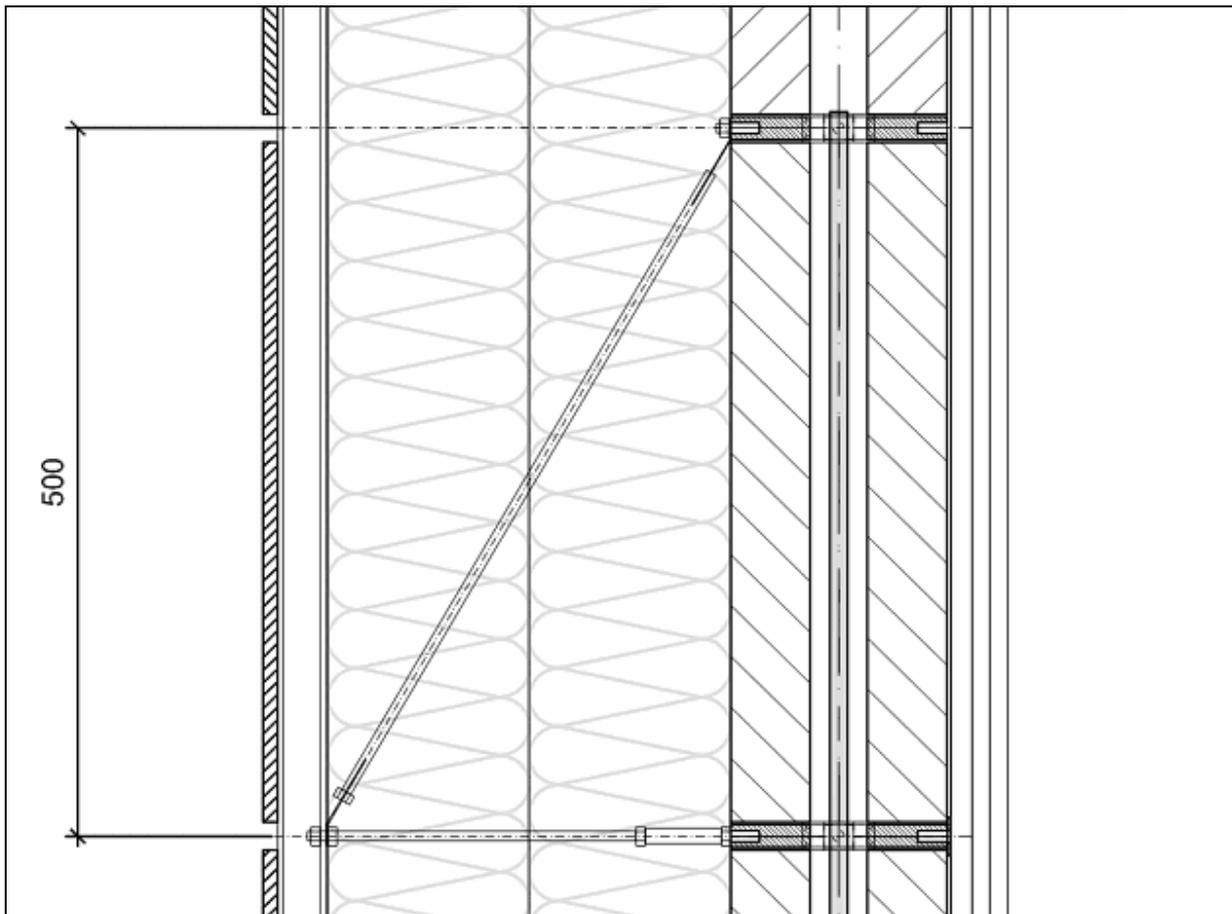


Bild 134 Detail: Anwendung des Kreuzverbinders im Fassadenschnitt

In der Anwendung des Kreuzverbinders im Bereich der Außenwand kann im Fassadenschnitt (Bild 134) das dem modularen Ansatz zugrunde liegende Gleichteileprinzip gezeigt werden (vergleiche Abschnitt 4.1.2.). Das Fugenbild der Fassade wird, bedingt durch das modulare Raster der Kreuzverbinder und der Art der Fassadenunterkonstruktion, bestimmt. Weiterhin kann gezeigt werden, dass sämtliche Folgeschichten von der Innenwandbekleidung bis zur Fassadenbekleidung an ein und demselben Verbindungselement befestigt sind. Bei Wahl einer punktförmig befestigten Fassade ist keine zusätzliche Unterkonstruktion notwendig. Die erforderliche Luftdichtheit wird durch Anordnung der Abdichtung auf und unter den Kreuzverbindern in der Fuge des jeweiligen Moduls bzw. zwischen den jeweiligen Baugruppen sichergestellt. Durch entsprechende Materialwahl und Ausbildung offener Fugen in der Fassadenbekleidung wird dem Grundsatz „innen dichter als außen“ [127] Rechnung getragen. Der nahezu wärmebrückenfreie Anschluss der Fassadenunterkonstruktion (vergleiche hierzu Abschnitt 3.8.3 und Abschnitt 4.4, sowie [156] in [214] auf Seite 68) wird durch Materialwechsel am Ankerfuß der Fassade erreicht.

Die Sicherstellung der Wind- und Schlagregendichtheit wird, vorbehaltlich Angaben zur geografischen Lage [127], bei der gewählten hinterlüfteten Vorhangfassade (VHF) ohne Einsatz zusätzlicher Schichten gemäß [7] als gesichert angenommen.

4.7.4. Zusammenfassung Variante A

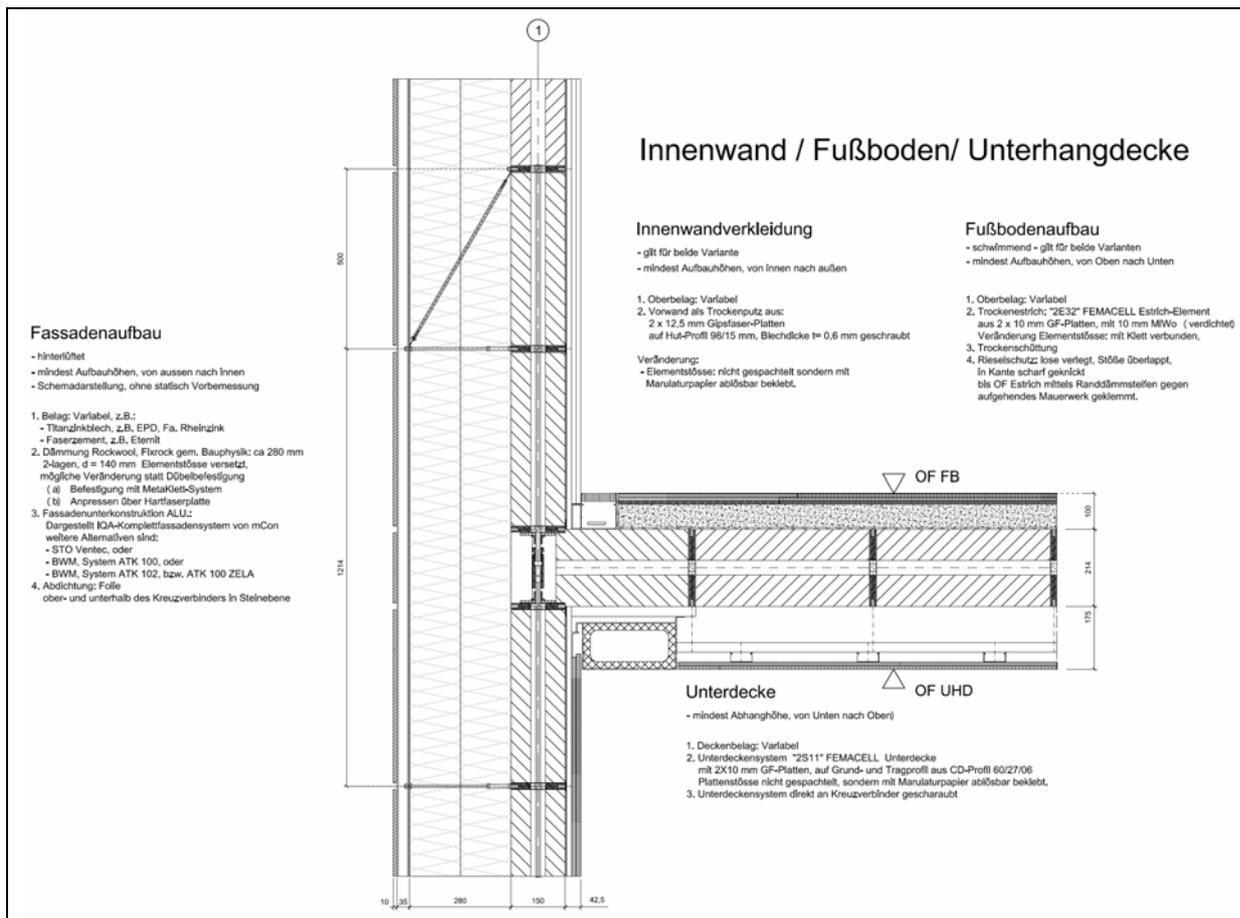


Bild 135 Zusammenfassende Darstellung des Wand-Decken-Knotens mit Kreuzverbinder

Die Ergebnisse der entwickelten Konstruktion zum modularen Lösungsansatz mit dem Kreuzverbinder lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Das dem Ansatz der Differentialbauweise zugrunde liegende Prinzip der Funktionstrennung kann an allen untersuchten Stellen baukonstruktive Lösungen vorweisen. Die Folgerichtigkeit des theoretisch entwickelten Ansatzes kann somit als nachgewiesen festgestellt werden, da mit dem Kreuzverbinder:
- sowohl Anforderungen der Verbindung Modul- Modul, Toleranzausgleich, Abdichtung, Modulzentrierung und Verband,
- wie auch die Verbindung (Schicht – Schicht) der Wand von Innen nach außen und jenen der Decke von oben nach unten in einem Bauteil und mit einer Verbindungsart gezeigt und prinzipiell gelöst werden.
- Notwendige Anpassungen an die bauteilspezifischen Anforderungen sind aufgrund dessen „stetiger“ Einbindung zwischen den Modulen eindeutig definiert und lassen sich für weitere Untersuchungen zuordnen. Im Zuge einer möglichen Produktweiterentwicklung können diese spezifiziert und gelöst werden.

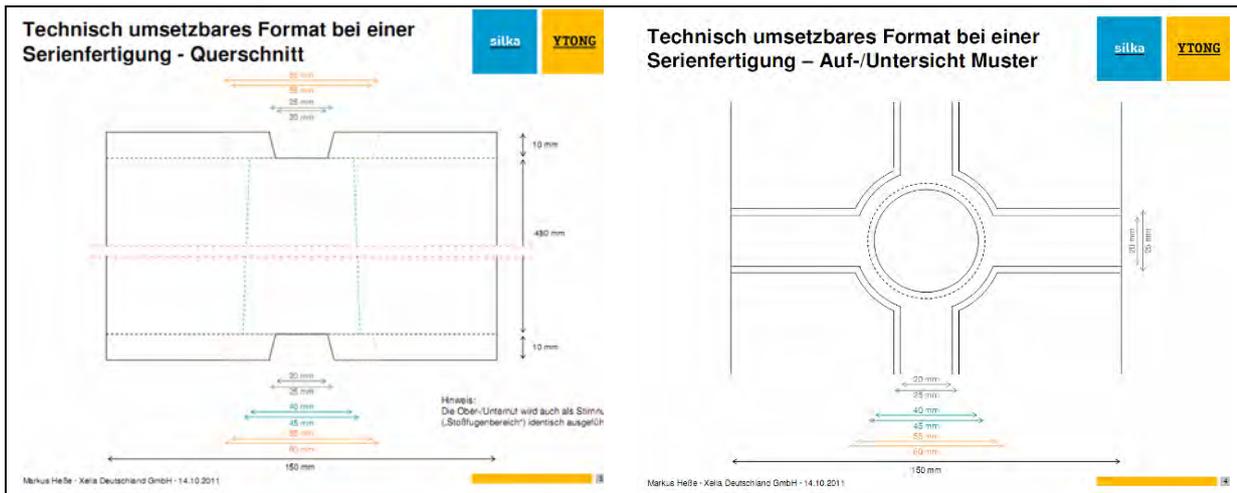


Bild 136 Steinzeichnungen für eine mögliche Serienfertigung beim Modul für den Kreuzverbinder [201]

- Im Zuge notwendiger Modifikationen am Modul zur Aufnahme des Kreuzverbinders im Stein ist die gewählte Modulgröße von B/H/T = 500/500/150 mm zu prüfen. Es ist hierbei ohne weiteres möglich, die erforschten Prinzipien auf das heute aus produktionstechnischen Gründen bestehende Steinformat von B/H/T = 498/498/150 mm anzuwenden. Daher werden weitere Untersuchungen ungeachtet der Steingeometrie erfolgen. Als Schwerpunkt möglicher Untersuchungen werden Tests am Kreuzverbinder hinsichtlich des Einsatzes im Verband der Trockenmauer und dessen Effizienz betreffs der geforderten Luftdichtheit vorgeschlagen.

4.8. Ausarbeitung und Detaillierung: Variante B

4.8.1. Anlass zur Entwicklung der „Linienhaften Verbindung“

In Alternative zur Entwicklung des modularen Ansatzes wurde, parallel zur schrittweisen Entwicklung des Kreuzverbinders, eine Konstruktionsweise ausgearbeitet, die über die theoretisch entwickelten Festlegungen weitere Fragenstellungen betrachtet. Aspekte und Fragen wie die der Ausbildung von Öffnungen in vorgespannten Wänden und Überlegungen zur modulunabhängigen Ausbildung der Fugenabdichtung, kommen hinzu. Das produktionstechnisch begründete Steinformat von B/H/T = 498/498/150 mm wird bei der Ausarbeitung der Variante B als formbildendes Maß zugrunde gelegt. Weiterhin kommen Überlegungen, die sich aus dem Spannvorgang, dessen Lösbarkeit und der Detailausbildung der Vorspanngeometrie ergeben, hinzu. Aspekte, die zur Entwicklung der sogenannten linienhaften Verbindung geführt haben, wie auch eine stichpunktartige Darstellung der Alternative werden in den Abschnitten 4.8.2 bis 4.8.7 betrachtet.

4.8.2. Modul unabhängige, schichtbezogene Fugenabdichtung

Imit dem Wegfall der Möglichkeit das Mauerwerk durch Putzauftrag luftdicht abzuschließen, entsteht die Frage nach einer alternativen Luftabdichtung von Stoß- und Lagerfuge. Zudem, sind unabhängig von der Dichtigkeit des Wandaufbaus, luftdichte Anschlussdetails für alle Bauteilanschlüsse an Außenecken, Fenster- und Türanschlüsse in Außenbauten, erforderlich.

Im Rahmen der Projektarbeit wurden folgende Vorschläge zur Gewährleistung der Luftdichtigkeit entwickelt [14]. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Loses Einlegen komprimierbarer Textildichtung im Mauerwerksverband
- Fragliche Praktikabilität in den vertikalen Fugen
- Prüfung der statischen Eigenschaften
- Entwicklung einer komprimierbaren Ummantelung im Bereich der Zugstäbe
- In Abhängigkeit von Art, Anordnung und Ausrichtung der Zugstäbe wurden diverse Varianten hierzu erarbeitet und verglichen.
- Ausbildung der Innenraumverkleidung als Dichtungsebene
- Bspw. OSB – Platten, mit (Nut- und Feder)
- Einsatz luftdichter Dämmung.
- Kritisch werden hierbei die Durchstoßpunkte der Unterkonstruktion der Vorhangsfassade, sowie die Stossfugen der Dämmplatten angesehen.

Beim modularen Ansatz wird die Abdichtungsebene zwischen den Modulen angeordnet und so durch den Einsatz des Kreuzverbinders gewährleistet. Alternativ entstand die Überlegung, die Abdichtung direkt der Schichtung zuzuordnen und so modulunabhängig, über das Element hinweg anzuordnen, wo diese, zum Beispiel bauphysikalischen Gründen der Luftdichtigkeit, benötigt wird.

4.8.3. Öffnungen in vorgespannten Mauerwerkswänden

Nach Deplazes [16] sind Öffnung in Mauerwerkswänden Perforationen, welche strukturelle Störungen der Mauer darstellen. Die Vermittlung zwischen Innen und Außen steht im direkten Abhängigkeitsverhältnis von Mauer und Aussparung. Infolge dessen ergeben sich für den Mauerwerksbau zwei mögliche Arten der Öffnungsbildung:

- durch Einsatz von Mauerstürzen
- durch Anwendung der Schottenbauweise (siehe Abschnitt 3.1.4, Tabelle 2)

Schottenbauweise

Bei der Schottenbauweise kann „a priori“ von einer störungsfreien Stein- bzw. Modulordnung ausgegangen werden, da die Öffnungen sich zwischen den Wandscheiben (Schotte und Schotte), sowie der Decke und dem Fußboden befinden. Die Öffnung wird im Zwischenraum von Baugruppen gebildet. Eine Schottenbauweise stellt somit „die erste Wahl“ bei einer modularen Baugruppenbildung der Wand dar. Daher bietet es sich an, vorgespanntes Mauerwerk für Gebäude in Schottenbauweisen einzusetzen (siehe Abschnitt 3.7.1, Bild 73).

Mauerstürze

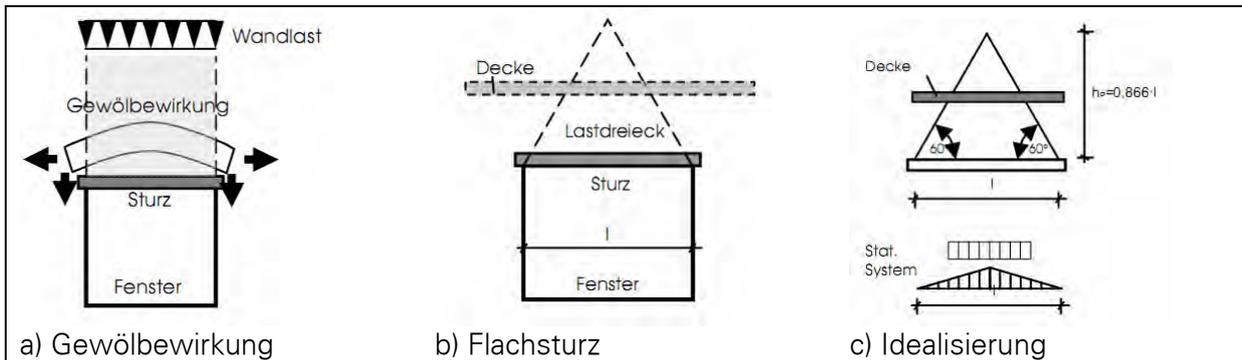


Bild 137 Sturz und Abfangträger über Wandöffnungen [106]

Bild 137 verdeutlicht typische Lösungen mit Mauerwerksstürzen und deren tragwerksplanerische Idealisierung. Demnach können Mauerstürze, je nach deren Art, als Teil der Baugruppe, oder als die Baugruppe in „Subgruppen“ (Brüstung, Sturz etc) unterteilendes Bauelement verstanden werden. Bild 138 verdeutlicht diesen Zusammenhang zwischen der Öffnung und der möglichen Anordnung der Vorspannelemente.

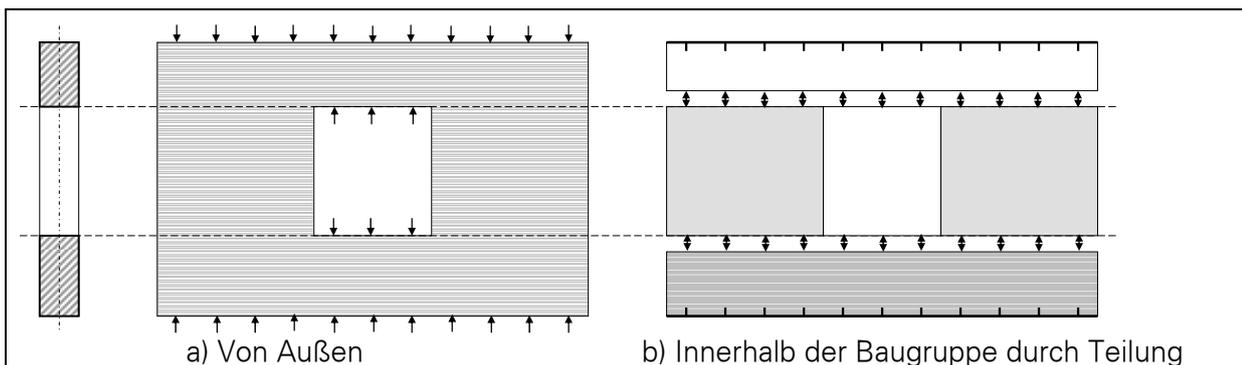


Bild 138 Mögliche Anordnung der Spannstelle unter Berücksichtigung von Wandöffnungen

4.8.4. Im Bauteilinneren angeordnete Spannstelle

Bild 139 zeigt die sich beim Vorspannen der Decke mit einem an der Deckenaußenkante angeordneten Spannkopf ergebenden konstruktiven Zwänge. Der außenliegende Spannkopf und dessen Spannstahlenden ragen in die potenzielle Dämmebene (Bild 139a). Bei flächenbündiger Ausrichtung ergibt sich einerseits die statisch ungünstige, teilweise aufliegende Deckenplatte (siehe Bild 139b und vergleiche Abschnitt 3.6), andererseits ist die Zugänglichkeit (vergleiche Abschnitt 2.3.3) zum Verbindungsmittel für den Spann- Lösevorgang (vergleiche Abschnitt 3.7) beschränkt.

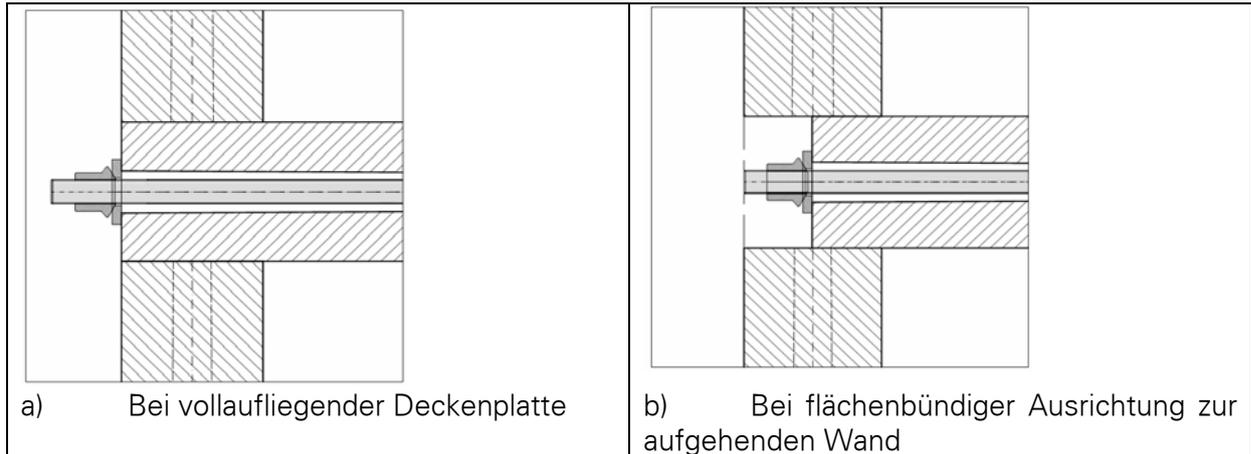


Bild 139 Geometrische Zwänge im Bereich des Wand-Decken-Knotens bei außenliegendem Spannkopf

In Abschnitt 3.7 wird gezeigt, dass das Aufbringen von Vorspannung sowohl an der Bauteilaußenkante, als auch innerhalb des Bauteils angeordnet erfolgen kann. Im Folgenden wird gezeigt, dass bei einer Anordnung der Vorspannstelle im Bauteilinneren eine vollaufliegende Deckenplatte, wie auch eine flucht – und flächenbündige Ausrichtung von Wand und Decke möglich wird. Dabei werden die Festpunkte der Vorspannung (Ankerplatten) an der Bauteilaußenkante und die Vorspannung erzeugenden Elemente innerhalb des Bauteils angeordnet. In der Folge wird die Vorspannung dadurch erzeugt, dass das Bauteil an einer definierten Stelle geteilt und diese Einzelteile gegen die Spannanker gedrückt werden. Bild 140 stellt die möglichen Arten zur Erzeugung der Vorspannung von innen dar.

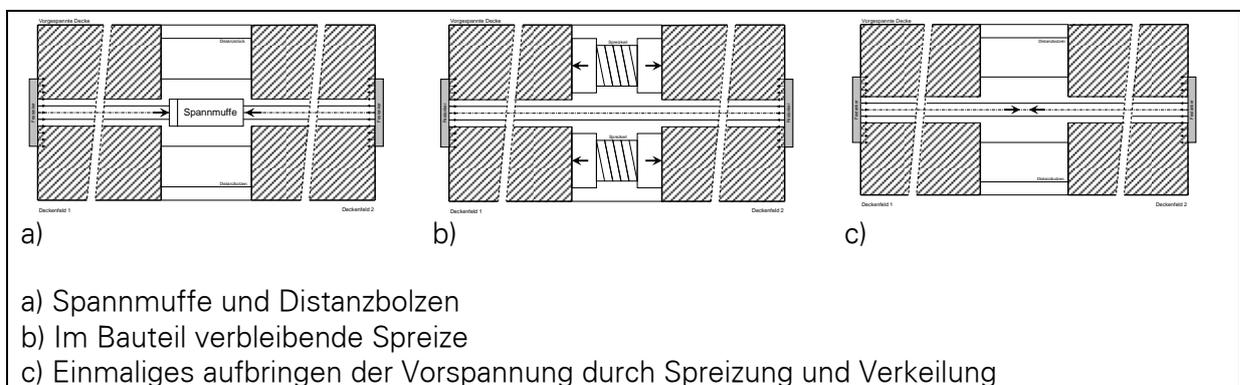


Bild 140 Mögliche Ausbildung der im Bauteilinneren angeordneten Spannstelle

Um eine flächenbündige Außenwand gewähren zu können, wird für die linienhafte Verbindung von dieser Anordnung der Spannstelle innerhalb der Decke ausgegangen.

4.8.5. Zeilenhafte Fassadenbefestigung

Auf die konträre Beziehung zwischen bauphysikalischen Anforderungen und statischer Notwendigkeit, sowie den wesentlichen Prinzipien zur Reduktion von Wärmebrücken im Bereich der Fassade wurde bereits in Abschnitt 3.8.3 und Abschnitt 4.4 eingegangen. Demnach wird ein Weg zur Optimierung der Fassadenbefestigung in der Verwendung weniger,

kräftiger Durchdringungen [6] gesehen. Zeilenhaft angeordnete Verankerungen bieten eine solche Möglichkeit der Fassadenbefestigung. Die Forschung von Schellbach, Zumbroich [140] sowie die Untersuchungen von Brameshuber, Graubner, Schmidt und Richter [10] zeigen, dass zeilenhafte Verankerungen, bei zweischaliger Mauerwerks-konstruktionen sowohl in bauphysikalischer als auch in tragwerksplanerischer Hinsicht optimal zum Einsatz kommen.

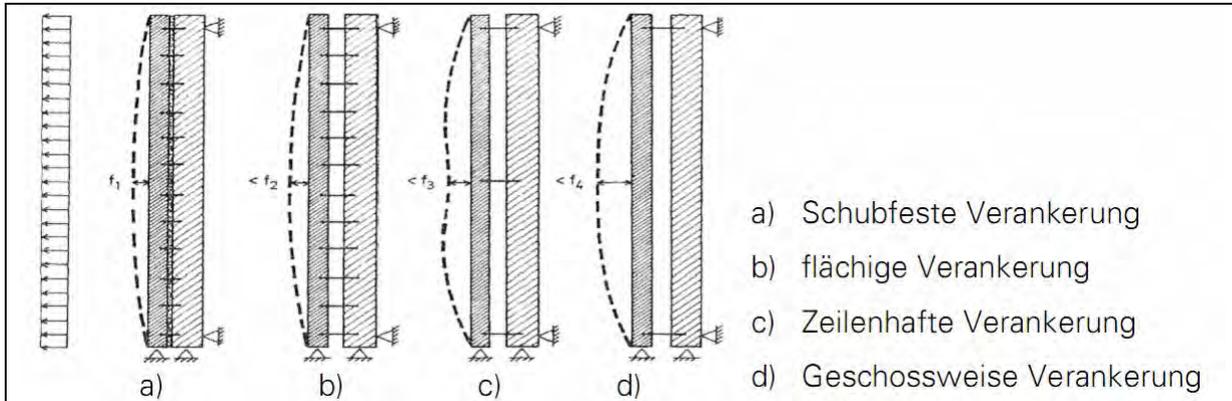


Bild 141 Durchbiegung (Beanspruchung) der Verblendschale zweischaliger Wände bei unterschiedlicher Verankerung unter Windlast (Prinzipiskizze) [140]

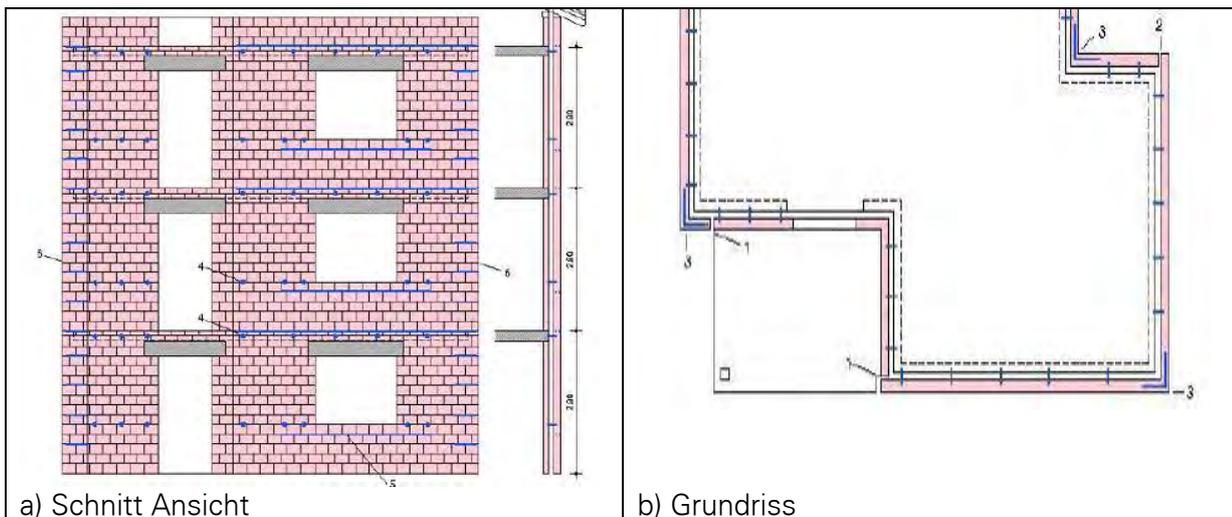


Bild 142 Beispielhafte Anordnung von zeilenhafter Verankerung bei zweischaligem Mauerwerk [10]

4.8.6. Schichtbezogene Abdichtung mit zeilenhafter Befestigung

Die sogenannte linienhafte Verbindung wird durch Anordnung der Luftabdichtungsebene an die zeilenhafte Fassadenbefestigung im Bereich der Vorspannöffnungen von vorgespanntem Trockenmauerwerk gebildet. Sie stellt somit eine Kombination der in Abschnitt 4.8.2 und Abschnitt 0 vorgestellten konstruktiven Alternativen dar.

Anwendung Außenwand

Die Anwendung der linienhaften Verbindung lässt sich für die Außenwand wie folgt darstellen:

- Die vollflächig an der Außenwand aufgebrachte Abdichtungsfolie wird durch Einklemmen im Bereich der zeilenhaften Verankerung (Fassadenbefestigung) befestigt.
- Im Bereich der Fassadenbefestigung wird die Folie hinter die zur Aufrechterhaltung der Vorspannung benötigten Distanzbolzen gelegt und so ein Durchstoßen der Luftdichtheitsebene ausgeschlossen.
- Die Folie kann sowohl auf der Innenseite wie auch auf der Außenseite der Außenwand, angebracht werden. Da eine Perforation der Folie während der Nutzungszeit ausgeschlossen werden soll, wird eine Anordnung an der Wandaußenseite zwischen Wand und Dämmung vorgeschlagen.

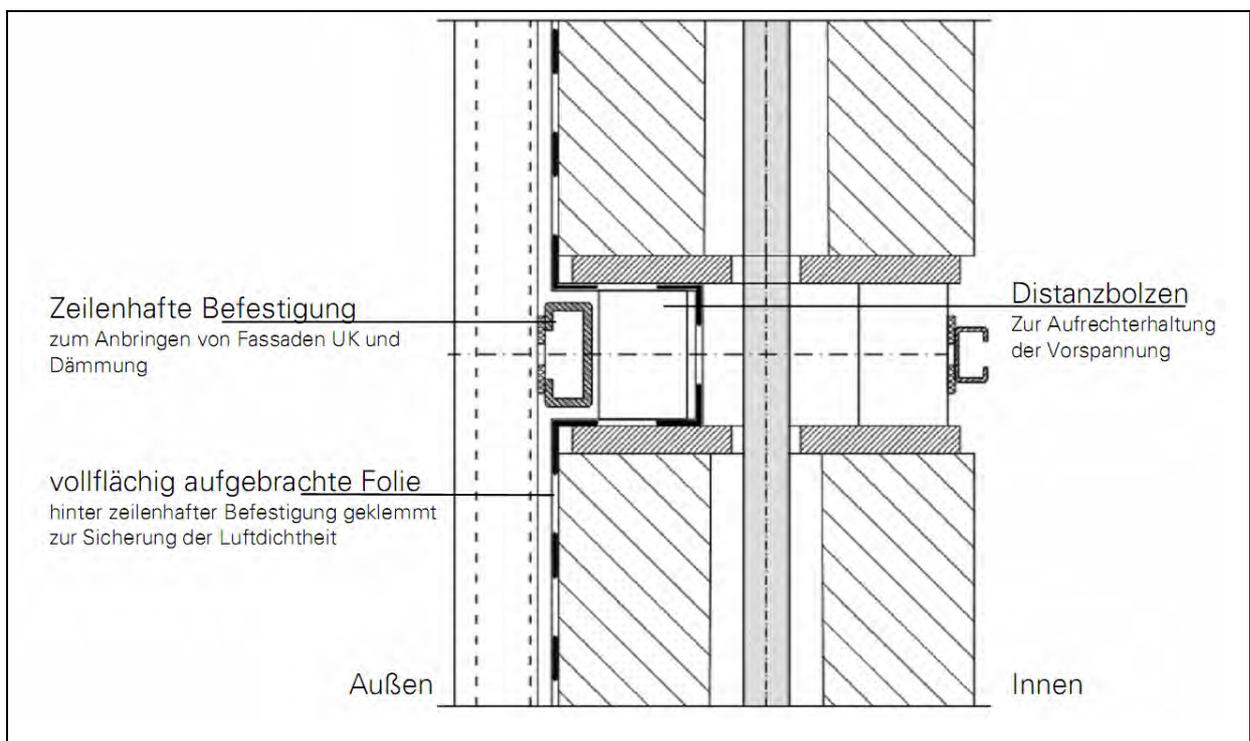


Bild 143 *Prinzipskizze: Folienabdichtung der Spannöffnung in der Außenwand (Vertikalschnitt)*

- Der im Sturz- und Brüstungsbereich angeordnete Spalt dient als Montagestoß zum Einprägen der Vorspannung durch Spreizen. Zur Aufrechterhaltung der Vorspannung wird der gespreizte Spalt mittels Distanzbolzen verkeilt. Zum Lösen der Vorspannung werden die Distanzbolzen herausgeschlagen. Im Montagespalt können eventuell entstandene Maßtoleranzen ausgeglichen werden.
- Das Fügeprinzip bei den Distanzbolzen beruht auf dem Prinzip des Klemmens. Die Anwendung ist, bei genügend Auflast, auch ohne Vorspannung denkbar.
- Die horizontal angeordnete und bündig mit der Außenwand abschließende Fassadenbefestigung (zum Beispiel HALFEN [181]) ist mittels Schrauben an die eingeklemmten Distanzbolzen befestigt. Die Schienen können mittels Langlöchern flucht- und höhengleich ausgerichtet werden. Zur Befestigung einer ggf. vorgesehenen Innenwandbekleidung kann in gleicher Weise innenseitig vorgegangen werden.

- Bei zeitversetzter Ausführung von Roh- und Dämmarbeiten kann, durch Anordnung von überlappten Folienstößen im Bereich der Fassadenbefestigung, die Folie in handhabbar großen Flächen nachträglich vollflächig aufgebracht werden.

Bild 144 veranschaulicht das Zusammenspiel von zeilenhafter Fassadenbefestigung und Spannöffnung im Bereich Brüstung - Sturz.

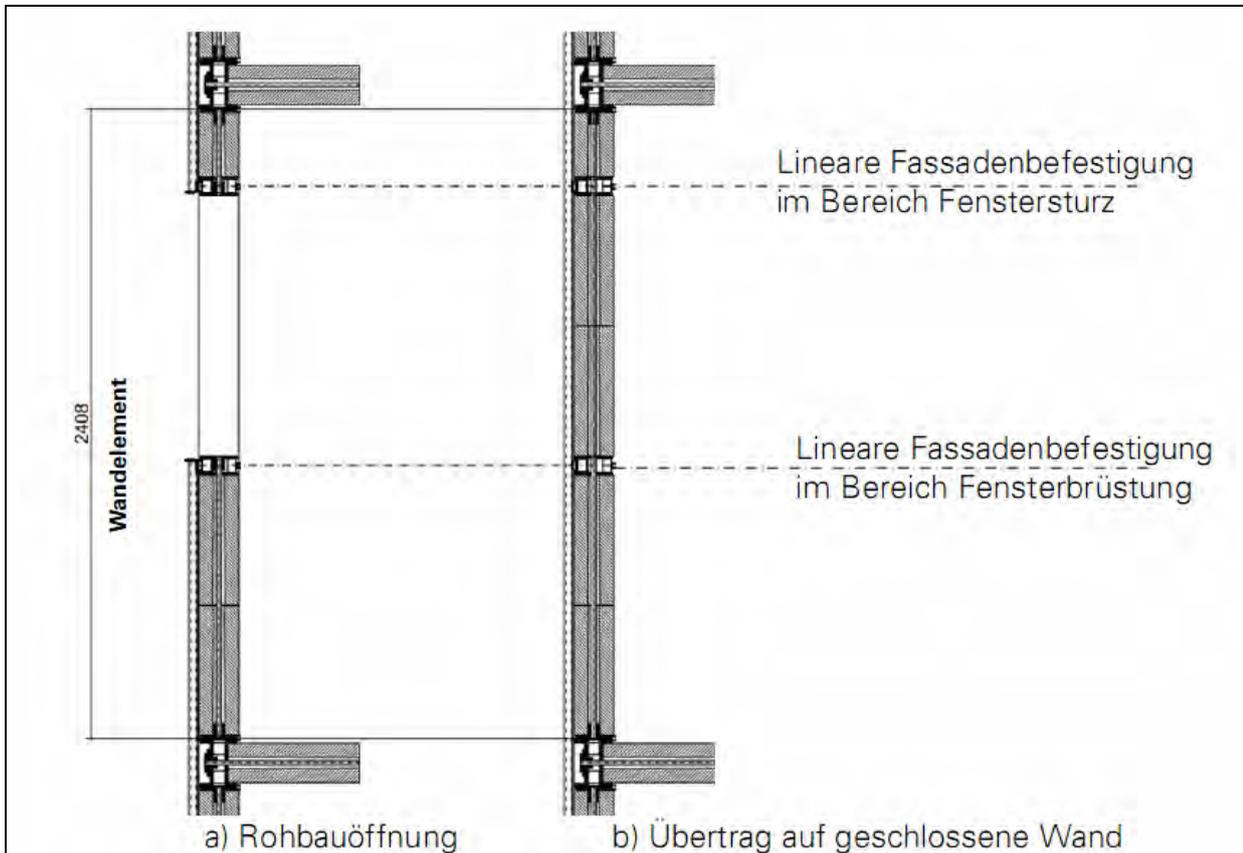


Bild 144 Anordnung der linearen (zeilenhaften) Fassadenbefestigung im Zusammenspiel mit Spannöffnungen im Bereich von Brüstung und Sturz

Wesentliche Vorteile der Konstruktion sind:

- Aufgrund der zeilenhaften Befestigung kann eine vertikale Substruktur (analog zur Konterlattung) aufgebracht werden. Dies bietet den Vorteil, dass sämtliche statischen Anforderungen (z.B. Windsog in Eckbereichen etc.) durch Distanzanpassung der Konterlage bewerkstelligt werden, sodass weder das Fügeprinzip noch die modulare Ordnung des Systems beeinflusst wird.
- Bei zweischaligen Mauerwerkswänden mit Vormauerung kann auf bereits existierende, clipbare, geschosshoch verankerte Fassadensysteme zurückgegriffen werden [183]. Eine zusätzliche Substruktur, wie zum Beispiel bei punktförmig befestigten hinterlüfteten Vorhangfassaden, ist dann nicht notwendig, da die Vormauer Ihre Lasten direkt an die zeilenhafte Befestigung abtragen kann.
- Da die Fassadenbefestigung nicht unmittelbar in die Mauersteine greift, können sämtliche am Markt erhältlichen KS- Mauersteine unmodifiziert verbaut werden. Die

- eingesetzten Mauersteine sind nach der Demontage faktisch ohne Modifikation dann auch in konventionellem Mauerwerk (mit Mörtelfuge) wiederverwendbar.
- Da die Abdichtungsebene zwischen Wand und Dämmung liegt, ist sie im Gebrauch geschützt.
 - Im Bereich der zeilenhaften Befestigung ist ein Wechsel der Abdichtungsfunktion der Folie modulunabhängig möglich. Abdichtungen gegen aufsteigende Feuchte lassen sich im Bereich der Bodenplatte herstellen. Eine gebäudeumschließende einheitliche Abdichtungsebene kann so realisieren werden.
 - Auf eine vollflächige Bekleidung der Außenwandinnenflächen kann bei dieser Variante verzichtet werden, da nur die Spannöffnung abgedeckt werden muss. Somit steht dem Innenraum das unbedeckte KS-Planelement als Baumasse für den sommerlichen Wärmeschutz zur Verfügung.

Anwendung Decke

Die Anwendung der linienhaften Verbindung lässt sich für die vorwiegend auf Biegung beanspruchte Decke durch die in Abschnitt 0 dargelegten Gründe zur Ausbildung einer flucht- und flächenbündigen Deckenaußenkante im Wand-Decken-Knoten und durch die Anwendung eines einheitlichen Spannprinzips (Spreizung von Innen) realisieren. Der in der Rohdecke vorhandene lineare Montagepalt zur Aufbringung der Vorspannung kann durch Anordnung einer Abdeckung unter Gewähr entsprechender bauphysikalischer Anforderungen reversibel geschlossen werden (siehe Bild 145). Eine zusätzliche Bekleidung der Rohdecke von unten wird bei diesem Ansatz aus rein technischer Sicht als nicht notwendig angesehen. Aus gestalterischen Gründen kann diese jedoch vorgesehen werden.

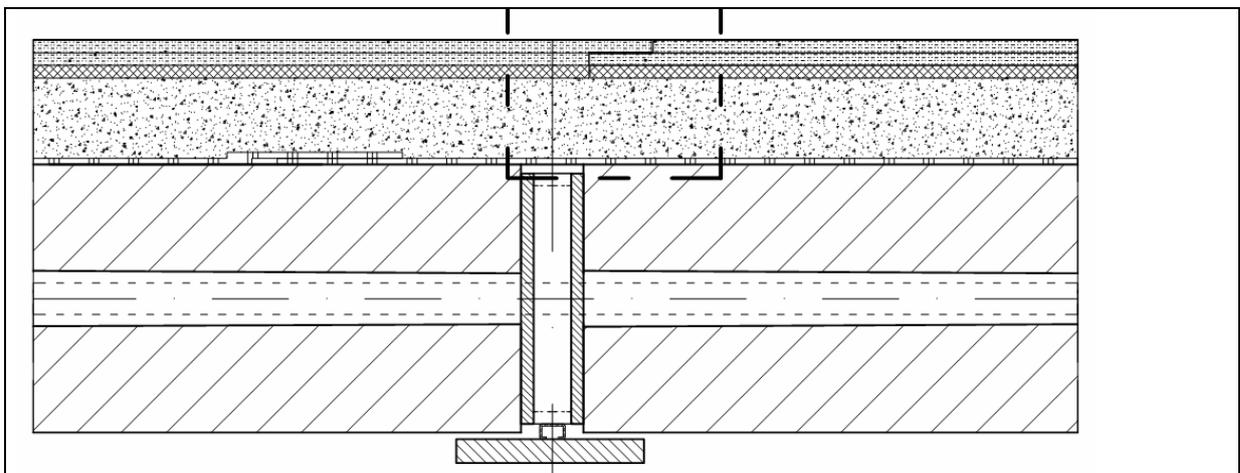


Bild 145 Abdeckung der Spannöffnung

4.8.7. Fassadenschnitte und Detailzeichnungen

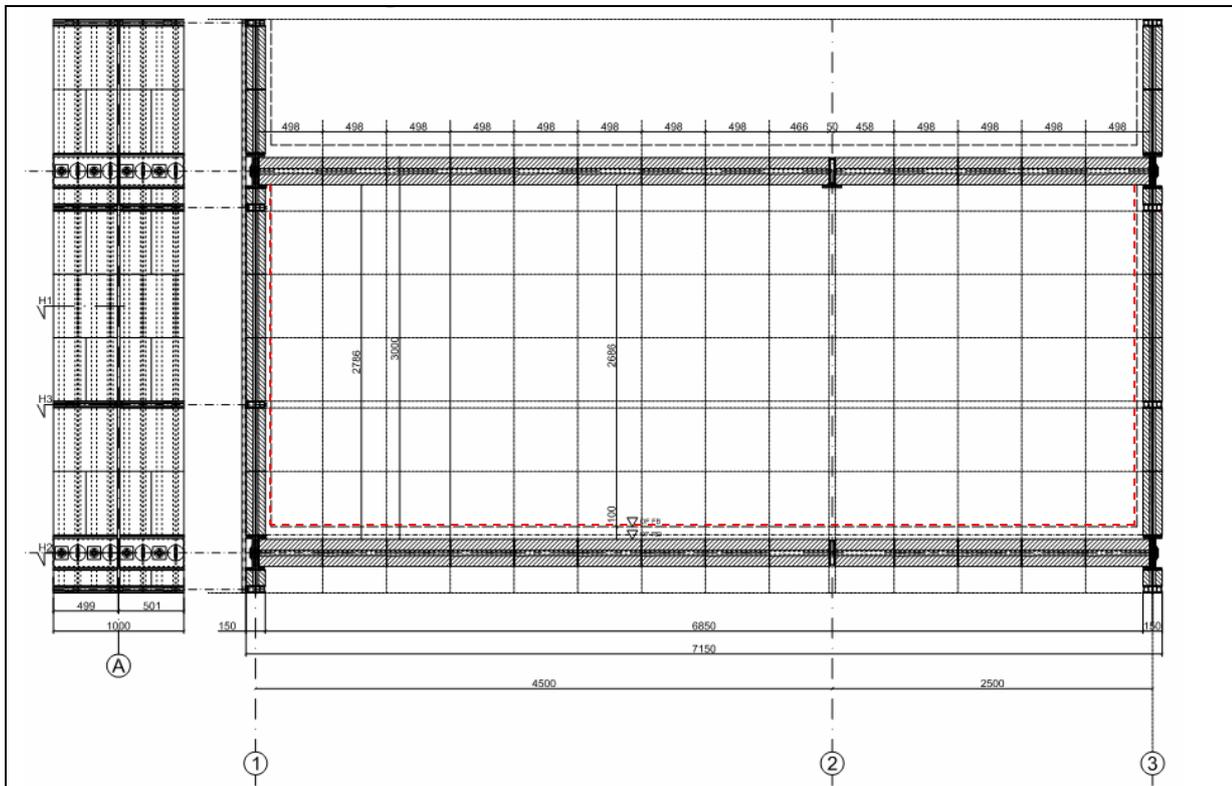


Bild 146 Übersicht Mustergeschoss „elementbezogene - lineare Verbindung“

In Übertrag der geometrischen Vorgaben aus Abschnitt 4.1.1 kann in Bild 146 gezeigt werden, dass die Fügung bei der sogenannten elementbezogenen - linearen Verbindung zu einer Unterteilung der Baugruppen führt. Zwar liegt eine in Abhängigkeit von der verwendeten Modulgröße, gleichmäßige Verteilung des Moduls vor, diese wird jedoch durch das Verbindungsmittel unterbrochen - siehe die beispielhaft farbig hervorgehobenen Verbindungsmittel in Bild 146. Eine „Stetigkeit“ (siehe Abschnitt 4.1.2) kann hier nicht aufgezeigt und nachgewiesen werden. Anpassungen an die geometrischen Vorgaben erfolgen nicht wie bei dem modularen Ansatz innerhalb der jeweiligen Baugruppe sondern in der „Subgruppe“. Dadurch ist der Einsatz des jeweiligen Moduls auf die jeweilige „Subgruppe“ innerhalb des Elements beschränkt. Der notwendige Ausgleich von Toleranzen erfolgt zusammenfassend am Verbindungsmittel.

Beim elementbezogenen Lösungsansatz ergibt sich durch den horizontal ausgerichteten linienhaften Verbinder eine für die Baugruppe typische Teilung, an welche die Vorspannung aufgebracht wird. Innerhalb der sich ergebenden Subbaugruppen findet sich dann der für das jeweils verwendete Mauerwerk typische Verband. Eine vollständige Trennung von Primär- (Tragwerk, Rohbau) und Sekundärstruktur (Bekleidung, Ausbau) ist möglich. Diese ergibt sich jedoch nicht zwingend aus dem Lösungsansatz. Im Innenraum kann die nicht durchgängig vorhandene Trennung zwischen Roh- und Ausbau durch farbiges Hervorheben der nicht geschlossenen umlaufenden Ausbaulinie (Strichlinie in Bild 146) gezeigt werden.

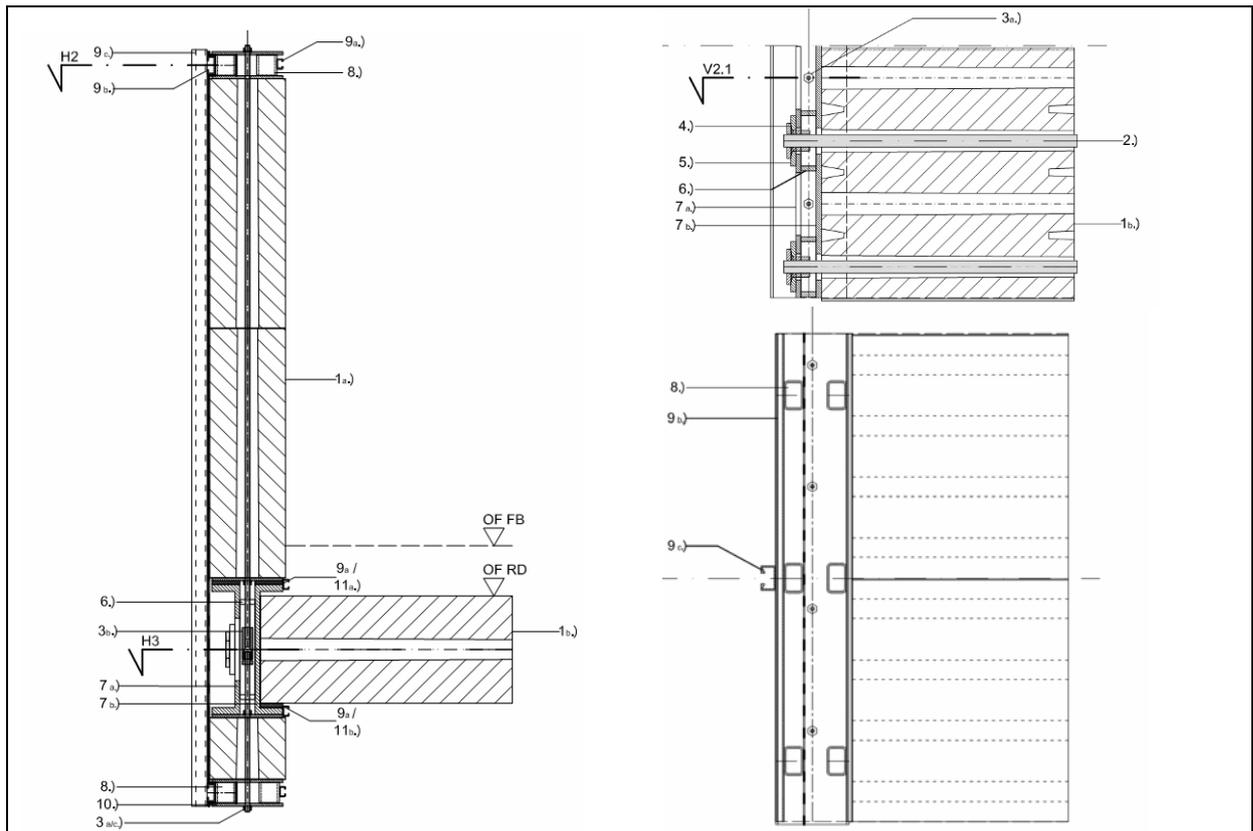


Bild 147 Teilschnitte der Fügung im Wand-Decken-Knoten und im Bereich der zeilenhaften Verbindung

In Bild 147 kann gezeigt werden, dass die Variante mit linearer Fügung keine Stetigkeit (Gleichteilung) aufweist. Im Wand-Decken-Knoten und an der zeilenhaften Fassadenverbindung zeigt sich eine Verdichtung der Verbindungsmittel gegenüber der sonst verbindungsmittellosen Trockenmauer. Die zur Erzeugung und Aufrechterhaltung der Vorspannung verwendeten Bauteile (Ankerplatten, Spannstäbe, Verbindungsmuffen und Distanzbolzen) der jeweiligen Baugruppe werden unabhängig vom Modul angeordnet. Modul und Verbindung wirken unabhängig voneinander. Eine Untersuchung der mit dem Spreizvorgang im Zusammenhang stehenden Zugänglichkeit beider im Wandgefüge konzentriert angeordneten linienhaften Verbindungselemente ist notwendig. Zudem Bedarf der Montagespalt eine gesonderte Untersuchung hinsichtlich der Effizienz zur Aufnahme von Maßabweichungen. Die linienhafte Verbindung (vergleiche Abschnitt 2.6.2, Bild 19) bedarf neben der Entwicklung einer geeigneten Spannstelle, eine statische Bemessung der überbrückten Öffnung.

Im Rahmen der modularen Fügung hat die linienhafte Verbindung im Zusammenwirken mit dem sogenannten Distanzbolzen mehrere Funktionen zu erfüllen. Im Zuge einer möglichen Weiterentwicklung dieser Fügung ist neben der Bemessung, Dimensionierung und Auslegung der Einzelteile, das Zusammenwirken im Mauerwerksverband genauer zu untersuchen. Darüber hinaus stellt die Sicherstellung der Funktionstüchtigkeit der im Montagestoß „eingeklemmten“ Folien hohe Anforderungen an die Weiterentwicklung.

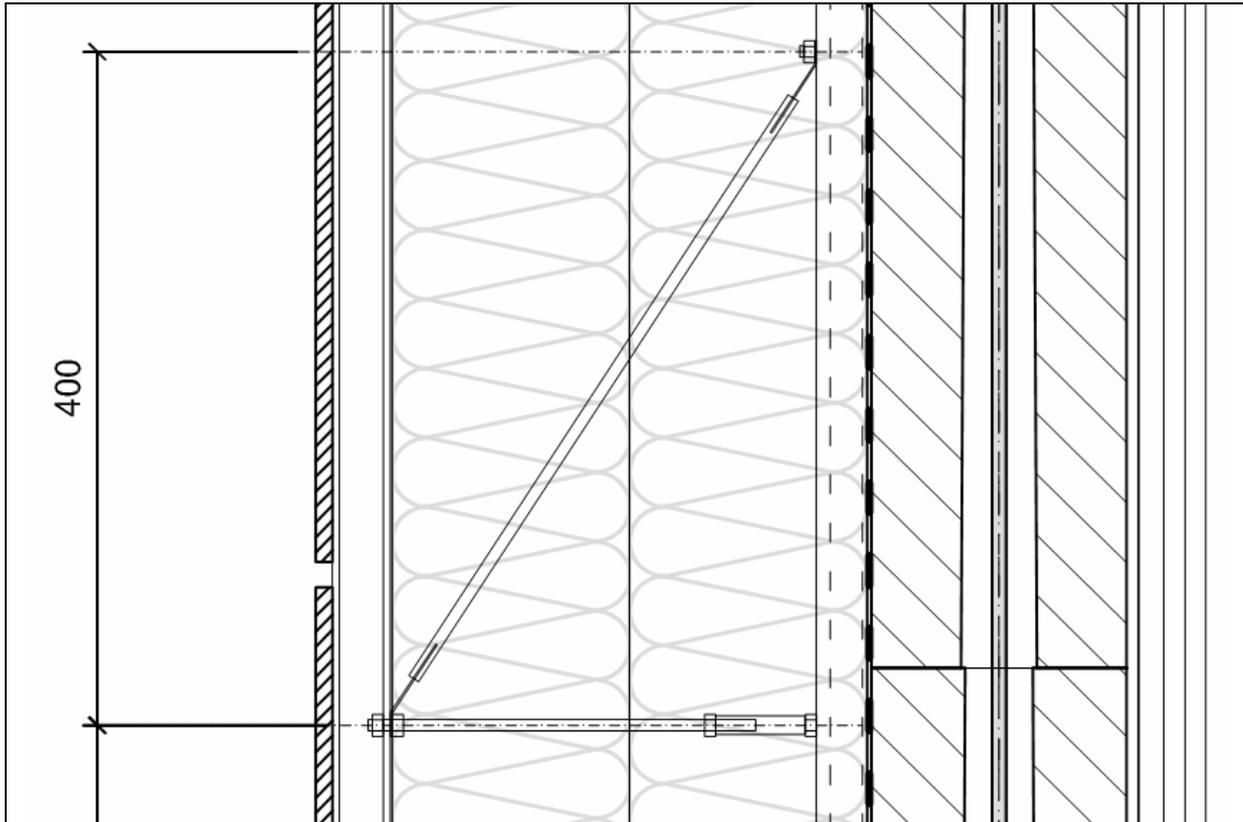


Bild 148 Detail: Punktförmiger Fassadenanschluss an linienhafte Verbindung mit Substruktur

In der Anwendung der elementbezogenen - linearen Verbindung im Bereich der Außenwand kann im Fassadenschnitt (Bild 148) gezeigt werden, dass das dem elementbezogenen Ansatz zugrunde liegende Teilungsprinzip von der Fassadenteilung unabhängig ist (vergleiche Abschnitt 4.1.2.). Das Fugenbild der Fassade ist aufgrund der horizontalen, zeilenhaften Verbindung in Folge der vertikal dazu angeordneten Substruktur unabhängig. Es kann gezeigt werden, dass die Schichten (von der Innenwandbekleidung bis zur Fassadenbekleidung) losgelöst vom Modul nur an der linienhaften Verbindung befestigt sind. Bei Wahl einer punktförmig befestigten Fassade ist aufgrund der notwendigen flächigen Verteilung der Fassadenlast eine Substruktur zwischen den horizontal angeordneten linienhaften Verbindungsmitteln notwendig. Die erforderliche Luftdichtheit wird, wie bereits in Abschnitt 4.8.2 dargestellt, vom Modul unabhängig, durch Zuordnung zur Schicht sichergestellt.

Wie beim modularen Ansatz auch, wird bei der linienhaften Verbindung durch die Materialwahl und Ausbildung offener Fugen dem Grundsatz „innen dichter als außen“ [127] gefolgt. Der Anschluss der Fassadenunterkonstruktion wird, ebenso wie beim modularen Ansatz, durch Materialwechsel am Ankerfuß der Fassade erreicht. Die teils in der Dämmebene angeordnete Substruktur stellt einen erhöhten Aufwand beim Einbringen des Dämmstoffs dar, muss aber hinsichtlich der Auswirkung auf etwaige Wärmeverluste aufgrund der Lage nicht als Wärmebrücke eingestuft werden (vergleiche Abschnitt 4.7.3). Die Sicherstellung der Wind- und Schlagregendichtheit wird, in Analogie zu Abschnitt 4.7.3, ohne Einsatz zusätzlicher Schichten als gesichert angenommen.

4.8.8. Zusammenfassung Variante B

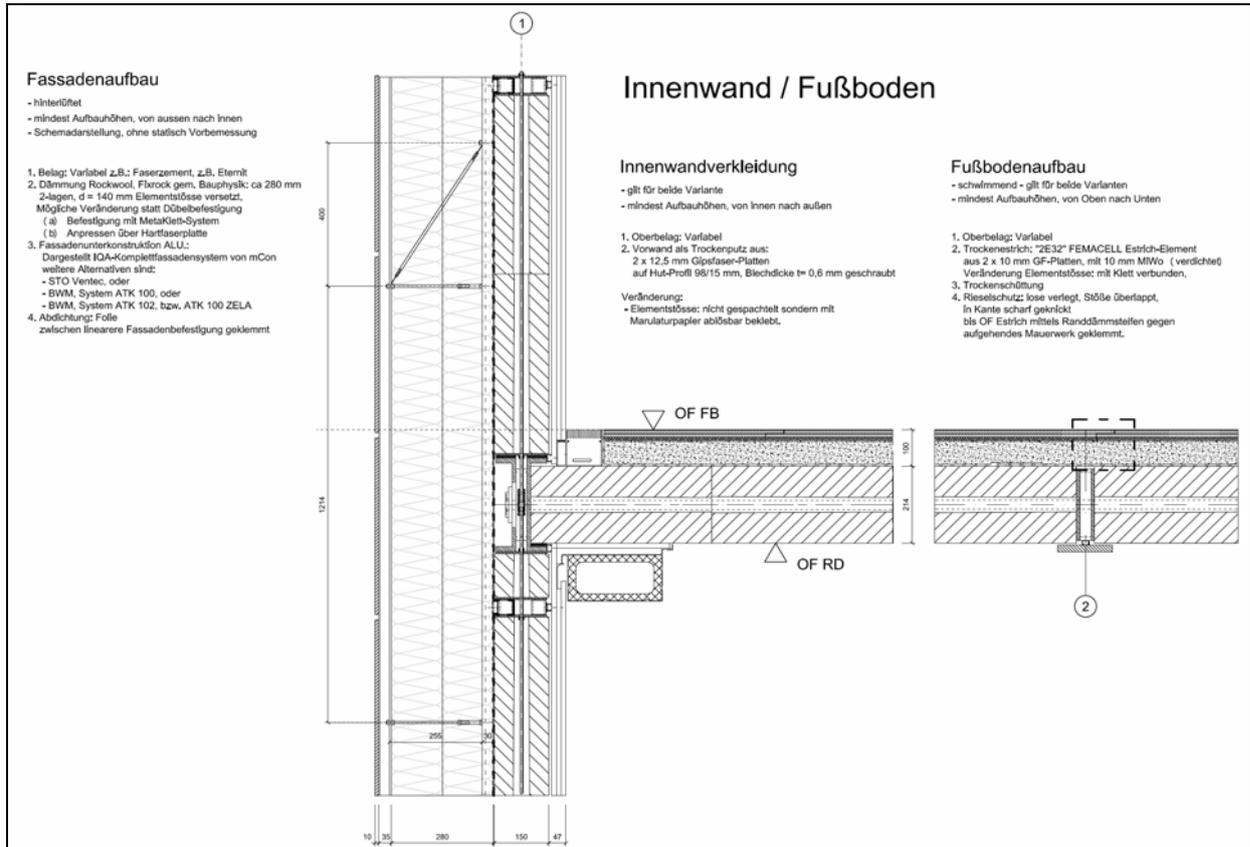


Bild 149 Zusammenfassende Darstellung des Wand-Decken-Knotens mit elementbezogener - linearer Verbindung

Die Ergebnisse der entwickelten Variante B (elementbezogene - lineare Verbindung) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Die Fragestellungen zur Luftabdichtung und Öffnungsbildung im Wandelement werden durch den elementbezogenen Ansatz gelöst.
- Die Luftdichtheit kann, bei sachgerechter Montage, auch ohne zusätzliche Versuche als gegeben betrachtet werden.
- Durch Abweichung von den theoretisch entwickelten Vorgaben entsteht ein Hybrid der bezüglich der vorgeschlagenen vollflächig aufgetragenen Folienabdichtung, dem Holzleichtbau verwandt ist.
- Die Konstruktion ermöglicht es,
- auf am Markt vorhandene Baustoffe zurückgreifen zu können.
- die zur Bestätigung des statischen Konzepts notwendigen Tests, losgelöst von den bauphysikalischen Tests durchzuführen.



5. Variantenvergleich

5.1. Vergleich der Varianten A und B

5.1.1. Ökobilanzieller Vergleich der Varianten A und B

Ziel der Ökobilanz ist es, die Umweltwirkungen der beiden entwickelten Konstruktionsvarianten zu bewerten und deren Vor- und Nachteile gegenüber herkömmlichen Bauweisen aufzuzeigen. Dazu werden folgende Konstruktionen untersucht und miteinander verglichen:

- ReMoMaB Variante A – „Kreuzverbinder“
- ReMoMaB Variante B – „linienhafte Verbindung“
- Vergleichstyp 1 – Wärmedämmverbundsystem (WDVS) + Stahlbetonwand/Decke
- Vergleichstyp 2 – Mauerwerk 2-schalig
- Vergleichstyp 3 – Monolithische Außenwand mit Porenbeton

Der Vergleich beschränkt sich auf Konstruktionsvarianten in Massivbauweise um gleichwertige Aufbauten gegenüberzustellen. Ebenfalls aufeinander abgestimmt sind die bauphysikalischen und statischen Kenngrößen. Alle fünf Aufbauten erreichen das gleiche Anforderungsniveau.

5.1.2. Ausgangsbedingungen

Bezugseinheit Wand-Decken-Knoten:

Die nachfolgende Bilanzierung wird für eine fest definierte Bezugsgröße durchgeführt. Dabei operiert die Bilanzierung nur auf Material und Detailebene, eine Bilanzierung auf Gebäudeebene ist innerhalb des Projekts ReMoMaB nicht vorgesehen.

Als Bezugseinheit für den Vergleich wird ein Teilabschnitt des Wand-Decken-Knotens festgelegt. Darin werden jeweils die Umweltwirkungen für 1m² Außenwand sowie 0,5 m² Geschossdecke inklusive sämtlicher Bauteilschichten bilanziert (siehe Bild 150). Das in dieser Geometrie dargestellte Verhältnis aus Wand- und Deckenfläche entspricht in etwa dem Verhältnis bei einem Standard-Einfamilienhaus (vergleiche hierzu Entwurf eines Musterhauses in Abschnitt 7.8.1).

Die Installationen der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA) werden für die Bilanzierung komplett ausgeklammert, da der Schwerpunkt auf den baukonstruktiv bedingten Parametern liegen soll. Da die TGA in allen Fällen vorgesehen werden müsste, würde deren Berücksichtigung die Ergebnisse der Ökobilanz der Baukonstruktion überlagern und so deren Interpretation erschweren.

Die bauphysikalischen Anforderungen orientieren sich für alle Vergleichsvarianten an den in Abschnitt 3.8.3 definierten Standards. Der Wärmedurchgangskoeffizient aller Konstruktionsvarianten entspricht 0,12 W/m²K.

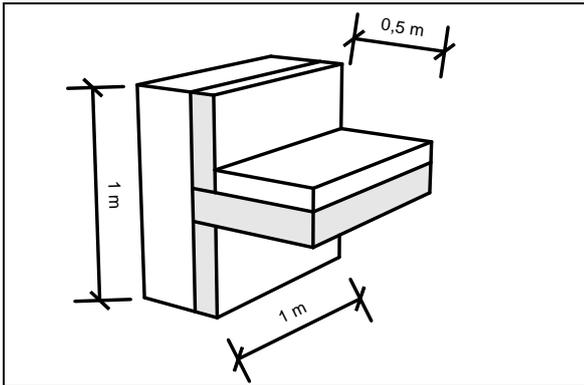


Bild 150 Bezugseinheit Wand-Decken-Knoten-Ausschnitt

Systemgrenzen und verwendete Datensätze:

Bei der Bilanzierung wird auf zwei Arten von Datensätzen zurückgegriffen. In einigen Fällen kommen die produktspezifischen Umweltproduktdeklaration (EPD, Typ III-Umweltzeichen (nach ISO 14025) zum Einsatz, für alle anderen Baustoffe, für die keine spezifische EPD vorhanden ist, wird auf die Datensätze der Ökobau.dat 2009 zurückgegriffen, die sich auf Querschnittswerte pro Baustoffkategorie bezieht. Sämtliche Datensätze umfassen die Lebenswegabschnitte „Cradle to Gate“, das heißt die Herstellung von Roh- und Hilfsstoffen ist ebenso berücksichtigt wie die eigentliche Produktion inkl. Verpackung. Die Systemgrenze bildet also das versandfertige Produkt am Werkstor (Gate). Transporte vom Werk zum Nutzer wurden nicht berücksichtigt. Gleiches gilt für die Phase End-of-Life. Auch hier wurden keine Transporte von der Baustelle zu den Recyclinganlagen bzw. der Deponie gewertet.

Welcher Datensatz für die jeweiligen Baustoffe angesetzt wird, kann den Eingangsdatentabellen je untersuchter Bauweise unter Abschnitt 5.1.4 entnommen werden. Die Bilanzierung richtet sich nach den Vorgaben gemäß DGNB [175], sowie der ISO 14040, 14041, 14042 und 14043.

Tabelle 11 Zusammenfassung der Systemgrößen

Bezugseinheit:	Wand-Decken-Knoten (1m² Wand, 0,5m² Decke)
Systemgrenzen:	Cradle to Gate, sämtliche Installationen der TGA ausgenommen, Transporte „Gate to Baustelle“ ausgenommen
Datenbasis:	Ökobau.dat Version 2009 (bereitgestellt durch das BMVBS) sowie EPD's der Hersteller (siehe Eingangsdaten, bereitgestellt durch Hersteller und „Institut Bauen und Umwelt e.V.“)
Bilanzierungsrahmen:	a) Ersterstellung, b) 50 Jahre nach DGNB, c) mit End-of-Life Szenario Produktrecycling

Folgende allgemein anerkannte ökologische Parameter (Wirkkategorien) wurden betrachtet [91]:

Tabelle 12 Betrachtete Wirkkategorien

	Kürzel	Bezeichnung	Einheit
-	PEI _{ne} :	Primärenergie nicht erneuerbar	[kWh / Bezugsgröße Wand-Decken-Knoten]
-	PEI _e :	Primärenergie erneuerbar	[kWh / Bezugsgröße Wand-Decken-Knoten]
-	GWP:	Treibhauspotenzial	[kg CO ₂ -Äqu / Bezugsgröße Wand-Decken-Knoten]
-	AP:	Versauerungspotenzial	[kg SO ₂ -Äqu / Bezugsgröße Wand-Decken-Knoten]
-	POCP:	Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial	[kg Ethen-Äqv / Wand-Decken-Knoten]
-	EP:	Eutrophierungspotenzial	[kg Phosp.-Äqu / Bezugsgröße Wand-Decken-Knoten]
-	ODP:	Ozonschichtabbaupotenzial	[kg R11-Äqu / Bezugsgröße Wand-Decken-Knoten]

5.1.3. Untersuchungsmethode

Folgende Vergleiche wurden durchgeführt:

a) Vergleich der Umweltwirkungen der Ersterstellung inklusive Dominanzanalyse

Der erste Vergleich stellt die Umweltwirkungen für die Ersterstellung gegenüber, also für das einmalige Erstellen der gesamten Konstruktion, ohne Instandhaltung und Einbeziehung der Phase End-of-Life. Mittels einer Dominanzanalyse der einzelnen Materialgruppen innerhalb der sieben untersuchten Wirkkategorien wird der Einfluss einzelner Baustoffe auf die Ökobilanz dargestellt und die Basis für spätere Optimierungsstrategien geschaffen.

b) Vergleich der gesamten Umweltwirkungen über 50 Jahre inklusive Instandhaltung und End-of-Life nach DGNB [175]

Dieser Vergleich orientiert sich an den Standards der DGNB. Bilanziert werden die gesamten Umweltwirkungen über einen Zeitraum von 50 Jahren. Die angesetzte Nutzungsdauer für einzelne Baustoffe orientiert sich an den Vorgaben des Leitfadens Nachhaltiges Bauen des BMVBS [191]. Materialien mit einer Lebensdauer von weniger als 50 Jahren werden entsprechend oft ausgetauscht. Konstruktionsbedingte und individuelle Abpassungen dieser Austauschzyklen werden zu Gunsten der Vergleichbarkeit nicht gesondert bilanziert.

Für die Phase End-of-Life finden die von der DGNB entwickelten Szenarien Anwendung. Dabei werden Annahmen für folgende fünf Materialgruppen und deren Verwertungswege unterschieden:

- Metalle: Verwertungsweg Recycling inklusive des jeweiligen Recyclingpotenzials (Gutschrift)
- Mineralische Baustoffe: Vereinfacht für alle mineralischen Baustoffe - Verwertungsweg „Bauschutttaufbereitung“
- Materialien mit Heizwert: Verwertungsweg „thermische Verwertung“
- Wärmeerzeuger: Für diese Bilanz irrelevant.

- Restlichen Materialien: Für alle anderen Materialien wird eine Deponierung angesetzt.

c) Vergleich der Umweltwirkungen mit dem End-of-Life Szenario Produktrecycling für Materialien mit Nutzungsdauern von mehr als 50 Jahren

Der dritte Vergleich soll das Potenzial der Wiederverwendung aufzeigen. Dazu wird auf Basis der Bilanzierung nach DGNB (siehe b) für alle Baustoffe die eine mittlere Nutzungsdauer von mehr als 50 Jahren haben und sortenrein sowie zerstörungsfrei rückbaubar sind, eine Wiederverwendung (Produktrecycling) angenommen. Alle anderen Baustoffe werden gemäß den DGNB Standards verwertet bzw. entsorgt. Wiederverwendung bedeutet also rechnerisch eine Bilanzierung entsprechender Bauteile mit umgekehrtem Vorzeichen.

Um die mit dem Rückbau verbundenen Materialverluste einzubeziehen, wird für die zur Wiederverwendung angesetzten Baustoffe zunächst mit einer Ausschussrate von 20% kalkuliert. Die Ausschussmaterialien werden den vorgegebenen Verwertungswegen gemäß DGNB zugeführt. Inwieweit dieser Wert realistisch ist, müssen zukünftige Praxistests zeigen.

5.1.4. Eingangsdaten

Die nachfolgend aufgeführten Eingangsdaten beziehen sich jeweils auf die Bezugseinheit Wand-Decken-Knoten (also 1m² Wandaufbau sowie 0,5m² Deckenaufbau jeweils mit allen Schichten).

Eingangsdaten Variante A – Kreuzverbinder:

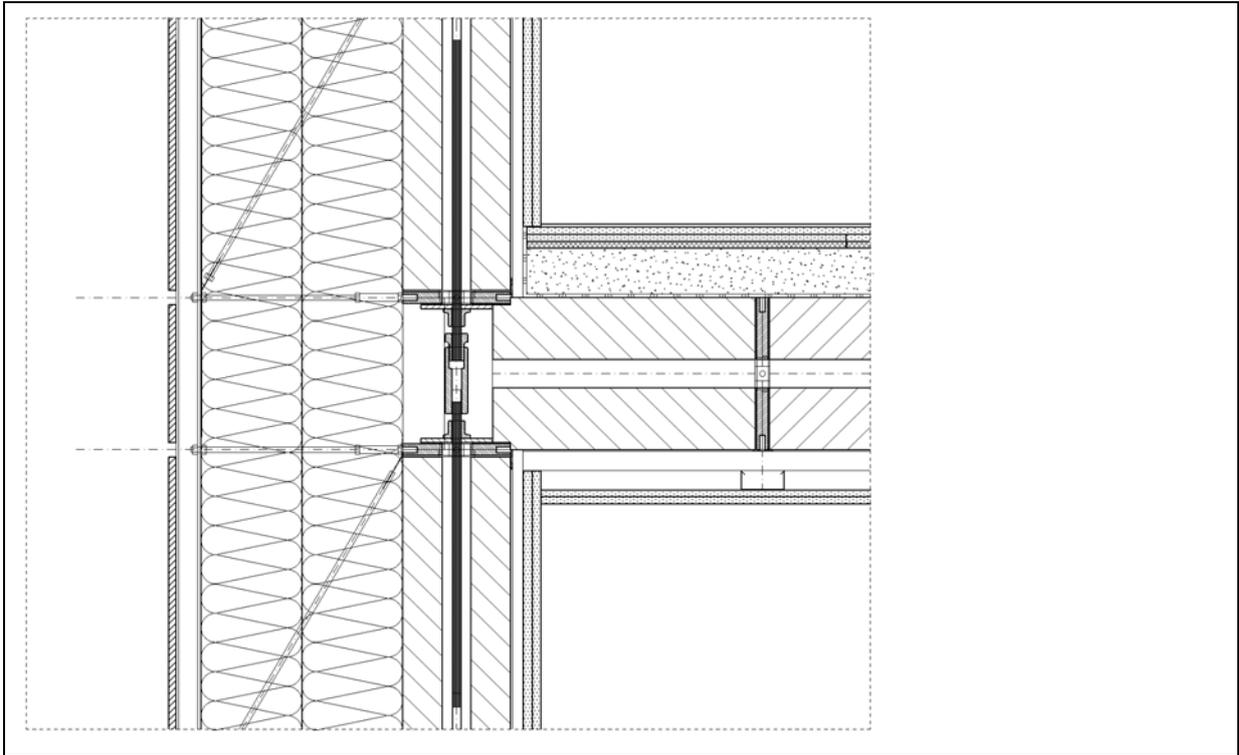


Bild 151 Detail Wand-Decken-Knoten-Ausschnitt: Variante A - Kreuzverbinder

ReMoMaB Variante A - Kreuzverbinder:				
Dicke [cm], [Stück]	Baustoff, Schichtaufbau von außen nach innen	Masse pro Bezugseinheit [kg]	Verwendeter Datensatz für Herstellung und End of Life [Ökobau.dat oder EPD]	Austauschquotient *
Wandaufbau:				
0,1	Fassadenbekleidung Titanzinkblech -Eol	7,20	EPD_Titanzink Blech Rheinzink EPD_Eol_Titanzink Blech - Recyclingpotential (EPD)	1
2 St.	Halfenschiene als UK für Verkl. ,HL50/30,Raster 50cm, vertik. -Eol	6,46	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	1
4 St.	Unterkonstruktion mCon, Edelstahl (Raster 50cm) -Eol	3,84	7.4 Befestigungsmittel/Schrauben Edelstahl 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
28	Mineralwolldämmung Fixrock 035 -Eol	14,00	EPD_Rockwool Mineralwolle/ Steinwoll Dämmstoffe 50kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	1
8 St.	Kopfplatten Wand 10/10/1 -Eol	0,75	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
8 St.	Mutter mit Unterlagscheibe, M8 -Eol	0,01	4.1.5 Stahl Schmiedebauteil 4.8 Recyclingpotenzial Stahl Grobblech (warmgewalzt)	0
4 St.	Spannmuffe Typ2, M8, Halben VBM, gv-M8 -Eol	0,05	4.1.5 Stahl Schmiedebauteil 4.8 Recyclingpotenzial Stahl Grobblech (warmgewalzt)	0
4 St.	Spannmuffe Typ1, M8, Halben VBM, gv-M8 -Eol	0,13	4.1.5 Stahl Schmiedebauteil 4.8 Recyclingpotenzial Stahl Grobblech (warmgewalzt)	0
4 St.	Gewindestab M8,DIN 975 -Eol	1,56	4.1.5 Stahl Schmiedebauteil 4.8 Recyclingpotenzial Stahl Grobblech (warmgewalzt)	0
	Schrauben/Dübel -Eol	0,05	7.4 Befestigungsmittel/Schrauben Edelstahl 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
16 St.	Dichtungsbänder -Eol	0,72	7.3.1 EPDM-Dichtungen für Aluminiumprofil; 0,18 kg/m End of life - EPDM Schaum (Rohrisolierung)	2
16 St.	Kreuzverbinder-Wand 15 cm -Eol	3,70	4.3.1 Aluminium Profil (2005) 4.8 Recyclingpotential Aluminium (Blech und Profile)	0
15	Kalksandstein, KS-Quadro adaptiert, 50/50/15 -Eol	194,16	1.3.01 Kalksandstein SILKA - Xella; 1800 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
2 St.	Halfenschiene HL 38/17 (vertikal, innen) -Eol	1,56	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
2,5	Gipskartonplatte, 2 x 12,5 -Eol	20,10	EPD_Fermacell Gipsfaserplatte 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
0,1	Anstrich -Eol	0,30	5.5 Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest 9.5 Bauschutttaufbereitung	3
Dackenaufbau:				
0,9	Fussbodenbelag -Eol	4,89	EPD_Laminat Bodenbelag Meister Werk Schulte (9mm) EPD_Eol:Laminat Bodenbelag Meister Werke	2
2	Trockenestrich 2 x 10mm -Eol	9,80	EPD_Fermacell Gipsfaserplatte 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
1	mineral. Trittschalldämmung -Eol	0,85	2.01 Mineralwolle (Boden-Dämmung); 85 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	1
6	Ausgleichsschüttung (Sand) -Eol	54,00	1.2.01 Sand 0/2 getrocknet 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
0,1	Rieselschutz, Pappe -Eol	0,20	6.6.5 Kraftpapier 9.5 Verbrennung Hausmüll	0
21,4	Kalksandstein. KS-Quadro adaptiert, 50/50/21,4 -Eol	223,30	1.3.01 Kalksandstein SILKA - Xella; 1800 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
8 St.	Kreuzverbinder-Decke, 21,4cm -Eol	2,40	4.3.1 Aluminium Profil (2005) 4.8 Recyclingpotential Aluminium (Blech und Profile)	0
8 St.	Dichtungsbänder -Eol	0,36	7.3.1 EPDM-Dichtungen für Aluminiumprofil; 0,18 kg/m End of life - EPDM Schaum (Rohrisolierung)	2
4 St.	Spannstahl DN20 -Eol	6,24	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
8 St.	Kopfplatte DN 20 -Eol	0,75	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
8 St.	Ankerstück T2073 -Eol	0,58	4.1.4 Stahl, warmgewalzte Bleche (2-20mm) 4.8 Recyclingpotenzial Stahl Grobblech (warmgewalzt)	0
2 St.	Unterkonstruktion Decke HF 20/12, Raser 50cm -Eol	0,41	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
2 St.	Gipskartonplatte 2x12,5mm -Eol	20,10	EPD_Fermacell Gipsfaserplatte 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
0,1	Anstrich -Eol	0,20	5.5 Innenfarbe 9.5 Bauschutt-Deponierung	3

* Austauschzyklen in 50 Jahren nach: Leifaden Nachhaltiges Bauen des BMVBS

Bild 152 Eingangsdaten Variante A - Kreuzverbinder

Eingangsdaten Variante B – linienhafte Verbindung

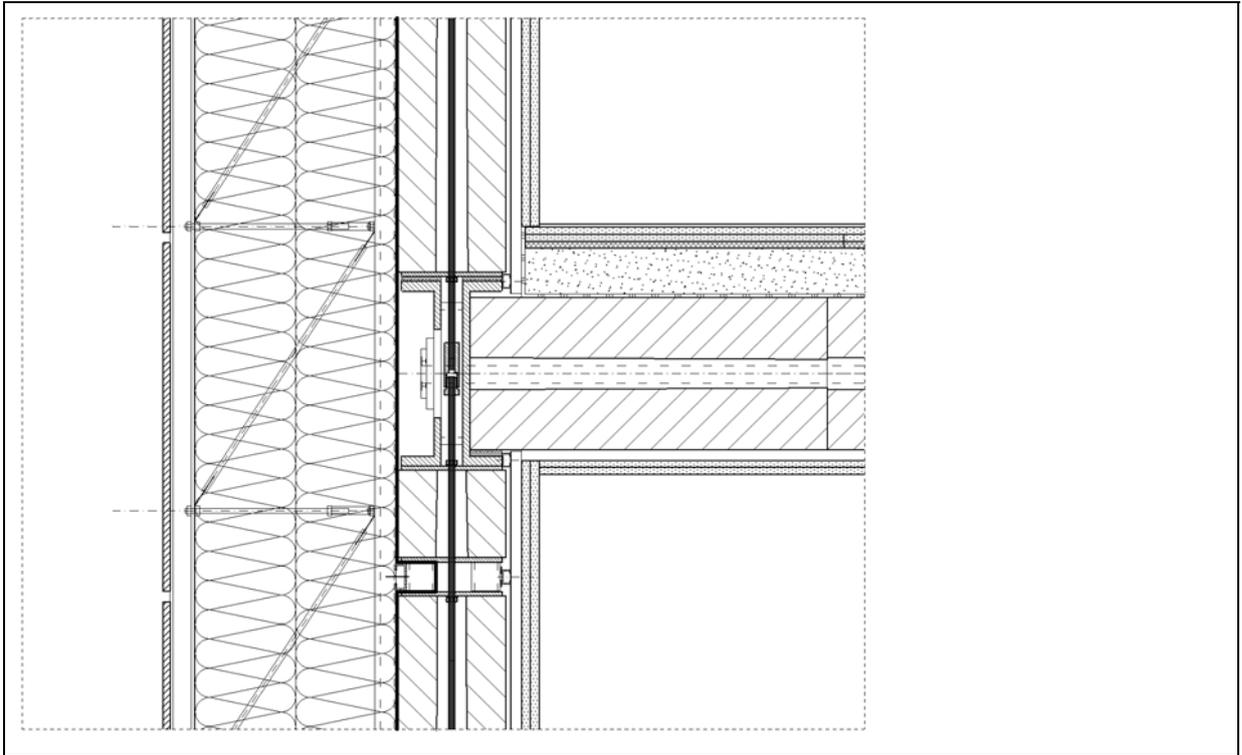


Bild 153 Detail Wand-Decken-Knoten-Ausschnitt: Variante B - linienhafte Verbindung

ReMoMaB Variante B - linienhafte Verbindung:				
Dicke [cm], [Stück]	Baustoff, Schichtaufbau von außen nach innen	Masse pro Bezugseinheit [kg]	Verwendeter Datensatz für Herstellung und End of Life [Ökobau.dat oder EPD]	Austauschquotient *
Wandaufbau:				
0,1	Fassadenbekleidung, Titanzinkblech -Eol	7,20	EPD_Titanzink Blech Rheinzink EPD_Eol_Titanzink Blech - Recyclingpotential (EPD)	1
2 St.	Halfenschiene als UK für Verkl., HL50/30, Raster 50cm, vertikal -Eol	6,46	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	1
4 St.	Wärmebrückenfreie Unterkonstruktion mCon (Achsmass 50cm) -Eol	3,84	7.4 Befestigungsmittel/Schrauben Edelstahl 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
28	Mineralwolldämmung Fixrock 035 -Eol	14,00	EPD_Rockwool Mineralwolle/ Steinwoll Dämmstoffe 50kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	1
2 St.	Halfenschiene HL 50/30 (vertikal, Raster 50cm, außen) -Eol	6,46	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
1 St.	Halfenschiene HL 38/17 (horizontal, außen) -Eol	1,86	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
0,1	Folie -Eol	0,30	6.6.2 Dampfbremse PE 9.5 Verbrennung Hausmüll	0
4 St.	Flachstahl 14/0,6/100 -Eol	13,02	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
6 St.	Hohlprofil Rechteck, als Distanshalter -Eol	1,59	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
8 St.	Mutter mit Unterlagscheibe, M8 -Eol	0,01	4.1.5 Stahl Schmiedebauteil 4.8 Recyclingpotenzial Stahl	0
4 St.	Spannmuffe Typ II M8, Halben VBM, gv-M8 -Eol	0,05	4.1.5 Stahl Schmiedebauteil 4.8 Recyclingpotenzial Stahl	0
4 St.	Spannmuffe Typ I M8, Halben VBM, gv-M8 -Eol	0,13	4.1.5 Stahl Schmiedebauteil 4.8 Recyclingpotenzial Stahl	0
4 St.	Gewindestab M8, DIN 975 -Eol	1,56	4.1.5 Stahl Schmiedebauteil 4.8 Recyclingpotenzial Stahl	0
15	Kalksandstein KS-Quadro E 49,8/49,8/15 -Eol	167,76	1.3.01 Kalksandstein SILKA - Xella; 1800 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
	Schrauben/Dübel -Eol	0,10	7.4 Befestigungsmittel/Schrauben Edelstahl 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
3 St.	Halfenschiene HL 20/12 (horizontal, innen), 3 Stück -Eol	1,35	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
2 St.	Halfenschiene HL 38/17 (vertikal, innen) -Eol	1,56	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
2,5	Gipskartonplatte, 2x12,5; 0,67m ² -Eol	20,10	EPD_Farmacell Gipsfaserplatte 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
0,1	Anstrich -Eol	0,30	5.5 Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest 9.5 Bauschutttaufbereitung	3
Deckenaufbau:				
0,9	Fussbodenbelag Parkett / Laminat -Eol	4,89	EPD_Laminat Bodenbelag Meister Werk Schulte (9mm) EPD_Eol:Laminat Bodenbelag Meister Werke	2
2	Trockenestrich 2x10mm -Eol	9,78	EPD_Farmacell Gipsfaserplatte 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
1	Mineral. Trittschalldämmung -Eol	0,85	2.01 Mineralwolle (Boden-Dämmung); 85 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	1
6	Ausgleichsschüttung (sand) -Eol	54,00	1.2.01 Sand 0/2 getrocknet 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
0,1	Riselschutz Pappe -Eol	0,20	6.6.5 Kraftpapier 9.5 Verbrennung Hausmüll	0
21,4	Kalksandstein KS-Quadro E 49,8/49,8/21,4 -Eol	198,09	1.3.01 Kalksandstein SILKA - Xella; 1800 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
1 St.	UAP-Stahlprofil 260 (außen) -Eol	27,94	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
1 St.	UAP-Stahlprofil 260 (innen) -Eol	30,00	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
4 St.	Spannstahl DN20 -Eol	6,22	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
4 St.	Hohlprofil Rechteck -Eol	2,93	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
8 St.	Kopfplatte DN 20 (8 St.) -Eol	0,75	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
8 St.	Ankerstück T2073 DN20 -Eol	0,58	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
2,5	Gipskartonplatte, 2x12,5; 0,43m ² , 15 kg/m ² -Eol	12,90	EPD_Farmacell Gipsfaserplatte EPD_Farmacell Gipsfaserplatte	0
2 St.	Unterkonstruktion Decke HF 20/12, Raser 50cm, 0,45kg/m -Eol	0,41	4.1.3 Stahlprofil 4.8 Recyclingpotential Stahlprofil	0
0,1	Anstrich -Eol	0,20	5.5 Innenfarbe 9.5 Bauschutt-Deponierung	3

* Austauschzyklen in 50 Jahren nach: Leitfaden Nachhaltiges Bauen des BMVBS

Bild 154 Eingangsdaten Variante B - linienhafte Verbindung

Eingangsdaten Vergleichstyp 1 – WDVS mit Stahlbeton

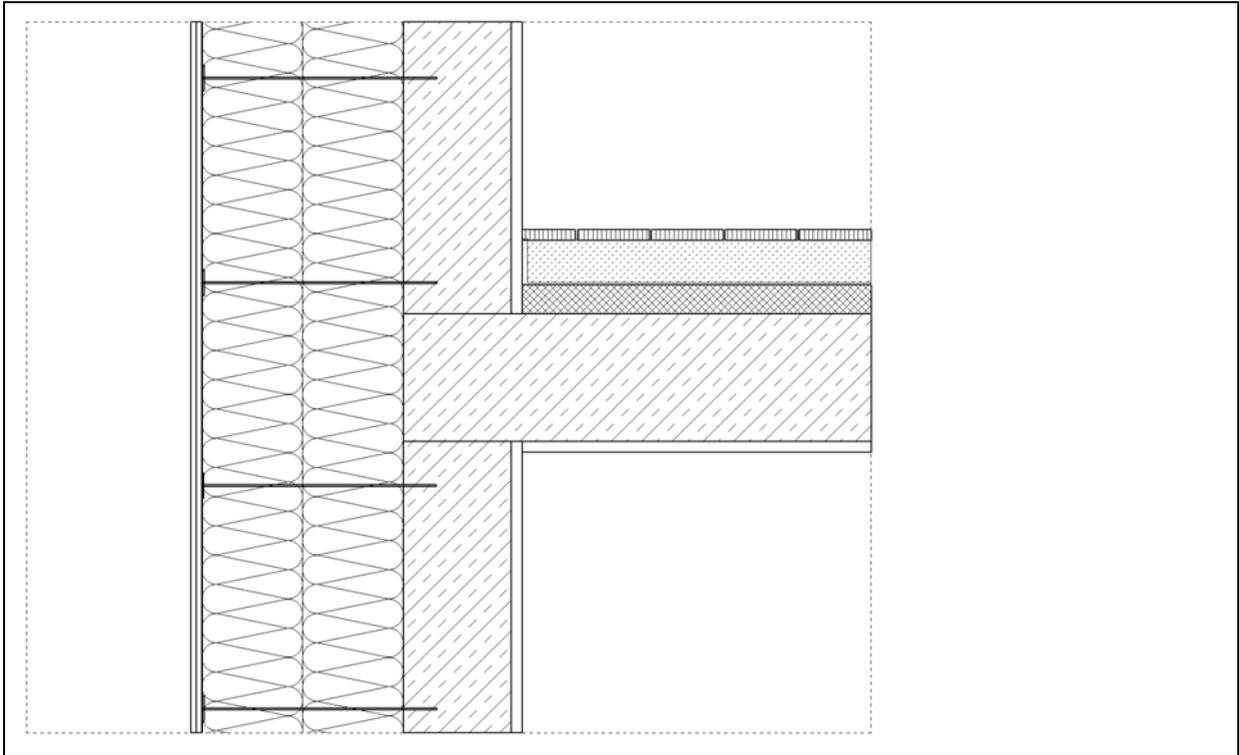


Bild 155 Detail Wand-Decken-Knoten-Ausschnitt: Vergleichstyp 1 – WDVS mit Stahlbeton

Vergleich Typ 1 - WDVS+Stahlbeton:				
Dicke [cm], [Stück]	Baustoff, Schichtaufbau von außen nach innen	Masse pro Bezugseinheit [kg]	Verwendeter Datensatz für Herstellung und End of Life [Ökobau.dat oder EPD]	Austauschquotient *
Wandaufbau:				
0,1	Anstrich -Eol	0,50	5.4 Fassadenfarbe Silikonharzfarbe 9.5 Bauschutt-Deponierung	3
0,3	Oberputz -Eol	3,00	10.1.4 WDVS Unterputz mineralisch 9.5 Bauschuttzubereitung	1
0,1	Haftgrund -Eol	0,30	5.4 Fassadenfarbe Voranstrich Silikat-Dispersion 9.5 Bauschuttzubereitung	1
0,4	Unterputz -Eol	4,00	10.1.4 WDVS Unterputz mineralisch 9.5 Bauschuttzubereitung	1
0,1	Glasarmierungsgitter -Eol	0,16	10.1.3 WDVS Glasarmierungsgitter 9.5 Bauschuttzubereitung	1
8	Dübel -Eol	0,32	10.1.2 WDVS Dübel 9.5 Bauschutt-Deponierung	1
28	Wämedämmung EPS -Eol	8,40	2.02 EPS PS 30; 30 kg/m ³ 9.5 Verbrennung Hausmüll	1
0,6	Klebemörtel -Eol	4,80	1.4.02 Normalmörtel - IWM; 1600 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung	1
15	Stahlbeton -Eol	333,47	1.4.01 Transportbeton C25/30; 2365 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung (+Kiesgutschrift)	0
6%	Bewehrungsstahl -Eol	70,65	4.1.2 Bewehrungsstahl 4.8 Recyclingpot. Stahl (nicht angesetzt da RC-Stahl als Input)	0
0,8	Innenputz -Eol	11,20	1.4.04 Kalk-Gips-Innenputz; 1400 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung	0
0,1	Anstrich -Eol	0,50	5.5 Innenfarbe 9.5 Bauschuttzubereitung	3
Deckenaufbau:				
0,1	Parkettlack -Eol	0,20	5.6.3 Parkettlack (Grundierung Holz; wasserverdünnt) 9.5 Verbrennung Hausmüll	6
3	Parkett -Eol	5,75	3.3.2 Stabparkett; 11,5 kg/m ² 9.5 Verbrennung Hausmüll	1
0,2	Klebstoff -Eol	1,00	1.4.05 Fliesenkleber 9.5 Bauschutt-Deponierung	1
6	Schwimmender Estrich -Eol	57,00	1.4.03 Zementestrich - IWM; 1900 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung	1
0,1	Trennlage -Eol	0,13	6.6.2 Dampfbremse PE 9.5 Verbrennung Hausmüll	1
4	Trittschalldämmung -Eol	0,60	2.01 Mineralwolle (Boden-Dämmung); 85 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung	1
18	STB Decke Beton -Eol	200,08	1.4.01 Transportbeton C25/30; 2365 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung (+Kiesgutschrift)	0
6%	Bewehrungsstahl -Eol	42,39	4.1.2 Bewehrungsstahl 4.8 Recyclingpot. Stahl (nicht angesetzt da RC-Stahl als Input)	0
0,8	Innenputz -Eol	5,60	1.4.04 Kalk-Gips-Innenputz; 1400 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung	0
0,1	Anstrich -Eol	0,25	5.5 Innenfarbe 9.5 Bauschutt-Deponierung	3

* Austauschzyklen in 50 Jahren nach: Leitfaden Nachhaltiges Bauen des BMVBS

Bild 156 Eingangsdaten Vergleichstyp 1 – WDVS mit Stahlbeton

Eingangsdaten Vergleichstyp 2 – Mauerwerk 2-schalig

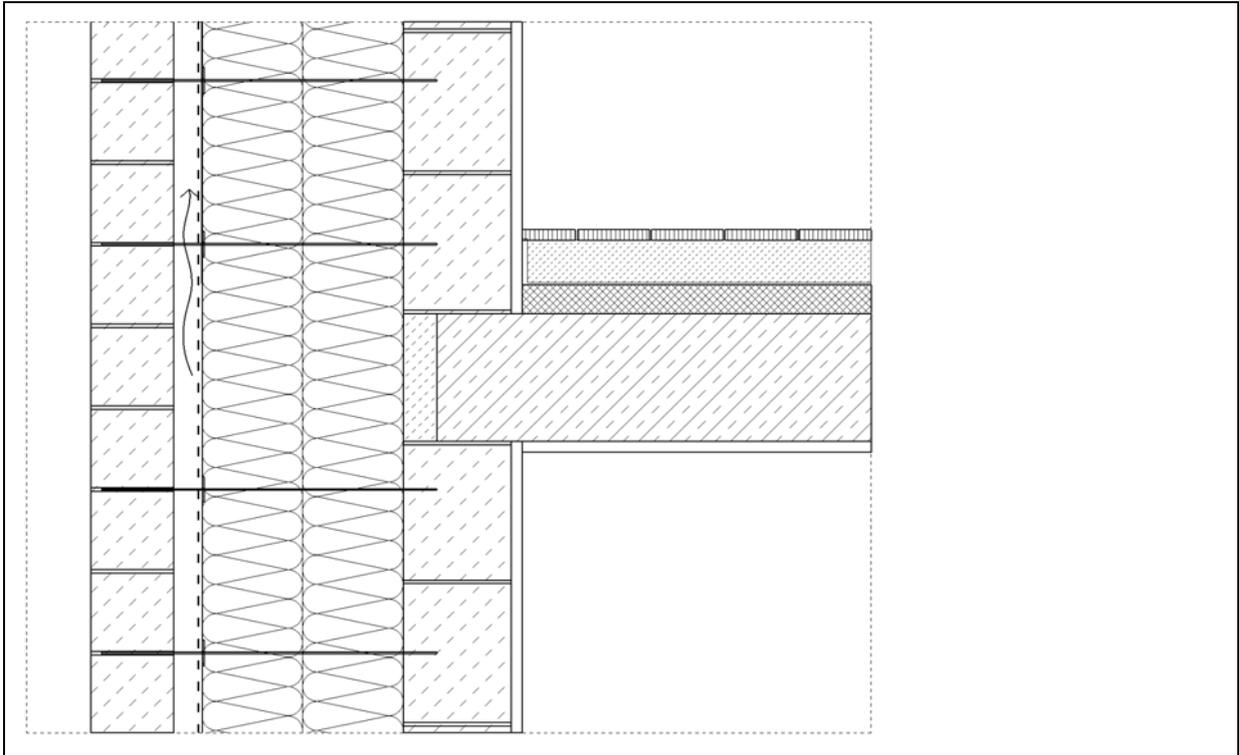


Bild 157 Detail Wand-Decken-Knoten-Ausschnitt: Vergleichstyp 2 – Mauerwerk 2-schalig

Vergleich Typ 2 - Mauerwerk, 2-schalig:				
Dicke [cm], [Stück]	Baustoff, Schichtaufbau von außen nach innen	Masse pro Bezugseinheit [kg]	Verwendeter Datensatz für Herstellung und End of Life [Ökobau.dat oder EPD]	Austauschquotient *
Wandaufbau:				
11,5	Vorsatzschale -Eol	200,79	1.3.02 Vormauerziegel; 1800 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
3%	Vorsatzschale Mörtel -Eol	5,52	1.4.02 Normalmörtel - IWM; 1600 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
0,3	Kaschierung -Eol	0,60	6.6.4 PE/PP Vlies 9.5 Verbrennung Hausmüll	1
28	Wärmedämmung -Eol	16,80	2.01 Steinwolle Dämmstoff - Rockwool 9.5 Verbrennung Hausmüll	1
8 St.	Dübel -Eol	0,32	10.1.2 WDVS Dübel 9.5 Bauschutt-Deponierung	1
17,5	Kalksandstein -Eol	305,55	1.3.01 Kalksandstein SILKA - Xella; 1800 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
17,5	Kalksandstein Mörtel -Eol	8,40	1.4.02 Normalmörtel - IWM; 1600 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
0,8	Innenputz -Eol	11,20	1.4.04 Kalk-Gips-Innenputz; 1400 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
0,1	Anstrich -Eol	0,50	5.5 Innenfarbe 9.5 Bauschutt-Deponierung	3
Deckenaufbau:				
0,1	Parkettlack -Eol	0,20	5.6.3 Parkettlack (Grundierung Holz; wasserverdünnt) 9.5 Verbrennung Hausmüll	6
3	Parkett -Eol	5,75	3.3.2 Stabparkett; 11,5 kg/m ² 9.5 Verbrennung Hausmüll	1
0,2	Klebstoff -Eol	1,00	1.4.05 Fliesenkleber 9.5 Bauschutt-Deponierung	1
6	Schwimmender Estich -Eol	57,00	1.4.03 Zementestrich - IWM; 1900 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	1
0,1	Trennlage -Eol	0,13	6.6.2 Dampfbremse PE 9.5 Verbrennung Hausmüll	1
4	Trittschalldämmung -Eol	0,60	2.01 Mineralwolle (Boden-Dämmung); 85 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	1
18	STB Decke -Eol	200,08	1.4.01 Transportbeton C30/37; 2365 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung (+Kiesgutschrift)	0
6%	Bewehrungsstahl -Eol	42,39	4.1.2 Bewehrungsstahl 4.8 Recyclingpotential Stahl (nicht angesetzt da RC-Stahl als Input)	0
0,8	Innenputz -Eol	5,60	1.4.04 Kalk-Gips-Innenputz; 1400 kg/m ³ 9.5 Bauschutttaufbereitung	0
0,1	Anstrich -Eol	0,25	5.5 Innenfarbe 9.5 Bauschutt-Deponierung	3

* Austauschzyklen in 50 Jahren nach: Leitfaden Nachhaltiges Bauen des BMVBS

Bild 158 Eingangsdaten Vergleichstyp 2 – Mauerwerk 2-schalig

Eingangsdaten Vergleichstyp 3 – monolithische Außenwand (Porenbeton)

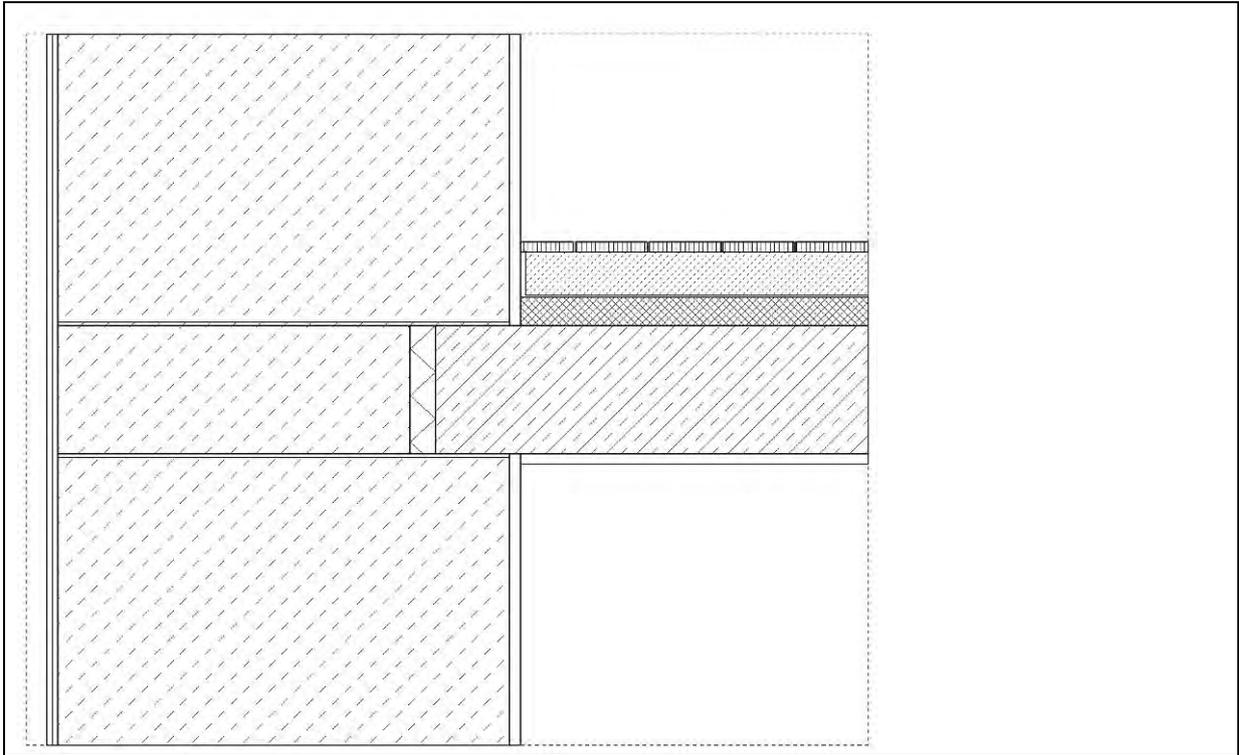


Bild 159 *Detail Wand-Decken-Knoten-Ausschnitt: Vergleichstyp 3 – monolithische Außenwand*

Vergleich Typ 3 - monolithische Außenwand, Porenbeton:				
Dicke [cm], [Stück]	Baustoff, Schichtaufbau von außen nach innen	Masse pro Bezugseinheit [kg]	Verwendeter Datensatz für Herstellung und End of Life [Ökobau.dat oder EPD]	Austauschquotient *
Wandaufbau:				
0,1	Anstrich -Eol	0,50	5.4 Fassadenfarbe Silikonharzfarbe 9.5 Bauschutt-Deponierung	3
0,1	Oberputz -Eol	3,00	10.1.4 WDVS Unterputz mineralisch 9.5 Bauschuttzubereitung	1
0,1	Hafgrund -Eol	0,30	5.4 Fassadenfarbe Voranstrich Silikat-Dispersion 9.5 Bauschuttzubereitung	1
0,4	Unterputz -Eol	4,00	10.1.4 WDVS Unterputz mineralisch 9.5 Bauschuttzubereitung	1
0,1	Glasarmierungsgitter -Eol	0,16	10.1.3 WDVS Glasarmierungsgitter 9.5 Bauschuttzubereitung	1
63	Porenbetonsteine -Eol	237,01	1.3.03 Porenbeton P2 04 unbewehrt; 380 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung	0
1%	Dünnbettmörtel -Eol	9,50	1.4.02 Sondermörtel (Dünnbettmörtel); 1500 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung	0
0,8	Innenputz -Eol	11,20	1.4.04 Kalk-Gips-Innenputz; 1400 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung	0
0,1	Anstrich -Eol	0,50	5.5 Innenfarbe Dispersionsfarbe scheuerfest 9.5 Bauschutt-Deponierung	3
Deckenaufbau:				
0,1	Parkettlack -Eol	0,20	5.6.3 Parkettlack (Grundierung Holz; wasserverdünnt) 9.5 Verbrennung Hausmüll	6
3	Parkett -Eol	5,80 5,75	3.3.2 Stabparkett; 11,5 kg/m ² 9.5 Verbrennung Hausmüll	1
0,2	Klebstoff -Eol	1,00	1.4.05 Fliesenkleber 9.5 Bauschutt-Deponierung	1
6	Schwimmender Estich -Eol	57,00	1.4.03 Zementestrich - IWM; 1900 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung	1
0,1	Trennlage -Eol	0,13	6.6.2 Dampfbremse PE 9.5 Verbrennung Hausmüll	1
4	Trittschalldämmung -Eol	0,60 0,60	2.01 Mineralwolle (Boden-Dämmung); 85 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung	1
18	STB Decke -Eol	200,08 200,08	1.4.01 Transportbeton C25/30; 2365 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung (+Kiesgutschrift)	0
6%	Bewehrungsstahl -Eol	42,12	4.1.2 Bewehrungsstahl 4.8 Recyclingpotential Stahl (nicht angesetzt da RC-Stahl als Input)	0
0,8	Innenputz -Eol	5,60	1.4.04 Kalk-Gips-Innenputz; 1400 kg/m ³ 9.5 Bauschuttzubereitung	0
0,1	Anstrich -Eol	0,25	5.5 Innenfarbe 9.5 Bauschutt-Deponierung	3

* Austauschzyklen in 50 Jahren nach: Leitfaden Nachhaltiges Bauen des BMVBS

Bild 160 Eingangdaten Vergleichstyp 3 – monolithische Außenwand

5.1.5. Ergebnisse und Vergleich

Im Folgenden werden die Ergebnisse der drei vergleichenden Bilanzierungen aufgezeigt.

a) Umweltwirkungen der Ersterstellung

Zunächst werden die Umweltwirkungen für die einmalige Herstellung des gesamten Aufbaus verglichen (Ersterstellung, Tabelle 13). Dabei wird deutlich, dass die neu entwickelten Konstruktionsvarianten bei der Ersterstellung deutlich größere Umweltwirkungen haben, als die herkömmlichen Aufbauten. Dies gilt besonders für die Wirkgrößen AP und EP mit teils mehr als 100% Abweichung (vergleiche Variante A und Typ 3).

Die in Bild 161 und Bild 162 dargestellten Dominanzanalysen machen deutlich, dass dies maßgeblich auf den verstärkten Einsatz von metallischen Baustoffen zurückzuführen ist. So ist das in Variante A für die Kreuzverbinder eingesetzte Aluminium bei ca. 1% der Gesamtmasse für 20-30% der Umweltwirkungen verantwortlich, je nach Wirkkategorie. Die Kalksandsteine sind dagegen trotz ca. 70% der Masse durchschnittlich für lediglich 10% der Umweltwirkungen verantwortlich.

Tabelle 13 Ergebnisse des Vergleichs der Umweltwirkungen

Variante	ReMoMaB Var. A Kreuzverbinder	ReMoMaB Var. B linienhafte Verb.	Vergleich Typ 1, WDVS + Stahlbeton	Vergleich Typ 2, Mauerwerk 2-schalig	Vergleich Typ 3, Monol. Außenwand

Umweltwirkungen der Ersterstellung (pro Bezugsgröße: Wand-Decken-Knoten)

PEI _{ne} [kWh]	830	1075	776	637	554
PEI _e [kWh]	123	70	105	90	106
GWP [kg CO ₂ -Äqv]	222	290	175	160	177
AP [kg SO ₂ -Äqv]	0,812	0,906	0,430	0,452	0,372
POCP [kg Ethen-Äqv]	0,0697	0,110	0,0693	0,0535	0,0563
EP [kg Phosphat-Äqv]	0,0922	0,116	0,0430	0,0484	0,0476
ODP [kg R11-Äqv]	1,68E-05	1,27E-05	1,23E-05	0,775E-05	1,04E-05

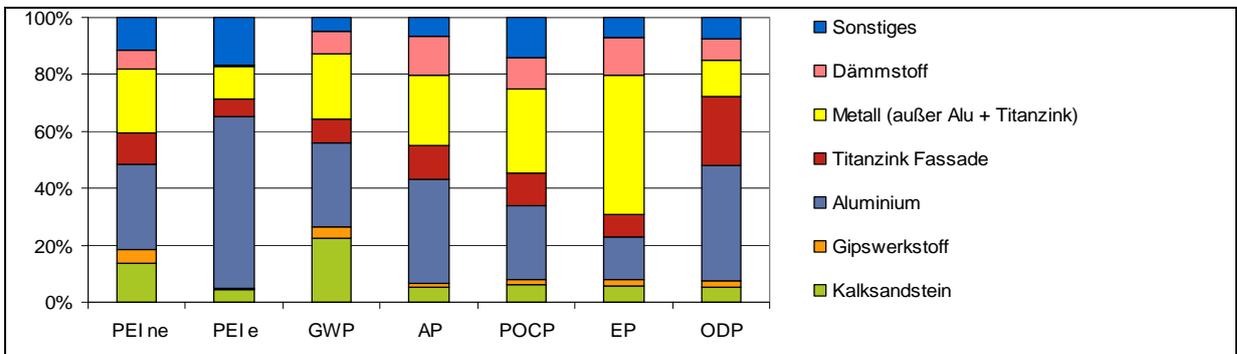


Bild 161 Dominanzanalyse der Baustoffgruppen bei der Ersterstellung für die Variante A - Kreuzverbinder

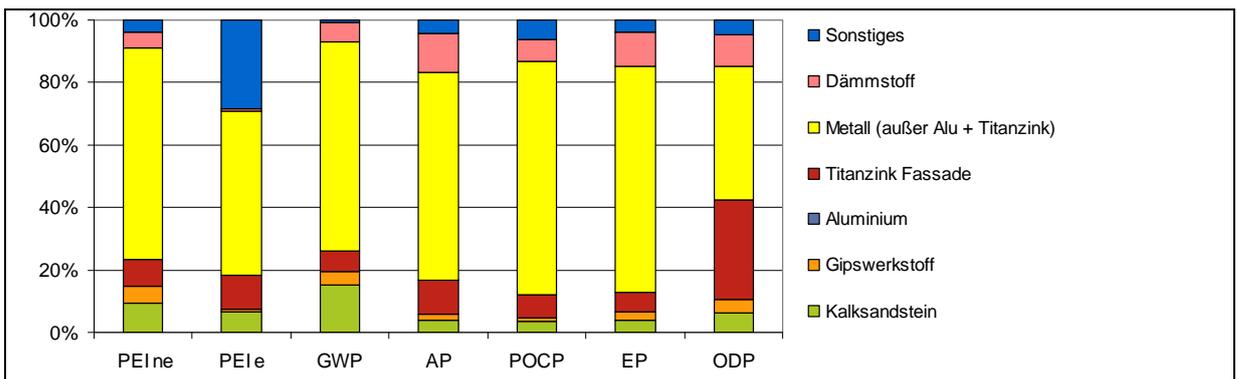


Bild 162 Dominanzanalyse der Baustoffgruppen bei der Ersterstellung für die Variante B - Linienhafte Verbindung

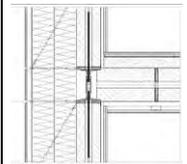
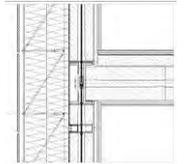
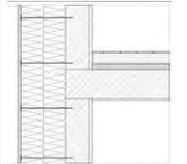
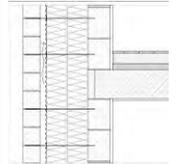
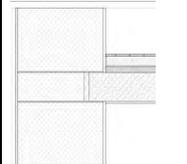
Die Dominanzanalyse zeigt deutlich den hohen Einfluss der metallischen Bauteile auf die Bilanz. Bei Variante A haben die Kreuzverbinder aus Aluminium (blau) einen maßgeblichen Einfluss. Variante B enthält kein Aluminium dafür sehr viel Metall für die Unterkonstruktion (gelb).

b) Gesamte Umweltwirkungen über 50 Jahre nach DGNB

Der zweite Vergleich bezieht neben der Erstherstellung auch die Instandsetzungen und die Phase End-of-Life in die Bilanzierung mit ein und hält sich dabei an die Methoden der DGNB. Die in Tabelle 14 aufgeführten Ergebnisse zeigen eine deutliche Verlagerung der Umweltwirkungen zugunsten der Varianten A und B.

Hier wirken sich die lange Nutzungsdauer sowie das günstige Recyclingpotenzial der metallischen Bauteile positiv auf die Gesamtbilanz über den Zeitraum von 50 Jahren aus. Jedoch muss bei der Bilanzierung der Phase End-of-Life für einige eigentlich gut wiederverwendbare Baustoffe ein minderwertiger Verwertungsweg angenommen werden, da die angewandte Bilanzierungsmethode nach DGNB keine derartigen Nachnutzungskonzepte einbezieht.

Tabelle 14 Umweltwirkungen gesamt, nach DGNB

Variante	ReMoMaB Var. A Kreuzverbinder	ReMoMaB Var. B linienhafte Verb.	Vergleich Typ 1, WDVS + Stahlbeton	Vergleich Typ 2, Mauerwerk 2-schalig	Vergleich Typ 3, Monol. Außenwand
					
Umweltwirkungen über 50 Jahre (inkl. Erstherstellung, Instandsetzung und End-of-Life nach DGNB, Bezugsgröße: Wand-Decken-Knoten)					
PEI _{ne} [kWh]	740	950	1090	780	684
PEI _e [kWh]	95	112	179	163	179
GWP [kg CO ₂ -Äqv]	221	282	240	234	204
AP [kg SO ₂ -Äqv]	0,768	0,919	0,734	0,808	0,598
POCP [kg Ethen-Äqv]	0,0802	0,100	0,141	0,113	0,118
EP [kg Phosphat-Äqv]	0,108	0,125	0,0689	0,0845	0,0638
ODP [kg R11-Äqv]	1,33E-05	1,64E-05	1,41E-05	9,17E-06	1,17E-05

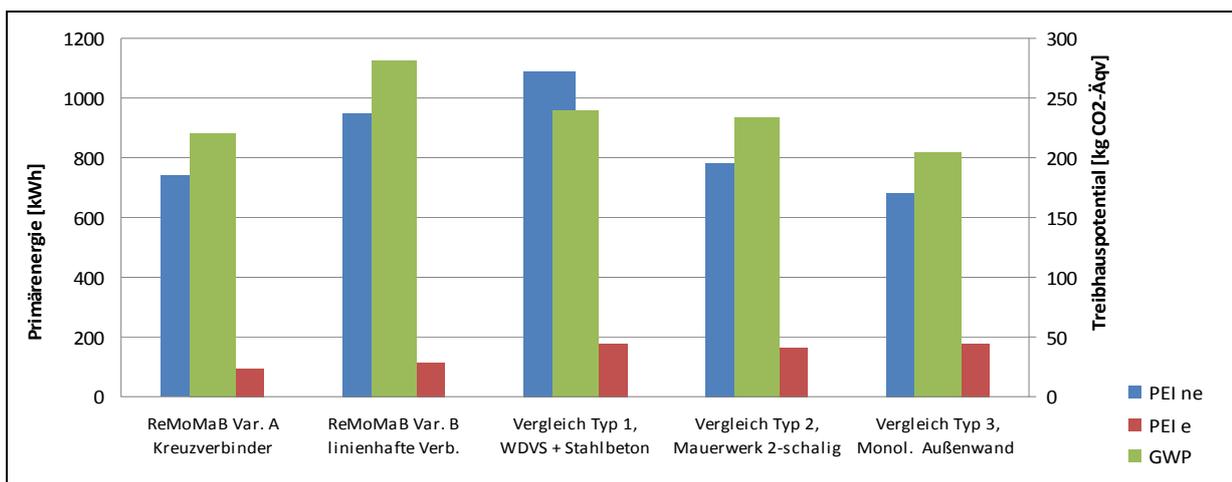


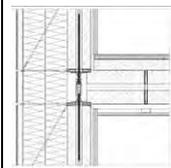
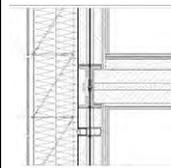
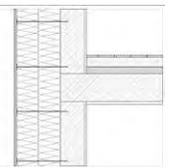
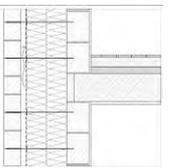
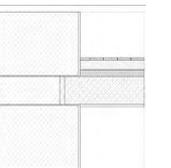
Bild 163 Treibhauspotential und Primärenergie gesamt nach 50 Jahren pro Bezugseinheit

c) Umweltwirkungen nach 50 Jahren mit End-of-Life Szenario Produktrecycling

Der dritte Vergleich zieht für die beiden neu entwickelten Konstruktionsvarianten A und B das End-of-Life Szenario Wiederverwendung (Produktrecycling) mit ein. Für die drei Vergleichskonstruktionen kann aufgrund der nicht zerstörungsfrei lösbaren Verbindungen von keinem Produktrecycling ausgegangen werden. Daher werden die zuvor beschriebenen End-of-Life Szenarien nach DGNB angesetzt.

Alle Baustoffe, die eine Nutzungsdauer von mehr als 50 Jahren haben und sortenrein sowie zerstörungsfrei rückbaubar sind werden nach einem Abzug von 20% Ausschuss für die Wiederverwendung bilanziert. Inwieweit dieser Wert realistisch ist, müssen zukünftige Praxistests zeigen. Das Ergebnis zeigt deutliche Vorteile der Konstruktionsvarianten A und B und zwar in sämtlichen Wirkkategorien.

Tabelle 15 Umweltwirkungen gesamt, mit End-of-Life Szenario Produktrecycling

Variante	ReMoMaB Var. A Kreuzverbinder	ReMoMaB Var. B linienhafte Verb.	Vergleich Typ 1, WDVS + Stahlbeton	Vergleich Typ 2, Mauerwerk 2-schalig	Vergleich Typ 3, Monol. Außenwand
					

Umweltwirkungen über 50 Jahre (inkl. Instandsetzung und End-of-Life nach DGNB, Bezugsgröße: Wand-Decken-Knoten)

PEI _{ne} [kWh]	448	422	1090	780	684
PEI _e [kWh]	71	72	179	163	179
GWP [kg CO ₂ -Äqv]	118	119	240	234	204
AP [kg SO ₂ -Äqv]	0,535	0,548	0,734	0,808	0,598
POCP [kg Ethen-Äqv]	0,0622	0,0580	0,141	0,113	0,118
EP [kg Phosphat-Äqv]	0,0631	0,0647	0,0689	0,0845	0,0638
ODP [kg R11-Äqv]	0,908E-05	0,895E-05	1,41E-05	0,917E-05	1,17E-05

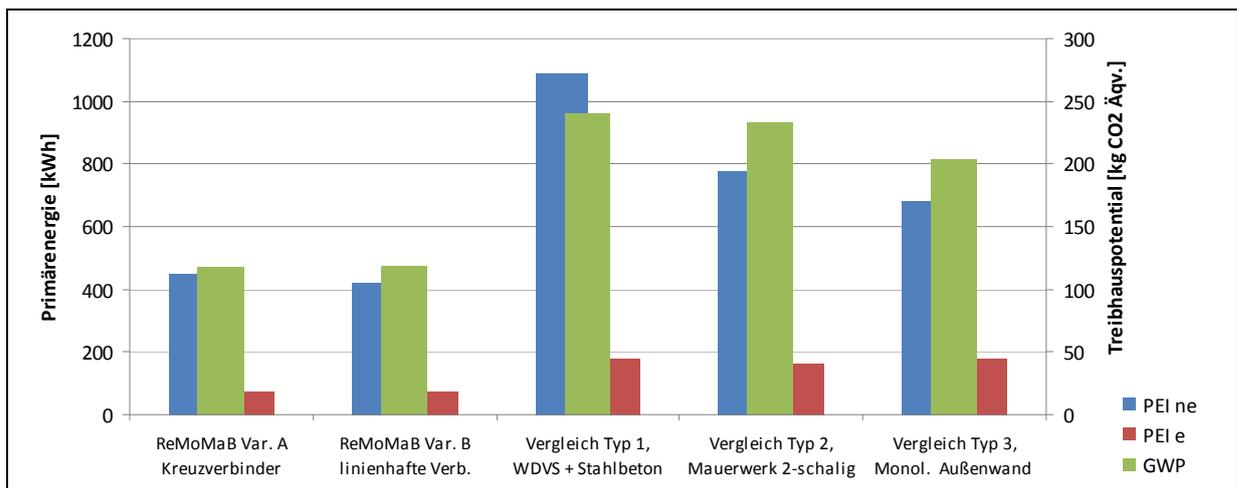


Bild 164 Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial mit End-of-Life Szenario Produktrecycling

5.1.6. Bewertung der Ergebnisse

Die entwickelten Konstruktionsvarianten können unter gesamtökologischen Gesichtspunkten einen deutlichen Vorteil gegenüber herkömmlichen Bauweisen aufweisen. Jedoch ist für deren Erstellung zunächst ein erheblich größerer ökologischer „Rucksack“, bzw. Aufwand an Grauer Energie und anderen Umweltwirkungen erforderlich, der erst im Laufe der Zeit ausgeglichen wird. In diesem Zusammenhang ist sicherzustellen, dass die angestrebten, hochwertigen Wiederverwendungs- und Verwertungswege auch tatsächlich umgesetzt werden. Geschieht dies nicht, kann die Bilanz am Ende unter Umständen schlechter sein als bei herkömmlichen Systemen.

Weitere Optimierungsmöglichkeiten zeigen die Ergebnisse der Dominanzanalyse auf. Eine Reduktion der verbauten Masse bei den metallischen Bauteilen bietet erhebliches Potenzial. Auch wenn diese Stoffe hervorragend rezyklierbar sind, würde sich bereits eine Reduktion um wenige Prozent deutlich auf die Gesamtbilanz niederschlagen.

5.1.7. Optimierungsmöglichkeiten

Die Dominanzanalysen in Bild 167 und Bild 168 zeigen den enormen Einfluss einzelner energieintensiver Baustoffe auf die gesamte Ökobilanz. Insbesondere die metallischen Bauteile sind für einen Großteil der Umweltwirkungen verantwortlich. Eine naheliegende, mögliche Optimierungsstrategie ist daher die Reduktion der verbauten Masse dieser Bauteile. So würde beispielsweise bei Variante A „Kreuzverbinder“ durch eine Halbierung des für die Kreuzverbinder verbauten Aluminiums (von 6,1 auf ca.3 kg/Bezugseinheit) eine Reduktion der gesamten Umweltwirkungen um durchschnittlich 15% erfolgen, obwohl die Bauteile lediglich für ca. 1% der Gesamtmasse stehen. Ein ähnlich großes Optimierungspotenzial besteht für die metallischen Komponenten in Variante B. Dort ist die Metall - Dominanz noch größer. Um das Einsparpotenzial dieser statisch hoch belasteten Bauteile nutzen zu können muss jedoch eine exakte statische Bemessung erfolgen, die im Umfeld des Forschungsprojekts nicht geleistet werden kann.

Ein weiterer Ansatz ist die Substitution energieintensiver Baustoffe durch Materialien mit einem weniger großen ökologischen Fußabdruck. Eine Substitution der Aluminium - Kreuzverbinder in Variante A durch Stahlguss-Bauteile gleicher Geometrie würde den Primärenergiebedarf (PEne) für die Ersterstellung zum Beispiel von 830 kWh auf 674 kWh pro Bezugseinheit reduzieren (das entspricht nahezu -20%). Wird das Recyclingpotenzial für Materialrecycling in die Bilanz mit aufgenommen relativiert sich dieser Effekt allerdings größtenteils. Dadurch resultiert bei der Variante mit Stahlguss-Bauteilen eine Verbesserung um lediglich 7 kWh/Bezugseinheit gegenüber der Aluminium-Variante.

Denkbar wäre auch, die Unterkonstruktion der vorgehängten hinterlüfteten Fassade (mCon-System in Edelstahl) durch eine Holzkonstruktion zu ersetzen. Dies würde dem ökobilanziellen Ergebnis entgegenkommen, steht aber mit dem Anspruch an größtmögliche Modularität im Widerspruch.

Dämmstoffwahl

Die Umweltwirkungen der Dämmung haben bei beiden Varianten (A+B) einen untergeordneten Einfluss auf die Ökobilanz. Betrachtet man jedoch die kurzen Austauschzyklen lohnt dennoch ein Blick auf mögliches Optimierungspotenzial. Daher sind in nachfolgender Tabelle alternative Dämmstoffe sowie deren Umweltwirkungen dargestellt. Um einen konsistenten Vergleich zu ermöglichen beziehen sich die Dämmstoffstärken auf einen einheitlichen U-Wert (aus Gründen der Datensätze mit 0,14 W/m²K statt wie bisher mit 0,12 W/m²K).

Tabelle 16 Dämmstoffalternativen im Vergleich

Dämmstoff	Materialstärke (nur Dämmung) (mm)	U-Wert [W/m ² K]	Erstherstellung			Recyclingpotential			Ergebniss		
			PE ne [kWh]	PE e [kWh]	GWP [kg CO ₂ -Äqv]	PE ne [kWh]	PE e [kWh]	GWP [kg CO ₂ -Äqv]	PE ne [kWh]	PE e [kWh]	GWP [kg CO ₂ -Äqv]
Mineralwolle Rockwool FixRock 035 [EPD-DRW-2008112-D] wie im Beispielaufbau gewählt	240	0,14	43,00	0,33	13,90	0,17	0,00	0,40	43,17	0,33	14,30
Vacuum Isolation Paneel WLG 007 Vacupor® NT-B2-S/Vacuspeed® [EPD-PDG-2011111-D]	50	0,14	27,28	7,68	4,82	-20,13	-3,43	-3,27	7,14	1,19	1,54
Holzfaserdämmung WLG 045 Pavatex Pavatherm Plus® [EPD_PTX_2010121_D]	320	0,14	146,40	404,71	-220,00	-349,60	-9,78	88,00	-203,20	394,93	-132,00
XPS WLG 035 Polystyrol Extruderschaum [EPD-IVH-2008311-D] Recyclingpotential XPS: 90% thermische Verwertung!	240	0,14	229,17	1,57	37,14	-68,36	0,88	-0,11	160,81	0,69	0,27

Bewertung:

Betrachtet man ausschließlich die Umweltwirkungen der verschiedenen Dämmstoffe sind die positiven Eigenschaften der Holzfaserdämmung eindeutig. Nachteile sind jedoch der schlechtere Wärmedurchgangskoeffizient und die daraus resultierende große Materialstärke sowie das hohe Gewicht im Vergleich zu den anderen Materialien. Eine vielversprechende Alternative sind hingegen die Vakuum-Isolations-Paneele (VIP). Besonders bei der Erstherstellung weisen sie die geringsten Umweltwirkungen auf. Die gute Rezyklierbarkeit des Kernmaterials (pyrogene Kieselsäure kann direkt wiederverwendet werden) sorgt auch beim Recyclingpotential für ein gutes Ergebnis. Die geringe Materialstärke und das geringe Gewicht erleichtern den Auf- und Abbau und kommen der Modularität zugute. Allerdings müsste ein Befestigungssystem entwickelt werden welches mit der gewünschten Modularität und Demontierbarkeit vereinbar ist ohne dabei die empfindlichen VIP's zu verletzen.

Die alternative Ausführung mit Hartschaumdämmung ist unter ökobilanziellen Gesichtspunkten nicht konkurrenzfähig. Selbst wenn für das Recyclingpotential eine thermische Verwertung von 90% der Masse (wie dies der EPD Datensatz vorschlägt) angesetzt wird.

Einen akzeptablen Mittelweg bietet die letztlich gewählte Variante mit Mineralwollämmung. Die Umweltwirkungen liegen im Mittelfeld. Dabei konnte das durchaus vorhandene Recyclingpotential durch Materialrecycling mangels eines entsprechenden Datensatzes nicht einmal angesetzt werden (Stattdessen wurde der Datensatz Bauschutttaufbereitung der Ökobaudat gewählt). Letztlich waren neben der Ökobilanz vor allem die guten Verarbeitungsmöglichkeiten innerhalb des entwickelten modularen Systems ausschlaggebend für die Wahl des Dämmstoffs.

5.2. Recyclingoptionen

Für beide in den vorangegangenen Kapiteln vorgestellten Varianten steten verschiedenste Recyclingoptionen zur Verfügung. Primäres Recyclingziel innerhalb des ReMoMaB-Projektes ist die direkte Wiederverwendung möglichst vieler Bauteile in einem anderen Gebäude (Produktrecycling). Diese Recyclingoption soll jedoch eine spätere stoffliche Verwertung (Materialrecycling) niemals ausschließen. Bei der Wahl der Materialien war daher zunächst die Kreislauffähigkeit (Materialrecycling) jedes einzelnen Werkstoffs Bedingung.

Dieses Ziel folgt somit der neuen, fünfstufigen Abfallhierarchie des novellierten Kreislaufwirtschaftsgesetzes (01.06.2012):

- Vermeidung,
- Vorbereitung zur Wiederverwendung,
- Recycling,
- sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung,
- Beseitigung

Des Weiteren wird in § 14 (3) darauf hingewiesen, dass spätestens zum 1. Januar 2020 mindestens 70 Gewichtsprozent von nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen (nicht in Natur vorkommender Materialien) recycled werden müssen.

Nachfolgend werden für den konkreten Fall des Wand-Decken Knotens detaillierte Recyclingoptionen aufgezeigt.

5.2.1. Wiederverwendung (Produktrecycling)

Allgemein werden Logistik und Demontagetechnologie durch Geometrie und Gewicht des jeweils wieder zu verwendenden Bauteils bestimmt. Diese wiederum bestimmen die Wirtschaftlichkeit der Wiederverwendung. Insbesondere der Transport, und die mit der Logistik verbundenen möglichen Technologien sind durch eine Vielzahl von Aspekten bestimmt: Transportwege, lokale Besonderheiten, Hebetechnik, Sicherheits- und Arbeitsschutzbestimmungen etc., sodass der qualitative Hinweis im Rahmen dieses Projekts genügt. Selbstverständlich sollte mit einem Anteil an transport- und lagerungsbedingtem Materialausschuss gerechnet werden.

Bei der Herstellung der Wand bzw. der Decke ist vorwiegend mit einem wiederverwendbaren Ausschuss beim Kalksandstein zu rechnen. Dieser Ausschuss ergibt sich aufgrund der vorhandenen Steingeometrie (Maß- und Ebenheitstoleranzen) entweder bei der Vorauswahl (Ausschluss ganzer Steine mit Über- bzw. Untermaß) oder aufgrund von Steinriss bzw. Steinbruch beim Spannen. Über- bzw. untermaßige Steine können beispielsweise problemlos in einem konservativen Verbau (Dünnbettmörtel) Wiederverwendung finden. Gerissene und gebrochene Steine werden dem Materialrecycling zugeführt.

Bei der Demontage ist der Zustand und die Erhaltung, der sogenannte technische Verschleiß, des Spannsystems maßgeblich. Er bestimmt die Anteile, die direkt wiederverwendbar bzw. rezyklierbar sind. Beim ungerissenen Kalksandsteinplanelement kann, infolge der langen Standzeit unter Vorspannung, von einem nahezu abgeschlossenen Kriechvorgang ausgegangen werden, sodass nach der Demontage von einer problemlosen Wiederverwen-

dung auszugehen ist. Das sortenreine Trennen von Kalksandstein und Spannsystem als solches, ist aufgrund der trockenen Fügung jederzeit möglich.

Aspekte und Prozesse, die sich aus der Demontage, Rückführung zur Wiederverwendung (Produktrecycling) ergeben, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Prozesse, die zur Validierung und Einstufung der Verwendungsebene des Moduls bzw. des Bauelements notwendig sind. Dabei werden die Untersuchungen in solche die vor und solche die nach der Demontage stattfinden unterschieden.

- Untersuchung vor der Demontage (Vorort)
- Abgleich von Planung, Ausführung und Bestand
- Prüfung (Sichtprüfung, Hammerschlag, etc.) zur Bestimmung der Ermüdung und Verschleiß der zu demontierenden Bauteile,
- Klärung der Logistik und Flächen zur Zwischenlagerung zur Bestimmung der Demontagetechologie und des Sicherheitskonzepts
- Start der Demontage Dokumentation
- Untersuchung nach der Demontage die zu einer Einstufung der Verwendungsebene führen
- Prüfung der Stahl- bzw. Steingeometrie und Dokumentation der Verformung
- Prüfung der Gewindegängigkeit
- Stichpunktartige Materialtest (Stahl- und Steinfestigkeit)

Prozesse die sich aus der Demontage und Aufarbeitung (Siehe Abschnitt 2.5.1) ergeben Diese sind:

- Das Lösen der Vorspannung
- Das Trennen des Spannstahls vom Stein
- Untersuchen und Sortieren entsprechend der Recyclingart
- Lagern und Kennzeichnen gemäß der angestrebten Wiederverwendung
- Abschluss der Demontage Dokumentation

Logistische Aspekte die sich aus der Rückführung und Wiederverwendung ergeben, wie zum Beispiel der dem Rücktransport, der Lagerung, Weiterverteilung, ergebenden.

5.2.2. Stoffliches Recycling (Materialrecycling)

Materialrecycling ist nicht der primär angestrebte Verwertungsweg innerhalb des Remomab-Projekts jedoch nicht minder wichtig, da davon auszugehen ist, dass alle Stoffe aus der Wiederverwendung früher oder später nicht mehr im Produktkreislauf gehalten werden können. Ausschuss und aufgrund von Verschleiß- und Gebraucherscheinungen stofflich verwertet werden müssen.

Daher wurde die Stoffliche Rezyklierbarkeit aller verwendeten Baustoffe als Grundbedingung aufgefasst. Um die Möglichkeiten eines hochwertigen Recyclings zu erhalten sind alle Stoffe sortenrein demontierbar oder nur minimal mit Fremdstoffen kontaminiert.

In nachfolgender Tabelle 17 wird für sämtliche im Wand-Decken-Knoten verbauten Stoffe eine Materialrecycling bzw. Verwertungsoption beschrieben und mögliche Recyclingwege dargestellt:

Tabelle 17 Zusammenfassung der Recyclingwege der verwendeten Materialien für Variante A & B

Materialkomponente (liegen sortenrein vor)	Angestrebter Recyclingweg
Kalksandstein	Zermahlen und Verarbeiten zu neuem Kalksandstein als Beimischung in der Produktion.
Gipskartonplatten	Platten sind mit geringem Anteil an Farbe und Fugenspachtel verunreinigt. Shreddern, Klassieren und Wiederverarbeitung des Gips zu neuen Gipsplatten z. B. Ri-cycle der Firma Rigips)
Stahl	Recycling in den etablierten Stahlrecyclinganlagen
Dampfbremse PE	Zermahlen, Cracken und Generierung von neuen Kunststoffen
Mineralwolle	Sortenreine Mineralwolle kann wieder dem Herstellungsprozess für neue Mineralwolle zugeführt werden (Herstellerrücknahme z.B. der Firma Rockwool)
Titanzinkblech	Etablierte Metallrecyclingverfahren. Einschmelzen und Verarbeitung zu neuen Titanzinkprodukten.
Holz	Verarbeitung zu Spanholzplatten, energetische Verwertung da nachwachsender Rohstoff.
Sand	Aufbereitung durch sieben und Reinigen. Direkte Wiederverwendung
Pappe	Recycling in etablierten Papierrecyclingsystemen. Alternativ energetische Verwertung da nachwachsender Rohstoff
Aluminium	Recycling in etablierten Aluminiumrecyclingsystemen.
EPDM	Zermahlen, Cracken und Generierung von neuen Kunststoffen
Holz	Kein Recycling möglich!

5.3. Zusammenfassung der Abschnitte 4 und 5

Mit den in den Abschnitten 4 und 5 vorgestellten Varianten werden Massivkonstruktionen gezeigt, die von der Primärstruktur über die Folgeschichten bis zu den Oberflächen demontierbar sind. Diese dauerhaften Massivkonstruktionen lassen eine einfache, zerstörungsfreie und sortenreine Trennung des verwendeten Materials zu und sind somit vollständig recycelbar. Darüber hinaus können die verwendeten Plansteine und die zum Einsatz kommenden Spannstähle mit einem hohen Prozentsatz wiederverwendet werden.

Voraussetzungen dafür sind neben dem bestimmungsgemäßen Gebrauch der Konstruktion folgende Aspekte:

- die trockene Fügung Kalksandsteinelemente unter Verwendung von Vorspannung in modularer Ordnung,
- die auf die modulare Ordnung abgestimmte Addition der Folgeschichten und des technischen Ausbaus,
- die Sicherung der bauphysikalisch notwendigen Luftdichtigkeit innerhalb und zwischen den jeweiligen Bauteilen,
- der von der Primärstruktur unabhängige mögliche Wechsel der Folgeschichten und der technischen Komponenten.

Der ökobilanzielle Vergleich der neu entwickelten Konstruktionsalternativen mit Standardaufbauten legt deren Potenzial im Bezug auf die Reduktion von Umweltwirkungen dar. Durch eine Steigerung der Wiederverwendungsrate und eine Weiterentwicklung der Abbildung derartiger Szenarien in der Ökobilanz ist weiteres Optimierungspotenzial vorhanden.

Zusammenfassend kann hier dargestellt werden, dass zwei vollständig unterschiedliche Grundprinzipien für vollrezyklierbare, massive Bauweisen in Breitenanwendung auf 0-Energiebasis entwickelt wurden und beide Varianten klare ökobilanzielle Vorteile gegenüber herkömmlichen Konstruktionen aufweisen.

6. Versuche zur Tragfähigkeit

Ausgehend von den im Projekt ReMoMaB entwickelten demontablen Wand- und Deckenkonstruktionen soll die Tauglichkeit der, in den Abschnitten 1 und 1 vorgestellten Konstruktionen nachgewiesen werden. Im Sinne einer effizienten Versuchsführung erfolgte die Überprüfung der Tragfähigkeit ausschließlich an Konstruktionen der Variante B (linienhaften Verbindung), da bei dieser Variante die Tests mit handelsüblichen, unmodifizierten Steinen durchgeführt werden konnten.

6.1.1. Allgemeine Angaben

6.1.1.1. Verwendetes Kalksandstein Planelement

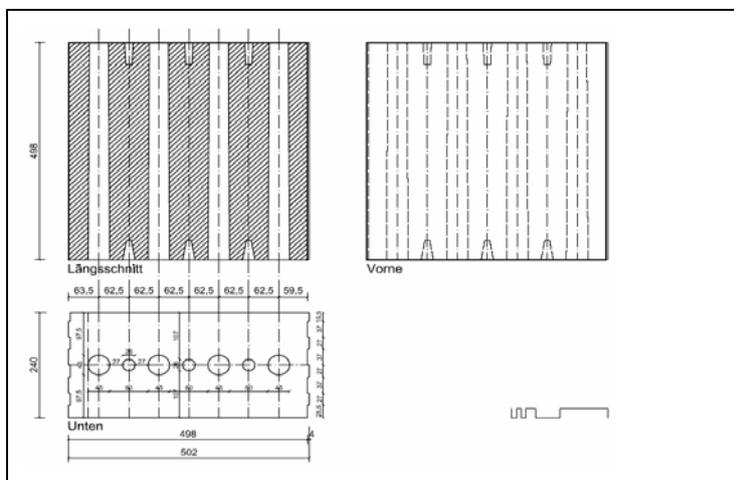


Bild 165 Steingeometrie KS-QuadroE [208]

Sämtliche Untersuchungen und Bauteiltest erfolgten an Kalksandsteinplanelementen gemäß DIN EN 771-2:2005-05 mit Steingeometrien gemäß Bild 165 und Kennwerten gemäß Tabelle 18.

Tabelle 18 Angaben zum verwendeten Kalksandstein Planelement gemäß Zulassung

Bezeichnung:	Planelement KS-QuadroE
Zulassung:	Z-17.1-551 [208]
Festigkeit:	Festigkeitsklasse: 20
	Mittelwert der Druckfestigkeit: $\geq 26,0 \text{ N/mm}^2$
Rohdichte:	Rohdichtelasse: 1,8
	Brutto-Trockenrohddichte: 1610 bis 1800 kg/m^3
Steinformat:	Verwendete Steinformate
	• $h/l/b = 498/498/115 \text{ mm}$
	• $h/l/b = 498/498/150 \text{ mm}$
	• $h/l/b = 498/498/240 \text{ mm}$
Hersteller:	Quadro Bausysteme GmbH

Die Zulieferung der für die Tests benötigten Steine erfolgte in zwei Chargen. Die erste Lieferung erfolgte am 16.02.2012 und wird im Zuge der in Abschnitt 6.2 vorgestellten Materialtests als Material A bezeichnet. Die zweite Steinlieferung erfolgte am 20.05.2012 und erhält die Bezeichnung Material B.

6.1.1.2. Verwendeter Spannstahl

Als Spannstahl wurde eine Baustahl B500 [206] gemäß statischer Vorbemessung vorgeschlagen. Aus Versuchstechnischen- und Sicherheitsgründen wurde jedoch abweichend von dem in der Statik vorgeschlagenen Stahl ein höherwertiger ST 950/1050 Spannstahl verwendet. Der Spannstahl als solches wurde nicht weiter untersucht, da der Auslastungsgrad gering und ein Versagen des Stahls in jedem Fall ausgeschlossen werden sollte. Die Kennwerte des für die Untersuchungen verwendeten Spannstahls sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

Tabelle 19 Allgemeine Angaben zum verwendeten Spannstahl

Bezeichnung:	WR – Temporäranker, ST 950/1050 (warm gewalzt, Gewinde rechtsdrehend)
Nenndurchmesser:	26,5 mm
Hersteller:	DYWIDAG
Last der Streckgrenze:	525 kN

6.1.1.3. Kopfplatte

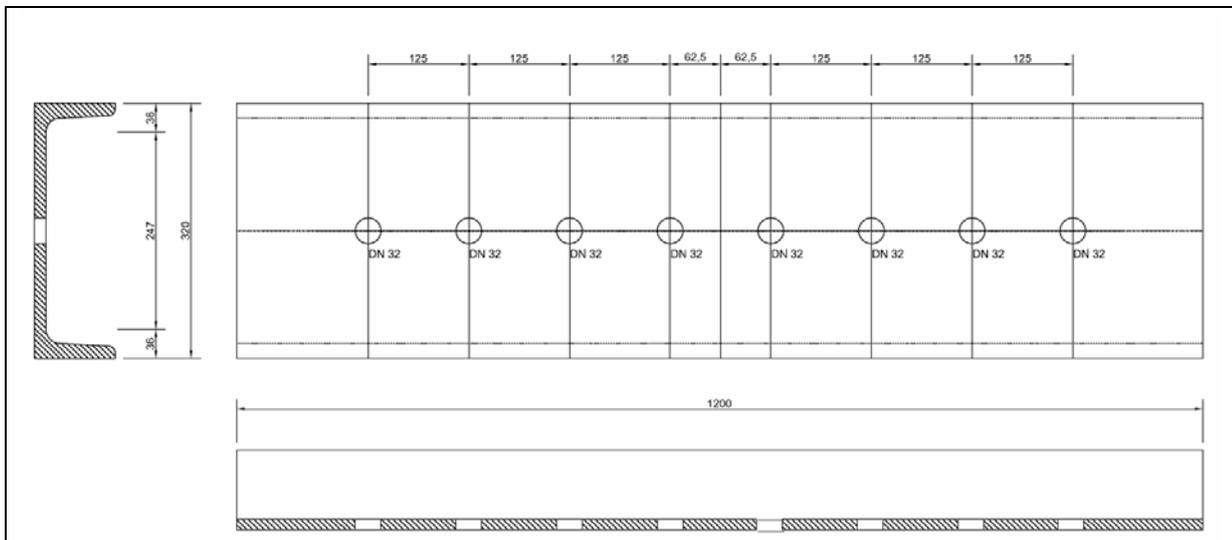


Bild 166 Ausführungszeichnung des als Kopfplatte verwendeten U-Profils

Zur Einleitung der Vorspannung in den Steinverband der Decke wurden zwei U-320 Profile, S235JR gemäß DIN 1026-1[23] durch Bohrungen, DN 32 mm so modifiziert, dass diese als Kopfplatte verwendete werden konnten (siehe Bild 166).

6.1.2. Vorbereitende Steinmessungen

Im Zuge der Versuchsvorbereitung wurden die gelieferten Steine auf Grenzabmaß- und Planparallelitätsabweichungen untersucht. Beprobte wurden 3 frei gewählte Kalksandsteinplan-elemente der Lieferung B.

Die Werte für die zulässigen Abweichungen der zu beprobenden Steine sind gemäß DIN EN 771-2:2005, Abschnitt 5.2, Tabelle 1 festgelegt [49]. Beigegebener Toleranzklasse TLMP ergeben sich zulässige Abweichungen gemäß Tabelle 20.

Tabelle 20 zulässigen Abweichungen Grenzabmaße gemäß DIN EN 771-2:2005 [49]

Maße	Grenzabmaße von Kalksandsteinen der Abmaßklasse TLMP		
	Mittewert der Höhe der Probe	Gesonderte Feststellung der 1.) Ebenheit der Lagerflächen $\leq 1,0$ mm 2.) Ebenheit der Planparallelität $\leq 1,0$ mm	
Mittewert der Länge der Probe	Solllänge	± 2	$> 1,0$ mm
Mittewert der Breite der Probe	Sollbreite	± 2	$> 1,0$ mm
Einzelwert der Höhe der Probe	Sollhöhe	± 1	$= 1,0$ mm
Einzelwert der Länge der Probe	Solllänge	± 3	$> 1,0$ mm
Einzelwert der Breite der Probe	Sollbreite	± 3	$> 1,0$ mm

Zusätzlich war, neben der Ermittlung der Einzelwerte für die Probenhöhe, die Ebenheit und die Planparallelität festzustellen.

6.1.2.1. Messgenauigkeit und Prüfeinrichtung

Die Messgenauigkeit der verwendeten Prüfeinrichtung ist gemäß DIN EN 772-16:2011, Abschnitt 5, Tabelle 1 [51] festgelegt. Aus den zulässigen Abweichungen der Grenzabmaße ergeben sich in Tabelle 21 die maximal zulässigen Messfehler.

Tabelle 21 Messgenauigkeiten gemäß DIN EN 772-16:2011 [51]

	Zulässige Abweichung	maximaler Messfehler
Ebenheit und Planparallelität	$\leq 1,0$ mm	0,2 mm
Sonstige Grenzabmaße	$> 1,0$ mm	0,5 mm

Als Messgerät wurde eine Schieblehre mit 0,1 mm Noniusteilung und einer Schenkellänge von 200 mm verwendet.

6.1.2.2. Messerverfahren

Maßhaltigkeit der Steinabmaße

Als Messverfahren zur Bestimmung der Maßhaltigkeit der Steinabmaße wurde das Messverfahren ‚e‘, gemäß DIN EN 772-16:2011-07, (Abschnitt 7.1) [50] zur Bestimmung von Kalksandstein-Probekörpern mit unregelmäßigen Oberflächen (Nut und Feder) gewählt. Breite und Höhe wurden dabei durch Messung ungefähr in der Mitte jedes Probekörpers ermittelt

und auf 0,2 mm gerundet angegeben. Die beiden zur Ermittlung der Länge an jeder Prüfkörperseite genommenen Maße werden als Mittelwerte gerundet auf 0,5 mm (gemäß [50] Abschnitt 8) angegeben.

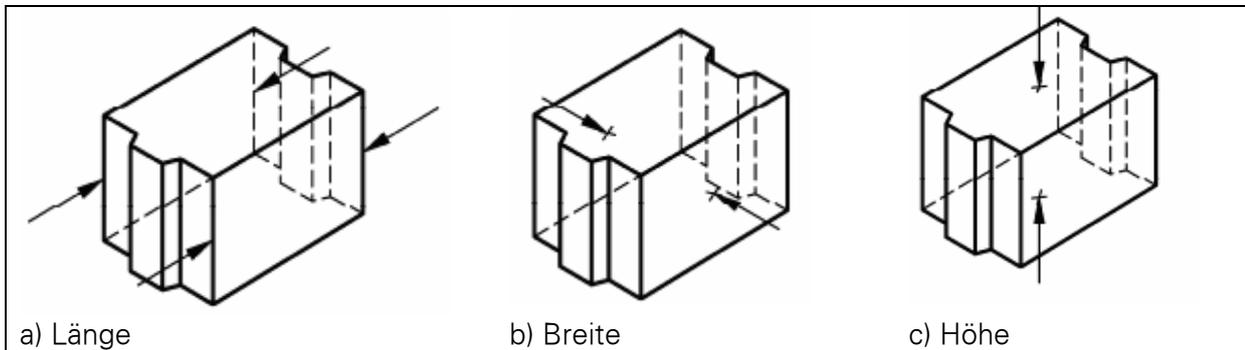


Bild 167 Vorgegebenes Messverfahren mit festgelegten Messstellen zur Bestimmung der Maßhaltigkeit von Kalksandstein Probekörpern [51]



Bild 168 Abmaßprüfung an festgelegten Messstellen

Planparallelität

Die Abweichung von der Planparallelität wurde nach DIN EN 772-16:2011, [50] als Differenz aus dem in den Ecken gemessenen größten und kleinsten Abstand zwischen der oberen Lagerfläche des Mauersteins und der ebenen Fläche berechnet und auf 0,2 mm gerundet angegeben. Als Abweichung von der Planparallelität wurde der größte Wert für alle Mauersteine, auf 0,2 mm gerundet, angegeben.

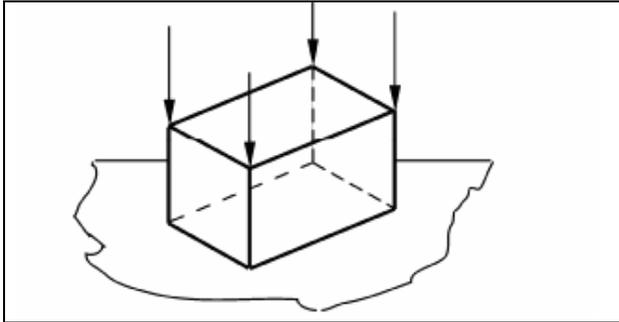
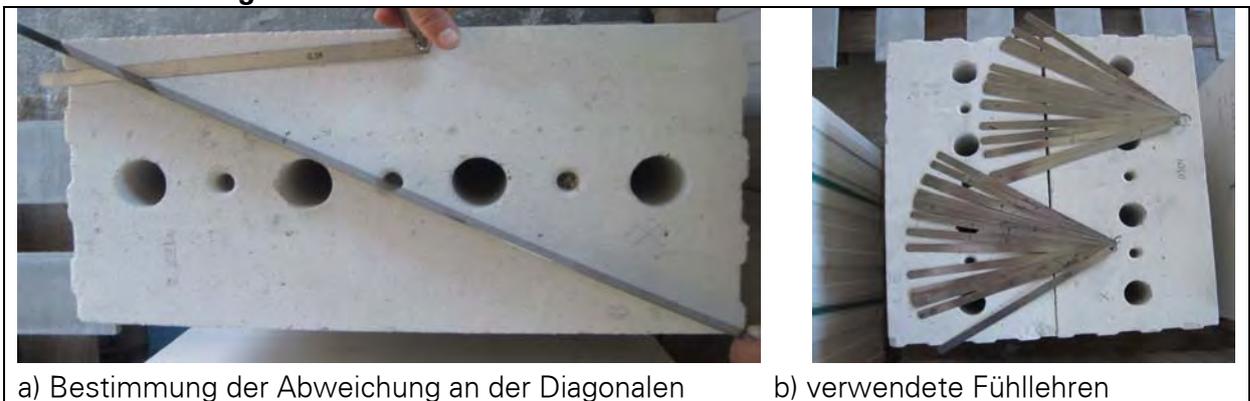


Bild 169 Vorgegebenes Messverfahren mit festgelegten Messstellen zur Bestimmung der Planparallelität [51]

Ebenheit der Lagerflächen



a) Bestimmung der Abweichung an der Diagonalen

b) verwendete Fühllehren

Bild 170 Bestimmung der Abweichung mittels Fühllehre

Die Ebenheit der Lagerflächen wurde nach DIN EN 772-20:2005, Abschnitt 5.3 [52] bestimmt. Sie ergibt sich aus dem Mittelwert des größten Abstands beider Diagonalen zur Lagerfläche. Ermittelt wurde der Abstand vom diagonal aufgelegten Stahllineal zur Bauteiloberfläche mit einer Fühllehre. Die Messgenauigkeit bei der Längenermittlung der Diagonalen mit Stahllineal ist gemäß DIN EN 772-20:2005 [52] auf 0,5 mm festgelegt. Die Messgenauigkeit der Fühllehre ist auf 0,05 mm festgelegt. Bei der Messung der Diagonale wurde aufgrund der vorhandenen Steingeometrie ein 1500 mm langes Stahllineal mit einer Millimeterteilung verwendet (siehe Bild 170). Aufgrund vorhandener Ausrundungen und Abplatzungen an den Steinkanten wurde, abweichend von der Normvorgabe, auf eine auf 0,5 mm genaue Ermittlung der Diagonalen verzichtet. Die maximale Abweichung zwischen dem aufgelegten Stahllineal und der Steinoberfläche wurde mittels Fühllehren auf 0,05 mm genau bestimmt.

6.1.3. Ergebnisse

Nach Wertung der ermittelten Ist-Maße wurde festgestellt, dass die geprüften Steine sowohl betreffs deren Grenzabmaße und Planparallelität als auch hinsichtlich deren Ebenheit innerhalb der zulässigen Toleranz liegen. Die ermittelten Werte der durchgeführten Messungen sind zusammen mit den sich ergebenden Mittelwerten, den dazugehörigen Sollmaßen und den zulässigen Abweichungen im Anhang, in Tabelle 36 und Tabelle 37 dargestellt.

6.1.4. Hinweise, Bemerkungen



Bild 171 Festgestellte Besonderheiten

Ungeachtet der festgestellten zulässigen Maßhaltigkeit der Steine wird auf folgende Besonderheiten an der Steinunterseite hingewiesen:

- Die gelieferten Steine wiesen transportbedingte Risse und Abplatzungen auf.
- Das Material sandete an den Steinkanten ab.
- An der Steinunterseite wurden produktionsbedingte Abplatzungen im Bereich der Durchgangslöcher festgestellt (siehe Bild 171)

Da die untersuchten Plansteine zulassungsseitig für eine Verlegung im Dünnbettmörtel bestimmt sind, stellen die festgestellten Besonderheiten keine Qualitätsdefizite bezüglich des bestimmungsgemäßen Gebrauchs dar. Vor dem Hintergrund des Einsatzes in einem knirsch verlegten Trockenmauerwerk, mit teilweiser Vorspannung, stellen jedoch die festgestellten Besonderheiten, insbesondere im Bezug auf die in Abschnitt 3.4.4 erläuterten Versagensmechanismen Schwachstelle dar.

6.2. Begleitende Materialprüfungen

6.2.1. Begleitende Materialprüfungen an Steinprismen und Zylindern

6.2.1.1. Hintergrund und Versuchsschwerpunkt

Um die Materialwerte des verwendeten Kalksandsteinplanelements zu ermitteln, wurden parallel zu den Bauteiltestes Materialprüfungen durchgeführt. Die durch die Materialprüfung gewonnenen Kennwerte konnten dann zur Interpretation der Versuchsergebnisse aus den Bauteiltestes hinzugezogen werden. Darüber hinaus sollte mit den begleitenden Materialtests eine Übereinstimmung der im Projekt ReMoMaB entwickelten Konzeptionen und den grundlegenden Vorarbeiten von Marzahn [104] für vorgespanntes Trockenmauerwerk hergestellt

werden. Da ein Schwerpunkt des Projekts die Entwicklung von trockengefügten, zentrisch vorgespannten Kalksandsteinkonstruktionen ist, wurde im Vorgehen sowie im Sinne einer Vergleichbarkeit der Ergebnisse vorrangig auf Stand der Forschung von Marzahn [104] Bezug genommen. Ergänzend wird auf die Dissertation Meyer [110] hingewiesen, in der eine anschauliche Zusammenfassung der Sachverhalte von Thomas [157] über Schubert [150] [149], Glitza [147] und Friede [148] bis hin zu Marzahn [104] gegeben wird. In beiden Arbeiten wird aufgrund fehlender normativer Festlegung zur Prüfung der Druck-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit auf Prüfverfahren für Beton DIN 1048 [25] zurückgegriffen.

Untersucht wurde das in Abschnitt 6.1.1.1 beschriebene Kalksandsteinplanelement. Dabei wurden folgende Kennwerte bestimmt:

- Druckfestigkeit und der E-Modul
- Spaltzugfestigkeit
- Biegezugfestigkeit

6.2.1.2. Orientierung und Schnitt der Probekörper

In Vorbereitung der Materialprüfungen wurden rechteckige Prismen bzw. kreisförmige Steinzyylinder aus dem Kalksandsteinplanelement herausgeschnitten. Die zuschneidende Geometrie ergab sich aus DIN EN 771-2, Anhang B [49]. Prismenförmige Probekörper wurden mittels Diamantsäge aus dem Planstein entnommen. Zylindrischen Probekörper wurden mittels Kernbohrer gezogen.

Die Bezeichnung der Probekörper richtete sich dabei nach deren Orientierung. Bild 172 stellt die am Probekörper definierten Achsbezeichnungen dar. Darüber hinaus erhielten Prismen das Kürzel P, Zylinder das Kürzel Z. Es wurden pro Steinlieferung 3 Proben entnommen und entsprechend der jeweiligen Materiallieferung mit dem Kürzel A bzw. B gekennzeichnet. In Summe ergaben sich 6 Proben je Prüfung.

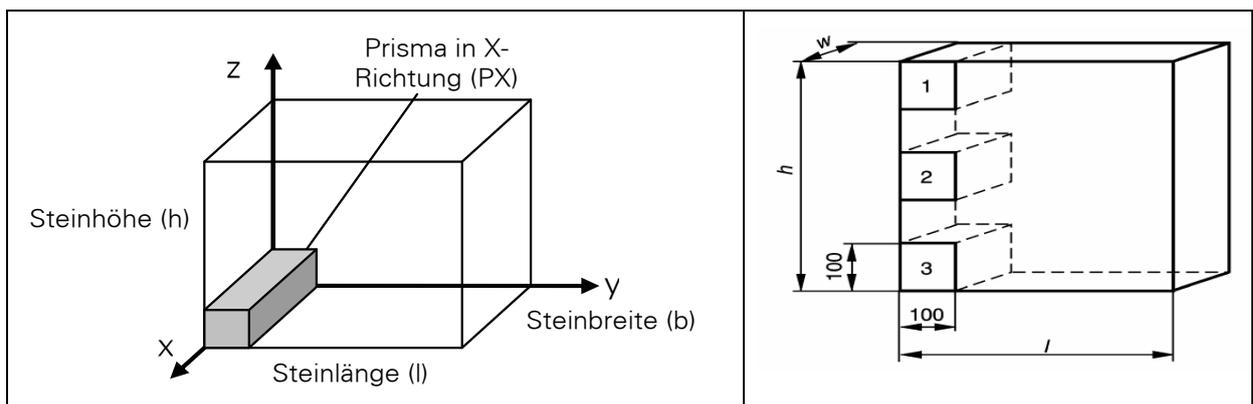


Bild 172 Koordinatensystem

Bild 173 Schneidskizze gemäß DIN EN 771-2 [49]

Gemäß DIN EN 771-2 werden in X Richtung orientierte Proben gefordert. Zudem ergeben sich aufgrund der vorhandenen Steingeometrie des verwendeten Planelements folgende Maße für den Probekörper:

- Prismen PX $b/h/l = 100/100/240$ mm b
- Zylinder ZX $d/l = 100/240$ mm.

Um eventuelle unterschiedliche Festigkeiten parallel und senkrecht zur Lagerfuge erfassen zu können, wurde das Testprogramm gegenüber jenem in der Norm vorgesehenen X-Ausrichtung der Proben, um die beiden verbleibenden Richtungen, Y und Z Richtung, erweitert. Aufgrund der vier durchgehenden, konisch zulaufenden Löcher im Planstein (siehe Bild 165) waren jedoch ungestörte Zylinder- bzw. Prismenschnitte in X und Y Richtung mit der geforderten Probengeometrie von $b/h=100/100$ mm bzw. $d=100$ mm nicht möglich. Deshalb wurden, ebenfalls zusätzlich, Proben mit einer verkleinerten Querschnitt, $b/h=70/70$ mm bzw. $d=70$ mm, in allen drei Ausrichtungen hergestellt und folgendes Vorgehen gewählt:

- Um die Versuche mit einer Grundfläche von $b/h = 100/100$ mm bzw. einem Durchmesser vom $d = 100$ mm nachweisen zu können, wurden die Versuche an in Z-Richtung orientierten Proben durchgeführt.
- Um das richtungsabhängige Materialverhalten nachweisen zu können, wurden zusätzlich zu den 100 mm Proben, kleinere, in alle drei Richtung orientierte Proben mit einer Grundfläche von $b/h=70/70$ mm bzw. $d=70$ mm hergestellt.
- Der Abgleich der durchgeführten Versuche gegenüber jenen von Marzahn erfolgte über Form- und Flächenbeiwerte.

Nach dem Herausschneiden wurden die Probekörper entsprechend dem vorgesehenen Prüfverfahren bis zum Erreichen der Massekonstanz (siehe DIN EN 772-1[50]) gelagert.

Bild 174 fasst die richtungsabhängige Prüfkörperstellung zusammen.

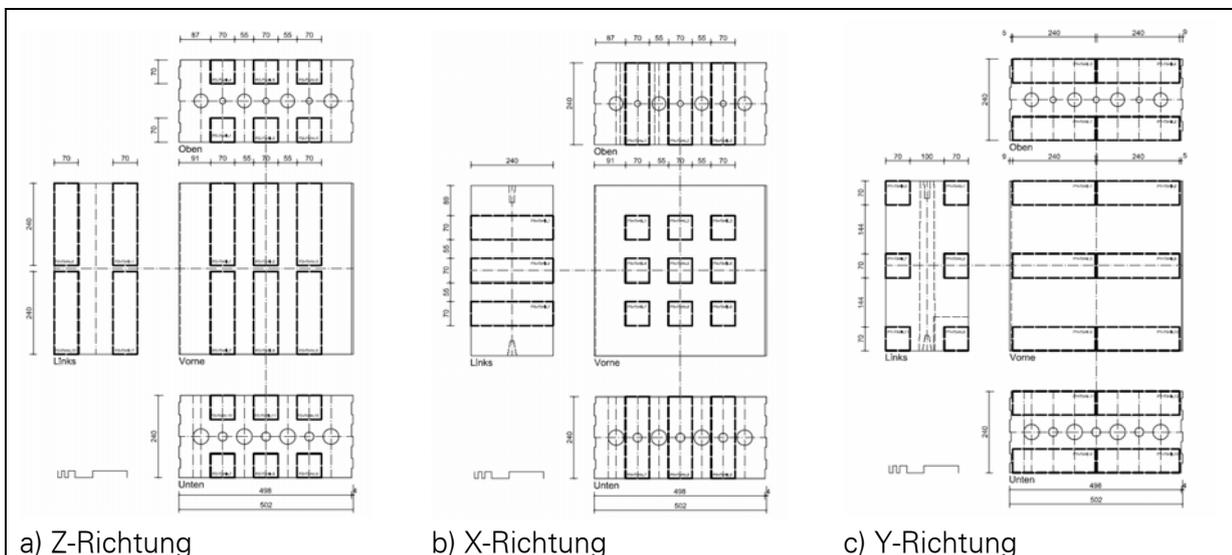


Bild 174 Richtungsabhängige Schneideskizzen der 70/70 - Prismen

6.2.1.3. Druckfestigkeit und E-Modul

Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgte gemäß DIN EN 772-1 [50] richtungsabhängig an je 3 rechteckigen und je 3 zylindrischen Probekörpern der Materiallieferung A und B. Aufgrund der Plansteingröße wurden Proben wie in Abschnitt 6.2.1.2 dargestellt entnommen. Die herausgeschnittenen Prüfkörper wurden an der Schnittfläche durch Abschleifen auf die erforderliche

derliche Höhe (bzw. Länge) und auf die vorgegebene Ebenheit von 1 mm je 100 mm zur Prüfung vorbereitet. Ein Abgleich durch Mörtel sollte unter Hinweis auf die Gesamtzielstellung des Projekts ausdrücklich vermieden werden. Die Konditionierung der Proben zum Erreichen des lufttrockenen Zustandes erfolgte durch Lagerung im Labor.

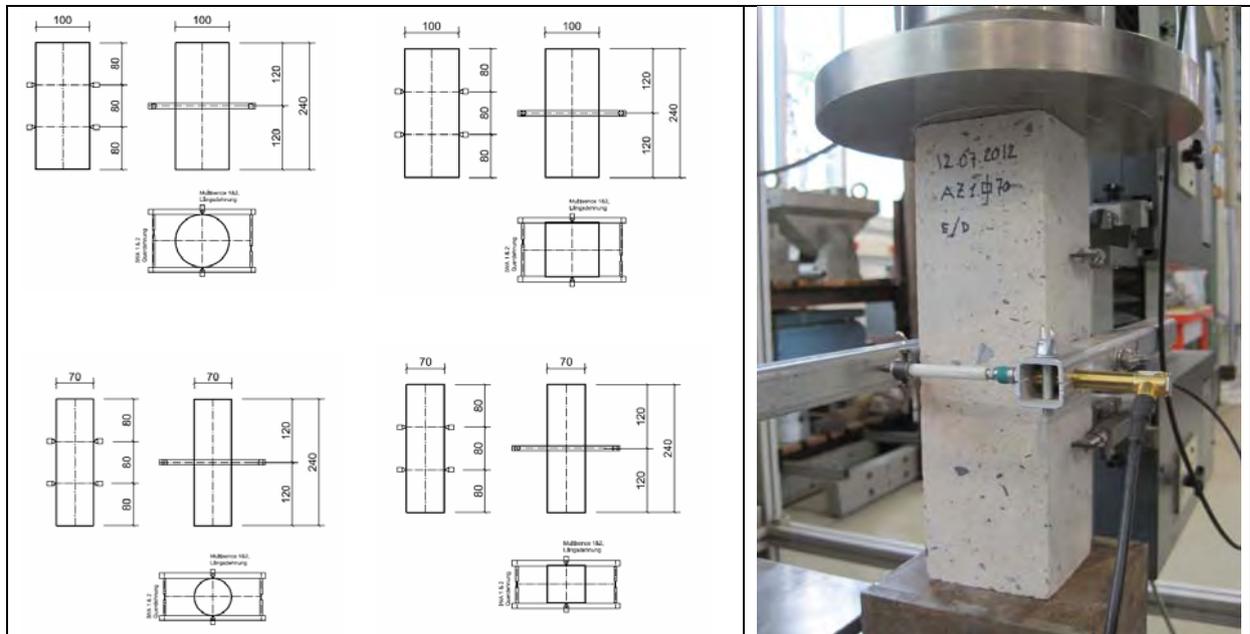


Bild 175 Prüfung Druckfestigkeit

Bild 176 Versuchsaufbau

Da sowohl Meyer [110] als auch Marzahn [104] bei Ihren Druckversuchen zylinderförmige Probekörper verwendeten, wurden zusätzlich zylindrische Probekörper bei den Druckversuchen getestet. Ebenso analog jenen von Marzahn [104] und Meyer [110] wurden die Versuche als Kraft - Weg geregelte durchgeführt. Dabei wurde Last durch eine Druckprüfmaschine über zwei Druckplatten aus Stahl bis zum Bruch des Probekörpers erhöht. Der Versuch wurde normkonform mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,05 N/mm²/s gefahren. Die Erfassung der Längs- und Querdehnung erfolgte mittels Wegaufnehmer gemäß Bild 175 und Bild 176. Dabei wurde ein Messhilfssystem eingesetzt, dass mit nur zwei geklebten Messpunkten befestigt wird und dadurch nahezu vollständig wiederverwendbar ist. Die Vorkraft beim Start der Messungen betrug 200N. Aus der erreichten Höchstlast F [N] ergibt sich die Druckfestigkeit β_D nach Gleichung (1).

$$(1) \quad \beta_D = \frac{F}{b \times h} \quad [N/mm^2]$$

Der E-Modul ergibt sich aus der Steigung zwischen den Punkten $1/3f$ und $2/3f$ der σ - ϵ -Kurve des jeweiligen Drucktests.

6.2.1.4. Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeitsprüfung erfolgte in Anlehnung an DIN 1048 [25] als Drei-Punkt-Biegeprüfung richtungsabhängig an je drei rechteckigen Probekörpern der Materiallieferung A und B. Der Abstand der unteren Auflagerpunkte wurde analog jenem von Marzahn mit $4/5$ der Prismenlänge (siehe Bild 177) festgelegt.

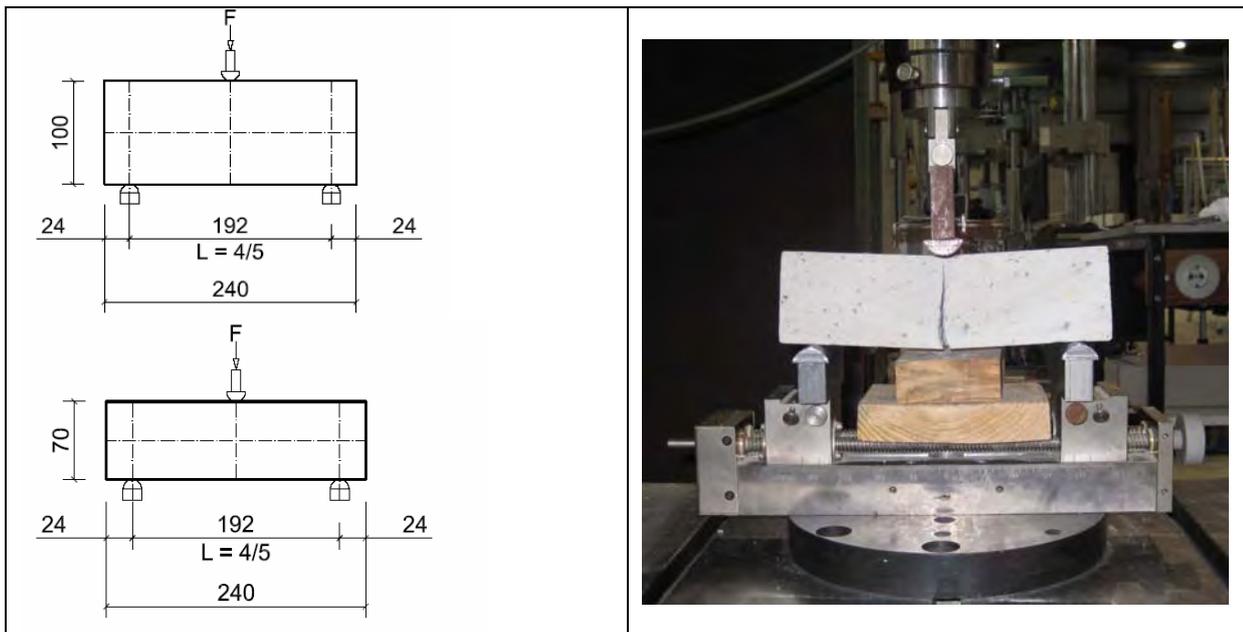


Bild 177 Biegezugfestigkeitsprüfung Bild 178 Versuchsaufbau

Der gewählte Versuchsaufbau geht aus Bild 178 hervor. Dabei wurden die Last durch eine Druckprüfmaschine über Auflager- bzw. Lastschneiden eingeleitet und bis zum Bruch des Probekörpers erhöht. Der Versuch wurde normkonform mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,05 N/mm²/s gefahren. Die Vorkraft beim Start der Messungen betrug 200N.

Aus der erreichten Höchstlast F [N] ergibt sich die Biegezugfestigkeit β_{BZ} nach Gleichung (2).

$$(2) \quad \beta_{BZ} = \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times h^2} \quad [N / mm^2]$$

6.2.1.5. Spaltzugfestigkeit

Die Spaltzugfestigkeitsprüfung erfolgte ebenfalls in Anlehnung an DIN 1048 [25]. Alternativ sind darin zwei Vorgehensweisen zur Prüfung von Rechteckquerschnitten beschrieben. Um zeit-, material- und kosteneffizient zu arbeiten, wurden die Spaltzugversuche an Reststücken der Biegezugfestigkeitsprüfung durchgeführt. Der gewählte, vom Prüfkörper abhängige Versuchsaufbau geht aus Bild 179 und Bild 180 hervor.

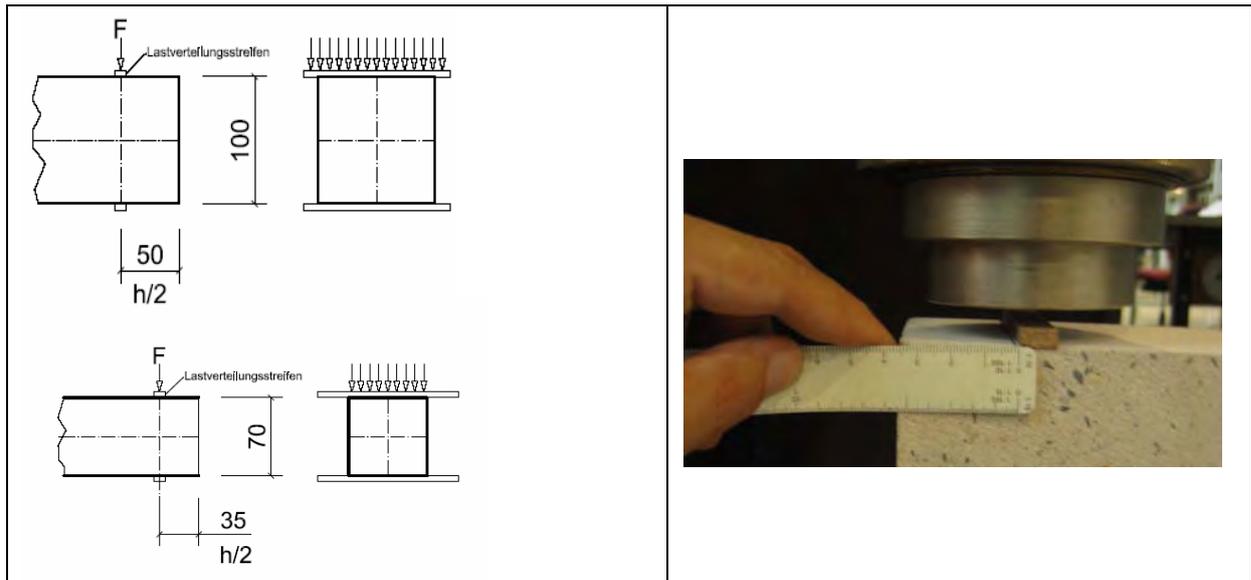


Bild 179

Spaltzugfestigkeitsprüfung

Bild 180

Versuchsaufbau

Die Last wird durch eine Druckprüfmaschine über zwei, oben und unterhalb des Prüfkörpers angebrachte Lastverteilungstreifen (Querschnitt $b/h = 10/5$ mm) als Streifenlast aufgebracht und bis zum Spalten des Probekörpers erhöht. Der Versuch wurde normkonform mit einer Prüfgeschwindigkeit von $0,05 \text{ N/mm}^2\text{s}$ gefahren. Die Vorkraft beim Start der Messungen betrug 200 N .

Aus der erreichten Höchstlast F [N] ergibt sich aus den Vorgegebenen Größen in [mm] die Spaltzugspannung β_{sz} nach Gleichung (3).

$$(3) \quad \beta_{sz} = \frac{2 \times F}{\pi \times b \times h} \quad [N / mm^2]$$

6.2.1.6. Versuchsprogramm

Um ein repräsentatives Versuchsergebnis darzustellen, wurden sechs Testläufe je Versuchsart und Probekörpertyp durchgeführt. Darüber hinaus wurden die Probekörper nach den Chargen des gelieferten Materials differenziert. Somit ergaben sich insgesamt 96 Einzeltests für die Materialprüfung der Steine. Tabelle 22 fasst das Versuchsprogramm zusammen.

Tabelle 22 Versuchsprogramm Begleitende Materialversuche

Nr.	Bezeichnung	Probekörper	Bruchlast	Anzahl Material
1. Druck				
1.1	Prisma 100	PZ b/l/h = 100/100/240	156,60	3 x A, 3 x B
1.2	Zylinder 100	ZZ d/h = 100/240	123,00	3 x A, 3 x B
1.3	Prisma 70	PX b/l/h = 70/70/240	76,73	3 x A, 3 x B
1.4	Zylinder 70	ZX d/h = 70/240	60,27	3 x A, 3 x B
1.5	Prisma 70	PY b/l/h = 70/70/240	76,73	3 x A, 3 x B
1.6	Zylinder 70	ZY d/h = 100/240	60,27	3 x A, 3 x B
1.7	Prisma 70	PZ b/l/h = 70/70/240	76,73	3 x A, 3 x B
1.8	Zylinder 70r	ZZ d/h = 70/240	60,27	3 x A, 3 x B
2. Biegezug				
2.1	Prisma 100	PZ b/h/l = 100/100/240	3,48	3 x A, 3 x B
2.2	Prisma 70	PX b/h/l = 70/70/240	1,19	3 x A, 3 x B
2.3	Prisma 70	PY b/h/l = 70/70/240	1,19	3 x A, 3 x B
2.4	Prisma 70	PZ b/h/l = 70/70/240	1,19	3 x A, 3 x B
3. Spaltzug				
3.1	Prisma 100	PZ b/h/l = 100/100/240	36,01	3 x A, 3 x B
3.2	Prisma 70	PX b/h/l = 70/70/240	25,21	3 x A, 3 x B
3.3	Prisma 70	PY b/h/l = 70/70/240	25,21	3 x A, 3 x B
3.4	Prisma 70	PZ b/h/l = 70/70/240	25,21	3 x A, 3 x B
Summe der Tests				96

6.2.1.7. Ergebnisse

In Tabelle 23 sind die Ergebnisse der durchgeführten Materialtest zusammenfassend dargestellt. Weitere detaillierte Werte sind im Anhang zu finden.

Tabelle 23 Versuchsergebnisse als Mittelwert aus je sechs Einzelversuchen

Spaltzugversuche								
Probe	Material	Länge l_0 [mm]	Breite b_0 [mm]	Höhe a_0 [mm]	A [mm ²]	F_{\max} [kN]	β_{sz} [N/mm ²]	$e-F_{\max}$ [mm]
70x70x240	A	159,80	70,34	70,28	4943,96	14,57	1,89	0,92
70x70x240	B	159,80	70,09	70,07	4911,36	21,18	2,76	1,15
100X100X240	A	159,80	100,63	99,63	10023,53	23,71	1,51	1,18
100X100X240	B	159,80	101,90	100,05	10192,27	41,30	2,59	1,74
Biegezug-, bzw. Dreipunkttest								
Probe	Material	Länge l_0 [mm]	Breite b_0 [mm]	Höhe a_0 [mm]	F_{\max} [kN]	β_{BZ} [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	$e-F_{\max}$ [mm]
70x70x240	A	159,80	70,34	70,28	3,35	2,76	980,69	0,31
70x70x240	B	159,80	70,09	70,07	5,31	4,45	1139,09	0,37
100X100X240	A	159,80	100,63	99,63	9,92	2,86	449,70	0,49
100X100X240	B	159,80	101,90	100,05	16,40	4,63	541,23	0,63
Druckversuche								
Probe	Material	F_{\max} kN	β_D N/mm ²	E-Modul N/mm ²	$e-F_{\max}$ mm			
Cyl. D=70 mm, H=240 mm	A	58,01	15,07	8092,78	0,14			
Cyl. D=70 mm, H=240 mm	B	86,89	22,58	12410,92	0,17			
Prism, 70x70x240	A	147,08	18,73	15631,23	0,23			
Prism, 70x70x240	B	212,12	27,01	14994,37	0,34			

β_{sz} Spaltzugspannung
 β_{BZ} Biegezugfestigkeit
 β_D Druckfestigkeit
 F_{\max} Maximal Last
 $e-F_{\max}$ Verschiebung bei Maximallast
 A Querschnittfläche des Prüfkörpers

In Wertung der begleitenden Materialuntersuchungen kann folgendes festgestellt werden:

- Bei den Ergebnissen der richtungsabhängigen Materialtests werden keine nennenswerten Unterschiede festgestellt. Das bedeutet, es liegt ein nahezu homogenes Material vor.
- Die festgestellten Unterschiede bei den beiden Materiallieferungen liegen im zulässigen Bereich und geben die Bandbreite der in der Praxis zu berücksichtigenden, produktionsbedingten Schwankungen wieder.

6.2.2. Druckkraftuntersuchungen an Einzelsteinen

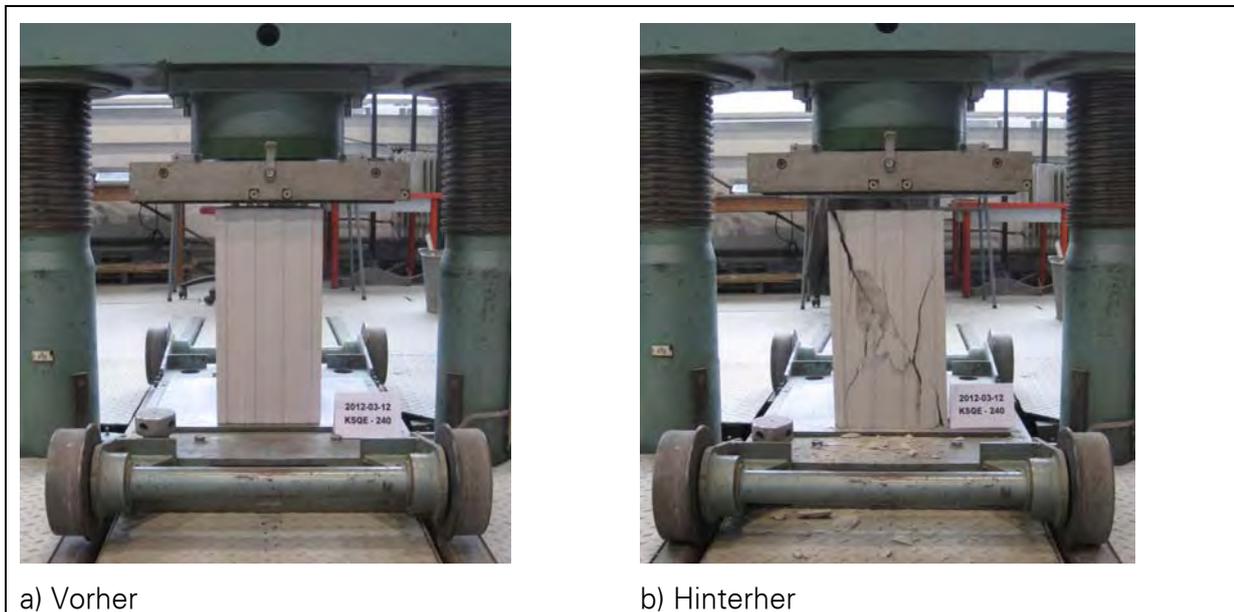


Bild 181 Aufbau Drucktests an Einzelsteinen

Ergänzend zu den Materialtests an Prüfkörpern wurden Drucktests an Einzelsteinen durchgeführt. Der gewählte Versuchsaufbau geht aus Bild 181 hervor. Dabei wurde die Last durch eine Druckprüfmaschine über Auflagerplatten eingeleitet und bis zum Bruch des Probekörpers erhöht. Ein Abgleich durch Mörtel sollte unter Hinweis auf die Gesamtzielstellung des Projekts ausdrücklich vermieden werden. Die Konditionierung der Steine zum Erreichen des lufttrockenen Zustandes erfolgte durch Lagerung im Labor.

Die Druckspannungsuntersuchungen wurden ausschließlich an Kalksandsteinen der Materiallieferung A vorgenommen. Folgende Abmessungen wurden getestet:

- $l/h/b = 498 / 498 / 115$ mm,
- $l/h/b = 498 / 498 / 150$ mm,
- $l/h/b = 498 / 498 / 240$ mm.

Im Einzelnen wurde jeweils ein Stein der Steinbreite 115 mm und 150 mm sowie drei Steine der der Breite 240 mm getestet. Das Ziel dieser Untersuchungen war es, einen Vergleich von Druckfestigkeit des Einzelsteins zur Druckfestigkeit des Mauerwerks zu ermöglichen. Wie auch bei gemörteltem Mauerwerk wird von einer Abhängigkeit der Mauerwerksdruckfestigkeit von der Einzelsteindruckfestigkeit ausgegangen (siehe Abschnitt 3.4.4). In der folgenden Tabelle 24 sind die Ergebnisse dieser Untersuchungen dargestellt. Dazu wurden der E-Modul $E_{33/66}$ und die einaxiale Druckfestigkeit der Steine berechnet. Bild 182 zeigt, wie der E-Modul $E_{33/66}$ bestimmt wurde. Hierbei wurde der Anstieg von jeweils zwei Punkten, sowohl bei 33% als auch bei 66% der Bruchspannung ermittelt. Die normierte Druckfestigkeit f_b wurde mit dem Formfaktor nach DIN EN772-1:2000 bestimmt.

6.2.2.1. Ergebnisse der der Druckversuche an Einzelsteinen

Tabelle 24 Ergebnisse der Druckversuche an Einzelsteinen der Größe 498x498xb, bei Steindicken $b = 115, 175$ und 240 mm

Stein	B [mm]	ρ [kg/dm ³]	A [mm ²]	$E_{33/66}$ [N/mm ²]	f_{b1} [N/mm ²]	ϵ_t ‰	ϵ_{ml} ‰	ϵ_{max} ‰	d [-]	f_b [N/mm ²]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
KS-115	115	1,67	57270	5218,8	19,8	3,3	8,0	8,4	1,3	25,4
KS-150	150	1,72	74700	3682,3	16,4	3,5	9,9	10,0	1,4	22,2
KS-240-1	240	1,80	119520	3155,5	16,7	3,3	9,9	10,4	1,1	18,9
KS-240-2	240	1,80	119520	3360,7	14,4	4,9	10,2	10,3	1,1	16,2
KS-240-3	240	1,80	119520	3030,0	15,9	4,1	11,4	11,9	1,1	17,9
KS-240	240	1,80	119520	3182,1	15,7	4,1	10,5	10,9	1,1	17,7

ρ Steindichte,
A Druckfläche,
 $E_{33/66}$ E-Modul,
 f_{b1} ermittelte einaxiale Steindruckfestigkeit,
 ϵ_t Dehnung am Ursprung des Sekantenmoduls E,
 ϵ_{ml} Dehnung bei maximaler Druckspannung,
 ϵ_{max} maximale Dehnung; d Formfaktor nach DIN EN772-1:2000,
 f_b normalisierte Druckfestigkeit des Steins

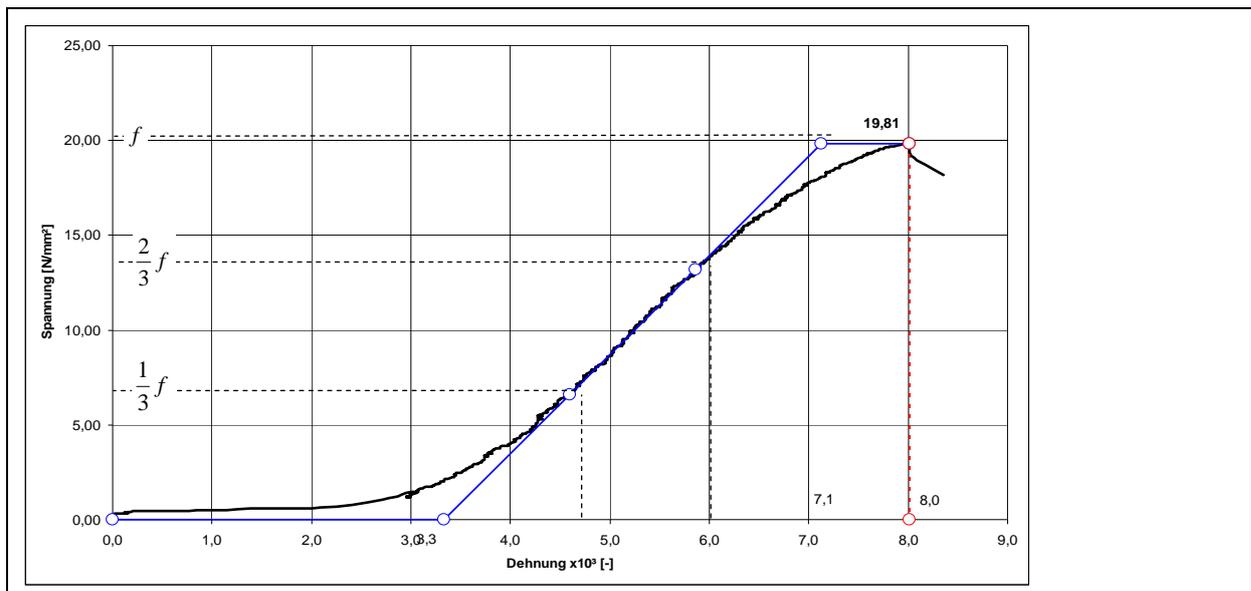


Bild 182 exemplarische Spannungs-Dehnungs-Linie für 115 mm-Stein (Test 115-1)

In Wertung der Ergebnisse der Einzelsteintest kann Folgendes festgestellt werden:

- Eine hohe Anschwelldehnung aufgrund der nicht abgeglichenen Steinoberfläche und der daraus folgenden lokalen Plastifizierungen des Steins im Lasteinleitungsbereich.
- Ausgehend vom Ursprung des Sekantenmoduls $E_{33/66}$ wird eine typische Spannungs-Dehnungs-Linie für KS-Steine ermittelt mit $\Delta\epsilon_{ml} = 7,1\text{‰} - 3,3\text{‰} = 3,8\text{‰}$ und $\Delta\epsilon_{max} = 8,0\text{‰} - 3,3\text{‰} = 4,7\text{‰}$.

6.3. Tragfähigkeitstest an Wänden: RILEM-Tests

6.3.1. Versuchsbeschreibung

Die experimentellen Untersuchungen zur Druckfestigkeit von Trockenmauerwerk wurden in Anlehnung an DIN 18554-1 durchgeführt. Diese Testes werden auch als RILEM-Versuche bezeichnet.

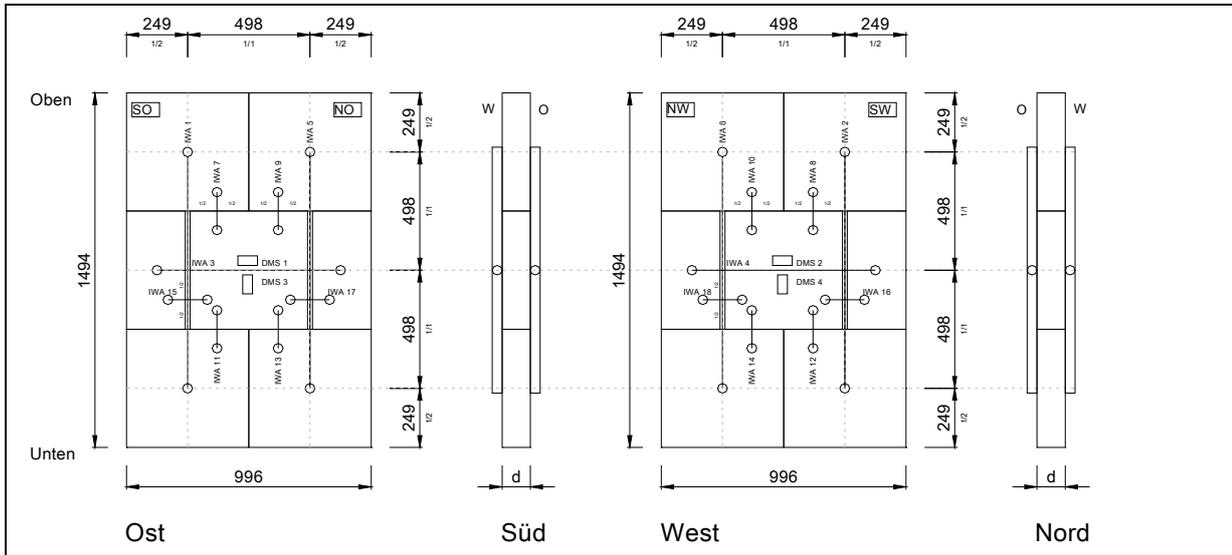


Bild 183 RILEM-Versuch mit positionieren Wegaufnehmern, jeweils für $d=115, 150$ und 240 mm.

Aus den Steinen, wie in Abschnitt 6.1.1.1 (siehe Tabelle 18) bereits beschrieben, wurden insgesamt 8 Probekörper aus Trockenmauerwerk errichtet. Davon waren 2 Prüfkörper der Dimension $l/h/b = 498 / 498 / 115$ mm und jeweils 3 Körper der Dimension $l/h/b = 498 / 498 / 150$ mm bzw. $b = 240$ mm.

Die Prüfung der Proben erfolgte nach jeweils demselben Belastungsregime:

- 3x Lastanstieg bis 15% der Bruchlast, 60 Sekunden Halten und Entlasten
- 1x Lastanstieg bis 50% der Bruchlast, 60 Sekunden Halten und Entlasten
- Bruch

Das Ziel der Wechselbeanspruchung bis 15% der erwarteten Bruchlast war die Beobachtung des Kriech- und Ermüdungsverhalten unter geringer Last. Die nochmalige Entlastung nach 50% der Bruchlast zeigte das nichtlineare Verhalten der Spannungs-Dehnungs-Linie infolge sich öffnender Risse.

6.3.2. Beobachtungen

Das mechanische Verhalten der Probekörper wurde durch eine enorme Anfangsverformung gekennzeichnet. Das Mauerwerk zeigte zu Beginn eine enorme Stauchung ohne signifikanten Lastanstieg. Nach fortschreitendem Lastanstieg kam es zu allmählichem Kontakt der einzelnen Mauersteine untereinander, wodurch sich eine Vergleichmäßigung der Span-

nungsübertragung in den Trockenfugen einstellte und die sich Mauerwerkssteifigkeit vergrößerte. Nach dem dreimaligen Lastwechsel bei 15% der Bruchlast kam es zu keinen plastischen Verformungen mehr, die Unebenheiten an den Kontaktstellen der Steine haben sich angeglichen. Die Untersuchungen zeigten eine große Steifigkeitserhöhung bei ca. 33% der Bruchlast. In diesem Stadium wurden die offenen Kontaktfugen infolge der Druckspannung fast vollständig geschlossen. Die Kontaktflächen zwischen den Steinen waren weitestgehend ausgereizt, wodurch sich die Druckkraftübertragung verbessern und die Steifigkeit erhöhen konnte. Das Verhalten der Spannungs-Dehnungs-Linien aller Prüfungen ist in Bild 184, Bild 185 und Bild 186 dargestellt.

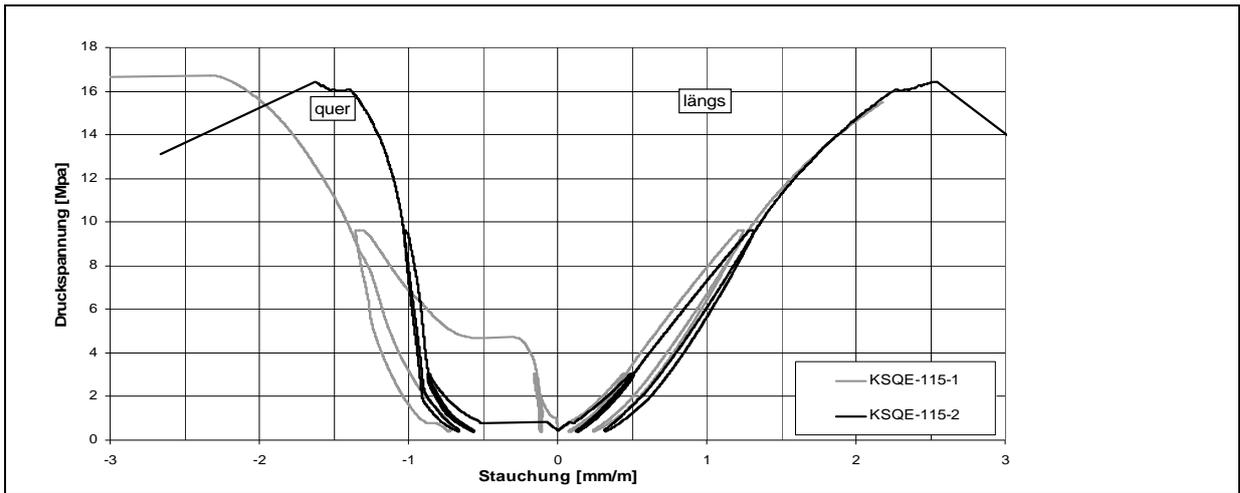


Bild 184 Spannungs-Dehnungs-Linie für RILEM-Tests KSQE-115-1 und KSQE-115-2

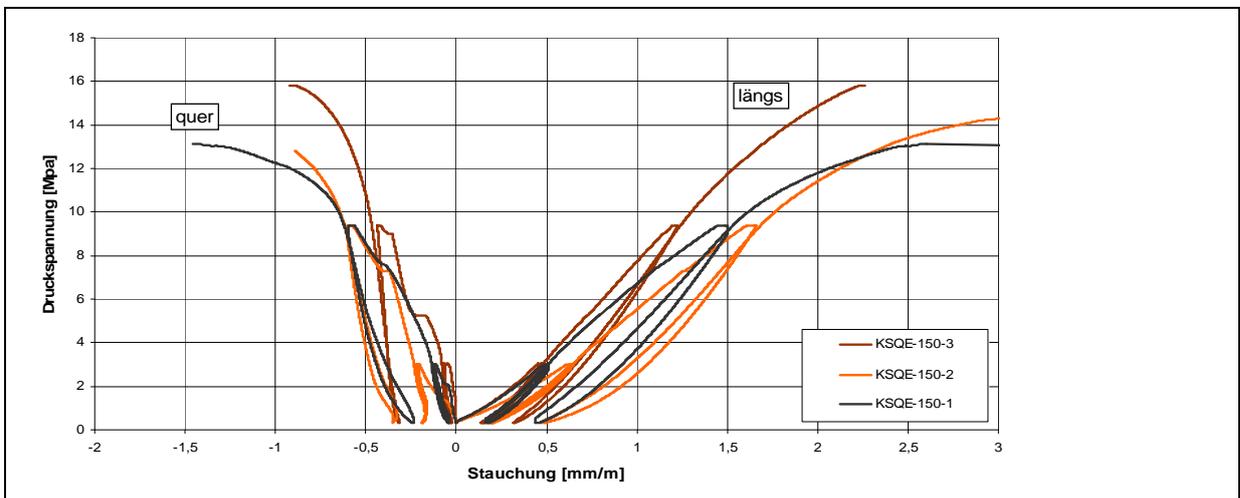


Bild 185 Spannungs-Dehnungs-Linie für RILEM-Tests KSQE-150-1, KSQE-150-2 und KSQE-150-3

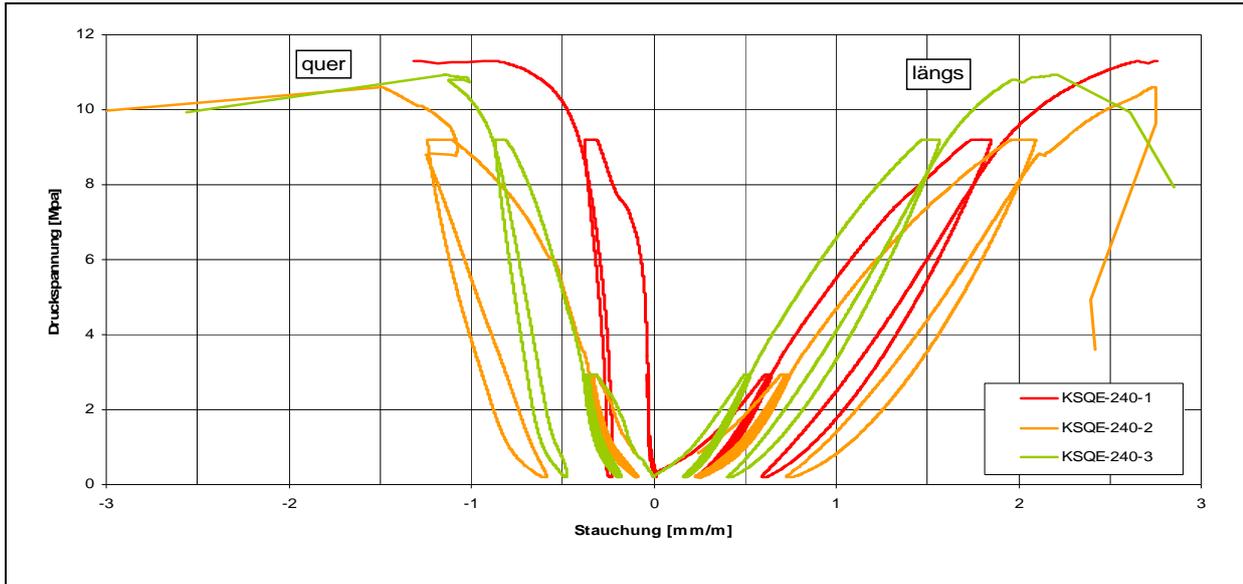


Bild 186 Spannungs-Dehnungs-Linie für RILEM-Tests KSQE-240-1, KSQE-240-2 und KSQE-240-3

An der Stelle, bei der es zur maximalen Spannungsübertragung in den Fugen kommt, zeigt die Spannungs-Dehnungs-Linie ihren maximalen Anstieg. Dieses Verhalten wird auch bei Dünnbettmauerwerk beobachtet. Der Punkt des steilsten Anstieges wird auch als Wendepunkt bezeichnet. Er befindet sich nach Marzahn [104] bei 1/3 der Bruchlast. Die zugehörige Dehnung im Mauerwerk liegt bei ca. $\epsilon_{33}=1.3 \text{ ‰}$. In den Versuchen befindet sich der Wendepunkt der Spannungs-Dehnungs-Linie in diesem Bereich.

Beim Erreichen der Bruchlast kommt es zu einem spröden Versagen. Die Duktilität ist größtenteils von den mechanischen Eigenschaften der Steine und ihrer Festigkeit abhängig [94]. Die Risse sind unabhängig vom Fugenbild verteilt und verlaufen entlang der Hauptspannung (siehe Bild 187).



Bild 187 Allgemeines Bruchbild von Trockenmauerwerk unter Druckkraft

Die Risse verlaufen über den gesamten Prüfkörper und gehen durch den gesamten Querschnitt (Trennrisse). Bild 188 zeigt dazu exemplarisch beide Prüfkörperseiten nach dem Bruch mit gleichartigem Rissbild.

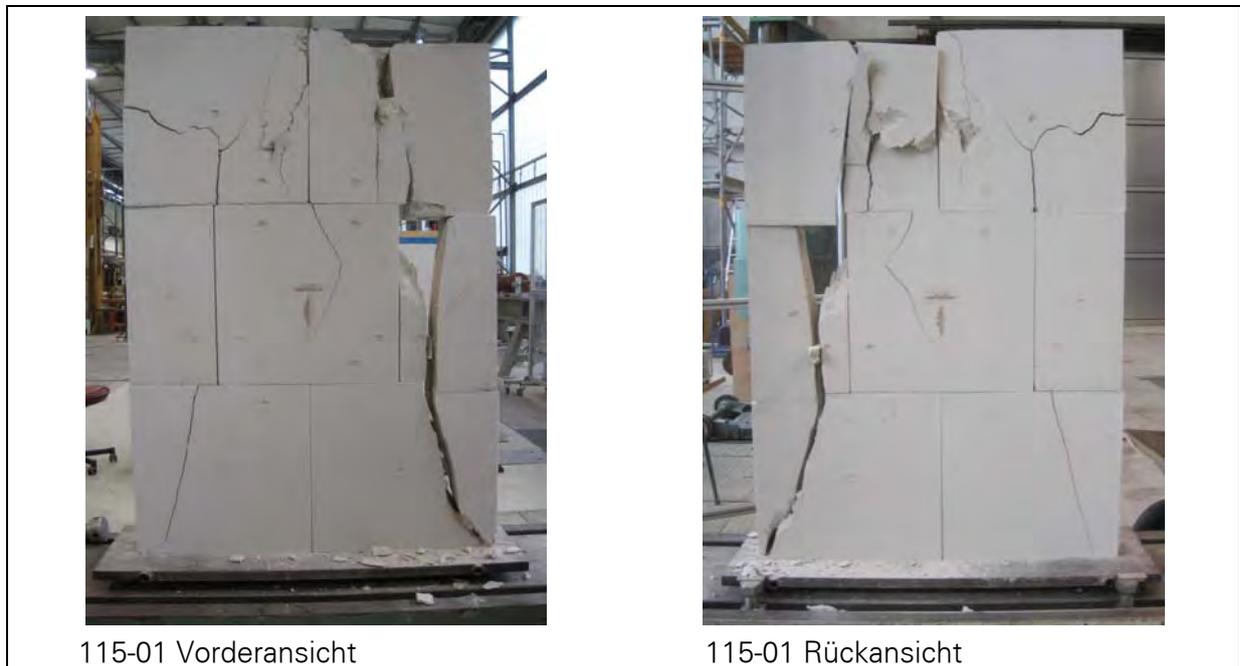
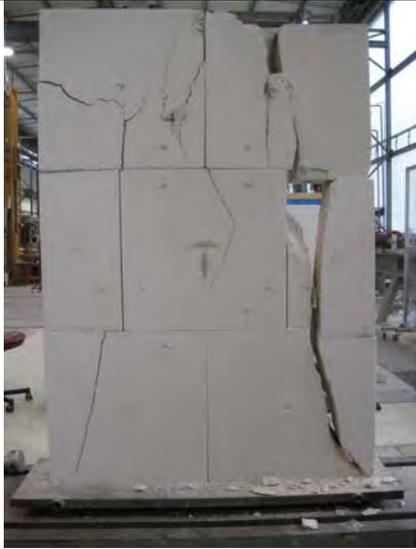


Bild 188 Trennrisse nach dem Versuch 115-01

An den Lasteinleitungsflächen ist die Querverformung behindert, sodass ein dreiaxialer Spannungszustand in diesem Bereich entsteht, welcher auch die Druckfestigkeit steigen lässt. In diesem Bereich kommt es, wie bei Betondruckversuchen zur Aufweitung der senkrechten Risslinien, da die Hauptspannung in diesem Bereich nicht mehr senkrecht verläuft.

Bei einer ausreichenden Schlankheit des Prüfkörpers existiert im mittleren Bereich ein nahezu einaxialer Spannungszustand, bei dem es keine Querdehnungsbehinderung gibt. Die ersten Risse entstehen in diesem Bereich und verlaufen senkrecht. Unter steigender Belastung werden infolge der 2. Hauptspannung seitlich ganze Segmente herausgedrückt, in dessen Folge sich der Bruch des Probekörpers ergibt. Die seitlichen Abplatzungen infolge des Querszugs sind an nahezu allen Probekörpern zu beobachten, Bild 189.



Test 115-01



Test 115-02



Test 150-01



Test 150-02



Test 150-03



Test 240-01



Test 240-02



Test 240-03

Bild 189 Bruchbilder der RILEM-Versuche unter Druckkraft

6.3.3. Testergebnisse

Tabelle 25 Ergebnisse der RILEM-Versuche,

Test	f [N/mm ²]	ϵ_{ml} ‰	$\epsilon_{ml,q}$ ‰	ϵ_{33} ‰	ϵ_{66} ‰	$\epsilon_{33,q}$ ‰	$\epsilon_{66,q}$ ‰	ν_{33} [-]	$E_{33/66}$ [N/mm ²]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
KSQE-115-1	16,7	2,5	2,3	0,7	1,5	0,8	1,5	-	7730,6
KSQE-115-2	16,4	2,5	1,6	0,8	1,5	0,9	1,1	-	8117,5
Mittelwert	16,6	2,5	2,0	0,8	1,5	0,9	1,3	-	7924,0
KSQE-150-1	13,1	2,6	1,5	0,7	1,5	0,2	0,6	0,28	5586,9
KSQE-150-2	14,3	3,0	1,8	0,9	1,7	0,3	0,6	0,32	3882,7
KSQE-150-3	15,8	2,2	0,9	0,7	1,4	0,2	0,5	0,31	3314,4
Mittelwert	14,4	2,6	1,4	0,8	1,5	0,2	0,6	0,30	4261,3
KSQE-240-1	11,3	2,7	0,9	0,8	1,7	0,0	0,3	0,05	3985,8
KSQE-240-2	10,6	2,8	1,5	0,8	1,9	0,4	1,1	0,47	3398,1
KSQE-240-3	10,9	2,2	1,1	0,6	1,4	0,4	0,8	0,68	4710,2
Mittelwert	10,9	2,5	1,2	0,7	1,6	0,3	0,7	0,40	4031,3

f Mauerwerksdruckfestigkeit,

ϵ_{ml} maximale Längsdehnung,

$\epsilon_{ml,q}$ maximale Querdehnung

ϵ_{33} Längsdehnung bei 1/3 der Bruchlast,

ϵ_{66} Längsdehnung bei 2/3 der Bruchlast,

$\epsilon_{33,q}$ Querdehnung bei 1/3 der Bruchlast,

$\epsilon_{66,q}$ Querdehnung bei 2/3 der Bruchlast,

ν_{33} Querdehnzahl bei 1/3

$E_{33/66}$ Sekantenmodul zwischen 1/3 und 2/3 der Bruchlast

Tabelle 26 Druckfestigkeit der RILEM - Körper nach Marzahn

Versuch	Stein		f		E-Modul	
	f_b [N/mm ²]	E_b [N/mm ²]	test [N/mm ²]	Marzahn [N/mm ²]	test [N/mm ²]	Marzahn [N/mm ²]
1	2	3	4	5	6	7
KSQE-115	25,4	5218,8	16,6	12,8	7924,0	7017,6
KSQE-150	22,2	3682,3	14,4	11,4	4261,3	6348,5
KSQE-240	18,9	3182,1	10,9	10,0	4031,3	5209,3

f_b normalisierte Druckfestigkeit des Steins,

E_b E-Modul des Steins,

f_{test} gemessene Druckfestigkeit des Mauerwerks,

$f_{Marzahn}$ berechnet nach $f = 0,82 \cdot f_b^{0,85}$,

E_{test} gemessener E-Modul,

$E_{Marzahn}$ berechnet nach $E_{33/66} = 930 \cdot f^{0,72}$

Infolge der Geometrie von Einzelstein und dem Verband (Toleranz und Ebenheit der Lagerfuge) sowie aufgrund vorhandener Steinfestigkeit ergeben sich verschiedene Versagensbilder, welche in Abschnitt 3.4.4 detailliert beschrieben sind.



Bild 190 Längsteilung infolge Inhomogenität im Querschnitt

Bild 190 zeigt bei nahezu gleichen Steinfestigkeiten (siehe Tabelle 25) aufgrund geometrischer Toleranzen verschiedenen Versagensmechanismen im Verband.

6.4. Tragfähigkeitstest an vorgespannten Steindecken

6.4.1. Allgemeine

6.4.1.1. Zielstellung und Konzeption

Zum Abschluss der Tragfähigkeitstests wurden Untersuchungen an vorwiegend biegebeanspruchten Bauteilen, den Decken durchgeführt. Dabei sollte schwerpunktmäßig das Gesamtverhalten der trockengefügten, lose vorgespannten Kalksandsteindecke erkundet werden. Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:

- Den Schlupf am Deckenaufleger
- Den Spannkraftverlust infolge Kriechen
- Das Verformungsverhalten aufgrund von Biegung infolge
 - Einzellast, ohne Bauteil versagen
 - Flächiger Last, mit Abschließender Ermittlung der Maximallast bis zum Bauteilversagen.

Die zur Erstellung der Konstruktionen verwendeten Baustoffe und Materialien sind in Abschnitt 6.1.1.1 beschrieben.

6.4.1.2. Statisch-konstruktive Angaben

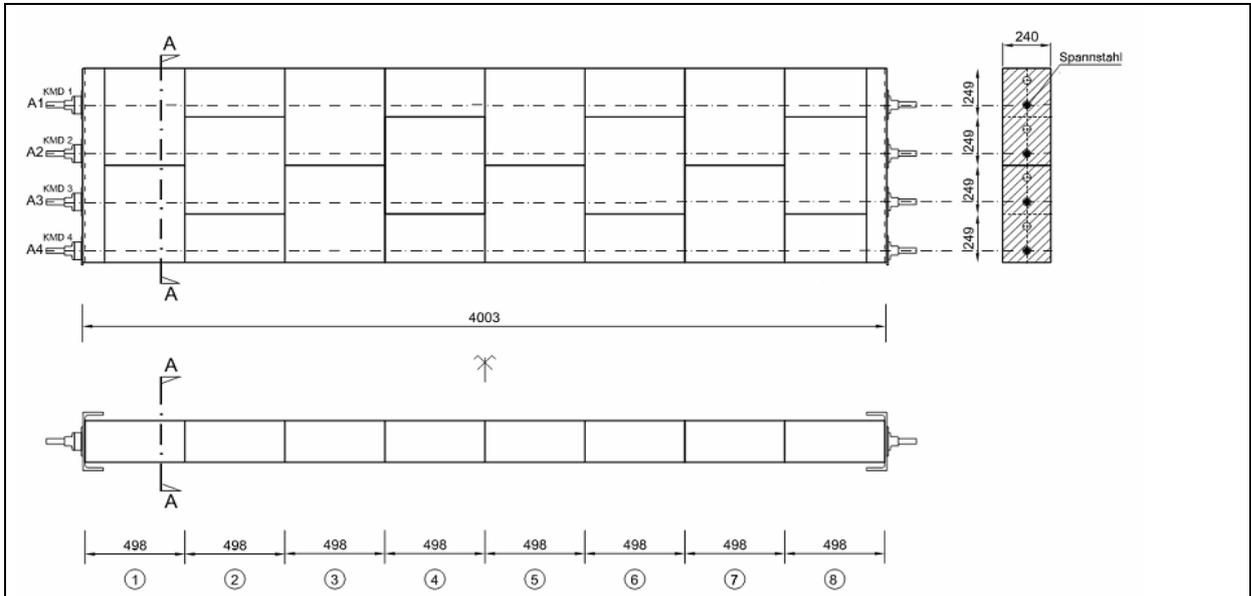


Bild 191 Aufbau und Geometrie der getesteten zentrisch vorgespannten Decken

Bild 191 zeigt die Geometrie der getesteten Decken. Diese ergibt sich aus 8 Planelementreihen im $\frac{1}{2}$ -Verband, wobei Reihe 1,3, 5, 7 aus zwei ganzen, Reihe 2,4,6, und 8 aus einem ganzen und zwei halben Planelementen gebildet wird. Die Gesamdeckenlänge vom $l = 4003$ mm ergibt sich aus Einzellängen der Planelemente und der konstruktiven Situation am Deckenauflager (siehe Bild 192).

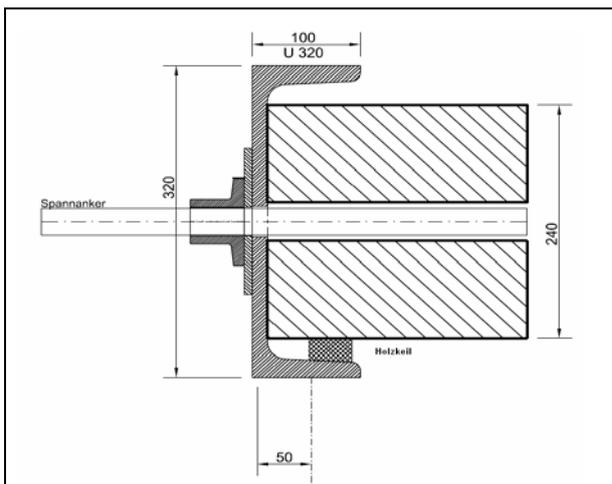


Bild 192 Detail Deckenauflager

Die planmäßig eingesetzte Vorspannung von 150 kN pro Stab ergab sich aus den Deckenlasten der im Zuge des Projektverlaufs erstellten Typenstatik (siehe Abschnitt 4.3). Für den im

Rahmen der Vorbemessung gewählten Baustahl BSt 500 [206] ergab sich in folge ein Stabquerschnitt gemäß Tabelle 27.

Tabelle 27 Bemessung Zugstab

BSt 500 f_{yk} :	500 N/mm ²
Sicherheitsfaktor:	1,15
f_{yd} :	435 N/mm ²
bei gewählten	Stabquerschnitt DN 28, ergibt sich: AS = 616 mm ² x 435 N/mm ² = 267,9 KN > 150 KN

Aus sicherheitstechnischen Gründen wurde abweichend von den Vorgaben der Vorbemessung ein höherwertiger Spannstahl verwendet (siehe Abschnitt 6.1.1.2), sodass der Stabquerschnitt auf DN = 26,5 mm reduziert werden konnte.

Die zulässige Spannung im Mauerwerk wurde unter Berücksichtigung der in den Bauteiltest ermittelten und gegenüber der Zulassung [208] reduzierten Spannung im Stein angesetzt. Diese wurde wie folgt ermittelt:

$$(4) \quad \sigma = \frac{F}{A} = \frac{0,15 \text{ [MN]}}{0,25 \times 0,24 \text{ [m]}} = 2,50 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$(5) \quad f_d = \frac{9^{*A)} \text{ [N/mm}^2\text{]} \times 0,85}{1,5} = 5,10 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

*A) Infolge Einzeltests gegenüber der Spannung gemäß Zulassung [208], Tabelle 4 reduziert

$$(6) \quad \frac{\sigma}{f_d} = \frac{2,50 \text{ [N/mm}^2\text{]}}{5,10 \text{ [N/mm}^2\text{]}} = 0,49 < 1$$

6.4.2. Einzelstein Anker

6.4.2.1. Versuchsbeschreibung

Um den sogenannten Schlupf am Deckenaufleger nachzuweisen, wird die für die vorgespannten Steindecken ermittelte planmäßige Vorspannung am Einzelstein mit unterschiedlich positionierten Zugstäben eingeleitet. Bild 193 zeigt den Aufbau und die gewählten Varianten in der Positionierung von Stein und Lasteinleitung. Die Varianz des Aufbaus ergibt sich aus dem für die Deckensteine gewählten Verband im 1/2-Versatz.

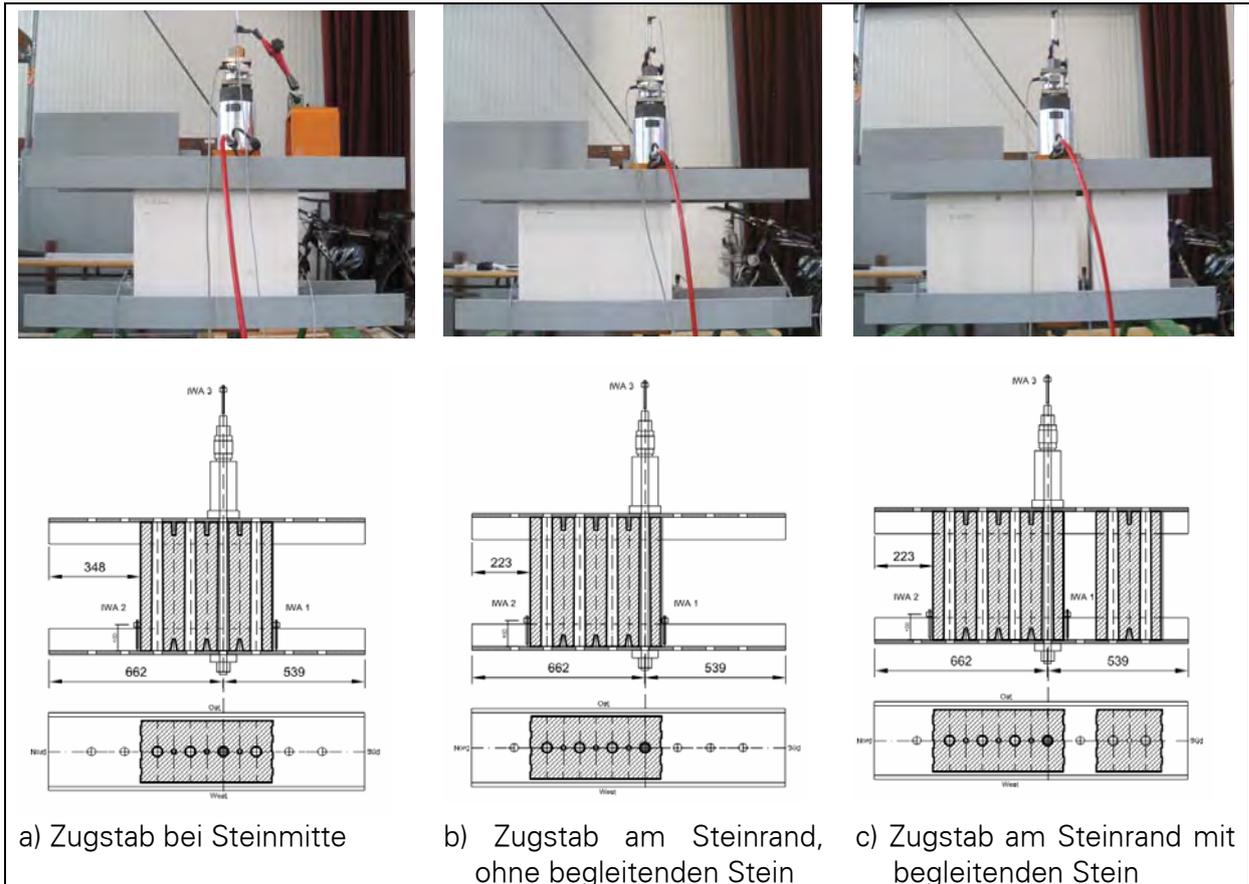


Bild 193 Versuchsaufbau mit Darstellung der Ankerpositionen

Die planmäßige Vorspannung von 150 kN wird mittels eines Spannstahls St950/1050, Stabquerschnitt $\varnothing 26,5$ mm, über zwei gelochte, an der Ober- und Unterseite des Steins angeordnete U320 Profile (vergleiche Abschnitt 6.1.1.3), in das Kalksandstein Planelement eingeleitet.

Die Last wird je dreimal bis zur planmäßigen Vorspannung eingetragen. Als Vorlast ist eine Kraft von 10 kN gewählt. Der Lasteintrag erfolgt mit einer Geschwindigkeit von 0,5 bis maximal 1 kN/s. Zur Berücksichtigung der Relaxation wird nach Erreichen der planmäßigen Vorspannung die Vorspannung 60s gehalten. Zwischen den drei Lastzyklen wird die Vorspannung auf Höhe der Vorlast heruntergefahren und ebenfalls eine Relaxationszeit von 60s gehalten.

6.4.2.2. Versuchsergebnis

Bild 194 zeigt den Zusammenhang zwischen der eingetragenen Vorspannkraft und der Verschiebung des Spannstahls direkt über der Presse. Dargestellt sind drei Versuche mit unterschiedlichen Positionen des Spanngliedes im Mauerstein (vgl. Bild 193). Jede Kurve weist in Abhängigkeit von der Spanngliedlage einen unterschiedlichen Dehnweg aus. Zudem ist eine starke Nichtlinearität im Anfangsbereich zu erkennen, welche zum Ende hin und während der zyklischen Beanspruchung fast in einem linearen Verlauf übergeht. Die starke Nichtlinearität wird der Unebenheit der Steinoberfläche zugeschrieben, die sich erst nach der ersten Belastung infolge der Angleichung der Kontaktflächen durch Plastifizierungen im Stein ange-

glichen hat. Das bedeutet, dass beim Erreichen des linearen Stadiums hauptsächlich die Elastizität des Steins und des Spannstahls einen Einfluss auf den Anstieg der Kraft-Verformungskurve hat. Der unterschiedliche Anfangsverlauf der Kurven lässt die Schlussfolgerung zu, dass mit steigender Spannung im Stein und größerer Kontaktfläche die Anfangsverformungen zunehmen.

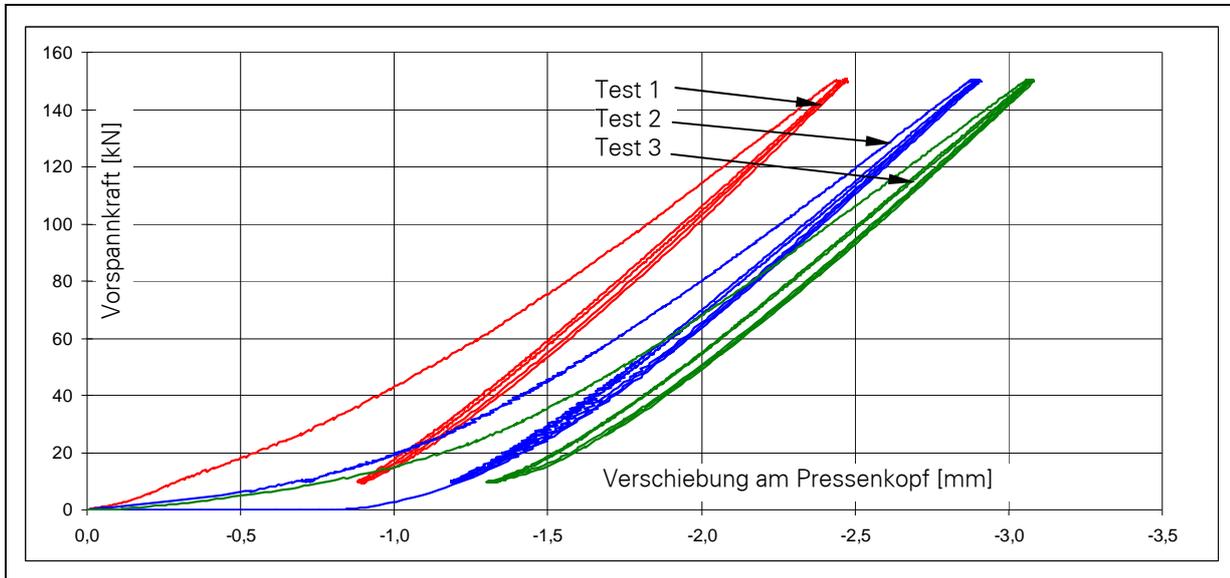


Bild 194 Kraft-Verformungs-Linie aus eingeleiteter Spannkraft und Dehnweg des Spannstahls an der Hydraulikpresse

Zum weiteren Verständnis der Nichtlinearität zeigt Bild 195 zusätzliche Kurven der Verschiebung innerhalb der Fuge von Stein und Ankerplatte. Der Kurvenverlauf gibt Auskunft über das Verhalten an verschiedenen Positionen dieser Kontaktstelle Ankerplatte-Stein unter Druckbeanspruchung. Im 1. Test, bei dem der Spannanker im mittleren Bereich des KS-Steins liegt und nur eine geringe Lastexzentrizität im Stein hervorruft, verhalten sich die beiden Wegaufnehmer nahezu gleich. Für Test 2 und 3 mit jeweils großer Lastexzentrizität ist in beiden Fällen eine starke Abweichung zu erkennen. Generell ist zu erkennen, dass sich während des ersten Lastanstieges die Fuge schließt und bei Entlastung nicht wieder voll auf geht.

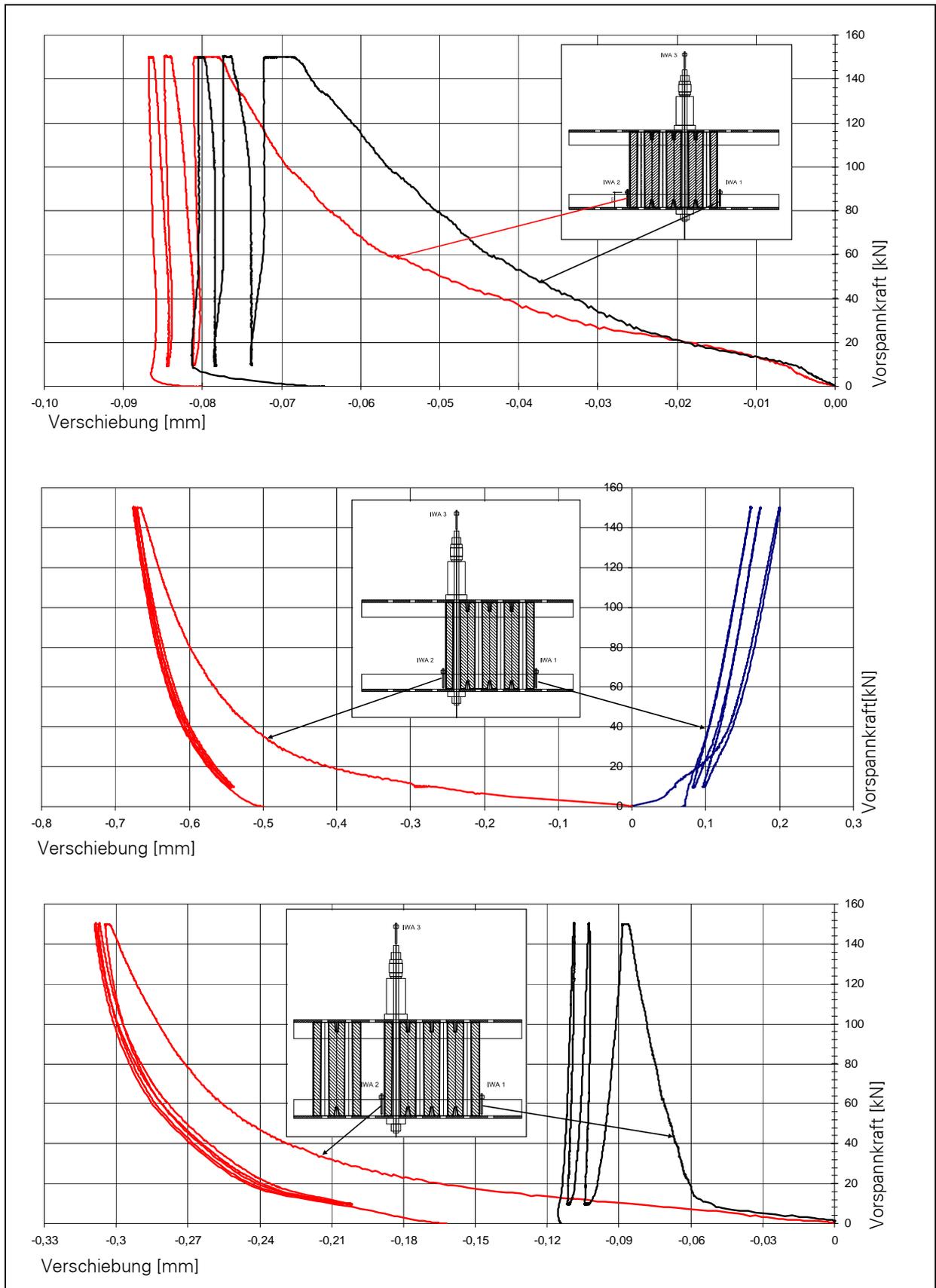


Bild 195 Kraft-Verformung zwischen Lasteinleitungsplatte und Mauerstein.

6.4.3. Versuche zum Spannverlust

Um den Verlust der Spannkraft infolge Kriechen zu ermitteln, wurde die Deckenplatte einem Langzeittest unterzogen. Dazu wurde eine der für den Biegetest vorbereiteten Decke vorzeitig errichtet und der durch das Kriechen bedingte Spannungsabfall mittels an den Spannstellen angebrachter Kraftmessdosen (KMD) über einen Zeitraum von 45 Tagen ermittelt. Um Platz im Labor zu sparen, wurde die Decke nach Errichtung hochkant gestellt.

6.4.3.1. Versuchsergebnisse

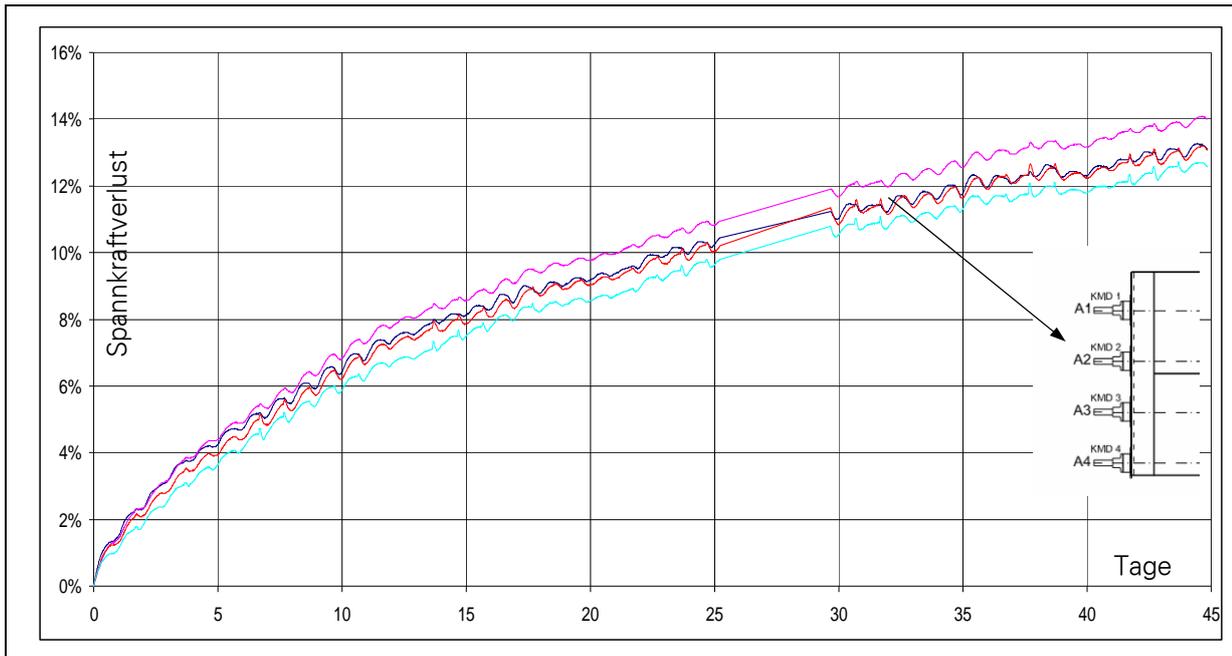


Bild 196 Ergebnis der Langzeitmessung von 45 Tagen

Gewöhnlich erfolgen Kriechversuche über mehrere Monate. In diesem Fall fand, der Bearbeitungszeit des Projektes geschuldet, ein Dauerbelastungsversuch über nur 45 Tage statt. Für diesen Zeitbereich kann das prinzipielle Verhalten des Mauerwerks unter zentrischer Vorspannung beobachtet werden. Der Vorspankraftverlust wurde an den vier Spannmitgliedern aufgezeichnet. In Bild 196 zeigt sich deutlich nach 45 Tagen ein stetig steigender Verlust infolge Kriechen im Mauerwerk von bis dahin 14%. Dieser Verlust ist im Vergleich zu üblichen Spannkraftverlusten bei Spannbetonkonstruktionen wesentlich höher. Für endgültige Aussagen ist ein Dauerstandzeitversuch über mehrere Monate notwendig.

6.4.4. Biegetest an vorgespannten Decken

Ziel der Biegetests an den vorgespannten Decken ist es, in Abhängigkeit von Einzel- bzw. Flächenlast, das Verformungsverhalten und die Querkraftverteilung in der Decke zu ermitteln.

6.4.4.1. Testaufbau und Messkonzept

Biegetest mit Einzellast

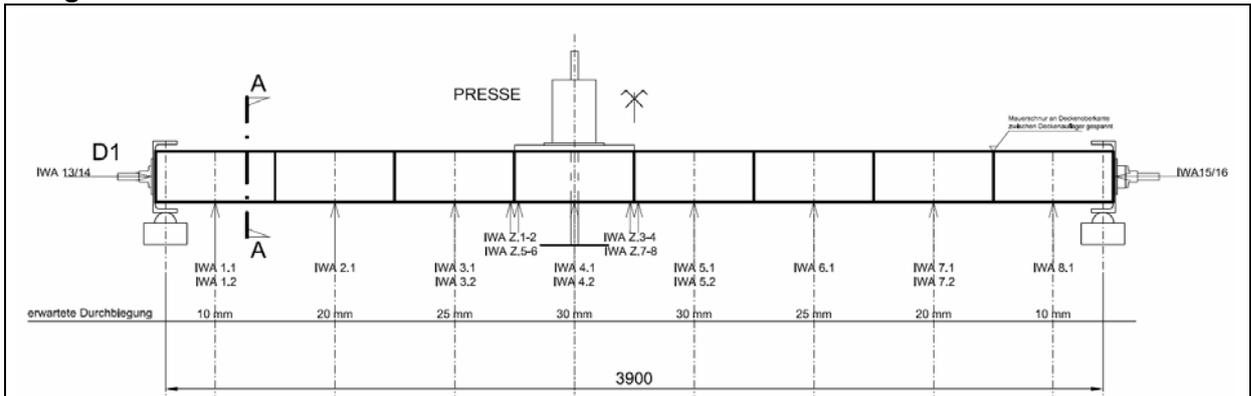


Bild 197 Aufbau des Biegetests mit Einzellast

Bild 197 zeigt den für den Biegetest mit einer Punktlast gewählten Aufbau. Der Test wurde mit einer Einzellast in Steinformat ($h/l = 498 / 498$ mm) gefahren. Die Einzelkraft wurde über eine Lastverteilungsplatte aus Holz mittels gekoppelter Pressen in die vorgespannte Decke eingeleitet und in 3 Laststufen erhöht. Die maximal zulässige Einzellast wurde auf 16,5 kN beschränkt. Ein Versagen der Decke sollte vermieden werden.

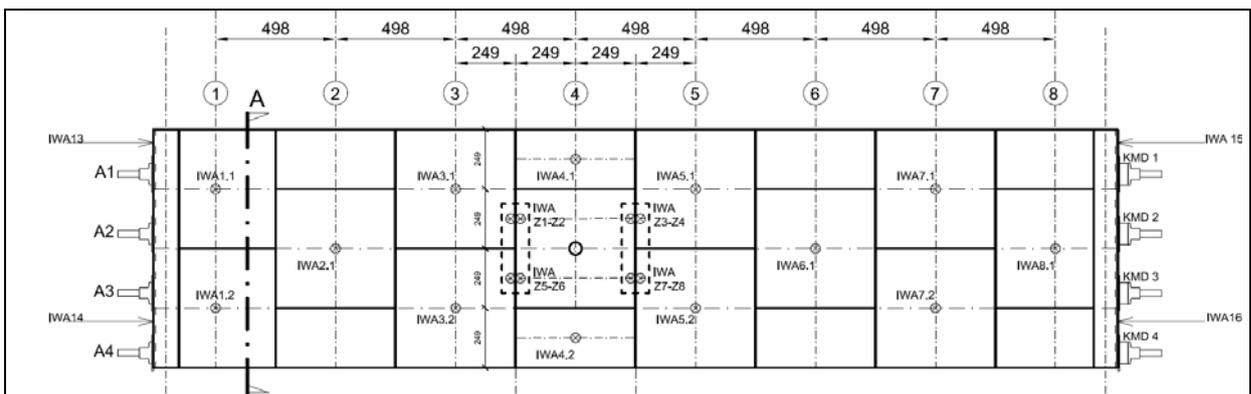


Bild 198 Messkonzept an der Deckenunterseite

Zur Ermittlung der erwarteten Durchbiegung wurde in Steinreihe 1,3,4, 5,7 je zwei sowie in Steinreihe 2, 6, 8 je ein Induktiver Wegaufnehmer (IWA) an der Deckenunterseite angebracht. Um einen eventuellen Einzelversatz des direkt belasteten Steins zu dokumentieren, wurden acht zusätzliche IWAs unmittelbar neben der Lagerfuge zwischen Steinreihe 3 und 4 sowie 4 und 5 vorgesehen (siehe Bild 198).

6.4.4.2. Lastprogramm der Biegetests

Tabelle 28 fasst das Lastprogramm beider an den Decken durchgeführte Biegetests zusammen.

Tabelle 28 Lastprogramm Deckentests, vorgespannte KS-Steindecken

	Einzellast	Flächenlast	Max. t
zu erwartende Maximalkraft	16,5 KN	27 KN	
1. 15% Last	2,5 KN	4,0 KN	
1.1 3 x Anfahren			
1.2 3 X 60 s. Last halten entlasten			
1.3 3 x Entlast und 60 s entlastet halten			15 min.
2. 50% Last	8,25 KN	13,5 KN	
2.1 3 x Anfahren			
2.2 3 X 60 s. Last halten entlasten			
2.3 3 x Entlast und 60 s entlastet halten			15 min.
3. 100% Last	16,5 KN	27 KN	
3.1 3 x Anfahren			
3.2 3 X 60 s. Last halten entlasten			
3.3 3 x Entlast und 60 s entlastet halten			15 min.
4. Bruch	nein	ja	

6.4.5. Ergebnisse der Trägfähigkeitsprüfung mit Punktlast

Der Versuch wurde nicht bis zum Bruch der Probe gefahren, da die Spannglieder wieder verwendet werden sollten. Die Ergebnisse der Belastungen bis 100% Nutzlast sind in den Bildern anschaulich dargestellt.

Bild 201 zeigt die ausgeführten Lastzyklen, je dreimal, in 3 ansteigenden Lastniveaus, wobei nach jedem Lastzyklus eine Haltezeit von ca. 60 Sekunden stattfand.

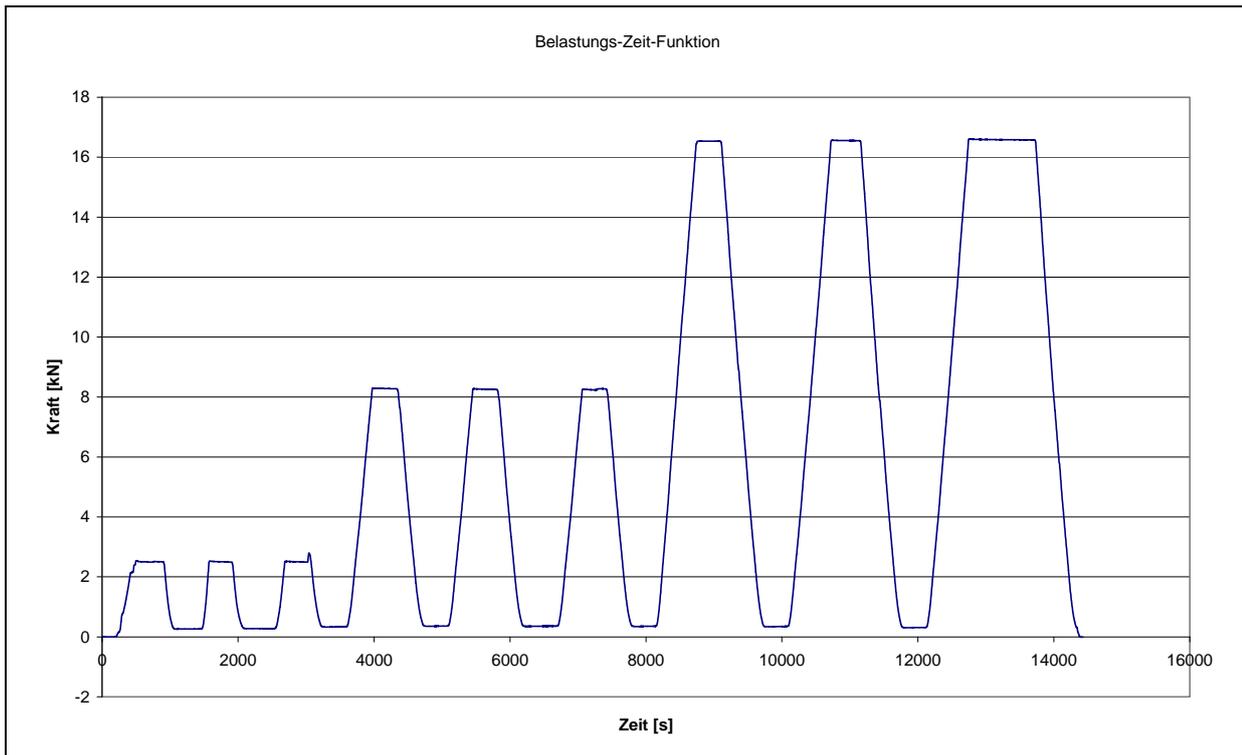


Bild 201 Gemessene Kraft-Zeit-Funktion des Versuchs

Bild 202 zeigt die Durchbiegung des Probekörpers an verschiedenen Stellen. Der nahezu lineare Verlauf zeigt, dass es innerhalb des Lastwechsels zu keinen größeren Plastifizierungen im Querschnitt kommt. Da alle Linien bei „Null starten“ ist erkennbar, dass es im gesamten Versuch dennoch zu einer signifikanten, bleibenden Verformung kommt, welche in Plattenmittel nach dem Lastregime bei ca. 0,24 mm liegt (siehe Bild 202 mit Ausschnittsvergrößerung in Bild 202). Diese Verformungen sind im Wesentlichen auf lokale Plastifizierungsvorgänge in den Lagerfugen zurückzuführen.

Aus dieser Ursache heraus verringert sich auch die Vorspannkraft in der Decke, da die sich in der Länge verkürzt, Bild 204.

Bild 205. zeigt, wie sich der belastete Einzelstein im Bezug zur Deckenplatte senkrecht zur Ebene infolge der Querbelastung verhält. Im Ergebnis zeigt sich ein nahezu linear Verhalten, bei dem der Stein nicht wesentlich aus der Decke herausgedrückt wird.

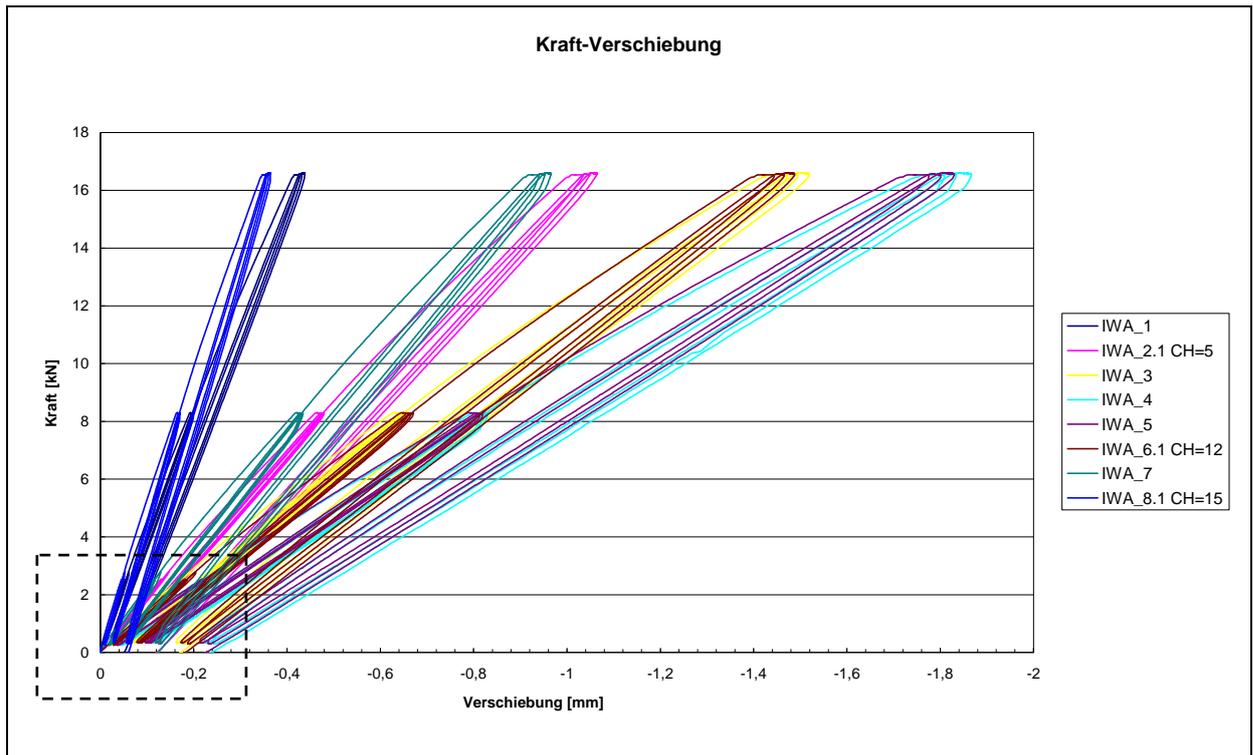


Bild 202 Kraft-Verschiebungs-Diagramm an den oben beschriebenen Punkten

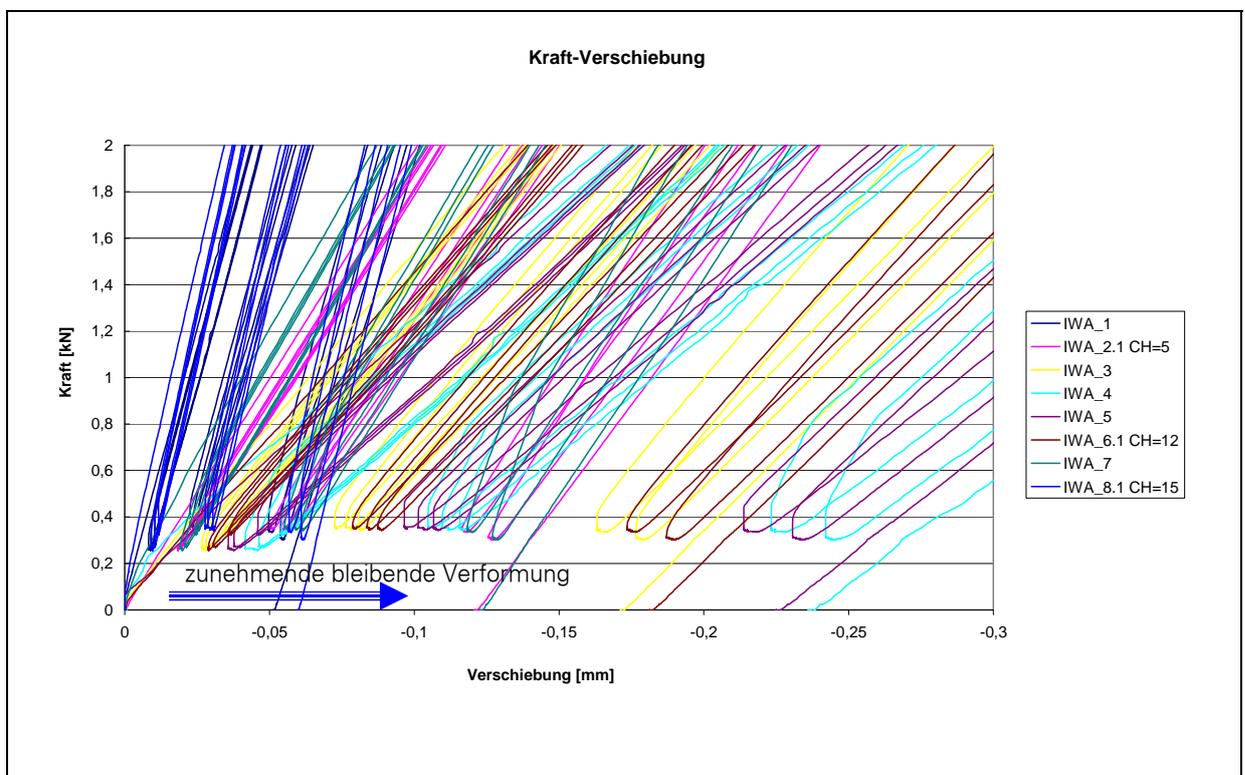


Bild 203 Vergrößerter Ausschnitt der Kraft-Verformungs-Linie im Bereich des Ursprungs

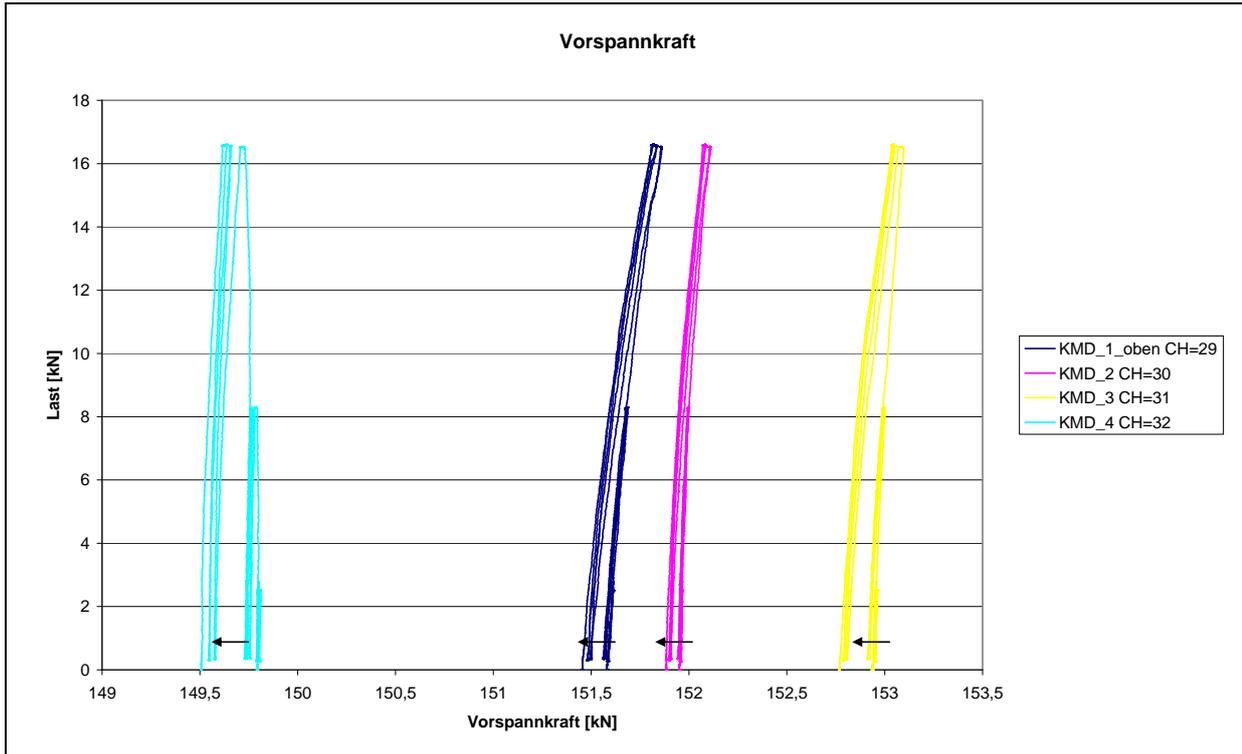


Bild 204 Verhalten der Vorspannkraft während der Belastungen

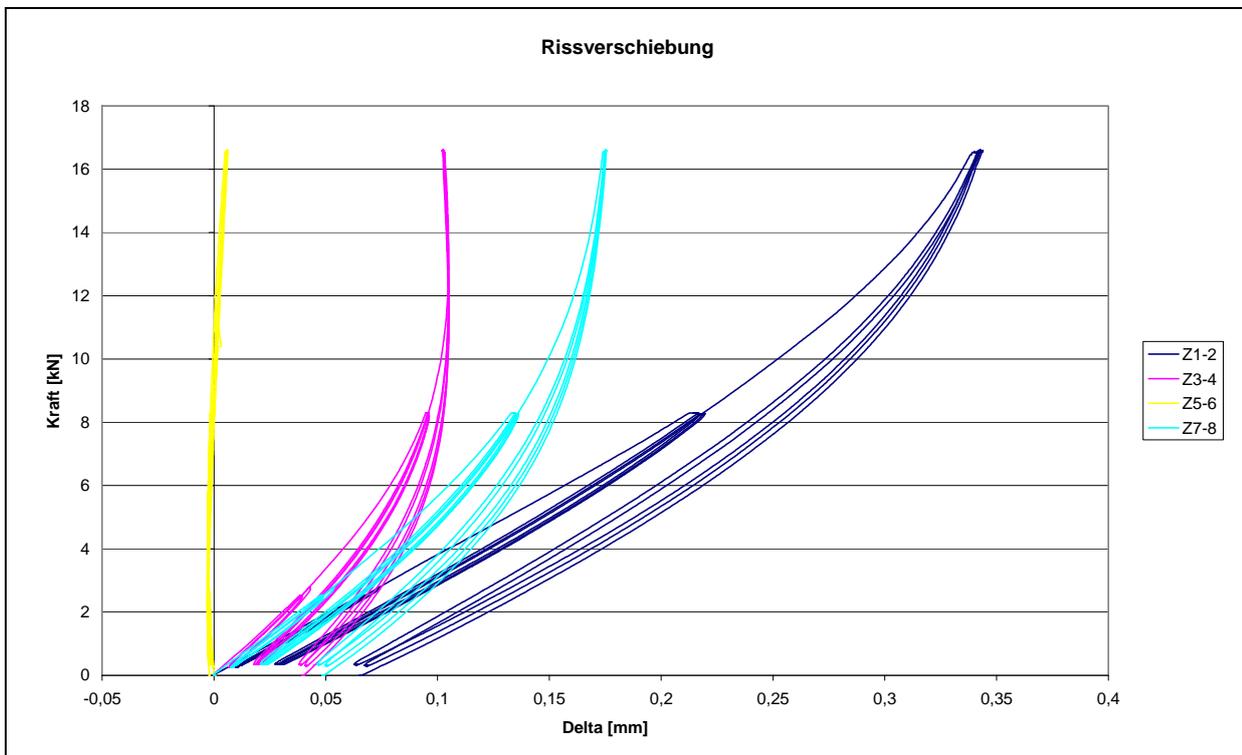


Bild 205 Relativverschiebung des belasteten Einzelstein im Vergleich zur Deckenebene

6.4.6. Ergebnisse der Trägfähigkeitsprüfung mit Flächenlast

Die Biegetests sollen die Maximaltragfähigkeit der Deckenplatte infolge einer Flächenlast ermitteln. Nach einem wiederum zyklischen Lastregime mit Untersuchung der Verformungen ist in einem 2. Schritt und Abbau der meisten Wegaufnehmer die Platte bis zum finalen Bruch belastet worden.

6.4.6.1. Ergebnisse der Belastungen bis 100% Nutzlast

Schwerpunkt dieser Untersuchung lag im Ergründen der elastischen und plastischen Verformungen unter Schwellenbelastung. Daraus wird das Ermüdungsverhalten abgeleitet.



Bild 206 Versuchsaufbau

Die Last wurde schwellenartig bis auf 27 kN erhöht, welches einer Flächenlast von $6,75 \text{ kN/m}^2$ entspricht. Bild 207 zeigt den Kraft-Zeit-Verlauf der Schwellenbelastung. Die dazugehörige Kraft-Verschiebungskurve zeigt Bild 208. Wie auch bereits in den Ergebnissen des Einzellasttests ist hier infolge Belastung ein bleibender Verformungsanteil erkennbar.

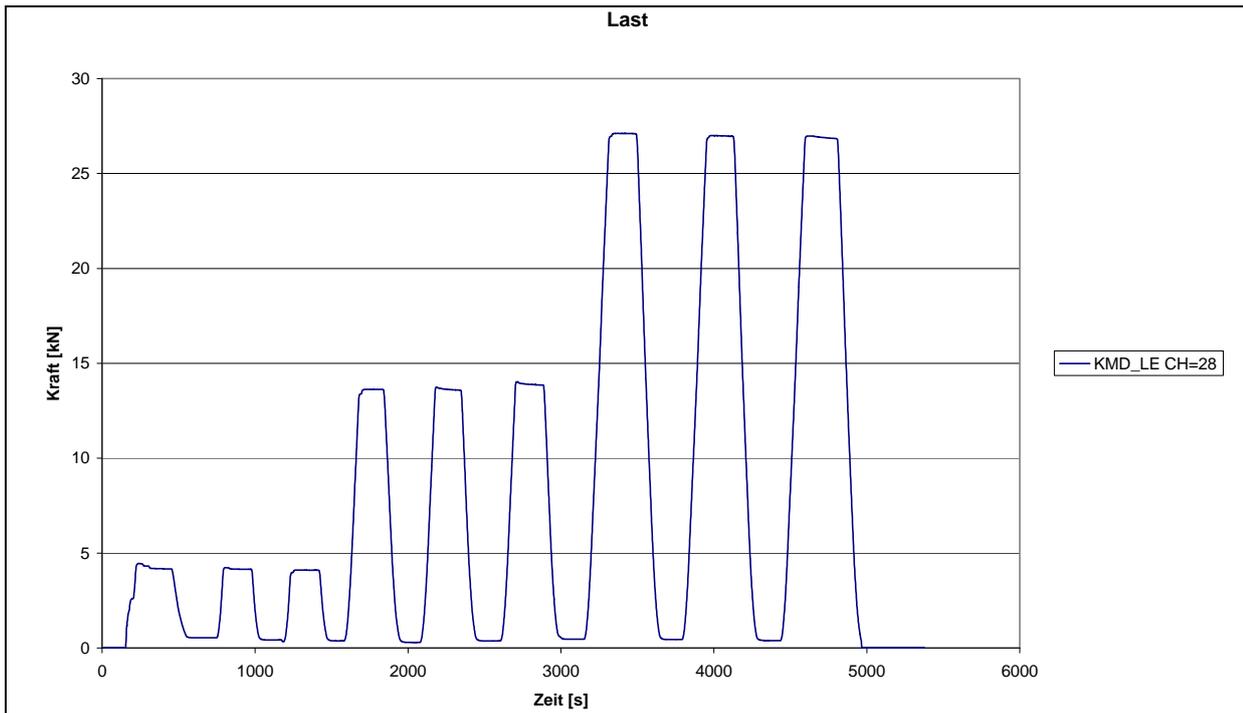


Bild 207 Kraft-Zeit-Diagramm

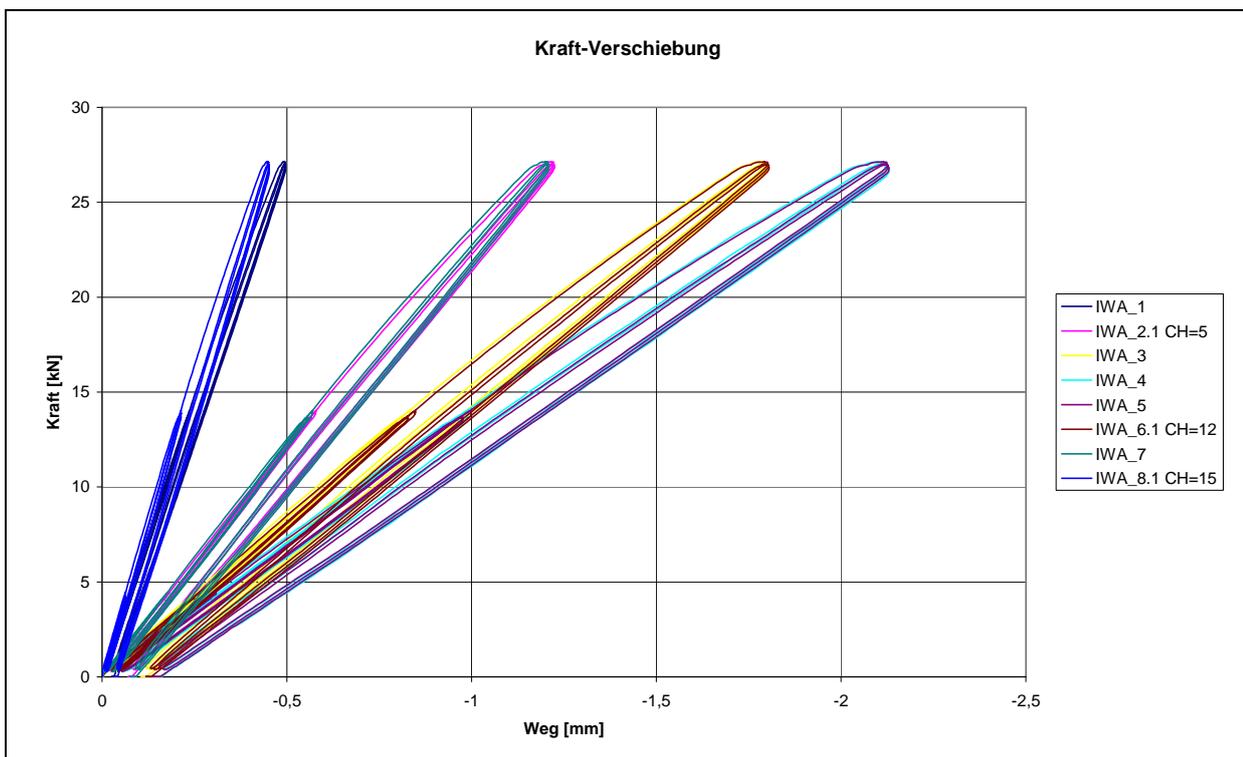


Bild 208 Kraft-Verschiebungs-Diagramm an verschiedenen Punkten der Deckenplatte

Vergleich man die sich bei den durchgeführten Deckentests mit jenen der Einzelsteinbelastung (siehe Abschnitt 6.4.5) ergeben bezüglich der Verformung ähnliche Ergebnisse. Die

Vorspannkraft geht zyklisch infolge der Verkürzung der Decke durch plastisches Zusammendrücken der Fugen „nach unten“.

6.4.6.2. Ergebnisse aus der Belastung bis zum Bruch

Nach Beendigung der zyklischen Versuche wurden die meisten Wegaufnehmer aufgrund der Gefahr eines plötzlichen, unkontrollierten Versagens demontiert und die Deckenplatte stetig bis zum Bruch belastet.

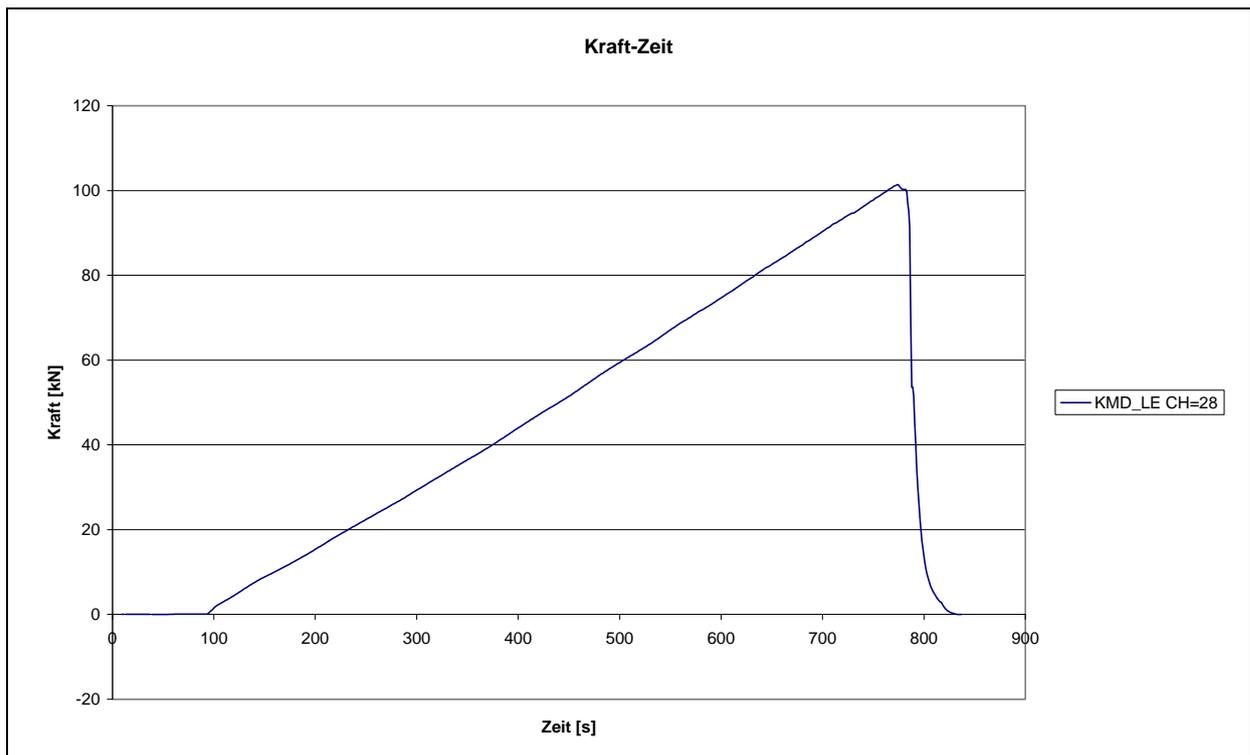


Bild 209 Kraft-Zeit-Kurve bis zum Bruch

Während des Bruchversuches wurde lediglich die Mittendurchbiegung aufgezeichnet, Bild 210. Die Kurve zeigt einen deutlichen Steifigkeitsabfall, welcher durch das Aufgehen der Fugen in der Zugzone begründet ist. Der Wert der Kraft beim Übergang von Zustand I zum Zustand II liegt bei ca. 55 kN, welches einer Flächenlast von 13,5 kN/m² entspricht. Der endgültige Bruch der Platte erfolgte bei ca. 100 kN (ca 25 kN/m²). Der Bruch erfolgte durch Versagen der Steindruckzone ohne Vorankündigung, schlagartig. Es fand kein Totalversagen statt, abgesehen von kleineren Abplatzungen in Kieselsteingröße verblieben die Steine im Deckenverband (Bild 211 und Bild 212).

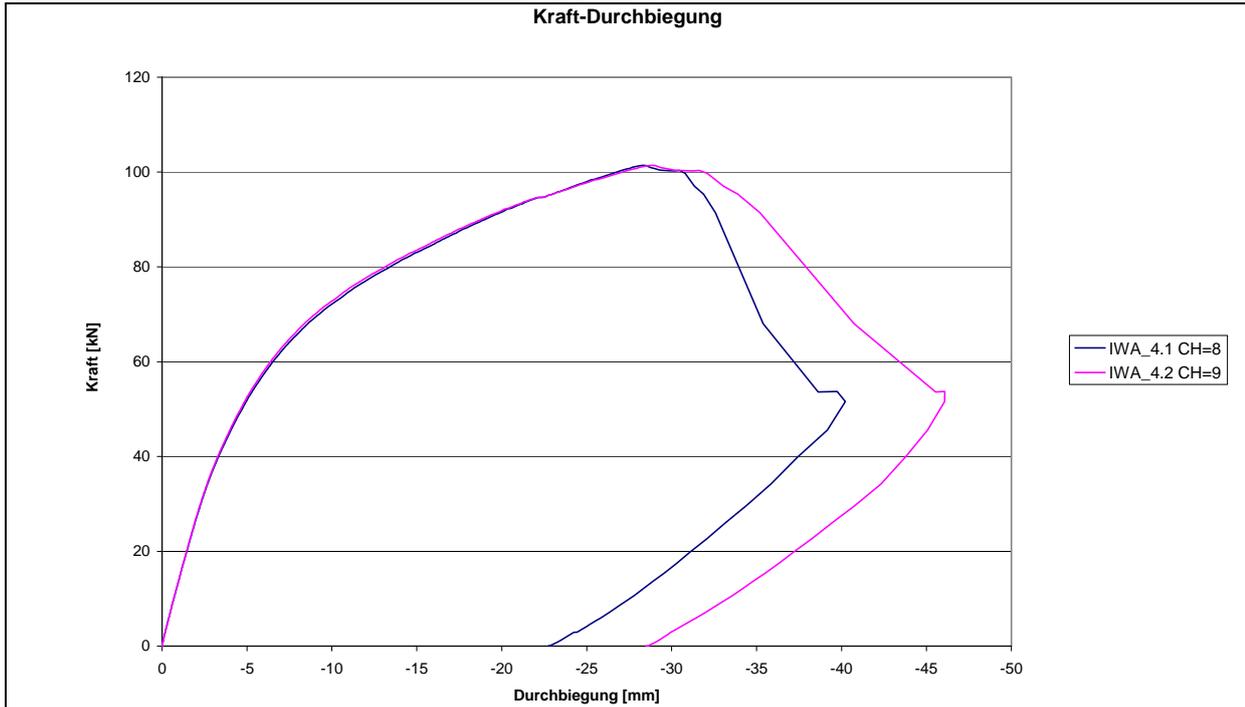


Bild 210 Kraft-Durchbiegungs-Funktion in Plattenmitte; ab ca. 55 kN Last ist deutlich das Öffnen der Fugen durch den Steifigkeitsabfall zu erkennen



Bild 211 Bruchbild Seitenansicht (Nord Gesamt)



a) Ausschnitt Nordansicht

b) Ausschnitt Südansicht

Bild 212 Bruchbild Seitenansicht

6.5. Zusammenfassende Bewertung der Bauteiltests

Für das Projekt ReMoMaB können die Ergebnisse der durchgeführten Material- und Bauteiltests wie folgt zusammengefasst werden:

- Mit den begleitenden Materialtests kann eine Übereinstimmung der entwickelten Konzeption für vorgespanntes Trockenmauerwerk mit den grundlegenden Vorarbeiten von Marzahn hergestellt werden. In den durchgeführten Drucktests an Einzelsteinen und an Wandkörpern nach RILEM werden die in Abschnitt 3.4.4 beschriebenen Versagensbilder nachgewiesen.
- Die Tauglichkeit der getesteten Planelemente zum Einsatz als Trockenmauerwerk wird, unter Berücksichtigung der ermittelten Minderung der zugelassenen Steifigkeit, grundsätzlich festgestellt. Der sich im Zusammenhang mit der Verwendung als trocken gefügter Steinverband ergebende Optimierungsbedarf bei Ebenheit und Planparallelität ist im Rahmen von Produktentwicklungen genauer zu untersuchen.
- Bei den durchgeführten Versuchen an den Steindecken werden die numerisch ermittelten Werte bestätigt. Dabei werden bei den auf Biegung getesteten Decken Reserven im Material festgestellt, welche sich auf das Bemessungsmodell zurückführen lassen. Es ergibt sich somit Forschungsbedarf beim Bemessungsmodell für zentrisch vorgespannte Steindecken.
- Weiterhin ergibt sich Forschungsbedarf aus den festgestellten Spannkraftverlusten infolge Kriechen. Hier sind die Ursachen für das starke Steinkriechen unter zentrischer Vorspannung zu ermitteln und eine konstruktive Lösung zur Kompensation der Spannkraftverluste auszuarbeiten.
- Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Tests, dass das gewählte Prinzip der trockenen Fügung mit zentrischer Vorspannung eine vielversprechende Möglichkeit zur Entwicklung demontabler Massivdecken darstellt.

7. Mögliche Weiterentwicklungen

7.1. Weiterentwicklungen bei der Wand

Beiden detailliert untersuchten Varianten (Kreuz- und linienhafte Verbindung) gemein ist der hohe Stahlanteil in der Primärstruktur. Überlegungen zur Reduktion des Stahlanteils in den konstruktiven Elementen bieten sich an. Insbesondere bei den vorgespannten Trockenmauerwerkswänden ist der Stahlanteil im Vergleich zu konventionell geklebtem Mauerwerk hoch. Dies Begründet sich zum einen durch die gewählte Konstruktionsart selbst, da konventionelle Mauerwerkskonstruktionen i.d.R unbewehrt sind. Andererseits begründet sich der hohe Stahlanteil durch die in diesem Bericht gewählte Darstellung, da zum Nachweis der möglichen Fügungen immer je Modul zwei Zugstäbe angenommen wurden.

7.1.1. Beschränkung auf den Einsatz bei Schubwänden

Deutlich besser in Bezug auf den Stahleinsatz stellt sich vorgespanntes Trockenmauerwerk, wenn Vorspannung nur im Bereich von Schubwänden und an den Enden sehr langer Wände vorgesehen wird. Dabei muss von einer Montage vor Ort ausgegangen werden, bei der, solange keine „Auflast“ durch Geschossdecken vorhanden, eine Sicherung der Wand gegen Kippen vorgesehen werden sollte.

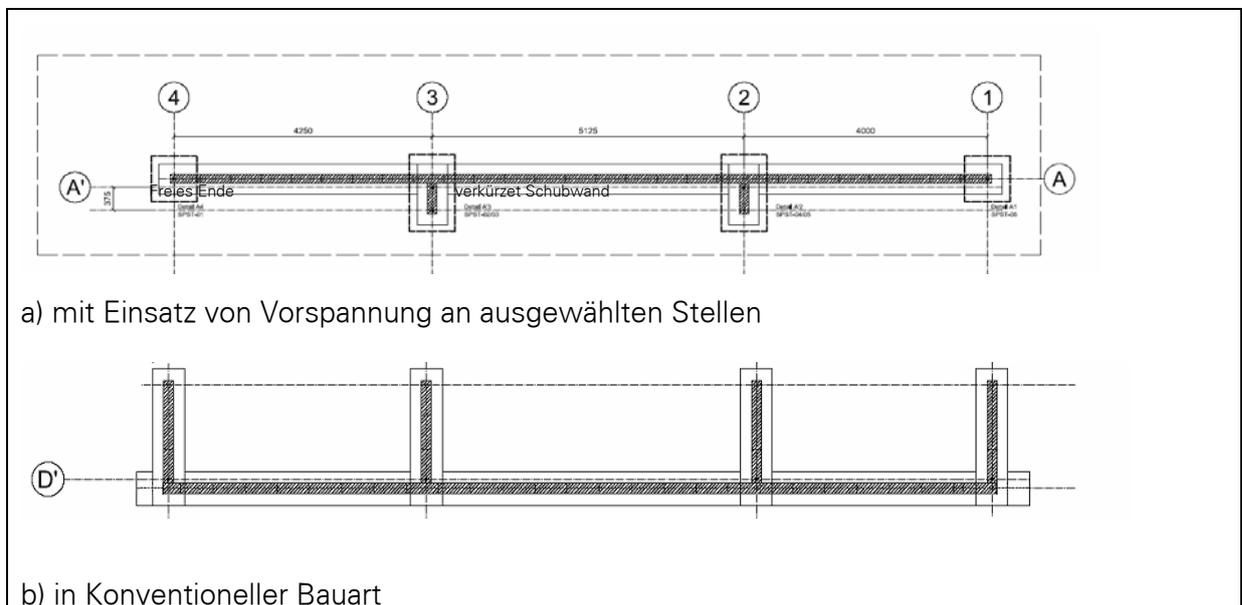


Bild 213 Typischer Reihenhaus Grundriss

Bild 213 zeigt eine typische Reihenhaustrennwand mit orthogonal angeordneten Schubwänden. Im gegebenen Fall kann die Zahl der eingesetzten Spannstähle reduziert und gleichzeitig die Schubwandlängen verkürzt werden.

7.1.2. Kombination von zentrischer Vorspannung mit Umreifungsstählen

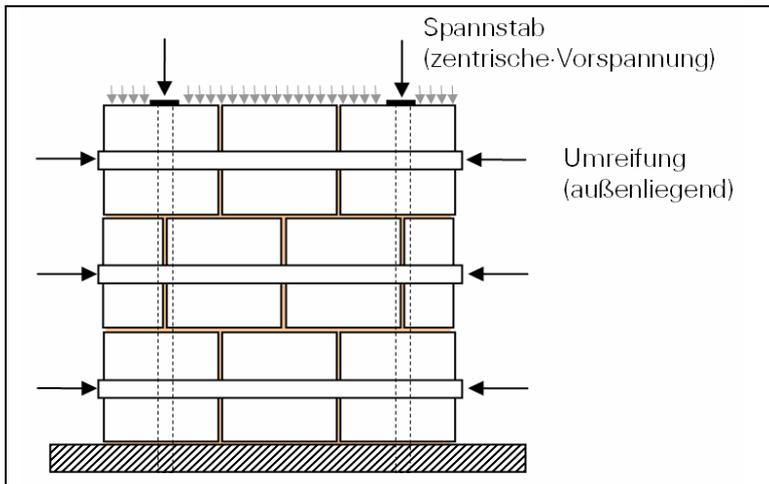


Bild 214 Kombination von zentrischer Vorspannung mit außenliegenden Umreifungsstäben

Ein weiterer Ansatz zur Reduktion des Stahlanteils wird in der Kombination von zentrisch angeordneter Vorspannung mit an der Bauteilaußenseite angeordneten Umreifungsstählen gesehen.

7.1.2.1. Umreifungsstahl, Stand der Technik



Bild 215 Verpackungsstahlband, [199]

Verpackungsstahlband, auch Bandeisen oder Stahl-Umreifungsband genannt, gibt es in zahlreichen Ausführungen, die sich grob nach folgenden Kriterien gliedern lassen:

Abmessungen

Verpackungsstahlband gibt es in den Bandbreiten von 12,7 mm bis 31,75 mm und in den Dicken von 0,38 - 1,0 mm.

Gütegrad

Verpackungsstahl wird nach dessen Gütegrad in einfaches Blankband, Güte- und Hochleistungsband unterschieden. Blankes Verpackungsstahlband ist ein weitgehend unbehandeltes

Stahlband, bei dem nach Walzen und Schneiden die Kanten entgratet werden. Die Dehnung liegt bei diesem Umreifungsband bei 3-6% und die Zugfestigkeit bei 700-800 N/mm². Beim Güteband sind die Kanten nicht nur entgratet, sondern arrondiert, die Dehnung liegt bei 6-8% und die Zugfestigkeit ist mit ca. 850 N/mm². Die höchsten Werte bei Dehnung und Reißkraft weist das Hochleistungsstahlband auf. Hier beträgt die Bruchdehnung etwa 14% und die Festigkeit ca. 1.050 N/mm².

Rostschutz

Bei Güte-Verpackungsstahlband und Hochleistungsband wird der Rostschutz in drei Stufen, gebläut, schwarzlackiert und zinkstaublackiert unterschieden.

Einsatz

Eingesetzt wird diese vorwiegend als Verzurrsystem bei Verpackungen zur logistischen Sicherung von Waren. Im Bauwesen sind kennt man von den Stahlbandumreifungen bei Palettengelagerten Steinlieferungen. Darüber hinaus sind Stahlbandbefestigungen an Rohrpfosten und Masten im Anlagen- und Oberleitungsbau wie auch bei der Beschilderung bekannt.

7.1.2.2. Ansatz und Tastversuche mit Umreifungsbändern

Bild 214 verdeutlicht den Ansatz. Dabei wird Vorspannung durch die zentrischen in Bauteilmitteln angeordneten Spannstäbe nur an den Endfeldern der Wand und im Bereich von Wandöffnungen eingetragen. Mittels lagenweise angeordneter Umreifungsbänder werden die Steine in der Ebene gehalten. Ein auseinanderklaffen der Stoßfugen oder verdrehen der Steine im Verband soll durch die Umreifung reduziert werden.



Bild 216 METAKLETT – „Flamingo“ [189]

Bild 217 Tastversuch mit Umreifungsbändern

Neben der mengenmäßigen Reduktion der Spannstäbe wird bei diesem Ansatz die mögliche Verwendung von metallischen Klettverbindungen zur Befestigung von Folgeschichten als Vorteil eingeschätzt (siehe Bild 216). Erste Tastversuche (siehe Bild 217) mit Verpackungsbändern aus hochfestem Bandstahl zeigen die grundsätzliche Realisierbarkeit.

7.2. Außenwand, Fassade

7.2.1. Forschungsansätze zur Luftdichtigkeit

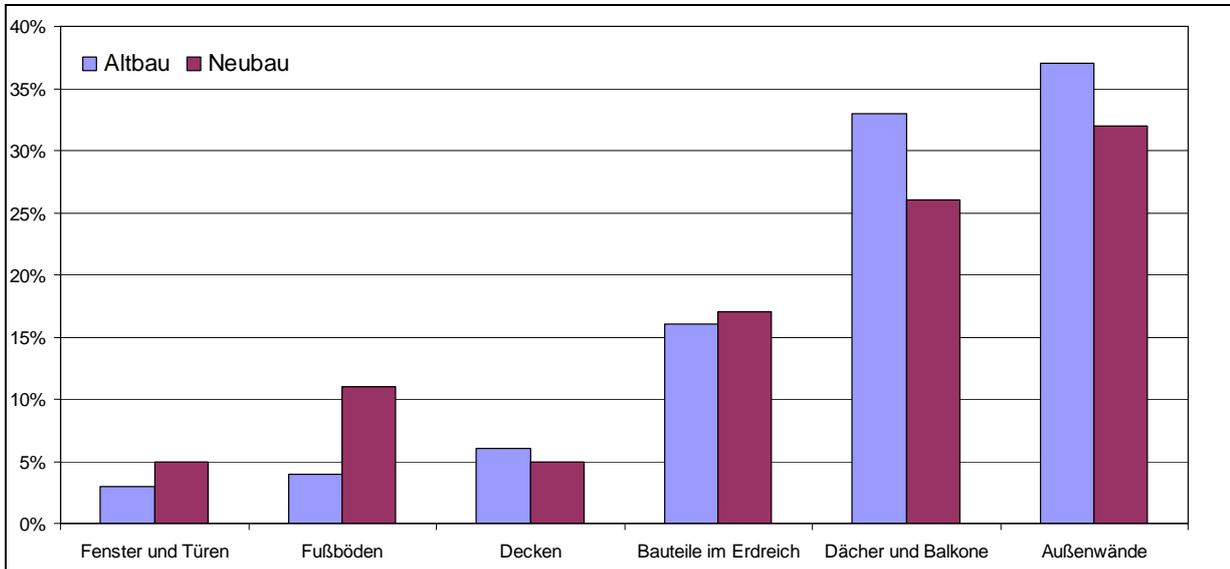


Bild 218 Prozentualer Anteil der Baugruppen an der Gesamtheit aller Schäden aus [18]

Außenwände stellen, gemäß dem Dritten Bericht über Schäden an Gebäuden, mit ca. 37% die Baugruppe mit dem größten Schadenspotenzial. Dies trifft sowohl bei Neubauvorhaben, als auch bei Bestandssanierungen zu. Insbesondere die Wahrung der Luftdichtheit bei gleichzeitiger Sicherung einer ausreichenden Lüftung ist ein Themenkomplex, den es bei der Entwicklung von demontablen Außenwandkonstruktionen zu berücksichtigen gilt. Eine große Zahl von Schäden entsteht durch unkontrollierten Feuchtetransport in die Konstruktion [18].

Zwar sind bei beiden im Rahmen des Projekts ReMoMaB vorgestellten Konstruktionen Maßnahmen zur Wahrung der Luftdichtheit vorgesehen, jedoch sind diese im Vergleich zu den bestehenden, geklebten Systemen sehr aufwendig zu realisieren und deshalb stör- und fehleranfällig. Vor diesem Hintergrund bedürfen die in diesem Bericht vorgestellten Grundprinzipien, die vorrangig Fügeprinzipien der Primärstruktur betrachten, weitere detaillierte Untersuchungen hinsichtlich bauphysikalischer Anforderungen. Insbesondere an den beiden ausgewählten und detailliert entwickelten demontablen Systemen sollte im Rahmen künftiger Forschungsprojekte sowohl die Konstruktion als auch der Übergang zu andern Bauteilen hinsichtlich der Erfüllung der bauphysikalischen Anforderungen untersucht werden. Im Vorgehen kann dabei an vergleichbaren, bereits durchgeführten Untersuchungen z.B. zur Luftdichtigkeit orientiert werden [93].

7.2.2. Weitere Ansätze

Im Rahmen des Projekts wurden Modifikationen am Stein (Modul) entwickelt, die jedoch im Rahmen der in Abschnitt 1 dargestellten, ausgewählten Varianten, nicht detailliert untersucht. Folgende Ansätze sollen kurz vorgestellt werden, da diese bereits soweit ausgearbeitet vorliegen dass sie in künftigen Forschungsprojekten detailliert untersucht werden zu könnten.

Bei den Überlegungen herkömmliche Schichtverbindung so gestalten dass sämtliche Schichtfolgen an einem linear gestaffelten Verbindungsmittel demontabel realisiert werden können, wurde der in Bild 219 dargestellte Ansatz entwickelt. Dabei sind 45° - Fasen in die Steinecken angedacht, in denen dann das Verbindungsmittel eingelegt und mittels Schrauben in Lage gehalten wird.

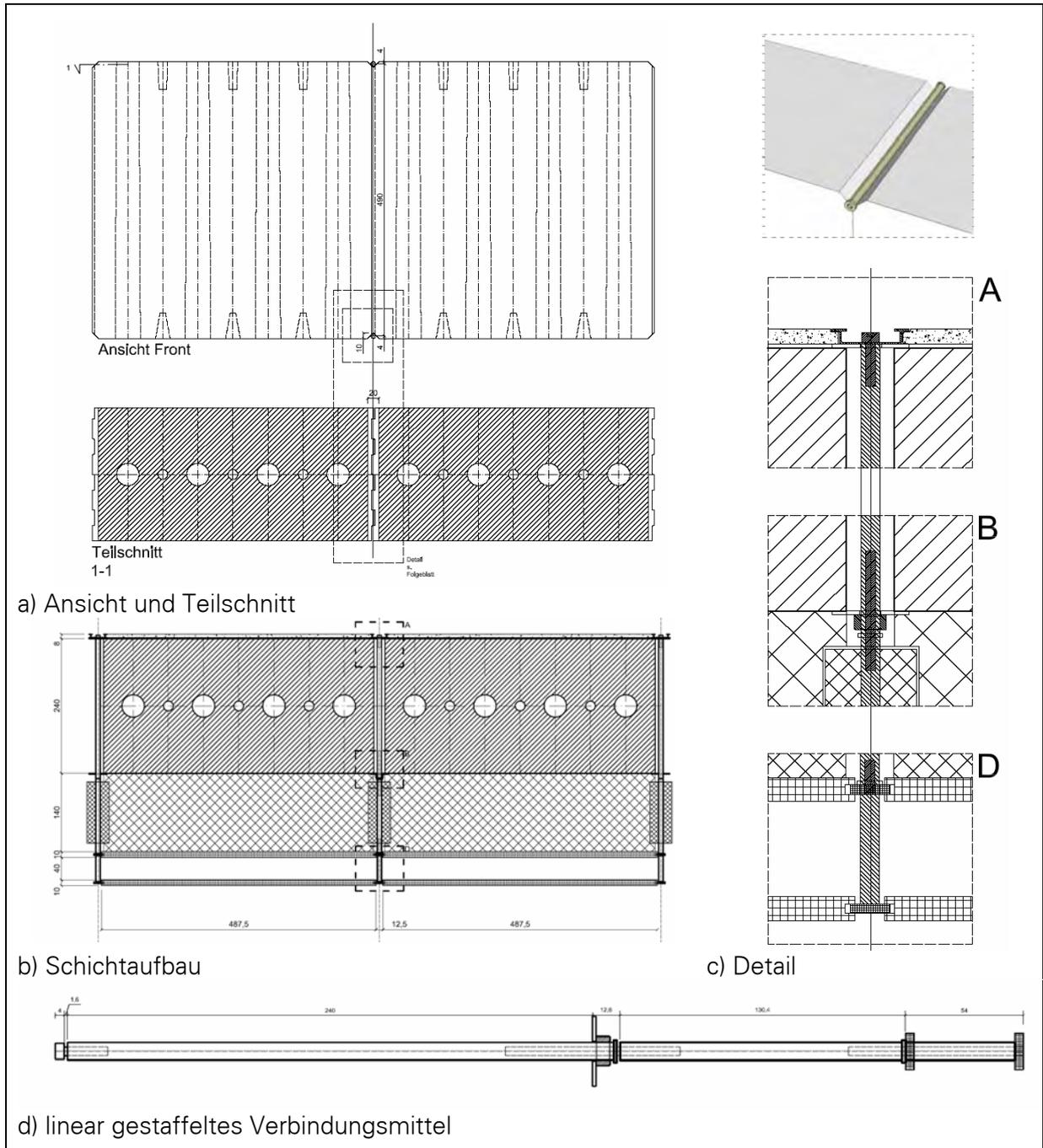


Bild 219 Mögliche Weiterentwicklung der Schichtverbindungen durch Modifikation der Steinecken

Ebenfalls entwickelt, jedoch, nicht detailliert untersucht, wurde ein Ansatz bei dem die Abdichtung der Stoßfuge im Vordergrund stand. Durch ein an den Modulkanten angeordnetes

Verbindungsmittel soll eine demontable Verbindung die Stoßfuge luftdicht abschließen (siehe Bild 220). Dazu sind bei der Steinerstellung an den Modulkanten entsprechende Dreieckleisten in die Pressform zu legen. Das Verbindungsmittel kann dann in den entstandenen Hohlraum eingelegt werden. In Folge des für Mauerwerk üblichen Verbands ergibt sich ein in Bild 221 dargestelltes Fugenbild.

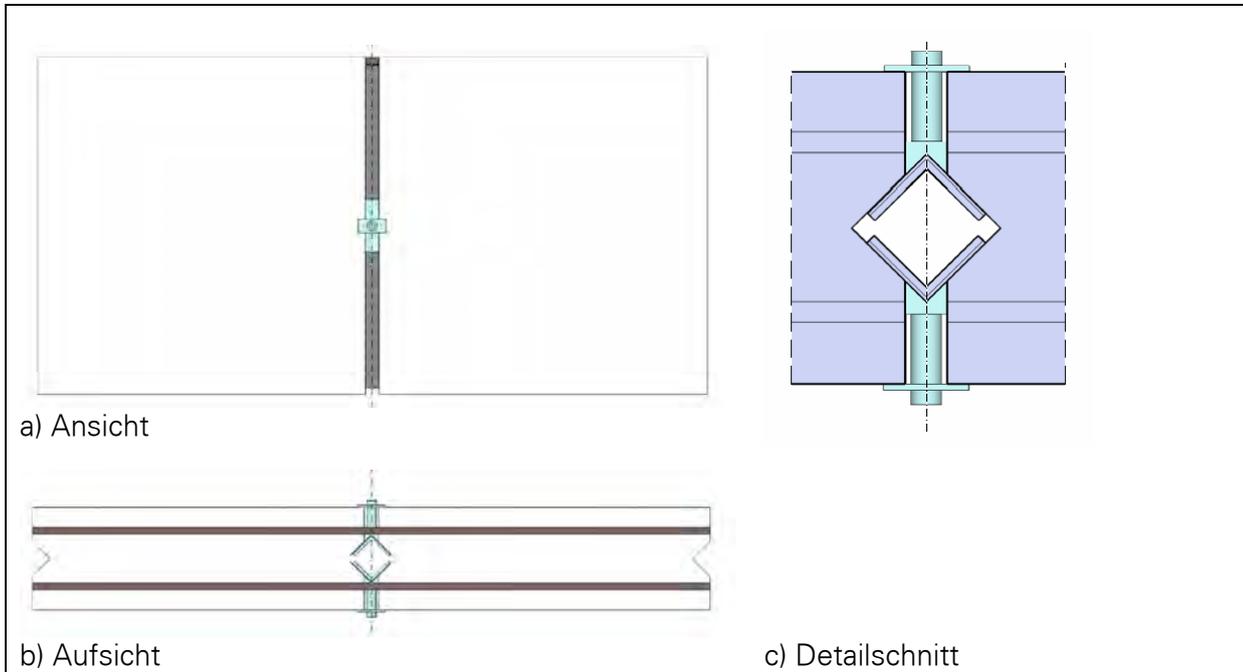


Bild 220 Abdichtung der Stoßfuge durch an den Modulkanten angeordnetes Verbindungsmittel.

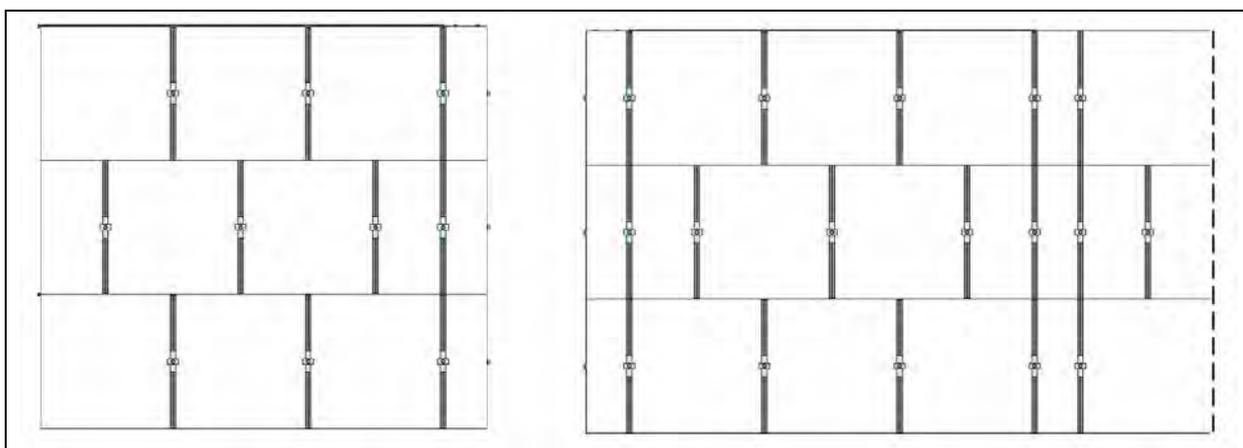


Bild 221 Typisches Fugenbild bei Abdichtung der Stoßfuge durch an den Modulkanten angeordnete Verbindungsmittel.

7.3. Abdichtung erdberührender Bauteile: Gründung, Sockel, Kellerwände

Die Frage, welche Gründung bei welcher Nutzung welchem Baugrund zugemutet werden kann, soll hier nicht erörtert werden. Vielmehr wird in diesem Abschnitt Wert auf die gemeinsame Darstellung der erdberührenden Bauelemente mit der Bauwerksabdichtung gelegt, da in der gemeinsamen Betrachtung von Gründung als ein mit der Bauwerksabdichtung zusammenwirkendes Ganzes die Möglichkeit zur Entwicklung demontabler erdberührender Konstruktionen gesehen wird. Deshalb werden in diesem Bericht Überlegungen zur demontablen Gestaltung der Gründung und sämtlicher weiteren erdberührenden Bauelementen, vom Punkt- bzw. Linienfundament, über die tragende bzw. nichttragende Bodenplatte bis hin zu Kellerwänden, Gebäudesockel und Frostschränzen gemeinsam behandelt.

In Abschnitt 7.3.1 wird eine Übersicht zum Stand der Technik gegeben. Dort wird gezeigt, dass bei Bauwerksabdichtungen eine sortenreine Trennbarkeit nicht gegeben ist. Entweder erfolgt die Bauwerksabdichtung durch einen vollflächigen Anstrich mit einem geeigneten Beschichtungssystem oder, bei bahnförmigen Abdichtungen, durch vollflächige Verklebung der Bahnen auf den vorbehandelten Untergrund. Die ggf. erforderliche Perimeterdämmung wird ebenso, systembedingt punkt- oder vollflächig, dauerhaft mit der Abdichtungsebene verbunden. Sämtliche eingesetzten Baustoffe, von der Abdichtung bis zur Perimeterdämmung sind, mit Ausnahme von Schaumglas, Produkte der Erdölindustrie mit einem hohen Anteil an so genannter Grauer Energie. Diese Produkte verrotten aufgrund der sich bei erdberührenden Bauteilen ergebenden hohen Anforderungen an Dauerhaftigkeit und Dichtigkeit nicht. Bauwerksabdichtungen stellen neben den Außenwänden, Dächern und Balkonen, eine der Hauptschwachstellen und Schadensschwerpunkt im Hochbau dar. Aufgrund der Einbausituation bleiben Schäden an Kellerabdichtungen naturgemäß lange Zeit unentdeckt und verursachen bei der Behebung enorme Kosten [18]. Veränderungen an nicht demontablen, jedoch mangel- bzw. schadensfrei funktionierenden Abdichtungssystemen sind somit für Herstellung, Planer, Verarbeiter und Bauherren gleichermaßen mit hohen Risiken verbunden.

Konstruktive Ansätze zur sortenreinen Demontage von Abdichtungen oder, im Sinne des Projekts ReMoMaB, hochwertig rezyklierbare Abdichtungssysteme gibt es gegenwärtig nicht, sodass die in Abschnitt 7.3.2 und 7.3.3 vorgestellten Ansätze im Rahmen dieses Berichtes theoretisch bleiben. Vielmehr sollen, neben der Vorstellung konstruktiver Ansätze, Themenpunkte aufgezeigt werden, die Gegenstand weiteren Forschungen sein könnten.

Schwerpunkte der zusammenfassenden Darstellung sind:

- Entwurfsgrundsätze zur Reduktion bzw. Vermeidung von geklebten Abdichtungen
- Vorschläge für demontable Gründungen
- Mögliche Ansätze für demontable Abdichtungen

7.3.1. Stand der Technik

Aussagen zur Planung und Ausführung von Gründungen erfolgen gemäß Eurocode 7 (nach DIN EN 1997-1) [48] als Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Aussagen zu den im Ein- und Mehrfamilienwohnungsbau üblicherweise eingesetzten Flach- und Flächengründungen werden betreffs der Grundsätze in DIN 1054 [28] sowie betreffs der Baugrundberechnung in DIN 4017 [35] und DIN 4018 [36] gegeben. Sowohl bei der Gründung als auch bei der Abdichtung wird in unterkellerte und nicht unterkellerte Gebäude unterschieden. Eine frostfreie Gründung ist sicherzustellen.

Aussagen zur Ausführung von Abdichtungen sind im Wesentlichen in den Teilen 1 bis 10 der Normung für Bauwerksabdichtungen, der DIN 18195 [31], geregelt. Dort wird auch eine Übersicht der Beanspruchungsarten gegeben, die u.A. zu Aussagen über Planung und Bemessung von Dränageanlagen gemäß DIN 4095 [37] führt. Zur Bestimmung der angemessenen Abdichtungsart und auch zur Klärung der Frage, ob die Boden- und Wandbauteile gegen Wasserdruck bemessen werden müssen, ist die Feststellung der Bodenart und des Bemessungswasserstandes am geplanten Bauwerksstandort unerlässlich. In der Regel werden diese Fragen unter Hinzuziehung eines Baugrundsachverständigen geklärt [118]. Dabei ergeben sich folgende zu beplanende Details:

- Abdichtung der Bodenplatte
- Abdichtung der Außenwandfläche
- Querschnittsabdichtung der Außenwand
- Querschnittsabdichtung von Innenwänden
- Anschluss Kelleraußenwand – Kellerboden
- Anschluss Sockel, Sockelhöhen, Türschwellen, Treppen
- Durchdringungen aufgrund von Leitungsquerungen
- Lichtschächte und Kelleraußentreppen

Bei zwei- bzw. mehrschaligen Außenwänden sind weitere Details die im Zusammenhang mit der Vorsatzschale stehen zu berücksichtigen. Diese sind:

- Die Art der Sockelausbildung im Zusammenhang mit dem Lastabtrag der Vorsatzschale
- Die Ausbildung der Sockelentwässerung bzw. der Zu- und Abluftöffnungen

Bei der Abdichtung von erdberührtem Mauerwerk wird in die Abdichtung von Außenwänden und Querschnittsabdichtung, der sogenannten Horizontalsperre, unterschieden. Die Horizontalsperre umfasst die Abdichtung der Bodenplatte sowie die Verbindung zwischen der Abdichtung der Bodenplatte und Außenwandabdichtung. Eine Horizontalsperre ist bei allen auf dem Gründungskörper stehenden, aufgehenden Mauerwerkswänden notwendig, um diese gegen aufsteigende Feuchte zu schützen.

Abdichtung von Außenwänden

Bei den Außenwänden hat sich die Verwendung von kunststoffmodifizierten Bitumendickbeschichtungen (KMB) als praxistauglich bewährt. Der früher übliche Heißbitumenanstrich stellt gegenwärtig den Sonderfall beim Grundmauerschutz nicht unterkellerten Gebäude dar.

Bahnenförmige Wandabdichtungen

Bahnenförmigen Wandabdichtungen werden vorrangig bei geringen Beanspruchungsklassen und meist zur Vermeidung von Wartezeiten infolge von Trocknungszeiten oder frost- und niederschlagsbedingten Verzügen eingesetzt.

Querschnittsabdichtung

Da Kellerwände senkrecht zur Wandfläche einwirkende Kräfte aufnehmen müssen, darf die Querschnittsabdichtung keine Gleitschicht darstellen. In der Regel ist eine einzige Querschnittsabdichtung vorgesehen, die unmittelbar auf der bis zur Fundamentaßenkante durchlaufende Bodenplatte verlegt wird. Bei der Querschnittsabdichtung ist die Verwendung von mineralischen Dichtschlämmen (MDS) Stand der Technik seitdem MDS die volle Haft-scherfestigkeit der Lagerfuge gewährleisten.

Bahnförmige Querschnittsabdichtung

Bei bahnenförmigen Querschnittsabdichtungen sollten entweder R500 besandete Pappen gemäß DIN 52128: [43] oder G200 DD Bitumen-Dachdichtungsbahnen gemäß DIN 18336:20012-09 [33] vorgesehen werden. Im Gegensatz zu den flexibleren Dichtschlämmen stellen Perforationen durch z.B. Bewehrung eine Schwachstelle bei bahnenförmigen Querschnittsabdichtungen dar.

Boden-Wand-Anschluss

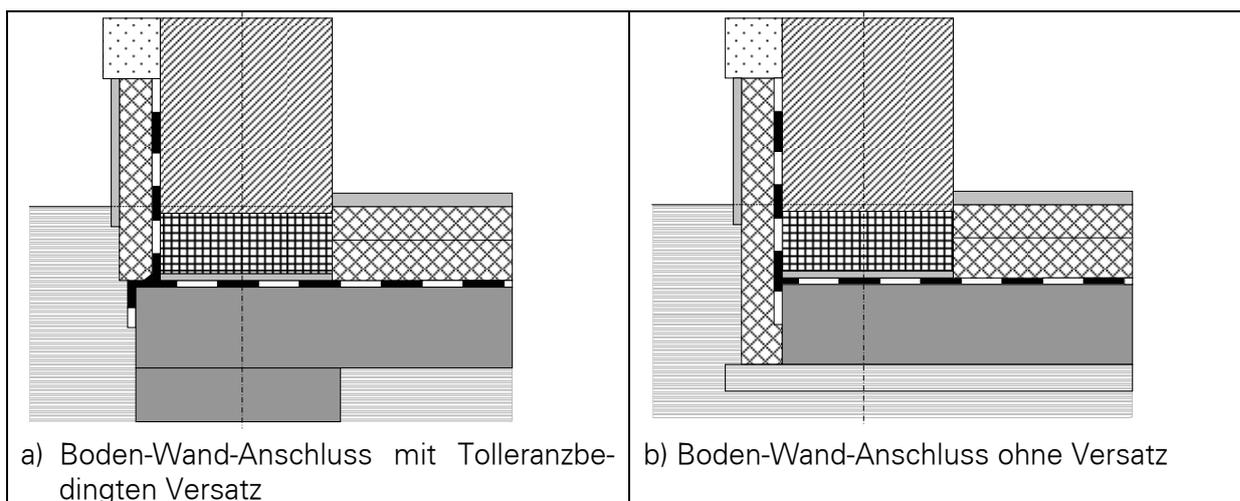


Bild 222 Konstruktive Ausbildung des Boden-Wand-Anschluss gemäß [31] aus [118]

Konstruktiv kann der Anschluss der Außen- bzw. Kellerwand mit oder ohne Versatz ausgebildet werden. Theoretisch ist es abdichtungstechnisch günstig Bodenplattenstirnseite und Außenwandoberfläche in einer Flucht bündig auszuführen, da dann das Sickerwasser ungehindert an der Außenoberfläche ablaufen kann und Hohlkehlen ganz vermieden werden. In der Baupraxis setzt dies aber eine sehr fluchtgerechte Ausrichtung der Bodenplatte voraus, da es sonst zu einem Überstand der Wand kommen kann, der nur ganz ungünstig abdichtbar ist. In der Regel wird daher besser mit einem Überstand der Bodenplatte gearbeitet.

7.3.2. Vorschläge für demontable Gründungen

Mauerwerk wird seit Jahrhunderten als bewitterter Fassadenbaustoff oder für ständig erdfeuchte Fundamente verwendet. Allein dadurch ist die grundsätzliche Feuchtebeständigkeit

vieler Mauerwerksbaustoffe nachgewiesen. Bei dem in Abschnitt 4.7 entwickelten und vorgestellten demontablen Trockenmauerwerk mit teilweiser Vorspannung könnte eine auf dem Verbindungsprinzip Vorspannung beruhende Gründung entwickelt werden. Diese könnte analog der zentrisch vorgespannten Decken mit in den Führungslöchern des verwendeten Moduls verlegten Spannstählen erfolgen (siehe Bild 223a). Alternativ dazu bietet sich die Möglichkeit zum Einsatz der in Abschnitt 7.1.2 vorgestellten Umreifungsbändern (siehe Bild 223b) an.

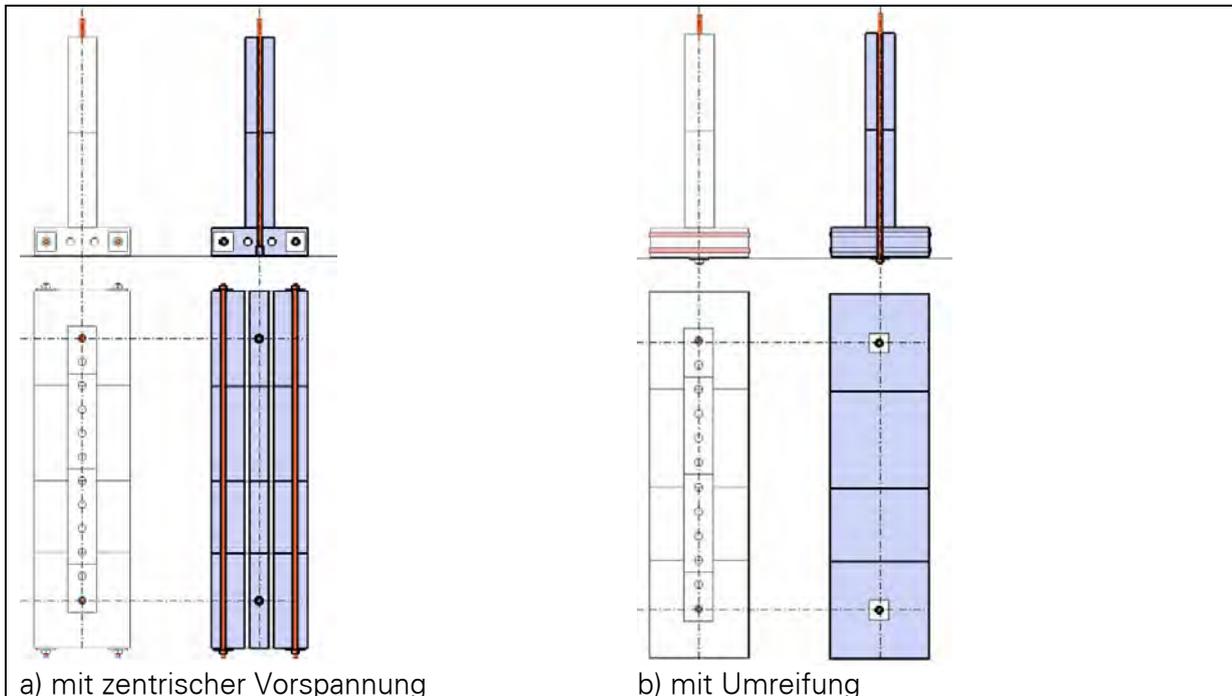


Bild 223 Ansätze demontabler Gründungen am Beispiel linienförmiger Flachgründung

Im Zuge einer Weiterentwicklung ist eine Prüfung der Eignung als Gründungskörper bei den im Projekt ReMoMaB verwendeten Kalksandsteinen empfohlen. Aufgrund des erdfeuchten Milieus ist ggf. ein Materialwechsel von Kalksandstein zu Betonstein sinnvoll.

7.3.3. Ansätze zur Entwicklung demontabler Abdichtungen

In früheren Zeiten war der Gewölbekeller aus Naturstein gemauert und hatte oft nur einen Boden aus gestampftem Lehm oder Natursteinplatten. Das feuchtkühle Klima war ideal für die Vorratshaltung, vorausgesetzt es wurde für eine minimale Lüftung gesorgt. Eine fehlende Abdichtung gegen kapillar aufsteigende Feuchte musste mangels Alternativen hingenommen werden und führte zu typischen Lösungen in der Gebäudenutzung [2]. Die allgemeine Entwicklung im modernen Hochbau läuft auf eine hochwertige Nutzung von Kellerräumen mit erhöhten Anforderungen an die Trockenheit der Bauteiloberflächen und der Raumluft hinaus [118]. Ein mehrstufiges Vorgehen gemäß Tabelle 29 bietet sich an:

Tabelle 29 Vorgehen bei der Entwicklung demontabler Bauwerksabdichtungen

Nr.	Stufe	Beschreibung
1.	Vermeiden	Prüfung der Notwendigkeit einer Unterkellerung
2.	Definieren	Definition von Art und Umfangs der Gründung und Abdichtung Festlegung eventuell erforderlicher Schnittstellen zwischen Demontablen, nicht abzudichtenden und konventionell, abzudichtenden Bauteilen.
3.	Reduktion	Reduktion der erdberührenden Kontaktfläche durch <ul style="list-style-type: none"> • Aufständering • Ausbildung eines belüfteten Distanzraumes
4.	Separieren	Getrennt, wenn möglich umlaufend geschlossene Führung der Dämm- bzw. Dichtebene. Vermeidung des Wechsels, bzw. der Durchdringung der beiden Ebenen.

Diese Strategien werden im Folgenden näher erläutert:

Vermeiden

In Abhängigkeit der sich aus dem Standort ergebenden Anforderungen und den Vorgaben des Nutzers ist, neben weiteren Aspekten des nachhaltigen Bauens und Betriebs, vor dem hier betrachteten Hintergrund einer demontablen und rezyklierbarer Bauweise ist zu prüfen, wann und in welcher Art ein Keller sinnvoll vorzusehen ist.

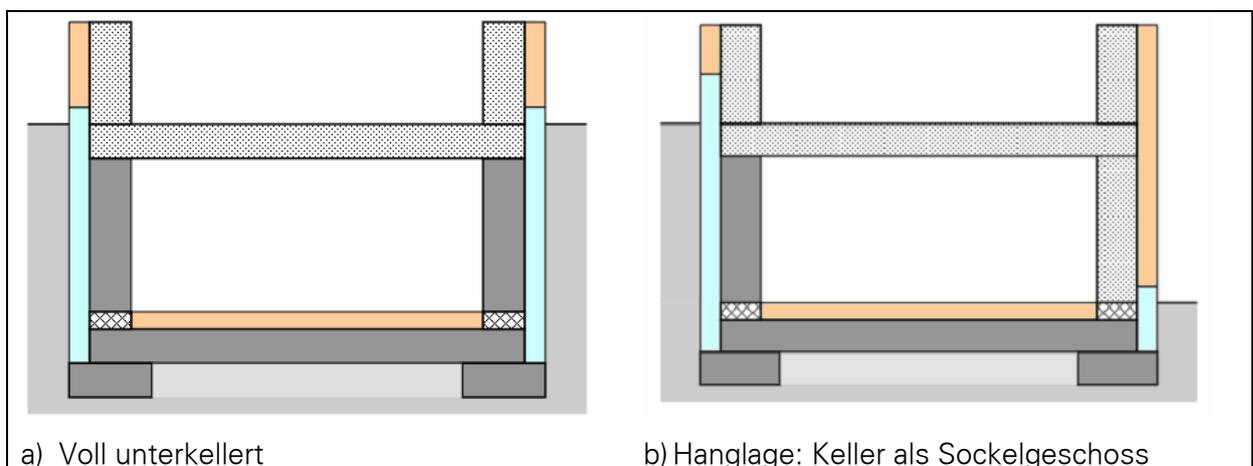


Bild 224 Standortabhängige unterschiedliche Realisierbarkeit demontabler Konstruktionen

Definieren

Ist ein Keller zwingend, sollte geprüft werden an welcher Stelle eine demontable Konstruktion noch realisierbar ist. Diese Schnittstellen zwischen demontabel und konventionell errichteter Konstruktion sollten dann, analog dem in diesem Bericht dargelegten Vorgehen, schichtbezogen definiert werden (siehe Bild 224).

Die Tatsache, dass nicht jedes Bauteil bei jeder Anforderung demontabel gestaltet werden kann, sollte akzeptiert und zu einer klaren Festlegung von Sonderbauteilen konventioneller Bauart führen, über deren Ausdehnung, Anordnung und Lebensdauer, sowie Art der zum Einsatz vorgesehene Materialien gesondert befunden werden muss. Bei den erdberührenden Bauteilen sollte, neben dem bereits erwähnten Bauteilen des Kellers auch die Bodenplatte nicht unterkellertes Gebäude dazu in betracht gezogen werden.

Reduzieren

Ist ein Keller nicht erforderlich, kann die Bauwerksabdichtung in Abhängigkeit der Gründung reduziert werden.

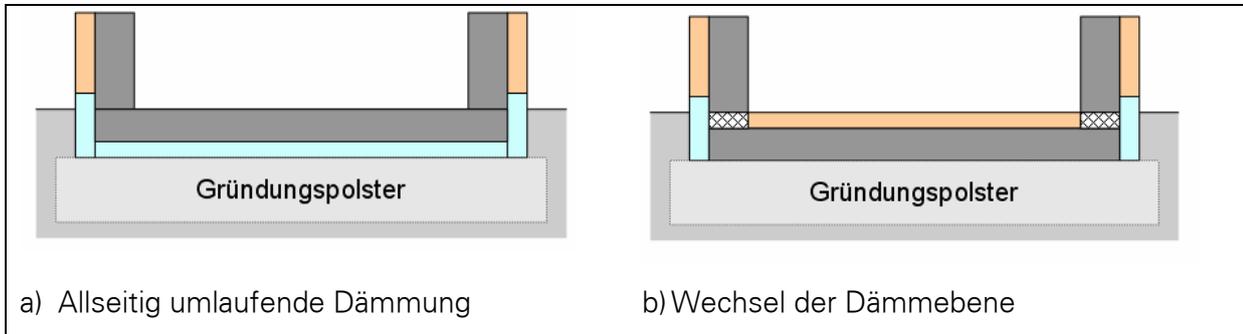


Bild 225 Varianten der Flachgründung mit Gründungspolster

In Abhängigkeit möglicher frostfreier Gründungen, dem Gründungspolster mit Kies oder Schaumglasschotter (siehe Bild 225) oder dem Streifenfundament (siehe Bild 226) ergeben sich weitere Aspekte, wie zum Beispiel der Ausbildung notwendiger Fugen gegenüber der aufgehenden Wand, bei der nicht tragenden Bodenplatte oder die Anordnung von Dämm- bzw. Perimetererebenen.

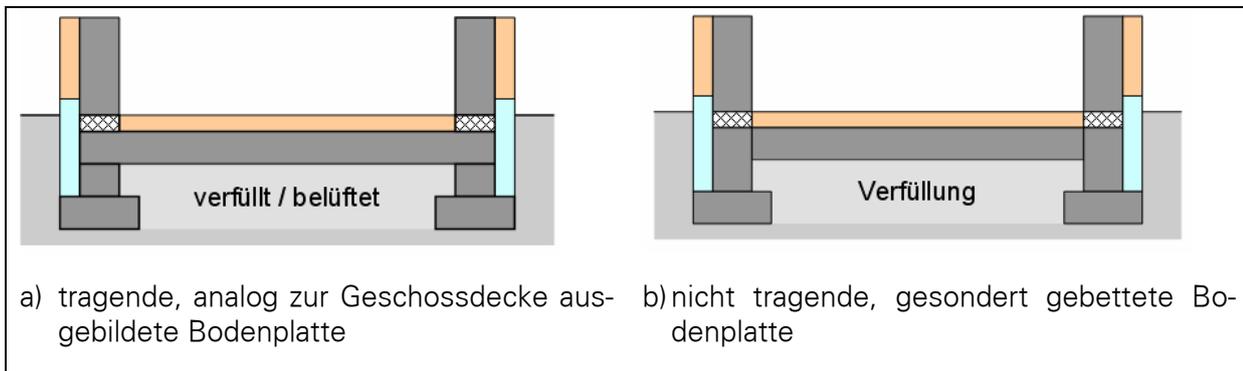


Bild 226 Varianten der Flachgründung mit Linienfundamenten

In vielen Fällen ist es bauphysikalisch sinnvoll und bautechnisch naheliegend, das für die weiteren Geschosse verwendete Mauerwerk auch im Kellergeschoss bzw. zur Ausbildung des Gebäudesockels einzusetzen [118] [116]. Auch kann gezeigt werden, dass die bis zur Außenkante der Außenwand geführte Bodenplatte den Regelfall der konstruktiven Durchbildung des Bodenplatten-Wandanschlusses, mit der typischen Kehle bei den Flachgründungen bildet. Es bietet sich die Ausbildung einer tragenden Bodenplatte, analog der Geschosdecken, an. Darüber hinaus bestehen bei der tragenden Bodenplatte unterschiedliche Möglichkeiten mit der Aushubverfüllung zu verfahren, wo hingegen die nichttragende Bodenplatte auf eine geeignete Verfüllung gebettet werden muss. Das Gründungspolster bietet gegenüber der Gründung mit Linienfundamenten den Vorteil, dass eine wannenförmigen, geschlossen umlaufend Perimeterdämmung ausgebildet werden kann, ohne dass ergänzend dämmende Mauerfüßelemente erforderlich sind.

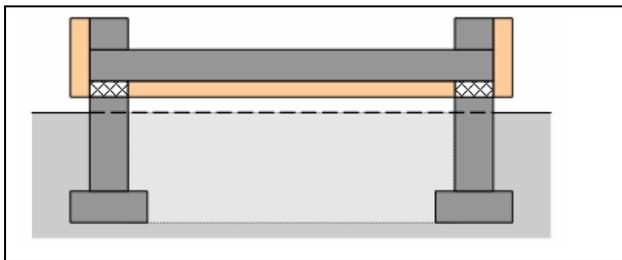
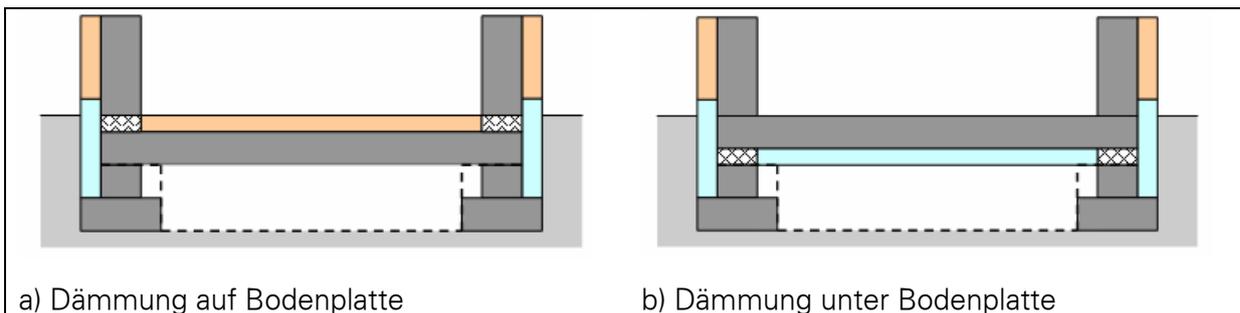


Bild 227 Reduktion der Abdichtung Aufständering

Soll die Bauwerksabdichtung auf ein Minimum reduziert werden, besteht die Möglichkeit durch Aufständering die erdberührenden Kontaktflächen zu verringern. Dabei wird die Bodenplatte, wie eine reguläre Geschossdecke ausgeführt, auf Biegung bemessen und ggf. wie in Bild 227 dargestellt unterseitig gedämmt. Die Boden- bzw. Erdgeschossplatte hat keine Berührung zum Baugrund und sollte bei ausreichendem Abstand zur Geländeoberfläche, z.B. 30 cm ab Oberfläche Gelände, nicht mehr gegen Erdfeuchte abgedichtet werden müssen. Die verbleibenden Kontaktflächen zwischen der vom Fundament aufgehenden Wand, dem Sockel, und der Decke kann dann durch sogenannte Mauerfüßelemente oder auflegen von druckfesten Schaumglasdämmstreifen realisiert werden, die neben der thermischen Entkopplung auch eine Horizontalsperre bilden. Die Einbindung der gebäudetechnischen Ver- und Entsorgung könnte über gedämmte Ver- und Entsorgungsleitungen.



a) Dämmung auf Bodenplatte

b) Dämmung unter Bodenplatte

Bild 228 Reduktion der Abdichtung Ausbildung eines belüfteten Kriechkellers

Soll das Gebäude zu ebener Erde erschlossen werden, kann im Zusammenhang mit der erforderlichen frostfreien Gründung und den durch Aushub entstehenden Distanzraum zwischen Fundamentplenum und Bodenplatte (Erdgeschossdecke), über die Ausbildung eines sogenannten belüfteten Kriechkellers nachgedacht werden. In dem belüfteten Kriechkeller könnte die Abdichtung, ähnlich manchen Dachabdichtungen, vorkonfektioniert und lose im Distanzraum verlegt und mechanisch am aufgehenden Mauerwerk befestigt werden (siehe Bild 228). Die Einbindung der gebäudetechnischen Ver- und Entsorgung erfolgt, unter Verwendung von geeigneten Dichtflanschen, an der im erdreich aufgehenden Wand.

Verteilen

Eine Voraussetzung zur Entwicklung konstruktiver Ansätze für demontable Bauwerksabdichtungen wird in der getrennten Führung von Dämm- und Abdichtungsebene gesehen. Wie in Abschnitt 7.3.1 dargelegt, ist der Bodenplatten-Kehlschluss bei einer konservativ erstellten, geklebten Bauwerksabdichtung durch den Wechsel der Dämm- und Abdichtungsebene gekennzeichnet (siehe Bild 229).

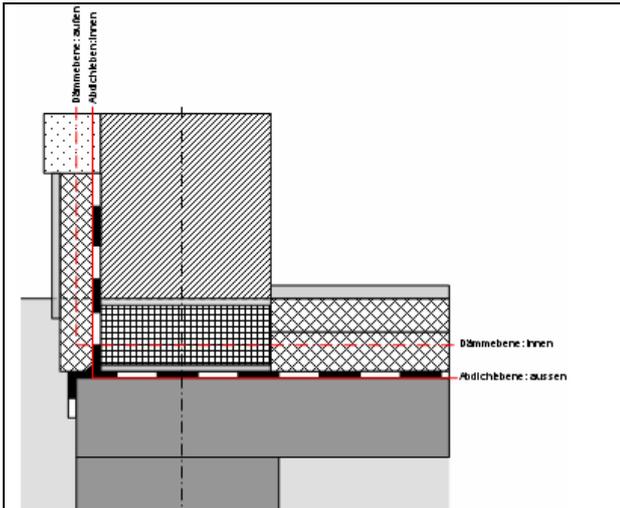


Bild 229 Bodenplatten-Kehlschluss einer konservativ erstellen Bauwerksabdichtung

Dieser Wechsel ist zum einen durch eine reduzierte Schichtenfolge und zum andern durch den technologischen Ablauf bestimmten. Die unmittelbar auf die Bodenplatte verlegte Abdichtungsebene führt im Übergang zur Außenwand zu einem Wechsel der Dämmebene und Abdichtungsebene der nur durch vollflächiges kleben sicher gewahrt werden kann. Die im erdfeuchten Bereich angeordnete Perimeterdämmung kann, will man Perforationen der Abdichtungsebene durch Befestigungsmittel vermeiden, im Gegensatz zu der innen auf der Bodenplatte liegenden Dämmung, nur auf die Abdichtung geklebt befestigt werden. Zur Wahrung eines wärmebrückenfreien Übergangs zwischen der innen liegenden Dämmung auf der Bodenplatte und der außen angeordneten Sockeldämmung sind Ergänzungsbauteile in der aufgehende Wand sogenannten Mauerfüßelemente z.B. aus Schaumglas vorzusehen.

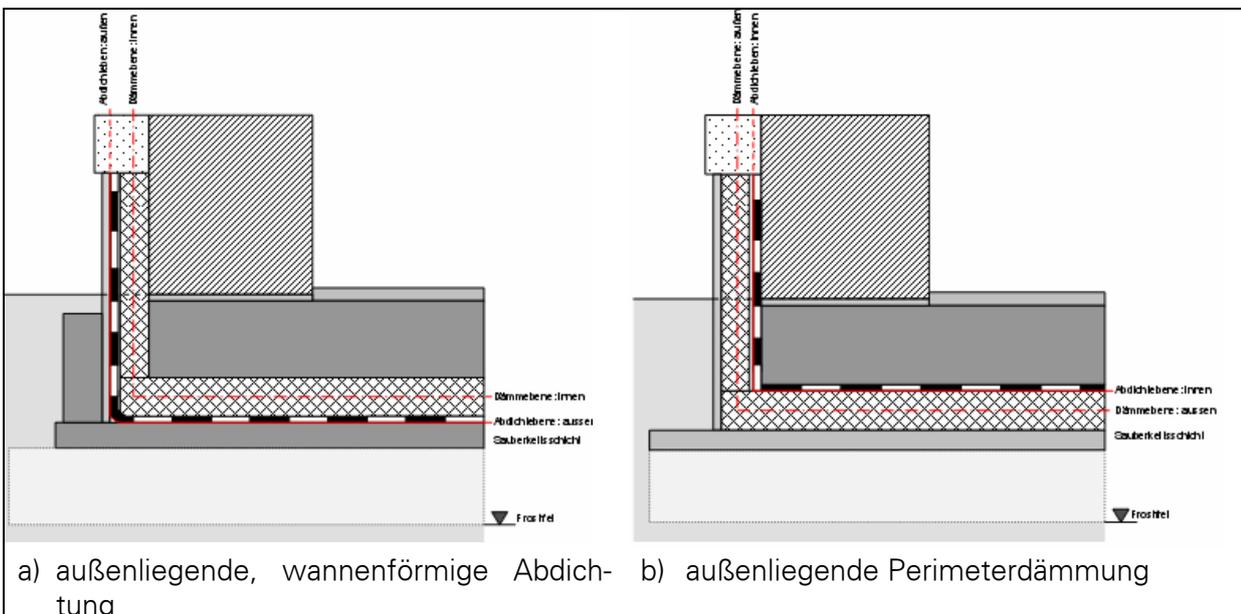


Bild 230 Beispiele möglicher getrennten Führung der Dämm- und Abdichtebenen

Eine getrennte Führung von Damm- und Abdichtungsebene, wie man sie bei Passivhäusern [145] [5], der Abdichtungen bei aufstauendem Sickerwasser, oder im Grundwasser liegenden unterkellerten Gebäuden kennt [118] [116], sind gegenüber konservativen, wechselnden Abdichtungssystemen, in der Schichtenfolge aufwendiger [119].

In Bild 230 sind mögliche Separierungen dargestellt. In beiden Fällen ist die Ausbildung einer zusätzlichen planebenen Sauberkeitsschicht, auf die entweder die Perimeterdämmung oder die wannenförmig außen umlaufende Abdichtung aufgelegt wird, vorzusehen. Um Abdichtung und Sockeldämmung stabil und voneinander losgelöst befestigen zu können, ist eine von der Außenwand unabhängig tragende Sockelwand zu errichten, an der die aufgehende Dichtung, oder aber die aufgestellte Sockeldämmung hochgezogen und mechanisch gefestigt werden kann (siehe Bild 230a).

Prinzipiell denkbar, wenn auch aufwendig, wäre der Einsatz einer eigenstabilen, wannenförmigen Abdichtung aus Edelstahlblechen, wie man sie beispielsweise aus dem Schwimmbadbau kennt, in die man dann das bis zur Bodenplatte gedämmte Haus stellt (siehe Bild 230b). Die von der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) benötigten Durchdringung könnten dabei vorkonfektioniert an den benötigten Stellen mit Dichtungen vorgesehene Schraubverbindungen realisiert werden.

7.4. Weiterentwicklungen der Decke

Um zentrisch vorgespannte Steindecken weiterentwickeln zu können, sind die in der Konstruktion vorhandenen Potenziale zu identifizieren. Neben der Demontabilität ist die Effizienz der Tragstruktur ausschlaggebend.

7.4.1. Verbesserung der Tragfähigkeit

Um die Tragwirkung der Decken zu verbessern, sind diese nach deren ausschlaggebender Bemessungsgröße zu optimieren. Bemessungsgrößen der zentrisch vorgespannten Steindecke sind in Abschnitt 4.2.4 dargestellt und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Biegung infolge Biegemomente
- Querschub infolge Querkraft

Aufgrund der losen Fügung der Einzelmodule und deren Zusammenhalt über Reibung ist die maßgebliche Bemessungsgröße bei den zentrisch vorgespannten Steindecken die Querkraft. Infolge Querkraft entsteht Querschub welcher über Haftreibung und Vorspannung kompensiert wird (siehe Abschnitt 4.2.4). Zur Verbesserung der Querschubübertragung sind folgende Maßnahmen denkbar:

- Einsatz von Schubdornen
- Ausbildung von Nut- und Federn

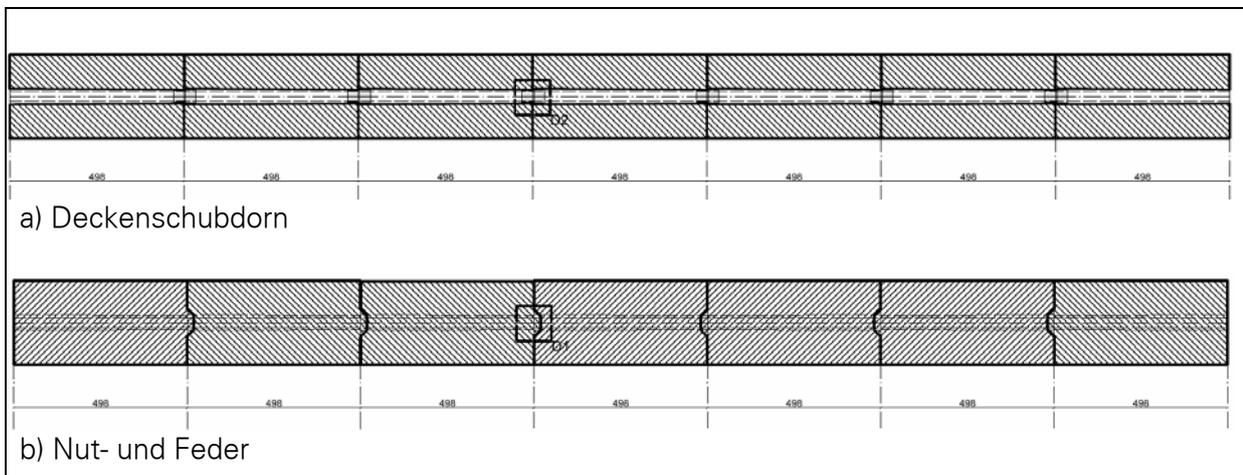


Bild 231 Möglichkeiten zur besseren Übertragung der Querkräfte in den Decken

7.4.1.1. Der Einsatz von Schubdornen zur Verbesserung der Querkraftübertragung

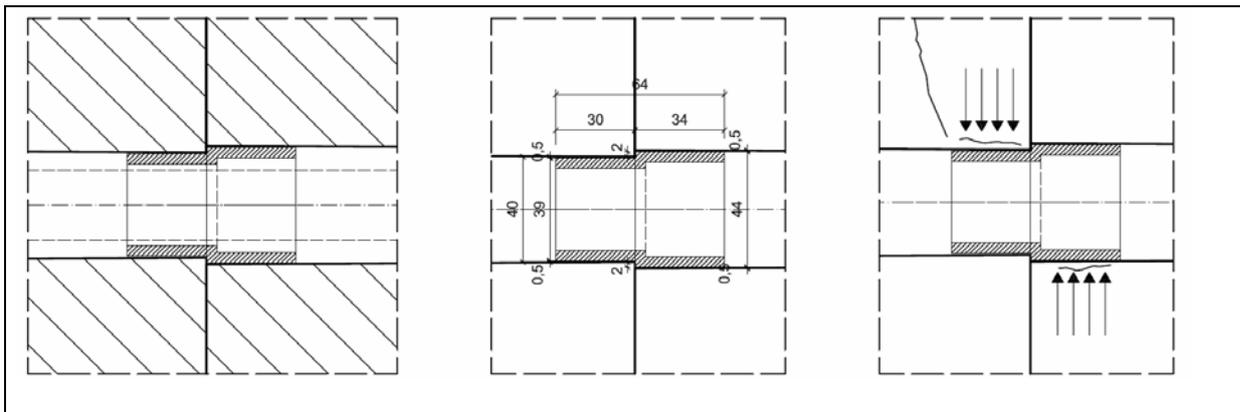


Bild 232 Situation bei querkraftübertragenden Deckenschubdornen

In Würdigung der spezifischen geometrischen Eigenheiten des verwendeten Mauersteins ist der Einsatz zusätzlicher Querschub übertragender Elemente, sogenannter Deckenschubdorne, bei den angedachten zentrisch vorgespannten Steindecken als kritisch zu bewerten. Dies begründet sich wie folgt:

Neben der Tatsache, dass der ohnehin schon hohe Stahlanteil der Decken durch die Elemente zusätzlich erhöht wird, stellt sich die Herstellung solcher Schubdorne aufgrund der geometrischen Vorgaben am Stein als aufwendig dar. Die produktionsbedingte konische Ausbildung der Führungslöcher im verwendeten Stein bedingen unterschiedliche Lochdurchmesser. Beträgt der Lochdurchmesser an der Steinunterseite $d = 45$ mm, so beträgt er infolge der konischen zulaufenden Führungslöcher an der Steinoberseite nur noch $d = 40$ mm. Folglich ist neben dem konischen Verlauf ein Versatz von 5 mm zu berücksichtigen. Es ergeben sich einerseits Pressungen am Lochrand des kleineren, an der Steinoberseite endenden Führungslochs, mit der Gefahr von Abplatzungen. Anderes stellen sich aufgrund der sich konisch weitenden Öffnung an der Steinunterseite punktuelle Belastungen infolge möglicher Verdrehungen des Dorns ein.

Es kann festgestellt werden dass der Ansatz gegenüber jener in Abschnitt 1 vorgestellten elementbezogenen-linearen Variante, dem sogenannten Kreuzverbinder keine Verbesserung darstellt.

7.4.1.2. Nut- und Feder zur Verbesserung der Querkraftübertragung

Die Ausbildung von Nut- und Feder ist bei den meisten Deckensystemen eine gute Möglichkeit die Übertragung von Querkraften zu verbessern. Da Nut und - Feder im Material des Moduls ausgebildet werden, verändern sich weder die Material-, Massenverhältnisse der Decke, noch werden zusätzliche konstruktive Elemente benötigt. Bei der vorgespannten KS-Decke geht diese Veränderung jedoch mit folgenden Nachteilen einher:

Infolge der am Deckenrand benötigten vollflächigen Ausbildung der Spannstellen ergibt sich für die Deckenmodule eine hohe Varianz bei den Einzelementen. Die Deckenmodule sind in Deckenendstücke mit Feder, in Deckenmodule mit Nut und Feder und in Deckenmodule in Deckenmitte nur mit Nut zu unterscheiden, herzustellen und bei der Verlegung zu berücksichtigen.

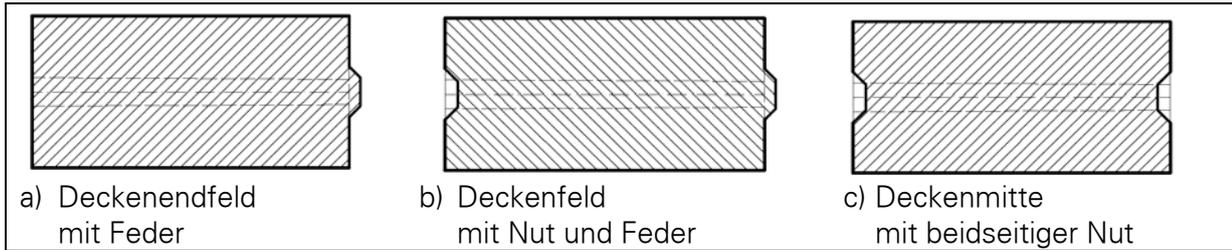


Bild 233 Varianz der Deckenmodule bei Ausbildung von Nut und Feder zur Querkraftübertragung

Aufgrund der Ausbildung von Nut und Feder, und der damit verbundenen Spaltbildung am Nutkopf, wird die spannungsübertragende Kontaktfläche zwischen den Steinen reduziert. Die durch die Vorspannung eingetragenen Kräfte müssen vom Material der verbleibenden Kontaktflächen kompensiert werden. Zudem führen die durch die Nut und Federverbindung übertragenden Querkräfte zu Scherspannungen am Konusfuß und dessen Flanken, welche zusätzlich durch toleranzbedingte Verkantungen, punktuelle Belastungen zur Folge haben.

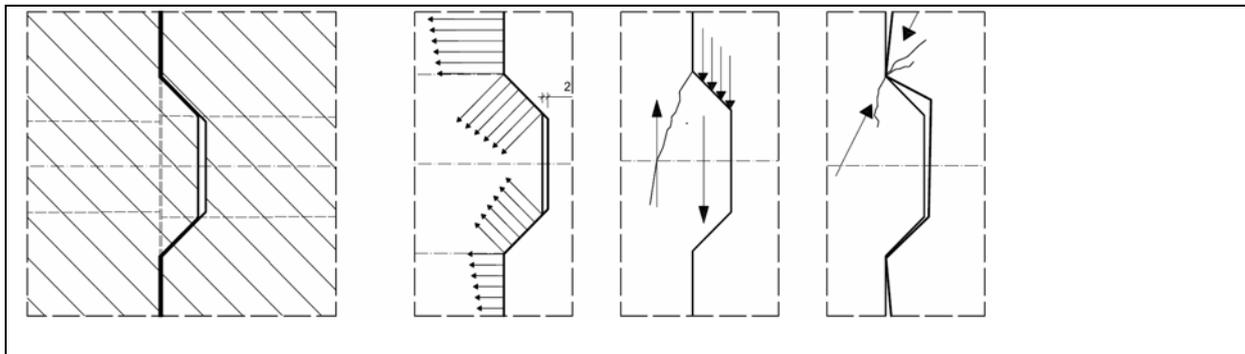


Bild 234 Darstellung der veränderten mechanischen Situation durch Ausbildung von einer querschubübertragenden Nut und Federverbindung

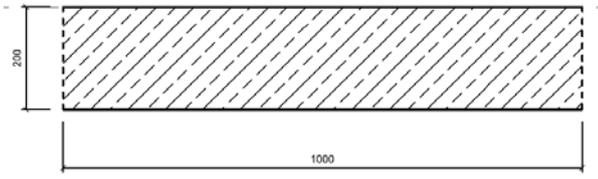
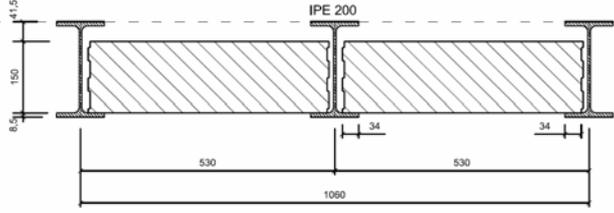
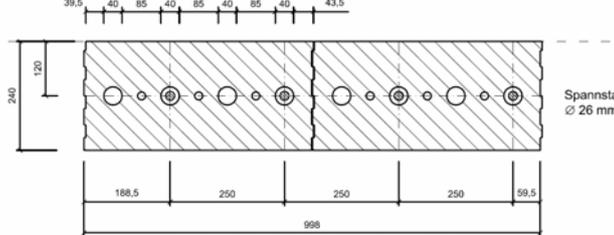
7.4.1.3. Rückschlüsse

Im Rückschluss auf die untersuchten Möglichkeiten zur Verbesserung der Querschubübertragung kann gesagt werden, dass die vorgeschlagenen Maßnahmen nicht zu einer Verbesserung der Tragwirkung bei den bisher angedachten zentrisch vorgespannten Steindecken führen. Daher sind weitere Ansätze zur Optimierung der Tragwirkung unabhängig von der ausschlaggebenden Bemessungsgröße zu suchen.

7.4.2. Leistungsvergleich

Eine weitere Möglichkeit Optimierungspotenzial aufzudecken, besteht im Leistungsvergleich der unterschiedlichen Deckensysteme. Ziel des Vergleichs ist es, die Leistungsfähigkeit des Deckentragwerks der entwickelten zentrisch vorgespannten Steindecke gegenüber herkömmlichen Decken festzustellen und ggf. weitere Ansätze zu finden, mit denen die Tragwirkung des Tragwerks erhöht werden kann. Dazu werden Deckentragwerke gemäß Tabelle 30 verglichen:

Tabelle 30 Untersuchte Decken

Nr.	Skizze	Bezeichnung
a)		Stahlbetondecke
b)		Stahldecke mit Steineinschub
c)		einachsige, zentrisch vorgespannte KS-Decke

Da Stahlbetondecken im Gegensatz zu zentrisch vorgespannten Decken zweiachsig gespannte Platten sind, wird zusätzlich zur Stahlbetondecke die Stahldecke mit Steineinschub als konventionelle Massivdecke mit einachsiger Plattenwirkung betrachtet. Darüber hinaus stellt die Stahldecken mit Steineinschub, eine gute Alternative da, mit herkömmlichen Mitteln eine massive und demontable Decke herzustellen.

7.4.2.1. Aspekte und deren Betrachtungsgrenzen

Beim Projekt ReMoMaB sind, neben weiteren Aspekten, die für eine Konstruktion benötigten Materialmengen von Interesse. Um die zu untersuchenden Decken vergleichen zu können bietet es sich an, das Eigengewicht der jeweiligen Decke auf die sich bei ihr ergebende maximale Deckenspannweite zu beziehen. Dabei wird das Eigengewicht der Decke auf einer Länge von einem Meter ermittelt und auf eine Spannweite des Tragwerks mit einer Breite von einem Meter bezogen (siehe Gleichung (7)).

$$(7) \quad k_D = \frac{q}{l^2} \quad k_D = \frac{\text{Eigengewicht}}{\text{Spannweite}^2} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$$

Der Nachweis für k_D ergibt sich aus der Eigenlast q in Gleichung (8) und der aufzunehmenden Spannung im Querschnitt aus Gleichung (9).

$$(8) \quad q = \gamma h$$

$$(9) \quad \sigma = \frac{M}{W} = \frac{ql^2}{\frac{8}{6}bh^2} = \frac{\gamma h l^2}{\frac{8}{6}bh^2} = \frac{3}{4} \frac{\gamma l^2}{h}$$

Für die Bemessungsspannung f_d kann somit folgender Ausdruck nach Gleichung (10) aufgestellt werden:

$$(10) \quad f_d = \frac{3}{4} \frac{\gamma l^2}{h}$$

Folglich ergibt sich k_D aus (8) und (10):

$$(11) \quad k_D = \frac{q}{l^2} = \frac{3}{4} \frac{\gamma l^2}{h}$$

Der Quotient k_D aus dem Eigengewicht und Quadratspannweite gibt an, wie viel Eigengewicht pro Quadratspannweite anfällt. Der Quotient k_D ist höher, je schwerer und „weniger weit“, eine Deckenkonstruktion spannt. Da bei den verglichenen Konstruktionen die gleichen Materialarten, Kalksandstein und Stahl, verwendet werden, gibt der Quotient k_D zusätzlich Aufschluss über die für die jeweilige Konstruktion benötigten Materialmengen. Die in Material und Verbund abweichende Stahlbetondecke dient als Referenz zu im Massivbau gängigen Spannweiten und Lasten.

Weiterhin wird im Zuge der ökobilanziellen Untersuchung ein hoher Stahlanteil in den Konstruktionen festgestellt. Folglich ist der Stahlanteil bei der Weiterentwicklung der Deckenkonstruktionen von gehobenem Interesse. Wo es möglich ist, soll der Stahlanteil in den Decken reduziert werden. Deshalb wird der Massenanteil Stahl gesondert ermittelt und ebenfalls auf das Gesamtgewicht der Konstruktion bezogen.

7.4.2.2. Bemessung

Als einheitliche Bemessungsgrundlage werden für den Deckenvergleich die im Rahmen dieses Projektes für das Musterhaus ermittelten Deckenlasten des ersten Obergeschosses angesetzt. Diese sind in Tabelle 31 zusammengefasst dargestellt.

Tabelle 31 Bemessungslasten

Bemessungslast			
1.	Eigenlast	g	12,53 KN/m ²
2.	Nutzlasten	q	3,51 KN/m ²
Summe			16,04 KN/m ²

Infolge wird die maximale Spannweite, die sogenannte Versagenslänge der jeweiligen Konstruktion, ermittelt. Im Zuge der Vorbemessung kann für die Stahlbetondecke und die Stein-

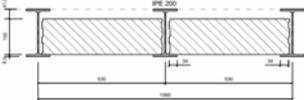
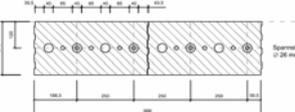
decke mit Steineinschub eine statisch wirksame Bauteilhöhe von 200 mm ermittelt werden. Bei der vorgespannten Steindecke wird auf die bereits im Rahmen der Versuchsvorbereitung ermittelten Werte zurückgegriffen. Hier ergibt sich aufgrund der Anordnung der Vorspannung in Bauteilmitte eine notwendige Bauteilhöhe von 240 mm (siehe Tabelle 32).

Tabelle 32 Vorbemessene Bauteilhöhen und deren Versagenslängen

	Decke	Höhe	Spannweite
1.	Stahlbetondecke	200 mm	5,95 m
2.	Stahldecke mit Steineinschub	200 mm	5,00 m
3.	Zentrischvorgespannte Steindecke	240 mm	3,90 m

Aus den im Zuge der Vorbemessung festgestellten Bauteildimensionen lassen sich die Massen der jeweiligen Decke ermitteln und auf deren typische Versagenslänge beziehen. Tabelle 33 stellt diese zusammenfassend dar.

Tabelle 33 Ergebnis- und Massenvergleich der untersuchte Decken

	Stahlbetondecke	Stahldecke mit Steineinschub	Zentrisch vorgespannte Steindecke
Skizze			
Spannweite	5,95 m	5,00 m	3,90 m
Gesamtmasse	334,08 kg/m	281,49 kg/m	415,76 kg/m
Masse Stahl	4,54 kg/m	49,43 kg/m	7,71 kg/m
Ergebnis			
Gesamtmasse pro Spannweite	9,44 kg/m pro m ²	11,26 kg/m pro m ²	27,33 kg/m pro m ²
Stahl pro Quadratspannweite	0,13 kg/m pro m ²	1,98 kg/m pro m ²	0,51 kg/m pro m ²
Massenanteil Stahl	1,36 %	17,56 %	1,85 %

7.4.2.3. Auswertung und Rückschlüsse für die Weiterentwicklung

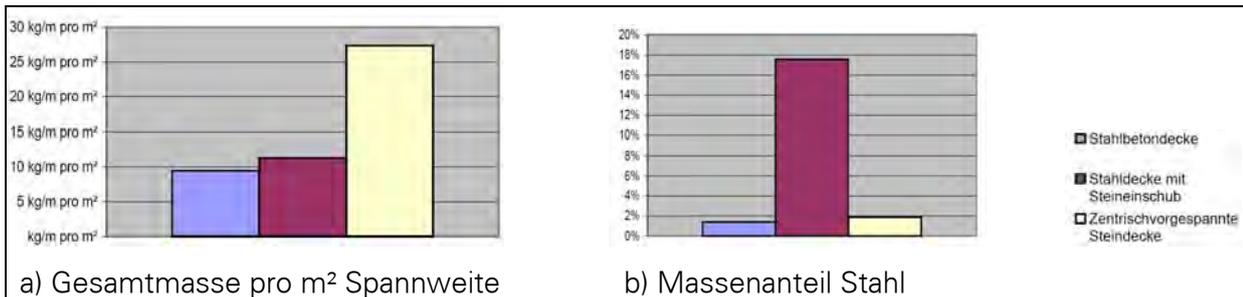


Bild 235 Auswertung der verglichenen Decken

In Wertung des Vergleichs kann gezeigt werden, dass die vorgespannte Steindecke aufgrund der Anordnung der Vorspannung in Bauteilmitte einen hohen Bauteilquerschnitt bei gleichzeitig geringer Deckenspannweite besitzt. Die Decke benötigt für die erreichbaren Spannweiten zuviel Material. Der Stahlanteil ist infolge des hohen Gesamtgewichtes mit jenem konventioneller Stahl-Stahlbetondecken vergleichbar. Hingegen weisen Stahldecken mit Steineinschub konstruktiv bedingt schlankere Querschnitte bei den Einschüben und somit einen geringen mineralischen Anteil auf als die mit Ihr verglichene zentrisch vorgespannte Steindecke. Folglich ist der Stahlanteil der Decke um eine 10er-Potenz höher als bei den beiden anderen Decken. Das Massen– Spannweiten– Verhältnis der Decke ist ebenso gut wie jenes konventioneller Stahlbetondecken.

Aus den Ergebnissen kann gefolgert werden, dass das Material der zentrisch vorgespannten Deckenkonstruktion nur mäßig ausgenutzt wird. Dies lässt folgende Rückschlüsse auf die zu treffenden Maßnahmen zu:

- Um das Massen– Spannweiten– Verhältnis zu verbessern, sollte das Gesamtgewicht der Decke reduziert werden. Da das Gesamtgewicht maßgeblich durch den mineralischen Anteil bestimmt wird, sollte der mineralische Masseanteil reduziert werden.
- Für die Anordnung der Spannstäbe ist eine günstigere Verteilung zu finden. Dadurch könnte der Stahlanteil der Konstruktion konstant gehalten werden.

7.4.3. Vorgespannten Steinbalken

7.4.3.1. Entwicklung des Ansatzes

Aufgrund der im Stein vorhandenen Spannkanäle ist eine einachsige Plattenwirkung bei den zentrisch vorgespannten Decken vorgegeben. Überlegungen die die Tragleistung der zentrisch vorgespannten Decken durch eine zweiachsige Plattenwirkung zu erhöhen zum Gegenstand haben, bedingen eine biaxiale Anordnung der Vorspannstähle und somit geometrische aufwendige konstruktive Abpassungen am Stein (Modul). Aus diesem Grund werden Überlegungen zu zweiachsig vorgespannten Steindecken nicht verfolgt. Der Vergleich mit der Stahldecke mit Steineinschub gezeigt, dass der Einschub im Querschnitt schlanker gestaltet werden kann und so das Gesamtgewicht der Decke reduziert werden kann. Weiterhin bieten Einschübe die Möglichkeit den Abstand zwischen den Spannstäben so zu erhöhen das sich eine günstige Verteilung der Spannstäbe ergibt.

Bild 236 zeigt einen Ansatz, bei dem diese Überlegungen umgesetzt werden. Die einachsrig gespannte Decke wird dabei durch eine Kombination von vorgespannten Steinbalken mit Steineinschüben gebildet.

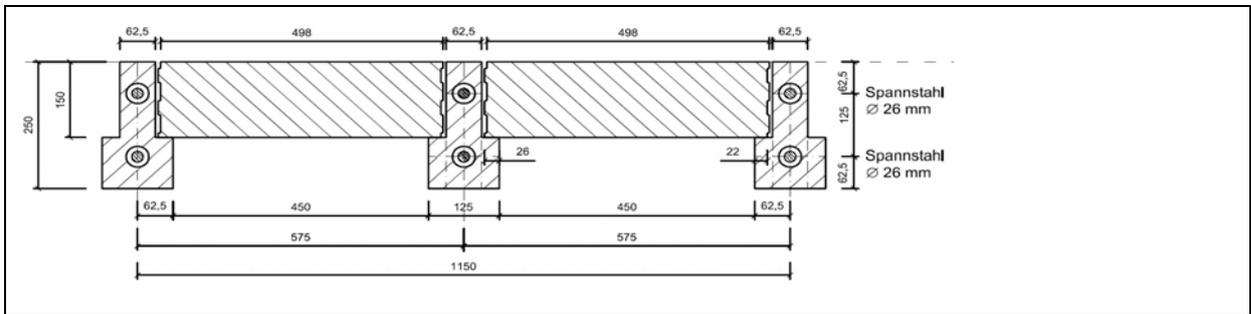


Bild 236 vorgespannte Steinbalken

Der Steinbalken selbst wird durch senkrecht zur Spannrichtung gedreht, hochkant anordneten Steinen gebildet (siehe Bild 237). Dadurch entsteht eine günstige Anordnung der Spannkä-näle übereinander in 2/3 Höhe des Steins (siehe Bild 238), wobei durch eine unterschiedliche Vorspannung in den Kanälen gezielt ein konstantes Biegemoment erzeugt werden kann.

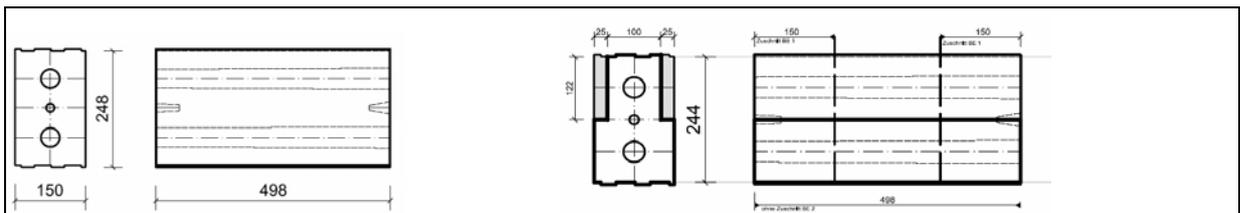


Bild 237 Modifikationen am Modul

Der vorgeschlagene Versatz zur höhengleichen Aufnahme des Einschubs lässt sich mit entsprechenden Einlagen im Presswerkzeug bei der Steinerstellung aufgrund der Aussparungsgeometrie relativ einfach realisieren.

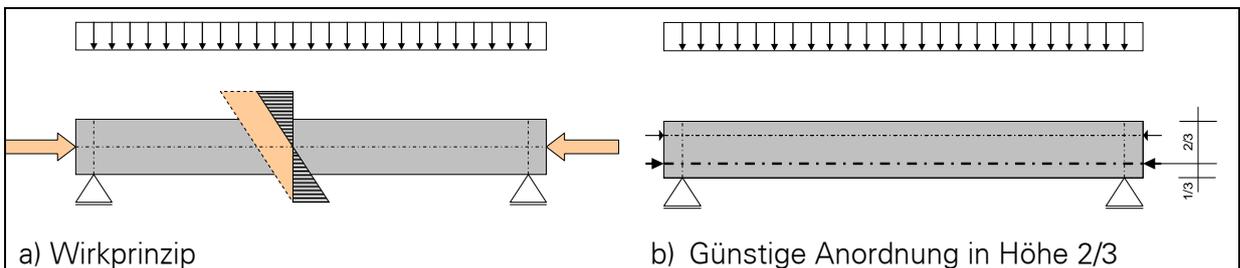


Bild 238 Optimierung des Wirkprinzips bei lose vorgespannten Steindecken

In Bild 239 wird exemplarisch gezeigt, wie durch Addition der Einzelmodule die jeweilig benötigte Spannweite bei dem Steinbalken realisiert werden kann. Ein solcher Steinbalken kann aufgrund seiner linearen Geometrie problemlos im Werk vorgefertigt und transportiert werden. Die Vervollständigung der Decke mit den entsprechenden Steineinschüben kann dann auf der Baustelle erfolgen.

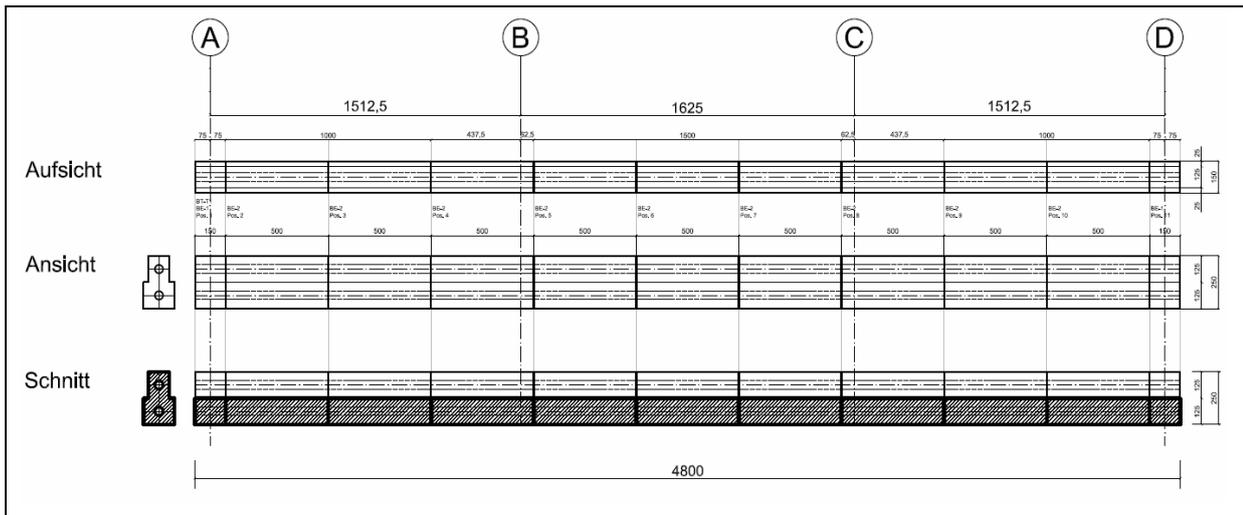


Bild 239 Beispielhafte Ausbildung des KS-Trägers

7.4.3.2. Stand der Forschung

Recherchen zum Stand der Forschung bei Steindecken ergaben, dass hierzu bereits Untersuchungen zur Tragfähigkeit von vorgespannten Steinbalken vorliegen [74]. Diese lassen sich wie folgt zusammenfassen:

An einem mit verschiedenen Drähten vorgespannten Balken aus Kalksandsteinelementen (200/900/600) und Dünnbettmörtel wurde die Tragfähigkeit in Abhängigkeit von Bewehrungsverhältnis und Spannweite bestimmt. Die Elemente wurden aufstehend angeordnet, womit der Balken eine Bauteilhöhe von 900 mm besaß. Durch diese Anordnung entstanden zwei übereinander liegende Spannkanäle, welche unterschiedlich vorgespannt wurden. Mit der in der Studie maximal getesteten Vorspannkraft von 91 kN ließ sich eine Spannweite von 6 Metern bei einer Traglast von 17,11 kN/m erreichen. Durch die relativ geringe Vorspannkraft entstand im Mauerwerksquerschnitt eine mittlere Druckspannung von 0,5 N/mm². Dagegen belief sich die Bemessungsfestigkeit auf 5,6 N/mm². Die größte anzunehmende Spannung infolge Maximallast wurde jedoch auf 3 N/mm² aufgrund groß geschätzter Kriechinflüsse reduziert. An vorgespannten Mauerwerkswänden konnten diese Einflüsse bereits gezeigt werden, [16].

Im Projekt ReMoMaB wird mit wesentlich höheren Normalspannungen infolge Vorspannung gearbeitet, da der wirksame Biegequerschnitt wesentlich kleiner ist. Die Verwendung von Trockenmauerwerk ohne Mörtel lässt den Schluss zu, dass die zeitabhängige Verformung geringer ausfällt, als in den Versuchen von [74]. Da das Ausmaß der Verkürzung unbekannt ist, sind im Vorfeld Langzeitversuche unter konstanter Vorspannung durchgeführt worden.

7.4.3.3. Abschließender Vergleich mit Steinbalkendecke

Vergleicht man die in Abschnitt 7.4.3.1 entwickelte Steinbalkendecke unter den in Abschnitt 7.4.2.1 genannten Voraussetzungen, ergeben sich aus der Vorbemessungen Bauteilhöhen und Versagenslängen gemäß Tabelle 34.

Tabelle 34 Vorbemessene Bauteilhöhen und deren Versagenslängen

	Decke	Höhe	Spannweite
4.	Steinbalkendecke	250 mm	4,80 m

Ergänzend zu den in Tabelle 33 ermittelten Werten lassen sich die Massen der Steinbalkendecke aus den Bauteildimensionen aus Tabelle 34 in Tabelle 35 vergleichen.

Tabelle 35 Massenvergleich der untersuchte Decken incl. Steinbalkendecken

	Stahlbetondecke	Stahldecke mit Steineinschub	Zentrisch vorgespannte Steindecke	Steinbalkendecke
Spannweite	5,95 m	5,00 m	3,90 m	4,80 m
Gesamtmasse	334,08 kg/m	281,49 kg/m	415,76 kg/m	305,70 kg/m
Masse Stahl	4,54 kg/m	49,43 kg/m	7,71 kg/m	13,39 kg/m
Ergebnen				
Gesamtmasse pro Spannweite	9,44 kg/m /m ²	11,26 kg/m /m ²	27,33 kg/m /m ²	13,27 kg/m /m ²
Stahl pro Spannweite	0,13 kg/m /m ²	1,98 kg/m /m ²	0,51 kg/m / m ²	0,58 kg/m /m ²
Massenanteil Stahl	1,36 %	17,56 %	1,85 %	4,38 %

Im abschließenden Vergleich kann gezeigt werden, dass mit der Steinbalkendecke eine Optimierung gegenüber der zentrisch vorgespannten Deckenkonstruktion möglich ist. Zum einen kann das Massen– Spannweiten– Verhältnis halbiert und damit die Tragleistung der Massivdecke deutlich verbessert werden. Zum anderen konnte die Stahlmenge in der Decke in einem vertretbaren Bereich von rund 5% Massenanteil gehalten werden.

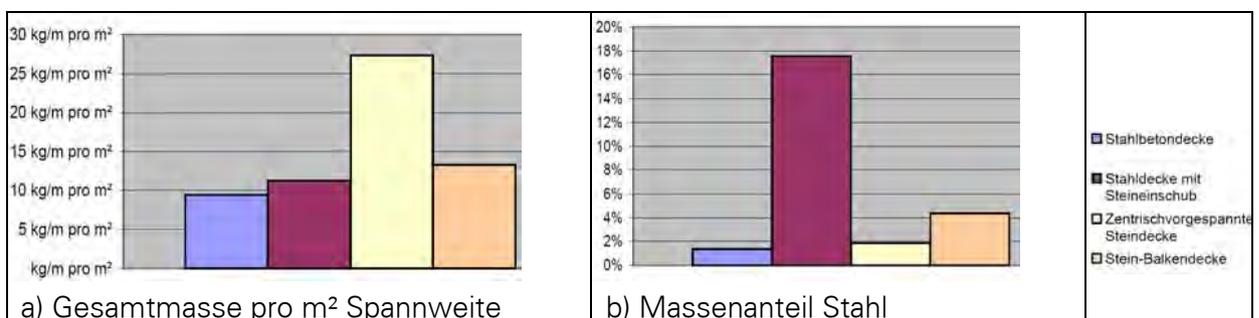


Bild 240 Auswertung mit Stein-Balkendecken

7.4.4. Anwendung im Wand-Decken-Knoten

Neben einer Verbesserung der Tragwirkung der zentrisch vorgespannten Decke ist die konstruktive Durchbildung im Wand-Decken-Knoten interessant. Hier ist, neben der Anordnung des Ringankers und der Spannstelle, die Wahl einer geeigneten Ausfuchung zwischen den Steinbalken und der aufgehenden Wand maßgeblich. Bild 241 zeigt die Situation im Deckenaufleger eines Steinbalkens mit einer möglichen Ausfuchung unterhalb des Deckeneinbaus.

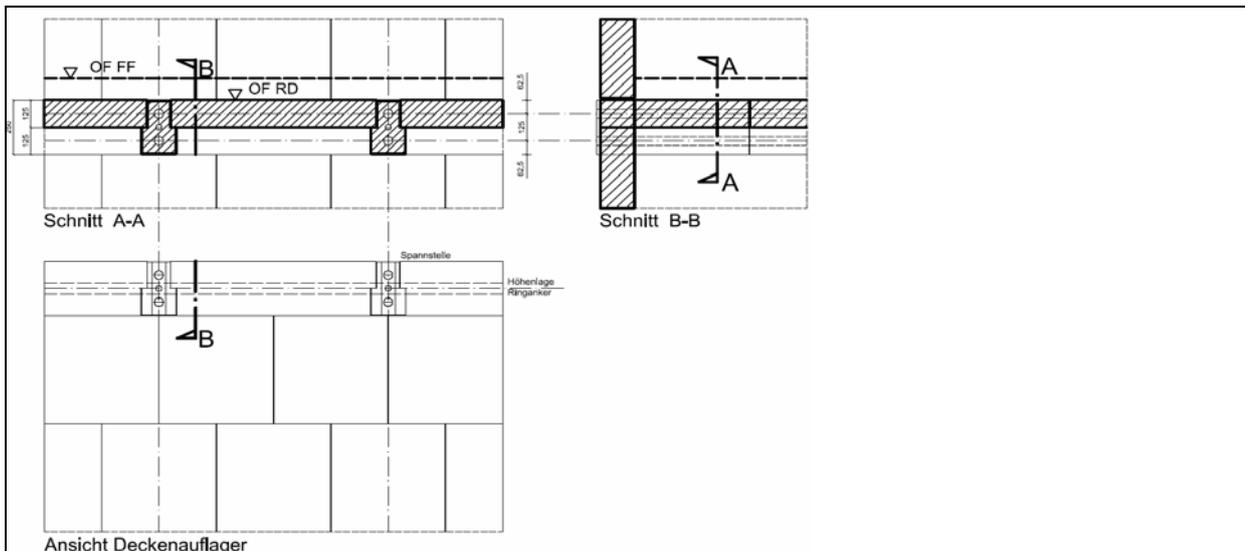


Bild 241 Beispielhafte Auflageausbildung mit Ausfuchung der Wandfläche zwischen den Steinträgern

Bei diesen Decken ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten die Schubwand zum Deckenbalken zu orientieren. Diese Möglichkeiten sind in Bild 242 dargestellt. Je nach Lage zum Deckenbalken ergeben sich ferner für die eventuell in der Schubwand vorgesehenen Spannelemente konstruktive Ansätze diese über mehrere Geschosebenen hinweg auszubilden.

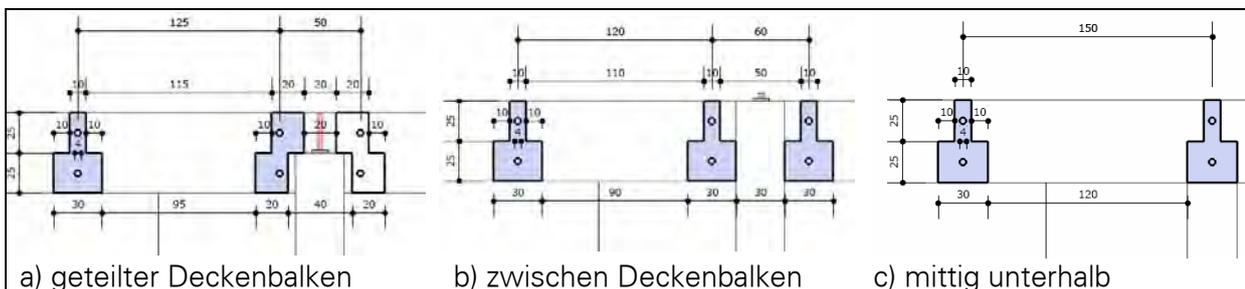


Bild 242 Mögliche Schubwandanordnung bei der Steinbalkendecke

7.5. Ringanker

Bei Überlegungen zur demontablen Ausbildung von Ringankern kann auf von XELLA realisierte Konstruktionen [202] [203] zurückgegriffen werden. Bild 243 zeigt Varianten zu möglichen Ausbildungen von Ringankern in Abhängigkeit vom Grundriss und Ausrichtung der Deckenplatten.

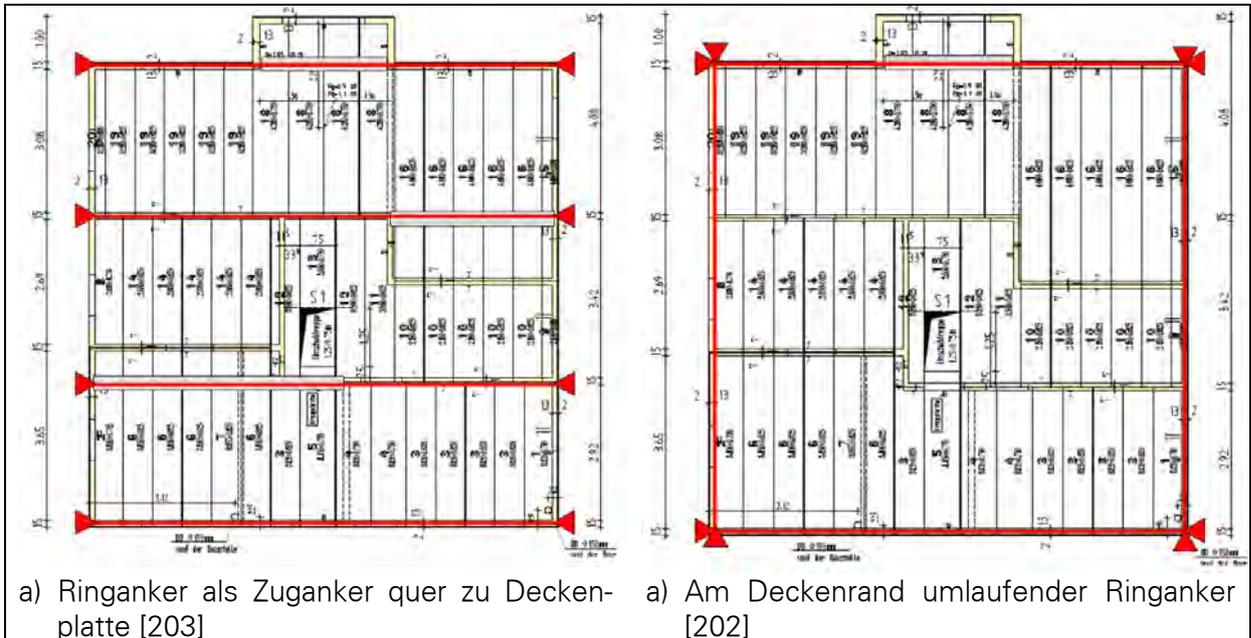


Bild 243 Varianten bei der Ringankeranordnung

Unter Berücksichtigung der möglichen Ankeranordnung ergeben sich die in Bild 244 dargestellten Lösungen. Die fragliche demontable Ausbildung kann durch loses Einlegen eines Zugstabs in die z.B. bei Porenbetonelementdecken vorhandene Nut realisiert werden (siehe Bild 244c).

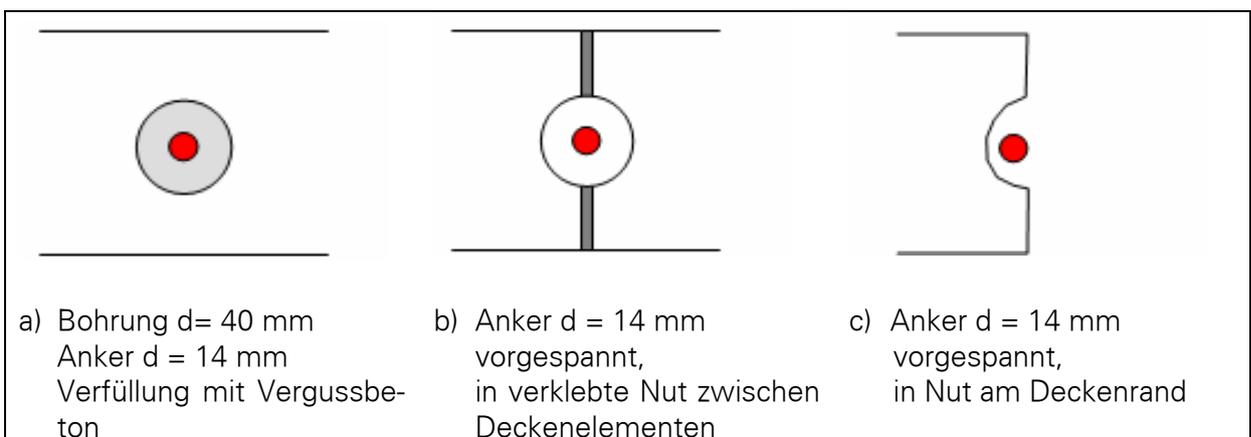


Bild 244 In Abhängigkeit der Ringankeranordnung sich ergebende Detailausbildung [202] [203]

Die sich an den Gebäudeecken ergebenden geometrischen Zwänge werden im Detail durch Verwendung von mit Langlöchern versehenen Stahlwinkeln gelöst (siehe Bild 245). Dadurch können Zwängungen und punktuelle Pressungen, welche sich z.B. beim Einsatz von Bandstählen als Ringanker ergeben, vermieden werden. Darüber hinaus lassen sich mit diesem System Ringanker Quer zum Deckenelement in Deckenplattenmitte realisieren (siehe Bild 245 b und d).

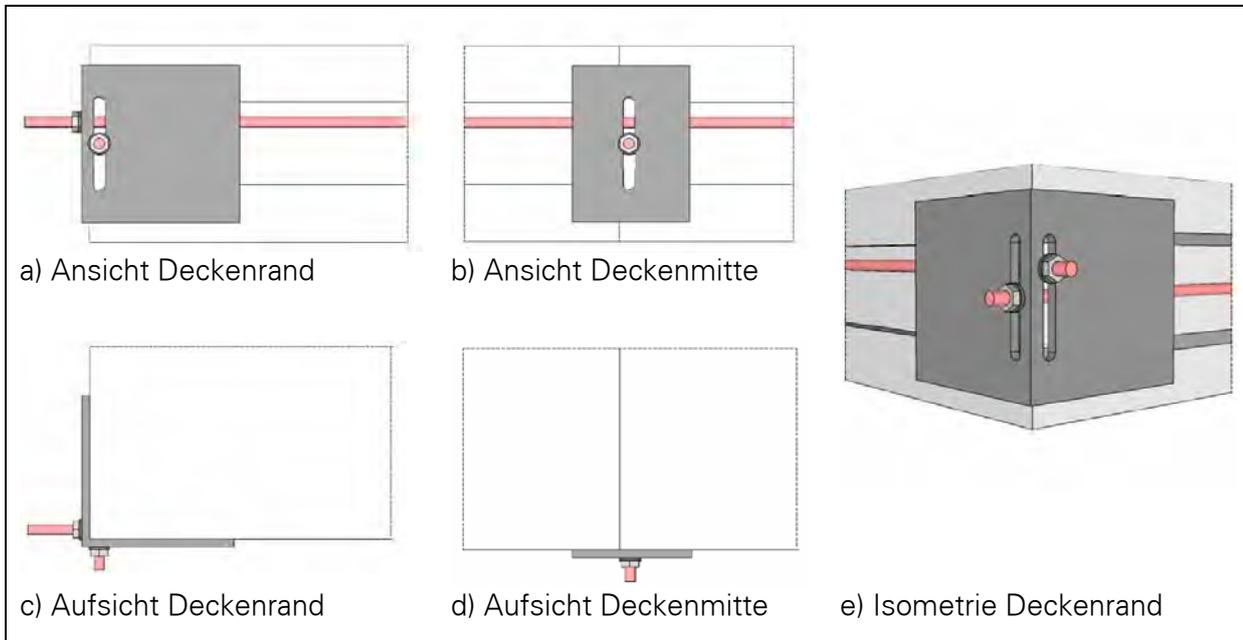


Bild 245 Detailausbildung demontabler Ringanker

7.6. Balkone und Dächer

Die Aussagen zur demontablen Gestaltung von Balkon- und Dachkonstruktionen beschränken sich in diesem Bericht auf Hinweise. Beide Gebäudeelemente werden in diesem Abschnitt zusammengefasst dargestellt. Auf gesonderte Ausführung zum Stand der Technik wird verzichtet.

Balkone

Sofern Balkone dem Konstruktionsregeln zur Vermeidung von Wärmebrücken [5] folgen und losgelöst vom Gebäude, eigenständig vor der thermischen Hülle eines Gebäudes stehen, können diese problemlos demontabel gestaltet werden. Forderungen an geklebte Abdichtungen oder die Ausbildung von schwer lösbaren Bauteilverbindungen zur Reduktion von Wärmebrücken bestehen dann aufgrund fehlender Durchdringungen nicht.

Dächer

Dächer werden allgemein nach der Dachneigung in Flach- und geneigte Dächer unterschieden. Bei geneigten Dächern entscheidet die Wahl der Dachneigung über Art und Material der Dachdeckung. Flachdächer müssen im Gegensatz zu geneigten Dächern abgedichtet werden. Sie werden nach der Lage der Entwässerung in außen und innen liegender Entwässerung eingeteilt [22]. Darüber hinaus ist bei Flachdächern die Art der Nutzung von entscheidender Bedeutung, ob die Konstruktion des Flachdachs demontabel gestaltet werden kann.

Beim geneigten Dach handelt es sich in i.d.R um ein ganzes Gebäudeteil, das demontabel ist. Meist ist die im Wohnungsbau eingesetzte tragende Konstruktion ein Skelett aus Holz (Dachstuhl), bzw. Stahl, mit entsprechend lösbaren Verbindungen. Bei den Folgeschichten kann aufgrund der Dachneigung auf geklebte Abdichtungen verzichtet werden, sodass die Dacheindeckung, die Abdichtung, die Dämmung, die Dampfbremse, bzw. die Sperre und die Innenbekleidung ebenfalls mit lösbaren Verbindungen realisiert und somit problemlos sortenrein trennbar und daher gut demontabel gestaltet sind.

Bei Flachdächern finden sich, im Gegensatz zu Abdichtungen der erdberührenden Bauteile, um Systeme, die nicht mit der Dämmung oder tragenden Konstruktion verklebt werden müssen. Je nach Art der Nutzung genügt eine in sich geschlossen ausgeführte, lose aufgelegte Dachabdichtungsbahn, die entsprechend gegen Windsog beschwert und am Dachrand gesichert ist. Hier kann auf Literatur zur Konstruktion demontabler Flachdächer, welche sich inzwischen bewähren haben, hingewiesen werden [108].

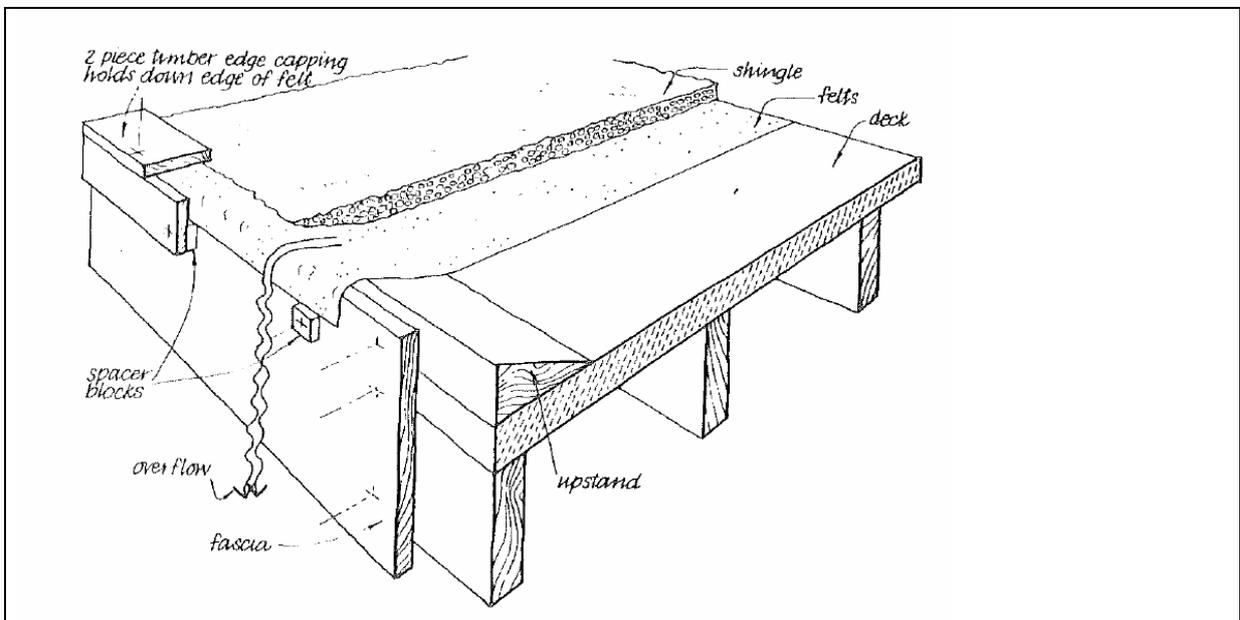


Bild 246 Beispiel eines Flachdachs bei dem jede Schicht des Dachaufbaus lose aufgelegt wird aus [108]

7.7. Treppen

Treppen sind in Grundrissform und Ausführungsart sehr vielfältig. Deshalb beschränken sich Darstellungen zur Treppe in diesem Bericht im Wesentlichen auf ergänzende Hinweise zum Stand der Technik und Überlegungen zu deren demontabler Gestaltung. Treppen werden dabei ausschließlich als Bauelemente innerhalb hochbaulicher Anlagen, Gebäude, betrachtet die Geschossebenen verbinden.

Naturgemäß lassen sich Treppenkonstruktionen aus Holz und Metall mit lösbaren Verbindungen realisieren. Sofern z.B. keine geklebten Trittbeläge verwendet werden, lassen sich mit diesen Materialien sehr einfach demontable und folglich sortenrein trennbare Treppen herstellen. Treppenkonstruktionen aus Holz und Metall werden deshalb hier nicht weiter dargestellt.

Da die meisten Massivtreppen, ebenso wie die sie verbindenden Geschossdecken, vorwiegend auf Biegung beansprucht werden, soll zur Entwicklung demontabler Massivtreppen auf die in diesem Projekt vorgestellten demontablen Deckensysteme zurückgegriffen werden. Ausgehend von den in [153] [152] dargestellten Massivtreppenkonstruktionen werden, entsprechend den Materialerfordernissen von Kalksandstein, Treppen aus Blockstufen demontable gefügt. Blockstufen werden in der Regel aus Beton oder Naturstein gefertigt. Im Sinne einer einheitlichen und allgemein anwendbaren Darstellung wird aufgrund der ungünstigen Abriebeigenschaften von Kalksandstein wird bei der Darstellung der Treppenkonstruktionen von Blockstufen mit Belag ausgegangen, dieser jedoch nicht weiter detailliert. Die Treppenkonstruktionen als solche sind im Abschnitt 7.7.3 exemplarisch ohne Belag dargestellt.

Um das bei Mauerwerkskonstruktion vorherrschende Höhenmaß mit den die Treppe bestimmenden Geschosshöhen in einem modularen Verhältnis darstellen zu können, werden beide Höhensysteme in Abschnitt 7.7.2 abgeglichen.

7.7.1. Stand der Technik

Neben den bauordnungsrechtlichen Vorschriften (*MBO/LBO [107], HHR [77], SchulBauRI [138], VStättVO [163]*) ist die DIN 18065 [30] die zentrale Planungsgrundlage für Treppen. Hier ist die sogenannte Steigungsformel (12) neben den die Treppe bestimmenden Maßen, Begriffen und Anforderungen verbindlich definiert. Demnach ergibt sich das Steigungsverhältnis *SV* der Treppe aus einer linearen Beziehung zwischen Steigung und Auftritt.

$$(12) \quad SV = 2S + A = 630\text{mm}$$

SV = Steigungsverhältnis

S = Steigung

A = Auftritt

7.7.2. modulare Höhenentwicklung

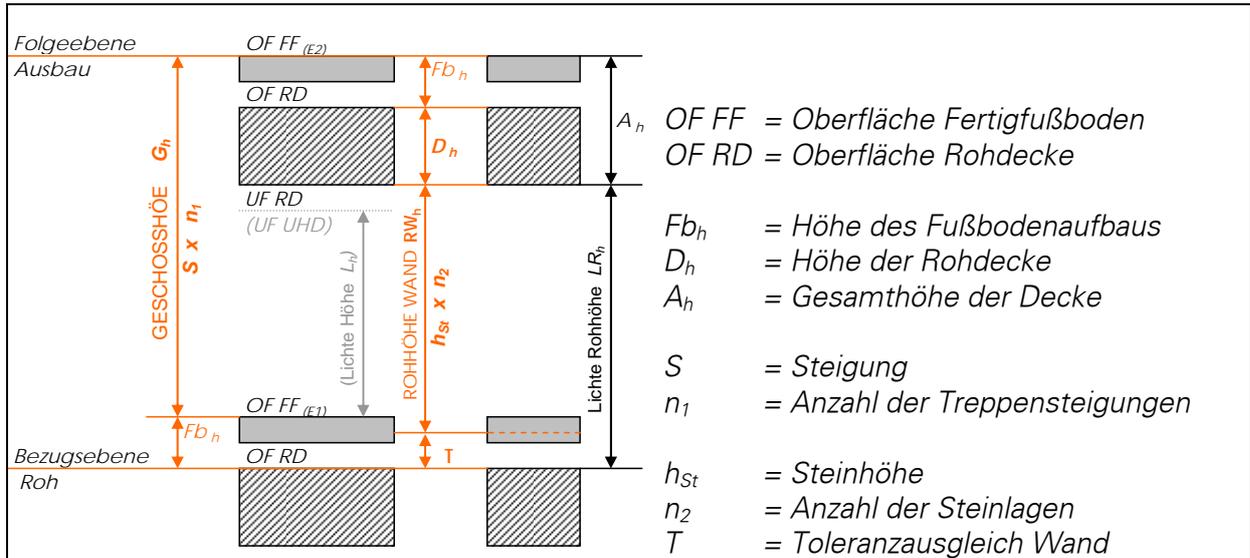


Bild 247 Darstellung der Beziehung zwischen Rohwandhöhe und Geschosshöhe

Im Sinne einer modularen Höhenentwicklung von Gebäuden stellen Treppen und ihre Steigung S , neben der Realisierung der benötigten Lichten Raumhöhe L_h und Überlegungen zur Fassadenteilung, die wesentliche Schnittstelle zwischen der Rohhöhe der Wand und der Geschosshöhe dar. In Bild 247 sind die verwendeten Begriffe und Beziehungen zwischen Rohhöhe der Wand RW_h – und Geschosshöhe G_h dargestellt. Diese Beziehungen lassen sich aufgrund der modularen Ordnung der Steine und der gleichmäßigen Höhenteilung der Treppen durch die Steigung S , mathematisch beschreiben.

- Die Geschosshöhe G_h ergibt sich aus der Lichten Rohhöhe LR_h zuzüglich Höhe des gesamten Deckenaufbaus A_h . Der Deckenaufbau selbst setzt sich aus der Höhe der Rohdecke D_h und der Höhe des Fußbodenaufbaus Fb_h mit all seinen Folgeschichten (Estrich, Trittschalldämmung, Ausgleichschüttung etc.) zusammen.
- Die Lichte Rohhöhe LR_h ergibt sich aus der Anzahl n_2 der Höhe der verwendeten Steine h_{st} zuzüglich der zwischen Rohdecke und Rohwand auszugleichenden Toleranz T .
- Die Treppensteigung S ergibt sich aus der gleichmäßigen Teilung n_1 der Geschosshöhe nach der Steigungsformel (12) (siehe Abschnitt 7.7.1).

Da die Rohhöhe der Wand und Geschosshöhe nicht direkt in Beziehung zueinander stehen, müssen diese auf eine gemeinsame Ebene bezogen werden (*Bezugsebene*). Es ergibt sich:

$$(13) \quad G_h + E_h = T + RW_h + D_h + Fb_h$$

Aus der in Gleichung (13) dargestellten Beziehung lässt sich, unter der Annahme gleicher Rohdecken- und Fußbodenhöhen in der Folgeebene Gleichung (14) aufstellen.

$$(14) \quad S \times n_1 = (n_2 \times h_{st}) + T + D_h$$

Da sowohl bei der Anzahl der Steinhöhen n_2 , als auch den Anzahl Treppensteigungen n_1 ganzzahlige Werte angestrebt werden gilt:

$$(15) \quad n_1 = \frac{(n_2 \times h_{st}) + T + D_h}{S}$$

Unter Berücksichtigung üblicher Treppensteigungen wie z.B. $S = 170, 175$ und 180 mm können, bei Anwendung der sich aus den Steinen ergebenden Höhe h_{st} für den Hochbau typische Geschosshöhen G_h zwischen $2,50$ m und $3,50$ m nachgewiesen werden (siehe Bild 248).

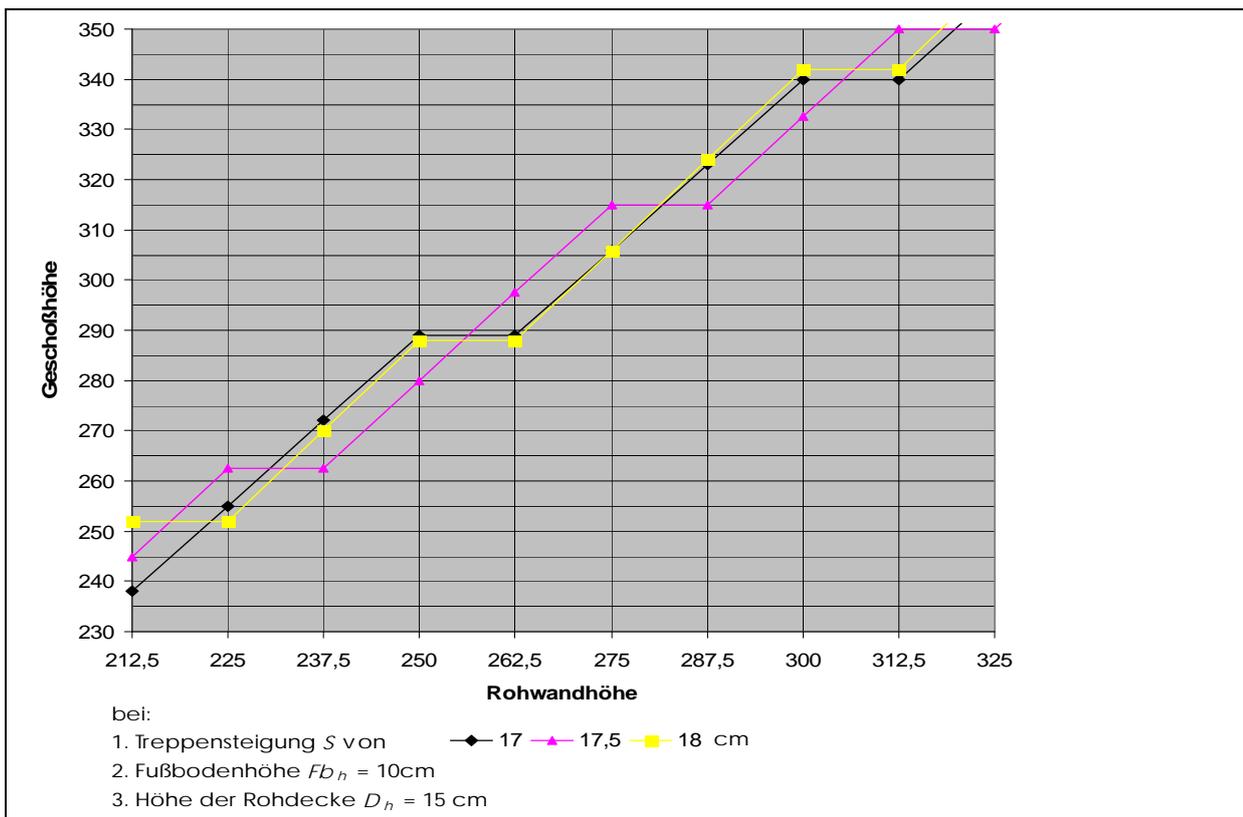


Bild 248 Beziehung Steinhöhe, Steigungsmaß der Treppe und Geschosshöhe

Im Ergebnis dieser exemplarischen Untersuchung zur Beziehung zwischen Rohhöhe der Wand und Geschosshöhe kann folgendes festgehalten werden:

- Die im Mauerwerksbau üblichen Steinhöhen bieten eine hohe Varianz zur Realisierung im Hochbau üblicher Geschosshöhen.
- Das im Wandmodul enthaltene Höhenmaß bedingt, in Abhängigkeit der statisch erforderlichen Rohdeckenhöhe Vorzugsmaße bei den Ausbauelementen. Diese lassen sich zum verwendeten Modul über die Treppensteigung in Beziehung setzen.
- Durch die Höhe des Fußbodenaufbaus und dem Toleranzausgleich am Wandfuß lassen sich systembedingte Höhendifferenzen ausgleichen.

7.7.3. Ansätze für demontable Massivtreppen

Die nachfolgend vorgestellten Ansätze möglicher demontabler Massivtreppenkonstruktionen beschränken sich auf mögliche Fügeprinzipien mit Blockstufen aus Kalksandstein. Diese sind:

- loses auflegen von Blockstufen auf tragende Wandscheiben.
- einspannen von Blockstufen zwischen zwei tragende Wandscheiben
- Realisierung mittels einseitig eingespannter, auskragende Blockstufen durch Vorspannung von Wandscheibe und Stufe.
- loses auflegen von Block- bzw. Dreiecksstufen auf Stahlwangen aus Profilstahl.

Im Sinne einer einheitlichen Darstellung wird von einer Geschosshöhe $G_h = 3150$ mm und einer Treppensteigung $S/A = 175 / 290$ mm ausgegangen. Die Boden-, bzw. die Deckenplatte wird mit $h = 175$ mm und der Fußbodenaufbau mit $h = 100$ mm angenommen und vereinfacht dargestellt.

Lose auflegte Blockstufen

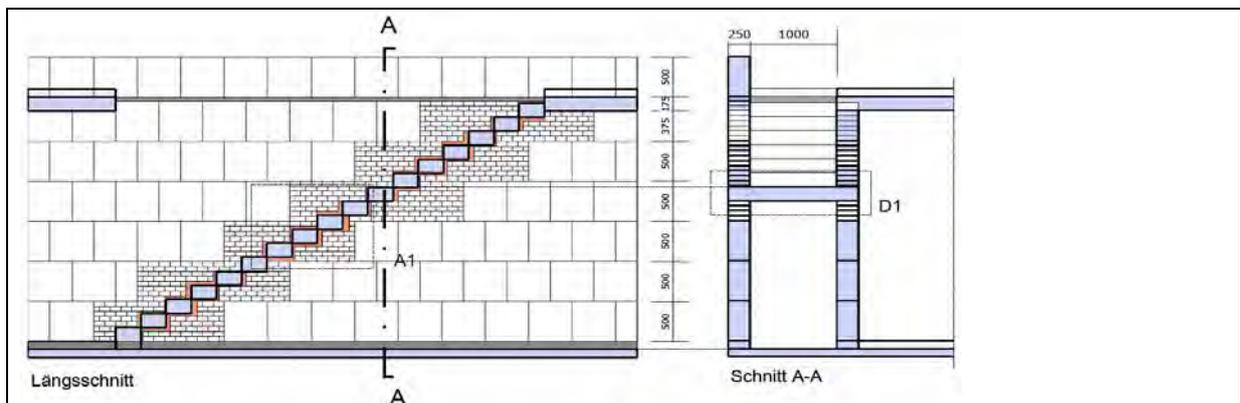


Bild 249 Beispiel einer demontablen Massivtreppe mit lose auflegten Blockstufen

Massivtreppen mit lose auflegten Blockstufen werden bei Hochbauten vorwiegend im Bereich von Außenkellertreppen sowie im Sockelbereich von Treppen vorgesehen.

Sollen geschosshohe Massivtreppen mit lose auflegten Blockstufen realisiert werden, muss das die Treppenlast abtragende Mauerwerk im Steigungsverhältnis der Treppe mit Höhenversätzen versehen werden. Durch Verwendung kleiner Steinformate kann die Treppensteigung näherungsweise erreicht werden. Üblicherweise erfolgt der Steigungsabgleich durch Anpassungen in der Mörtelfuge unterhalb der jeweiligen Blockstufe. Folglich ist diese Art des Höhenausgleichs bei Trockenmauerwerk nicht möglich. Es ergeben sich unterschiedlich große, abschnittsweise wiederkehrende Fugenöffnungen im Bereich des Stufenlagers (siehe Bild 249) die nur unbefriedigend im Hinblick auf bestehende Anforderung gefüllt, bzw. geschlossen werden können.

Die Ausbildung von Massivtreppen mit lose auflegten Blockstufen stellt im Zusammenhang mit der Verwendung vom Trockenmauerwerk eine logische, aber in der Umsetzung detailintensive Lösung dar, deren Einsatz nur in Ausnahmen empfohlen werden kann.

Mit Stahlankern befestigte Blockstufen

Gegenüber lose auflegten Blockstufen stellen Blockstufen die durch Stahlanker befestigt werden, im konstruktiven Sinne, eine effiziente Methode dar Massivtreppen demontabel zu gestalten. Dabei wird zwischen Blockstufen die durch Anker in der aufgehenden Wand befestigt (siehe Bild 250) und solchen, die durch Anker einseitig z.B. in die aufgehende Wand eingespannt werden können (siehe Bild 251), unterschieden. Beide Varianten sind hier nur schematisch dargestellt und bedürfen in jedem Fall einer detaillierten Untersuchung.

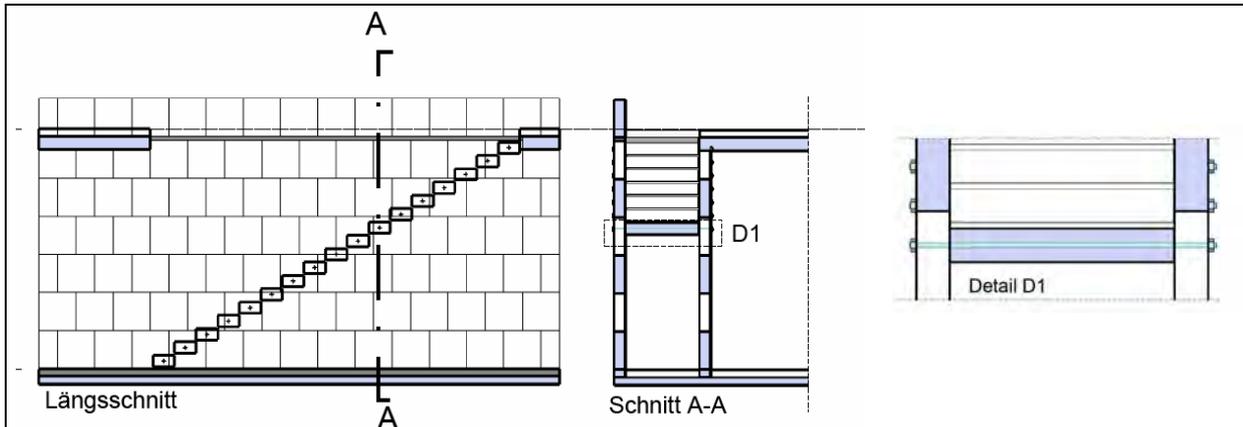


Bild 250 Beispiel einer mittels Stahlankern zwischen zwei Wandscheiben befestigten Treppe aus Blockstufen

Aufgrund der Auskrägung ist bei der einseitig eingespannten Blockstufe in jedem Fall mit einer zusätzlichen „Auflast“ z.B. durch Vorspannung auszugehen. Darüber hinaus birgt die einseitig eingespannte Blockstufe die Möglichkeit, als Spindeltreppe ausgebildet zu werden.

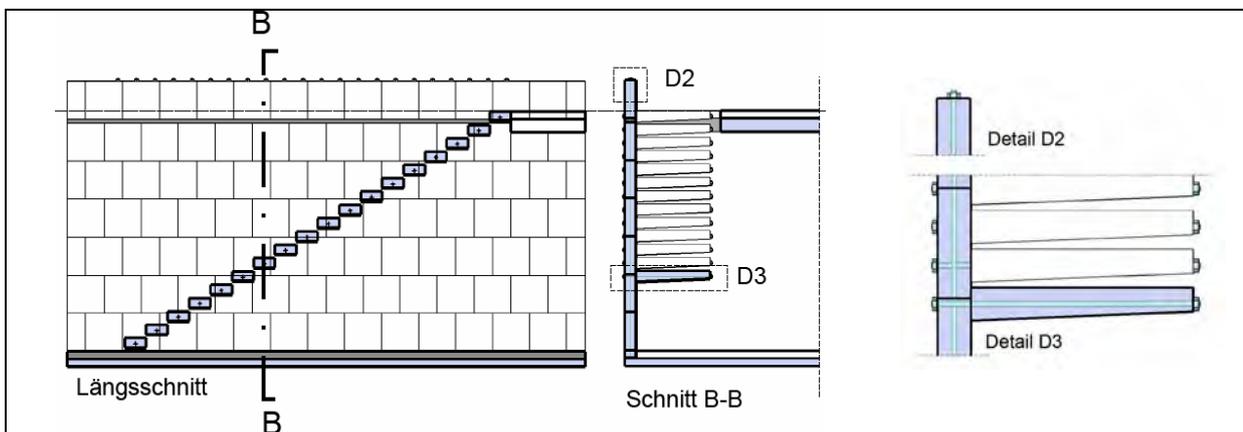


Bild 251 Beispiel einer Treppe mit einseitig eingespannten, auskragenden Blockstufe

Wesentlicher Nachteil der mittels Stahlankern befestigten Blockstufen ist die vom Steigungsverhältnis der Treppe abhängige Anordnung der Befestigungs- bzw. Spannstellen, das zu einer vom Modulmaß der Steine unabhängigen Anordnung der Durchgangslöcher führt. In letzter Konsequenz lassen sich diese Durchgangslöcher nur durch einmessen und bohren vor Ort passgenau ausführen, was dem modularen Grundprinzipien entgegensteht.

Stahlwangentreppen

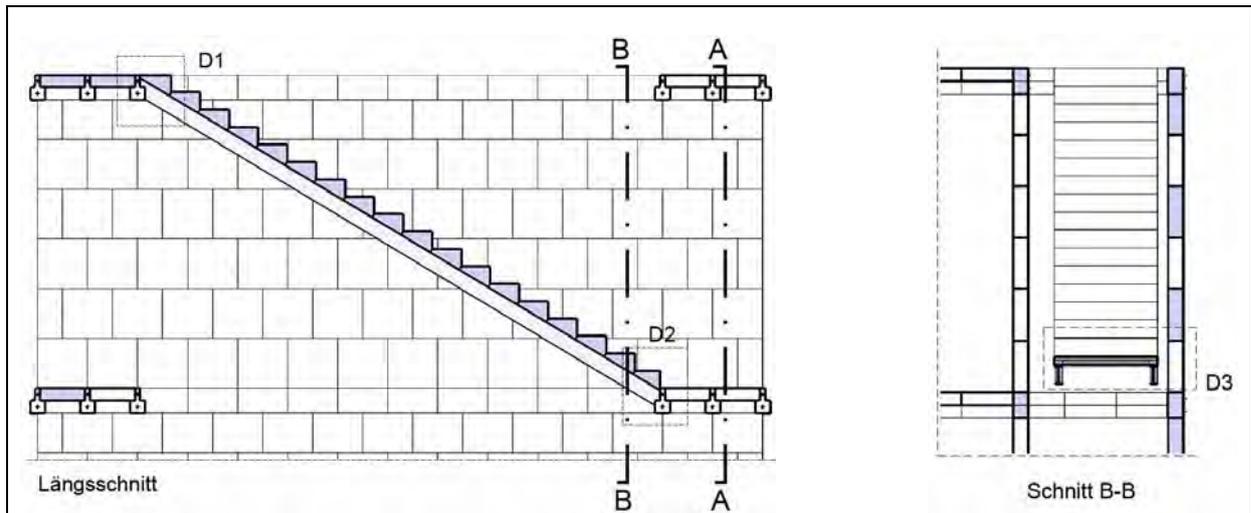


Bild 252 Beispiel einer demontablen Massivtreppe mit auf Stahlwangen auflegten Dreiecks- bzw. Keilstufen.

Stahlwangentreppen mit aufgelegten Dreiecksstufen, sogenannte Keilstufen, sind vorwiegend im Geschosswohnungsbau im Zeitraum von 1870 bis etwa 1950 [2] eingesetzt worden, bevor diese von vorgefertigten Stahlbetontreppen verdrängt wurden. Wesentlicher Vorteil dieser Konstruktionsarten ist dass vom Einzelmodul der Wand unabhängiges Auflagern auf der Decke. Genau wie Stahlbetontreppen spannen Stahlwangentreppen in der Regel frei zwischen den Geschossdecken bzw. zwischen Geschossdecke und Zwischenpodest.

In Bild 252 wird eine Stahlwangentreppe mit aufgelegten Keilstufen aus Kalksandstein zusammen mit den in Abschnitt 7.4 entwickelten Steinbalkendecken dargestellt. Es kann gezeigt werden, dass sich massive Treppen, analog zu den bereits entwickelten Bauelementen Wand und Decke, nach ähnlichen Mustern demontable konstruieren lassen.

Da die vorgestellten Rohbaukonstruktionen der Treppen durch Kalksandstein allein oder in der Kombination von Kalksandstein und Stahl realisiert werden können, wird, wie bereits bei den Überlegungen zur Materialwahl bei den Decken, die Anzahl der am Bau verwendeten Baustoffe konstant und klein gehalten, sodass bei der sortenreinen Demontage der entwickelten Rohbauelemente nur Kalksandsteine und Spannstähle anfallen.

7.8. Entwicklung eines Prototypenhauses

Mit dem Projekt ReMoMaB werden neue Felder betreten, die einer systematischen Erprobung der in der Forschung entwickelten Ansätze unter den realen Bedingungen der Baupraxis bedürfen. Die entwickelten Konstruktionen sollten im Rahmen einer an das Projekt ReMoMaB anschließenden Forschung daher im Maßstab 1:1 aufgebaut, in Ihrer Funktion getestet, demontiert und dann hinsichtlich Ihrer Wiederverwendbarkeit bewertet werden.

Anhand eines Prototypenhauses können des Weiteren auch Untersuchungen auf komplexe bauphysikalische Anforderungen (z.B. anhand eines Blower-Door-Tests) durchgeführt werden. Neben der Errichtung einer Gebäudehülle aus hinsichtlich Wärmedurchgang und Luft-

dichtigkeit sehr leistungsfähigen Bauteilen könnte in Abhängigkeit vom Standort ein Energie- und Betriebsregime entwickelt werden, welches zusammen mit dem architektonischen Entwurf weitere forschungsrelevante Ergebnisse liefern und gleichzeitig die Planer- und Nutzerakzeptanz erhöhen könnte. Die praktische Realisierung ließe auch eine wirtschaftliche Bewertung im konkreten Falle zu und zeigte das Potenzial für eine weitere Optimierung zur Sicherung einer Breitenanwendung auf.

Ziel bei der Errichtung eines demontablen Musterbaus sollte der Nachweis sein, dass die im Projekt ReMoMaB entwickelten Konstruktionen (nach definierter Nutzungsdauer) sich in gewünschter Weise zurückbauen lassen und dann als Baustoff bzw. Bauelemente sofort wieder verwendbar zur Verfügung stehen oder sortenrein in den Materialkreislauf wieder eingebracht werden können. Die Bewertung der Effizienz einer Konstruktion könnte nach entsprechenden theoretischen Überlegungen anhand eines Demontagekoeffizienten (Input / Output) zukünftig in die Nachhaltigkeitsbeurteilung eingeführt werden. Im Ergebnis steht die Optimierung von wiederholbaren, anpassungsfähigen – weil modulare - Konstruktionsweisen sämtlicher Gebäudeteile mit dem Schwerpunkt:

- Die Entwicklung von Konstruktionen, welche zerstörungsfrei demontiert werden können und somit 100% wieder verwendbar sind
- Eine Verbesserung der bauphysikalischen Bauteilkennwerte bei gleichzeitiger Möglichkeit, Einzelschichten der Konstruktion zerstörungsfrei auswechseln zu können
- Messungen hinsichtlich Luftdichtheit und Schallübertragung
- Wirtschaftliche Bewertung und Optimierung bisheriger konstruktiver Lösungsvorschläge

Bei diesem Vorgehen sollte direkt auf die im Projekt ReMoMaB gewonnenen Kenntnisse aufgebaut werden. Im Laufe des bisherigen Forschungsvorhabens gewonnene Erkenntnisse können dabei bereits umgesetzt bzw. präzisiert werden, wie z.B. die Notwendigkeit der Reduzierung des Einsatzes von Stahl und/oder Aluminium. Die Idee zu dem Ansatz beruht auf der Tatsache, dass in den letzten Jahren demontable Gebäude (allerdings nicht in Massivbauweise) zwar entworfen und errichtet [212], jedoch bisher noch nicht unter wissenschaftlichen Aspekten systematisch demontiert worden sind. Diese Gebäude sind bis heute in Nutzung. Daher liegen Aussagen zur Effizienz der realisierten Konstruktionen hinsichtlich ihrer Demontabilität nicht vor. Ausgehend von dieser Zielsetzung ließe sich die Form der wissenschaftlichen Begleitung in drei Abschnitte unterteilen:

- Planung und Realisierung
- Betrieb und Monitoring
- Demontage, Lagerung und Auswertung der Ergebnisse

Anhand eines Prototypenhauses könnten die im Projekt ReMoMaB erarbeiteten Grundprinzipien systematisch angewendet und praktisch erprobt werden. Mit einer Anpassung des Bauteilkatalogs an den konkreten Gebäudeentwurf könnten die Grundprinzipien weiter ausdetailliert und in Zusammenarbeit mit der Industrie die Herstellungsmöglichkeiten untersucht sowie die erarbeiteten Konstruktionen weiterentwickelt werden.

7.8.1. Entwurf eines Musterhauses

Die Entwicklung eines solchen Musterhauses würde den erarbeiteten Grundprinzipien des Projektes ReMoMaB folgen. Ein solches Musterhaus sollte, um dem Anspruch einer Breitenanwendung gerecht zu werden, etwa der Größe eines durchschnittlichen Einfamilienhauses in der Bundesrepublik von ca. 130-140m² entsprechen und alle Nutzungseinheiten für eine vierköpfige Familie vorsehen. Die im Projekt ReMoMaB erarbeiteten Grundprinzipien definieren hierbei einige Restriktionen, die in erster Linie der Modularität geschuldet sind. Die zum Zeitpunkt des Abschlusses des Projektes gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass insbesondere der Spannweite der aus vorgespannten KS-Modulen bestehenden Deckenelementen, im Vergleich zu herkömmlichen Stahlbetondecken, Grenzen gesetzt sind. Andererseits besteht aufgrund der Vorspannung der Wandscheiben die Möglichkeit, die einzelnen Elemente linear freistehend anzuordnen. Hieraus ergeben sich neue architektonische Perspektiven für den Mauerwerksbau, die ihn ästhetisch näher in den Bereich des Stahlbetonbaus und aufgrund der Flexibilität technisch sogar in die Nähe des Skelettbau rücken lassen. Dies wird bei der Betrachtung der Öffnungsgrößen von Türen und Fenstern deutlich. Bild 253 zeigt anhand einer Visualisierung eines der vielen möglichen Erscheinungsbilder eines solchen Musterhauses.

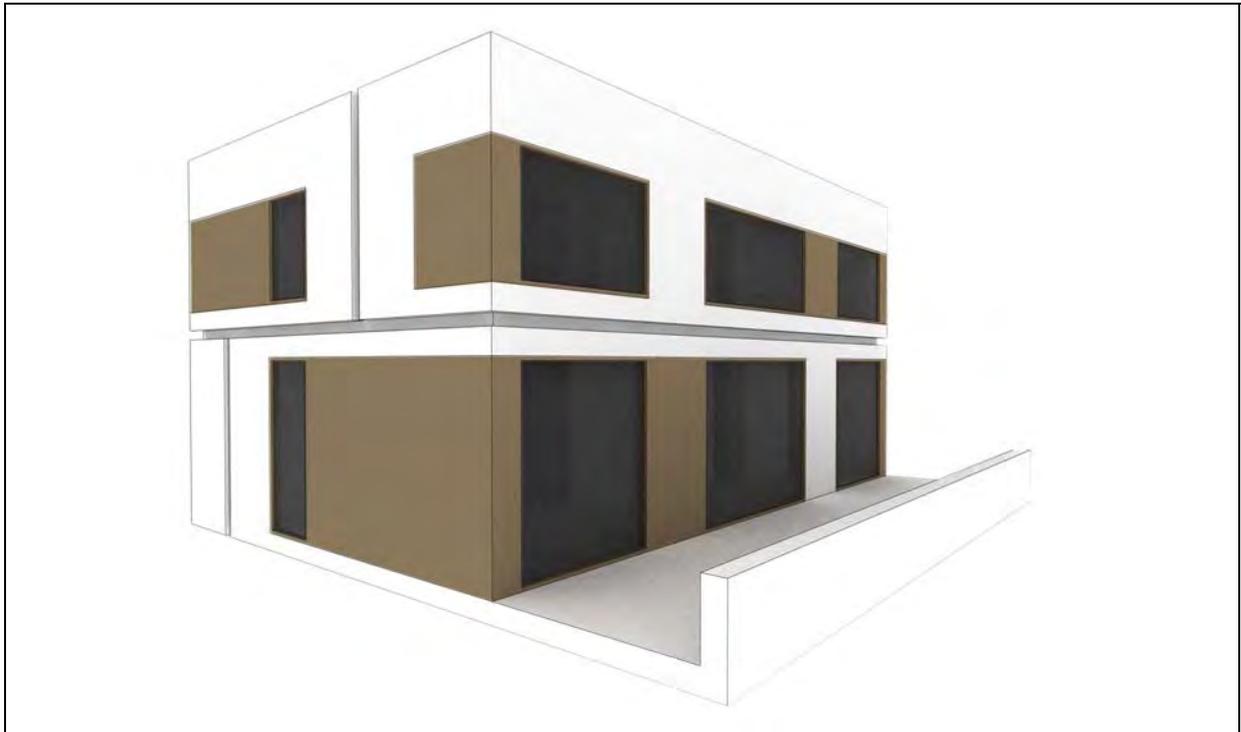


Bild 253 Visualisierung: Mögliches Erscheinungsbild eines Muster- bzw. Prototypenhauses

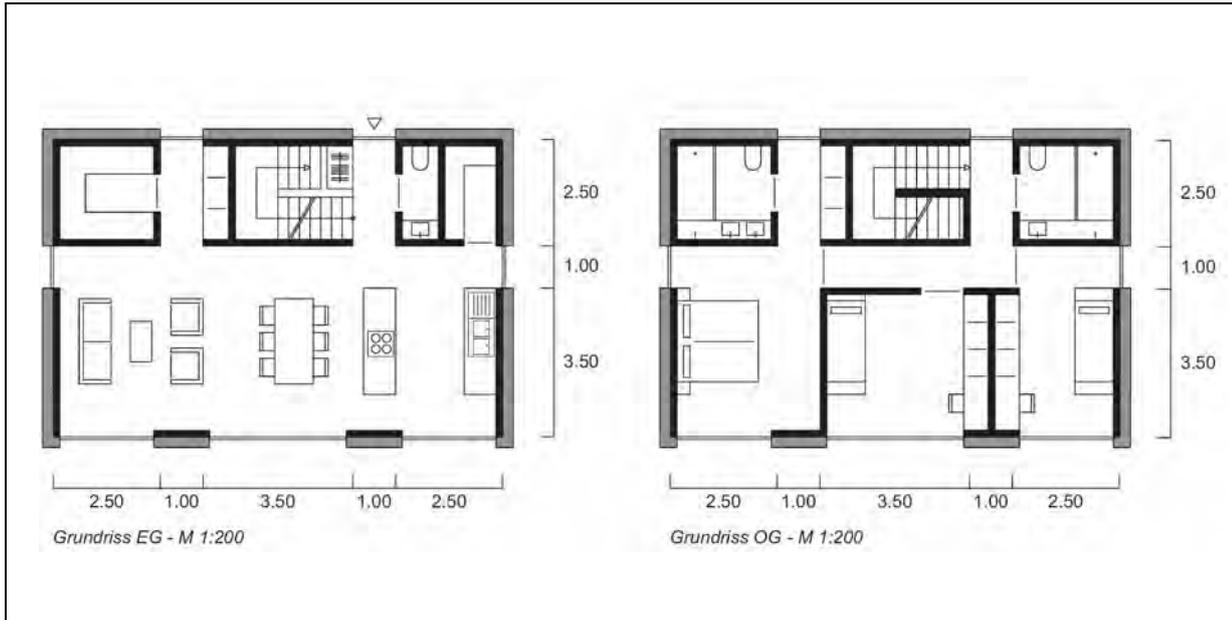


Bild 254 Grundriss des Musterhauses (EG und OG)

7.8.2. Modularität in der Grundrissorganisation

Bild 254 zeigt die Grundrissorganisation im Erdgeschoss und ersten Obergeschoss des Musterhauses. Neben den geometrischen Rahmenbedingungen aus den Grundprinzipien des Projektes ReMoMaB wurde zusätzlich die Anordnung der Räume in modularer Weise untersucht, da hieraus eine erweiterte Flexibilisierung erzielt werden kann. Diese hat einerseits positive Auswirkungen auf die Breitenanwendung, da durch eine Hierarchisierung der Module - von der Größe der Mauersteine über die geeigneten Wandelemente bis hin zu sog. Raummodulen - eine Adaption des Gebäudes auf unterschiedliche örtliche Gegebenheiten (bspw. Gebäudeausrichtung, Bebauungsplan, etc.) ermöglicht wird (siehe. Bild 255).

Durch die, dem Prinzip der Austauschcluster folgende, flexible Wahl der äußeren Fassade-schichten geht eine große Freiheit, was das Erscheinungsbild der Außenhaut (Fassade) und der verbauten Komponenten (zum Beispiel Fensterrahmen etc.) anbelangt, einher. Vergleichbare Flexibilität besteht für die Anforderungen aus den Wünschen der Nutzer im Innern. Im Zusammenspiel mit den erarbeiteten Grundprinzipien zur Integration der TGA ergibt sich so eine räumliche Konfiguration, die die notwendigen gebäudetechnischen Installationen intelligent organisiert und sie bei gleichzeitig hohem Nutzerkomfort in ihrer Menge und Komplexität minimiert. Darüber hinaus ergibt sich durch die modulare Grundrissorganisation die Möglichkeit, die entwickelten Prinzipien in einem nächsten Schritt über die Anwendung im Einfamilienhausbau hinaus anzuwenden. Bild 256 zeigt Grundriss-Varianten für die Typologien Doppelhaus, Reihenhaus und Mehrfamilienhaus (Zwei- und Dreispänner).

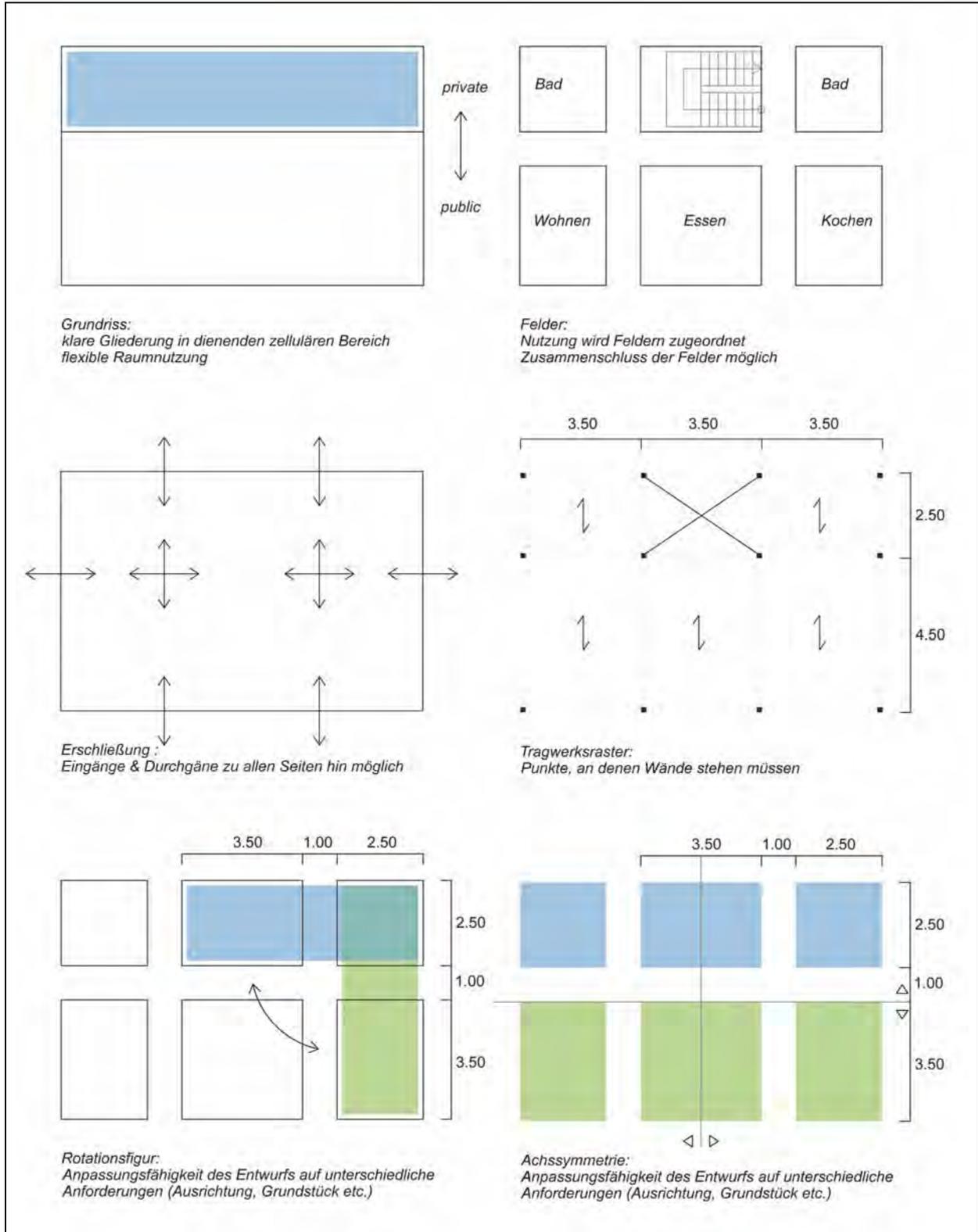


Bild 255 Modularität in der Grundrissorganisation



Bild 256 Erweiterung zu weiteren Gebäudetypologien

8. Ergebnis und Ausblick

8.1. Ergebnis

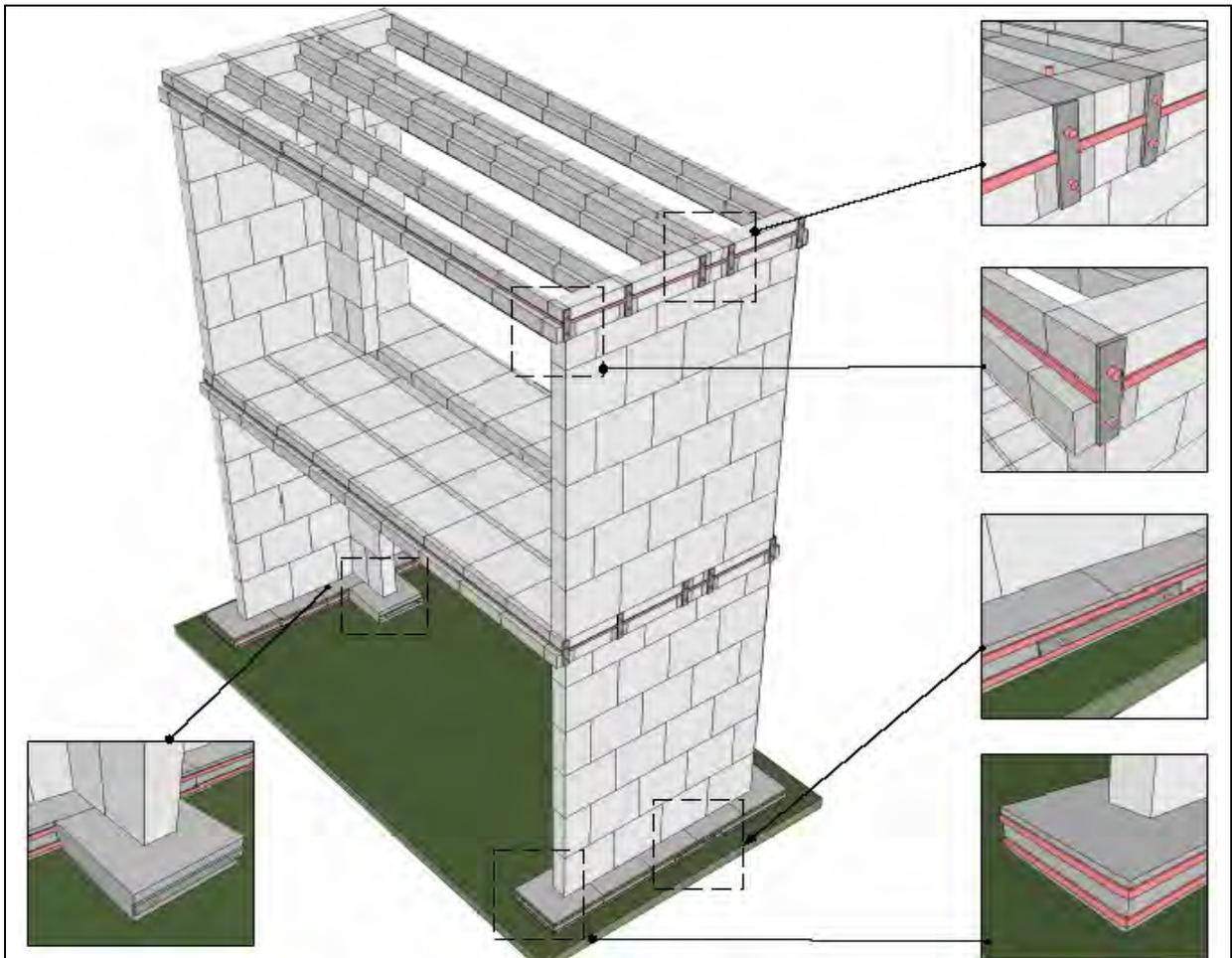


Bild 257 Übertrag auf weitere Gebäudeteile

Mit dem Forschungsprojekt wird ein Beitrag zum Übergang auf ressourcenorientiertes Bauen mit Hilfe vollständig rezyklierbarer Bauweisen am Beispiel des Massivbaus geleistet.

Primäres Ziel ist die Trennung aller Komponenten ohne nennenswerte Energieaufwendungen am Ende des Lebenszyklus eines Bauwerks und die direkte Wiederverwendung oder Rückführung möglichst vieler Bauteile. Mit verbundlos gefügten, unbewehrten, kleinmoduligen Elementen in hoher Präzision aus einem unbewehrten mineralischen Baustoff können bis zum Ausbau hin vollständig demontierbare Massivkonstruktionen hergestellt werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens dienten dazu Kalksandstein-Planelemente aus bzw. nahe dem derzeitigen Sortiment als Ausgangspunkt. Rohbau und Ausbau sind modular aufeinander abgestimmt und alle Verbindungen lösbar. Das Verbundprinzip wurde als kontraproduktiv

vollständig fallen gelassen. Die einzelnen Bauteile und das gesamte Bauwerk lassen sich in kürzester Zeit errichten. Trocknungsphasen sind durch völligen Verzicht auf Nassprozesse – vom Rohbau bis zum Ausbau hin – nicht notwendig. Der Bau wird damit faktisch witterungsunabhängig und von der Zeit der Errichtung her verkürzt. Dem derzeit allgemeinen Trend nach Mauern bzw. Bauen auch bei Temperaturen unter 0° C wird damit Rechnung getragen. In gleicher Weise lässt sich das Bauwerk am Ende des Lebenszyklus sortenrein zerlegen und die Materialien mit einem Minimum an Energieaufwand trennen. Eine kreislaufgerechte Rückführung auf derselben Ebene ist damit möglich, entweder als wiederverwendbares Teil oder durch genauso ressourcenschonenden Einsatz als Stoff in einem erneuten Kreislauf. Die dazu neue Denkweise beim Planen und Konstruieren wird im Rahmen dieses Forschungsvorhabens herausgearbeitet, erläutert und anhand von Beispielen demonstriert.

Die Grundelemente der Bauweise werden in Varianten unvoreingenommen und teilweise stark konzentriert zum Einsatz gebracht, ausgetestet und bewertet. Ein solches stellt u.a. die Vorspannung dar, die bei einer praktischen Umsetzung durchaus von der Einsatzdichte und Sinnfälligkeit her wieder auf ein vertretbares Maß reduziert werden kann.

Einzelne Bauteile wie Decke und Wand wurden vertiefend behandelt. Neben der Entwicklung von demontierbaren Außenwandkonstruktionen, mit getrennt rezyklierbaren Folgeschichten, stellt vor allem die sogenannte Stahl-Stein-Decke eine viel versprechende Innovation dar. Hier konnte die Masse unter Beibehaltung der Spannweite reduziert und somit die Leistungsfähigkeit der Decke erheblich verbessert werden.

Im Übertrag auf weitere Gebäudeteile (siehe Bild 257) wird die Anwendung von Vorspannung als flexibel einsetzbares, lösbares Verbindungsprinzip nachgewiesen.

Um eine baldige Anwendung zu gewährleisten, wurde vorrangig auf bereits isoliert vorhandene und am Markt etablierte Einzellösungen zurückgegriffen und diese in das System eingeführt. Die für die Bauweise notwendigen Modifizierungen halten sich in Grenzen. Die Chancen für eine Marktumsetzung werden dadurch wesentlich erhöht.

Als Ergebnis der Forschungen wurden die Grundprinzipien für vollrezyklierbare modulare Massivbauweisen entwickelt und Schwerpunkte bei Entwurf und baulicher Durchbildung herausgearbeitet.

Der bestehende Gegensatz zwischen einer massiven Verbundbauweise und einer demontier- und rezyklierbaren Bauweise wird durch den Einsatz der Vorspannung aufgehoben. Ein einfaches Trennen und folglich ein effizientes Rezyklieren massiver Bauteile wird durch trocken gefügte, zentrisch vorgespannte Kalksandsteinplanelemente ermöglicht und in Bauteilversuchen nachgewiesen. Die Wirkung bei Biegebeanspruchung senkrecht zur Plattenebene lässt sich durch exzentrische Positionierung der Spannstäbe weiter verbessern.

Insgesamt werden Konstruktionen gezeigt, die zu einer Reduktion der am Bau benötigten Materialarten führen. Bei der vorgeschlagenen Massivbauweise kann auf die Verwendung von Stahlbeton in Form von insitu hergestellten oder vorgefertigten Bauteilen gänzlich verzichtet werden, was zur Folge hat, dass die für Beton notwendigen Abbindezeiten entfallen und nicht lösbarer Verbund vermieden wird. Daraus ergibt sich ein kontinuierlicher Bauprozess ohne produktbedingte Wartezeiten. Ferner folgen Vorteile beim Winterbau, was derzeit als erheblicher Wettbewerbsbonus herausgestellt werden kann.

Für die auf den Rohbau folgenden Schichten, wie auch für den technischen Gebäudeausbau, werden Entwurfsmethoden und Prinzipien für die Konstruktion zusammengestellt, mit de-

nen eine sortenreine Trennung der Baustoffe bzw. Bauteilkomponenten durchgesetzt werden kann.

Die Leistungsfähigkeit der entwickelten Konstruktionen wird anhand von theoretischen und experimentellen Untersuchungen demonstriert und unter Beweis gestellt.

In der Wertung der Ergebnisse sind folgende Punkte zusammenfassend als wesentliche zu nennen:

1. Mit dem Forschungsvorhaben konnte der Nachweis erbracht werden, dass massives Bauen unter der Zielstellung einer **sortenreinen Zerlegung am Ende des Lebenszyklus mit Rückführung oder Wiederverwendung** möglich ist. Dabei wurde vollständig auf das Verbundprinzip unterschiedlicher Baustoffe verzichtet.
2. Die Aussage trifft für alle wesentlichen Bauteile eines **Gebäudes in Wandbauweise** zu.
3. Bei Anwendung der **Trockenfügung** kommt der Elementgeometrie hinsichtlich der **Toleranzen und der Elementfestigkeit** besondere Bedeutung zu. Sie ist mit einem gewissen Verlust der Ausnutzung der Festigkeit verbunden.
4. **Mit dem Prinzip der Vorspannung können die Trockenfügung optimiert und auf Biegung beanspruchte Bauteile ermöglicht werden.** Es setzt eine gewisse Festigkeit des (Stein- bzw.) Elementmaterials voraus. Spannkraftverluste infolge Kriechens lassen sich kompensieren. Bei der praktischen Umsetzung müssen in Deutschland vorhandenen Aversionen noch abgebaut werden.
5. Derzeit ist bei der Verbindung zwischen Roh- und Ausbaukonstruktion der Schichtenlösung der Vorrang gegenüber der Elementlösung zu geben.
6. Für Ausbau und Technische Gebäudeausrüstung sind Systemkomponenten auf dem Markt **weitestgehend vorhanden, die nur einer** geringfügigen Anpassungen in Bezug auf Roh- und Ausbau bedürfen.

8.2. Ausblick

Die im Projekt ReMoMaB erarbeiteten Grundsätze, Methoden und Lösungen decken einen wichtigen Teil der gegenwärtigen Herausforderungen im Bauwesen, die durch das Ziel eines effizienten Umgangs mit den natürlichen Ressourcen definiert sind, ab. Die Ressourcenschonung ist im Laufe der Projektbearbeitung inzwischen in die neue Bauproduktenrichtlinie der Europäischen Kommission als grundlegende Anforderung an Gebäude und bauliche Anlagen mit Nr. 7 [128] aufgenommen worden, was die Bedeutung des Projektthemas unterstreicht.

Folgende Schritte erscheinen im Hinblick auf eine praktische Umsetzung und Markteinführung von der technischen Seite her wichtig:

1. Praktische Erprobung der Grundprinzipien anhand eines **Experimentalbaus** zur Verifizierung und Ermittlung kalkulatorischer Grundlagen mit Reduzierung des Vorspannprinzips auf das statisch erforderliche Minimum sowie Durchlauf der Montage und der Demontagephase.
2. Vollständige Durcharbeitung aller Problemstellungen in Ausführungsreife im Sinne eines **Planungskataloges**.
3. Optimierung des Trockenfüßprinzips durch weitere **Reduzierung der Toleranzen** und alternativ durch Einsatz einer **auf- und abrollbaren Fuge**.
4. Durcharbeitung von Biegeproblemen unter dem Gesichtspunkt der Aufwandsreduzierung und Erlangung der **praktischen Umsetzungsreife** (Decke, Wand, Fundament, Treppe)
5. Der **Schichtenlösung** ist weiterhin der Vorrang zu geben; die Luftdichtheitslösungen bedürfen ebenso wie die der Feuchtigkeitsabdichtung einer weiteren Ausformung, Erprobung und Verfeinerung.
6. Die **Anpassung vorhandener Systemkomponenten** an die Anforderungen einer vollständig demontierbaren und rezyklierbaren Massivbauweise ist durchzuführen und exemplarisch zu demonstrieren.

Kaufmännische bzw. wirtschaftliche Aspekte für eine Weiterbearbeitung der Thematik und zur Vorbereitung der Markteinführung sind:

- Entwicklung von **Rücknahmesystemen** für mineralische Baustoffe entsprechend der Produktverantwortung
- Entwicklung von **Marktstrategien für die Wiederverwendung** von Bauteilen und Baustoffen
- Entwicklung von **Baufinanzierungs- die Hypothekensystemen**, die die Wiederverwendbarkeit der verbauten Materialien angemessen berücksichtigen
- Entwicklung von **Bauteil- und Baustoffkreislaufsystemen auf kommunaler Ebene** (Wohnbaugesellschaften)
- Möglichkeiten und Grenzen der **Gebäudeanpassung** an veränderte Nutzungsanforderungen

Als kommunikative Aspekte in Vorbereitung einer Praxisüberführung sind anzusehen:

- Die Ausarbeitung eines **Handbuchs demontabler Hochbaukonstruktionen**, mit mustergültigen Konstruktionsbeispielen und deren Einführung
 - in den allgemeinen Lehr- und Forschungsbetrieb

- bei den Ingenieur- und Architektenkammern
- Schaffung einer **Plattform** für den Austausch von praktischen Erfahrungen beim Umgang mit Demontage- und Recyclingverfahren
- Herausarbeitung der **Vorteile** der vollständig rezyklierbaren Massivbauweise und Propagierung derselben

Bauordnungsrechtliche Aspekte für eine Einführung der Bauweise und Ermöglichung einer Breitenanwendung sind:

- Reaktion auf die Umsetzung der grundlegenden **Anforderung No. 7 der europäischen Bauproduktenverordnung [128]**
- Schaffung gesetzlicher und verordnungsrechtlicher **Rahmenbedingungen**
 - Anpassung des Baurechts
 - Anpassung der HOAI
 - Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung von Detaillösungen soweit erforderlich

Die Idee und das Anliegen können und sollten durch gewisse Anreize gefördert werden, um schrittweise zu einer Marktakzeptanz zu kommen, da wirtschaftliche Vorteile derzeit (noch) nicht auszuweisen sind.



Literaturverzeichnis

- [1] A resource-efficient Europe – Flagship initiative under the Europe 2020 Strategy; European Commission (COM (2011) 21); Brüssel, 26.01.2011.
- [2] Ahnert, R.: Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 Band 1 Gründungen, Wände, Decken, Dachtragwerke, 3. Auflage 1991, Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin
- [3] Ahnert, R.: Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 Band 1 Gründungen, Wände, Decken, Dachtragwerke, 3. Auflage 1991, Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin
- [4] Arbeitsentwurf des BMU für ein Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) – Entwurf – V.2.1 – Stand 07.04.2011.
- [5] Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser – Phase II: 2006-2008:Protokollband 16: Wärmebrückenfreies Konstruieren; Herg.: Feist, W. Passivhaus Institut, 8. Auflage, Darmstadt Januar 2009
- [6] Arbeitskreis Kostengünstige Passivhäuser – Phase IV: 2006-2008:Protokollband 35: Wärmebrücken und Tragwerksplanung – die Grenzen des wärmebrückenfreien Konstruierens. Hrsg. W. Feist, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007.
- [7] Arndt H.: *Wärmeschutz und Feuchte in der Praxis, 2.Auflage*, Verlag Bauwesen: Berlin 2002
- [8] Bagheri, H.: *Prestressed Hybrids Of AAC And HPC*, thesis, Royal Institute Of Technology, Stockholm 2006
- [9] Baukonstruktion und Statische Systeme. Stuttgart: ILEK, Universität Stuttgart [Script zur Vorlesung], 2010.
- [10] Brameshuber, W. & Graubner, C.-A. & Schmidt, U. & Richter, L.: *Rationelle Herstellung von zweischaligem Mauerwerk durch Linienverankerung von Vormauerschalen*; TU Darmstadt/Ibac Aachen 2008. Gefördert von der Forschungsinitiative Zukunft Bau BBR Bonn.
- [11] Brand, S.: *How Buildings Learn*. New York: Viking Penguin, 1994.
- [12] Brenner, V.: *Recyclinggerechtes Konstruieren- Konzepte für eine Abfallfreie Konstruktionsweise im Bauwesen*, Universität Stuttgart; Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren, 2010.
- [13] Brenner. V & Altinisik L.: *Festlegung und Herleitung der technischen Kennwerte im ReMoMaB*. Aktennotiz GT0944 Projekt ReMoMaB Stuttgart, 23.5.2011
- [14] Brenner. V & Altinisik L.: *Integration der TGA, LCA und thermische Bauphysik*. Aktennotiz GT0944 Projekt ReMoMaB Stuttgart, 27.04.2011

- [15] Brenner, V & Altinisik L.: *Wandaufbauten Dämmstoffe und Materialstärken* Aktennotiz GT0944 Projekt ReMoMaB Stuttgart, 23.05.2011
- [16] Budelmann, H.; Gunkler, E.; Wichmann, H.-J.; Husemann, U.: Gebäudeaussteifung mittels vorgespannter Dünn- und „Normalbett“-Mauertafeln. *Mauerwerk* 10 (2006), Heft 1
- [17] Budelmann, H.; Gunkler, E.; Wigger, H.: Untersuchungen zum Biegedrucktragverhalten von vorgespanntem Kalksandstein-Planstein-Mauerwerk. *Mauerwerk* 7 (2003) H. 5, S. 150–157.
- [18] Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Dritter Bericht über Schäden an Gebäuden, 1995
- [19] Bundesverband Kalksandsteinindustrie e.V. (Hrsg.): *Kalksandstein. Das Lexikon: Bauen und Wohnen*. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2010.
- [20] Cziesielski, E et al.: *Lehrbuch der Hochbaukonstruktionen*, Teubner Stuttgart, 3. Auflage, 1997
- [21] Deplazes, A.: *Architektur Konstruieren: Vom Rohmaterial zum Bauwerk. Ein Handbuch*. 3. erweiterte Auflage, Birkhäuser Basel, Boston, Berlin 2008.
- [22] Deutsches Dachdeckerhandwerk Regelwerk, Hrsg. Zentralverband des Deutschen Dachdeckerhandwerks Fachverband Dach-, Wand- und Abdichtungstechnik e.V. Verlagsgesellschaft Rudolf Müller, 12.2011
- [23] DIN 1026-1:2009-09: Warmgewalzter U-Profilstahl - Teil 1: U-Profilstahl mit geneigten Flanschflächen: Maße, Masse und statische Werte, Ausgabe 2009-09.
- [24] DIN 1026-2: 2002-10: Warmgewalzter U-Profilstahl - Teil 2: U-Profilstahl mit parallelen Flanschflächen; Maße, Masse und statische Werte, Deutsche Norm, Ausgabe: 2002-10
- [25] DIN 1048:1991-06: Prüfverfahren für Beton - Teil 5: Festbeton, gesondert hergestellte Probekörper, Ausgabe 1991-06
- [26] DIN 1053-1:1996-11: Mauerwerk – Teil 1: Berechnung und Ausführung. NABau im DIN, Berlin 1996.
- [27] DIN 1053-100:2007-09: Mauerwerk – Teil 100: Berechnung auf der Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes. NABau im DIN, Berlin 2007.
- [28] DIN 1054:2010-12: Baugrund, Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau, Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1; Deutsche Fassung.
- [29] DIN 18000: Modulordnung im Bauwesen. 1984-05.
- [30] DIN 18065-09.2009: Gebäudetreppen, Definitionen, Maßregeln, Hauptmaße
- [31] DIN 18195: 2000-08: Bauwerksabdichtungen.

- [32] DIN 18195-1:2000-08: Bauwerksabdichtungen – Teil 1: Grundsätze, Definitionen, Zuordnung der Abdichtung. NABau im DIN, Berlin 2000.
- [33] DIN 18336:2012-09: VOB Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen, Teil C: Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen, Abdichtungsarbeiten.
- [34] DIN 276:2008-12: Kosten im Bauwesen. NABau im DIN, Berlin 2008.
- [35] DIN 4017:2006-03: Baugrund, Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flachgründungen.
- [36] DIN 4018:1974-09: Baugrund, Berechnung der Sohldruckverteilung unter Flächengründungen.
- [37] DIN 4095:1990-06: Baugrund; Dränung zum Schutz baulicher Anlagen; Planung, Bemessung und Ausführung.
- [38] DIN 4102-22:2004-11: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 22: Anwendungsnorm zu DIN 4102-4 auf der Bemessungsbasis von Teilsicherheitsbeiwerten. NABau im DIN, Berlin 2004.
- [39] DIN 4102-4:1994-03: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen; Zusammenstellung und Anwendung klassifizierter Baustoffe und Bauteile. NABau im DIN, Berlin 1994.
- [40] DIN 4108-2:2003-07: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 2: Mindestanforderung an den Wärmeschutz. NABau im DIN, Berlin 2003.
- [41] DIN 4108-3:2001-07: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung. NABau im DIN, Berlin 2001.
- [42] DIN 4109:1989-11: Schallschutz im Hochbau; Anforderungen und Nachweise. NABau im DIN, Berlin 1989.
- [43] DIN 52128:1977-03: Bitumendachbahnen mit Rohfilzeinlage; Begriff, Bezeichnung, Anforderungen.
- [44] DIN EN 10279: 2000-03: Warmgewalzter U-Profilstahl - Grenzabmaße, Formtoleranzen und Grenzabweichungen der Masse Europäische Norm, Ausgabe: 2000-03
- [45] DIN EN 1052-1:1998-12: Prüfverfahren für Mauersteine Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit, Deutsche Fassung, Ausgabe 1998-12
- [46] DIN EN 1996-1-1/NA:2012-01 Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. Nationaler Anhang NABau im DIN e.V.: Berlin 2012
- [47] DIN EN 1996-1-1:2010-12 Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für bewehrtes und unbewehrtes Mauerwerk. NABau im DIN e.V.: Berlin 2010

- [48] DIN EN 1997:2009-09: Eurocode 7: Berechnung und Bemessung in der Geotechnik; Deutsche Fassung.
- [49] DIN EN 771-2:2005-05: Festlegungen für Mauersteine - Teil 2: Kalksandsteine; Deutsche Fassung, Ausgabe 2005-05
- [50] DIN EN 772-1:2011-07: Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 1: Bestimmung der Druckfestigkeit; Deutsche Fassung, Ausgabe 2005-05
- [51] DIN EN 772-16:2011-07: Festlegungen für Mauersteine Teil 2: Kalksandsteine Deutsche Fassung, Ausgabe 2011-07
- [52] DIN EN 772-20:2005-05: Prüfverfahren für Mauersteine Teil 20: Bestimmung der Ebenheit von Mauersteinen, Deutsche Fassung, Ausgabe 2005-05
- [53] Duden: Das Fremdwörterbuch. Mannheim: Bibliographisches Institut Mannheim, 1982.
- [54] DYWIDAG Geotechnische Systeme, DYWIDAG-Stabanker – Geräteübersicht, Stand 01.08.2011
- [55] Ehrenstein, G. W. (Hrsg.): Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik. München: Carl Hanser Verlag, 2004.
- [56] EnEV 2009: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. 2009-10.
- [57] Esser, R.: Megaschritt Modularisierung. Modulare Karosseriestrukturen. Kalte Fabrik. Dezentrale Fertigung. LIZA. 2005. (www.ilipt.org/public/publications).
- [58] European Organisation for Technical Approvals (EOTA): *Leitlinie für die Europäische Technische Zulassung von Spannsystemen zur Vorspannung von Tragwerken*, ETAG 13 Juni 2002
- [59] Faltlhauser, M.: *Nadelanker bei unverbessertem, mehrschaligen Mauerwerk*. Dissertation, TH Karlsruhe, 2004
- [60] Fechner, O.: Analyse der Rolle der Architekten und Ingenieure in Abhängigkeit von unterschiedlichen Auftraggebermodellen. Weimar: VDG, 2009.
- [61] Fischer, H; Weißgerber, B.: Treppen - funktionell, nutzerfreundlich, sicher. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund 2006
- [62] Fischer, M.: Steineisendecken im Deutschen Reich 1892-1925. Dissertation, Tu Cottbus, 2008
- [63] Francis, A.J.; Horman, C.B. & Jerrems, L.E.: The effect of joint thickness and other factors on the compressive strength of brickwork. In: *Proc. 2nd IBMaC*, Stoke-on-Trent 1970
- [64] Frick, O.; Knöll; Neumann, D.; Weinbrenner U.: Baukonstruktionslehre Teil1, 30 Auflage, B.G. Teuber Stuttgart 1992

- [65] Gläser, C.: *Lasteinleitung von Vorspannkraften in den Beton unter Berücksichtigung der Ausbildung der Verankerungskomponenten*. 45. Forschungskolloquium des DAfStb, 100. Jahrgang Beton- und Stahlbetonbau, 2005
- [66] Glitza, H.: *Trockenmauerwerk, Stand und Entwicklungstendenzen*. Bundes-Bau-Blatt Heft 10 Oktober 1991.
- [67] González, A. C. & Gunkler, E. & Budelmann H. & Husemann U.: *Vorgefertigte Mauertafeln aus Kalksandstein*, In: *Mauerwerk* 10 (2006), S. 14 bis S.20. Hrsg. Ernst und Sohn, Berlin
- [68] Goris, A.; Heisel J.P.: *Schneider Bautabellen für Architekten*, 19. (2010) Auflage, Werner Verlag
- [69] Graubner, C.-A.: *Nachhaltigkeit im Bauwesen. Grundlagen - Instrumente - Beispiele*. Ernst & Sohn, Berlin 2003.
- [70] Graubner, C.-A.; Knauff, A.: *Ökobilanzstudie Gegenüberstellung Massivhaus Holzelementbauweise: Überprüfung der vorliegenden Studie Gegenüberstellung an einem KfW-Energiesparhaus 40 auf Erfüllung der Anforderungen nach KfW-Effizienzhaus 55 auf Basis der EnEV 2009 Forschungsbericht F01-10-2010 Technische Universität Darmstadt Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie Institut für Massivbau, Februar 2010*
- [71] Graubner, C.-A.; Ritter, F.: *Analyse der Trennbarkeit von Materialschichten hybrider Innenbauteile bei Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen – Erstellung einer praxisnahen Datenbank für die Nachhaltigkeitsbeurteilung, Abschlussbericht zum Forschungsprojekt F03-9-2010, Technische Universität Darmstadt Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie Institut für Massivbau, August 2010*
- [72] Graubner, C.-A.; Schneider, C.: *„Deutsches Gütesiegel Nachhaltiges Bauen“ - Herausforderung für den Mauerwerksbau*. *Mauerwerk* 12 (2008) H. 5, S. 224–234.
- [73] Greiner, P.; Mayer, P.; Stark, K.: *Baubetriebslehre – Projektmanagement*. 2., korrigierte Auflage 08/2002, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Wiesbaden 2002.
- [74] Gunkler, E.: *Rechnerische Beurteilung der Tragfähigkeit vorgespannter Mauerwerksbalken*, Gutachten, GA 02/08-GU/Da, Detmold 03.2008
- [75] Gunkler, E.: *Vorgespanntes Mauerwerk*, In: *Mauerwerk-Kalender* 25 (2000), S. 333 bis S.359. Hrsg. Ernst und Sohn, Berlin.
- [76] Hesse, S.; Malisa, V. (Hrsg.): *Taschenbuch Robotik – Montage – Handhabung*. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2010.
- [77] HHR Hochausrichtlinie 04.2008: *Muster- Hochausrichtlinie*
- [78] Hilsdorf, H.: *Untersuchungen über die Grundlagen der Mauerwerksfestigkeit*. Materialprüfungsamt für das Bauwesen der TH München, 1965
- [79] Hilsdorf, H.K.: *An Investigation into the Failure Mechanism of Brick Masonry Loaded in Axial Compression*. In: *Proc. of the International Conference of Masonry Structural*

Systems, Designing, Engineering and Constructing with Masonry Products, ed. F.B. Johnson: Houston, Texas 1969, 34-41

- [80] Hilsdorf, H.K.: *Untersuchungen über die Grundlagen der Mauerwerksfestigkeit*. Materialprüfungsamt für das Bauwesen der Technischen Hochschule München Bericht Nr. 40. München 1965
- [81] Hirsch, R.; Böttcher, A.: Mauerwerksprodukte mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung. In: Mauerwerk-Kalender 31 (2006), S. 37–170. Hrsg. H.-J. Irmshler, W. Jäger u. P. Schubert. Ernst & Sohn, Berlin.
- [82] Holzabsatzfonds.: Holzkonstruktionen in Mischbauweise, Holzbau Handbuch, Reihe 1, Teil 1 Folge 5, September 2006
- [83] Hösel, G.: Wiederverwendung von Abfällen, Umweltschutz, Nr. 19, S. 14-19, 1972.
- [84] Jäger, W.: Konstruktionsregeln für Mauerwerk - Teil 2: Anschlussdetails. Mauerwerk-Kalender 31 (2006). Ed. P. Funk. Ernst und Sohn: Berlin, 231-365.
- [85] Jäger, W.; Pfeifer, G.: Konstruktionsregeln für Mauerwerk - Teil1: Mauerwerksarten, Verbände und Maßordnung. In: Mauerwerk-Kalender 30 (2005), S. 233–264. Hrsg. H.-J. Irmshler, W. Jäger u. P. Schubert. Ernst & Sohn, Berlin.
- [86] Jäger, W.; Schöps, P.: Neue Erkenntnisse zum Schubversagen. Mauerwerk, 9 (2005) 3, S.93–98.
- [87] Kirtschig, K.: Baukostendämpfung durch Ermittlung des Einflusses der Güte der Ausführung auf die Druckfestigkeit von Mauerwerk. *Forschungsbericht F2141, Institut für Baustoffkunde und Materialprüfung der Universität Hannover*, 1989
- [88] Kloft H.: Kreislaufgerechtes Bauen, Zusammenhänge, Auswirkungen und Perspektiven im Mauerwerksbau, In: Das Mauerwerk, Hrsg. Ernst und Sohn, Berlin 01/ 97, Heft 2, S. 96 - 103
- [89] Knauf.: Fachwissen Trockenbau, Knauf Bauprodukte GmbH & Co. KG, Stand 10.2010
- [90] König, G.; Marzahn, G.: Forschungsbericht: Zum Tragverhalten von Trockenmauerwerk unter zentrischem Druck. In: Mauerwerk-Kalender 25 (2000), S. 925–930. Hrsg. H.-J. Irmshler u. P. Schubert. Ernst & Sohn, Berlin.
- [91] König, H.; Kohler, N.; Kreißig, J.; Lützkendorf, T.: Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung: Grundlagen - Berechnung - Planungswerkzeuge. Ins. F. Int. Architektur, 2009.
- [92] Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG) vom 27.September 1994 (BGBl. I S. 2705). zuletzt geändert durch Artikel 8 des Gesetzes vom 11.August 2010 (BGBl. I S. 1163).
- [93] Kuhnhenne, M.: Energetische Qualität von Gebäudehüllen in Stahl-Sandwichbauweise, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen Fakultät für Bauingenieurwesen, Aachen 2009

- [94] Langer, P.: Trockenmauerwerk, In: Bautechnik- 69 (1992) Heft 6, S. 300 bis 304. Hrsg. Ernst und Sohn, Berlin.
- [95] Lenz, B.; Schreiber, J.; Stark, T.: Nachhaltige Gebäudetechnik: Nachhaltige Sanitärtechnik - Heizung, Lüftung, Klimatisierung, Sanierungskonzepte. Ins. F. Int. Architektur, 2010.
- [96] Leonhardt 1973 in Ploch, J.: *Zur Definition und zum Sicherheitskonzept der Vorspannung*. Dissertation Universität Stuttgart, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart, 2004
- [97] Leufgens, N.; Waldmann, D.; Maas, S.; Zürbes, A.: Entwicklung von hybriden Wärmedämmsteinen aus LAC. Mauerwerk 14 (2010) H. 1, S. 10–18.
- [98] Löfflad, H.: Das globalrecyclingfähige Haus. Dissertation, TU Eindhoven. Eindhoven 2002.
- [99] Mann, W.: Zug- und Biegezugfestigkeit von Mauerwerk – Grundlagen und Versuchsergebnisse. In: Mauerwerk-Kalender 1992, S. 601-607.
- [100] Mann, W.; König, G. und Ötes, A.: Versuche zum Verhalten von Mauerwerk unter seismischer Beanspruchung. In: Mauerwerk-Kalender 14 (1998)S. 483–488
- [101] Mann, W.; Müller, H.: Nachrechnung der Wandversuche mit einem erweiterten Schubbruchmodell unter Berücksichtigung der Spannungen in den Stoßfugen, Anlage 2 zum Forschungsbericht "Untersuchungen zum Tragverhalten von Mauerwerksbauten unter Erdbebeneinwirkung", Forschungsbericht IV/1-5-488/86. TH Darmstadt, 1986
- [102] Mann, W.; Müller, H.: Schubtragfähigkeit von Mauerwerk. In: Mauerwerk-Kalender 3 (1978), S 35– 65
- [103] Mann, W.; Müller, H: Bruchkriterien für querkraftbeanspruchtes Mauerwerk und ihre Anwendung auf gemauerte Windscheiben. In Die Bautechnik 50 (1973) S. 421–425,
- [104] Marzahn, G.: Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von vorgespanntem Trockenmauerwerk. Dissertation, Universität Leipzig. Leipzig 2000.
- [105] Marzahn, G.: Vorgespanntes Trockenmauerwerk, Verlag B.G. Teubner GmbH Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden, 2000.
- [106] Mauerwerksbau Skript zur Vorlesung, TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung Prof. Dr.-Ing. Jäger, Dresden 2011
- [107] MBO Musterbauordnung 10.2008: Landesbauministerkonferenz
- [108] McKean J.: Learning from Segal, Birkhäuser Verlag, Basel 1989
- [109] Merkblatt Info Nr. 3.2: Bauen im Lebenszyklus, Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Januar 2009.

- [110] Meyer, A.: Zum Tragverhalten von Injektionsdübeln in Mauerwerk, Dissertation, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften Universität Stuttgart, Stuttgart 2005
- [111] Müller, A.; Kurkowski, H.; Kohler, G.; Eden, W.: Recycling von Mauerwerk (AiF). In: Eis, A.; Vassilev, T.: Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau. In: Mauerwerk-Kalender 35 (2010), S. 478. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin.
- [112] Musterbauordnung - MBO, Fassung November 2002, zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom Oktober 2008. Bauministerkonferenz (ARGEBAU).
- [113] Neubert, H.: Simultan lösbare Verbindungen zur Rationalisierung in der Feinwerktechnik. Dissertation, TU Dresden, Fakultät Elektrotechnik, Institut für Feinwerktechnik. Dresden 2000.
- [114] Neumann, D.; Weinbrenner, U.; Hestermann, U.; Rongen, L.: Frick/Knöll: Baukonstruktionslehre 1. Wiesbaden: B. G. Teubner, 2006.
- [115] Ökobilanzstudie - Gegenüberstellung Massivhaus, Holzbauweise Kurzfassung der Forschungsberichte Z04-8-2008 und F01-10-2010, April 2011, www.massiv-mein-haus.de, Stand 26.07.2011
- [116] Oswald, R.: Abdichtungen in Mauerwerk: Kalksandstein Bauseminar 2009
- [117] Oswald, R.: Grundsätze und praktische Hinweise zur Vermeidung von Streit über die Bauqualität Fachtagung des Handwerkskammer-Bildungszentrums Münster, Münster 13.2.2007
- [118] Oswald, R.: Konstruktionsregeln für Mauerwerk Teil4 : Abdichten von erdberührtem Mauerwerk. Mauerwerk-Kalender 33 (2008). Ed. P. Funk. Ernst und Sohn: Berlin, 353-371.
- [119] Oswald, R.: Mängel, Schäden, Streitigkeiten: typische Schwachstellen bei Außenwänden, Deutsch Verlagsanstalt: Stuttgart 1997
- [120] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Berlin: Springer, 2006.
- [121] Penev, K.: Design of Disassembly Systems. Eindhoven: TU Eindhoven [Dissertation], 1996.
- [122] Pistohl, W.: Handbuch der Gebäudetechnik 1: Allgemeines/Sanitär /Elektro /Gas, 7. Aufl. Werner, Neuwied, 2009.
- [123] Ploch, J.: *Zur Definition und zum Sicherheitskonzept der Vorspannung*. Dissertation Universität Stuttgart, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart, 2004
- [124] Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Heidelberg: Springer, 2008.

- [125] Prochiner, F.: Homes 24 - Zukunftsorientierte Fertigungs- und Montagekonzepte im industriellen Wohnungsbau. Dissertation, TU München, München 2006.
- [126] Radenberg, M.; Kollar, J.; Kurkowski, H.; Eden, W.: Recycling von Kalksandsteinmaterial für Tragschichten ohne Bindemittel im Straßenbau. In: Eis, A.; Vassilev, T.: Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau. In: Mauerwerk-Kalender 35 (2010), S. 480. Hrsg. W. Jäger. Ernst & Sohn, Berlin.
- [127] RAL-Gütegemeinschaft Fenster und Haustüren e.V.: Leitfaden zur Planung und Ausführung der Montage von Fenstern und Haustüren, Frankfurt am Main, 2010
- [128] Regulation (EU) No. 305/2011 Of The European Parliament And Of The Council, 09. March 2011, laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC
- [129] Reichel, S.: *The Effect of Chases and Recesses on the Load Bearing Capacity of Masonry*, Poster, 8th International Masonry Conference (IMC8), Dresden, 04 -07.07.2010
- [130] Rentz, O.; Seemann, A.; Raess, C.; Schultmann, F.: Entwicklung optimierter Rückbau- und Recyclingverfahren durch Kopplung von Gebäudedemontage und Baustoffaufbereitung. Enderbericht des gleichnamigen Forschungsvorhabens im Auftrag der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück 2003.
- [131] Richter, P.; Maak, N.: Die Burka fürs Haus. Erschienen in: Frankfurter Allgemeine Sonntagszeitung, am 16.11.2010.
- [132] Richtlinie 2000/53/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18.09.2000 über Altfahrzeuge, Stand: 25.02.2010.
- [133] Richtlinie 2002/96/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 27.01.2003 über Elektro- und Elektronikaltgeräte, Stand: 27.01.2003.
- [134] Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien; Stand 12.12.2008
- [135] Rickenstorff, G.; Berndt, E.: Tragwerke für Hochbauten, Dritte, überarbeitete Auflage, BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1998
- [136] Sächsische Bauordnung (SächsBO), rechtsbereinigt vom 05.06.2010.
- [137] SAS Stabspannverfahren: *Stabspannsystem für das Vorspannen von Tragwerken, intern, mit und ohne Verbund sowie extern*. Stahlwerk Annahütte Max Aichler GmbH & Co. KG vom 15.12.2011
- [138] SchBauRI Schulbaurichtlinie 12.2009: Richtlinie für bauaufsichtliche Anforderungen an Schulen, Landesrecht
- [139] Scheidig K.: Rechnerischgestützte Erfassung von Maßabweichungen in Baukonstruktionen,
- [140] Schellbach & Zumbroich: *Geschossweise Verankerung der Vorsatzschale von zweischaligem Mauerwerk*. Forschungsbericht des Instituts für Ziegelforschung F 1969.

- Essen. 1984. gefördert vom Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau.
- [141] Schlaich 1990 in Ploch, J.: *Zur Definition und zum Sicherheitskonzept der Vorspannung*. Dissertation Universität Stuttgart, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren der Universität Stuttgart, 2004
- [142] Schmidt-Kretschmer, M.: Untersuchungen an recyclingunterstützenden Bauteilverbindungen. Berlin: TU Berlin [Dissertation], 1994.
- [143] Schmitz-Riol, E.: Baukonstruktive Innovationen für den Geschosswohnungsbau unter Nachhaltigkeitskriterien. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar. Weimar 1998.
- [144] Schneider, Bautabellen, 13 Auflage
- [145] Schneider, F.: Konstruktionsregeln für Mauerwerk Teil3 :Ausführungsbeispiele. Mauerwerk-Kalender 33 (2008). Ed. P. Funk. Ernst und Sohn: Berlin, 329-351.
- [146] Schrepfer T.; Belaschk, H.: Wärmebrücken bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen, in Bauphysik-Kalender 2007: Schwerpunkt: Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, revidierte Edition, Ernst & Sohn, 2007.
- [147] Schubert, P., Glitza, H.: Festigkeits- und Verformungskennwerte von Mauersteinen und Mauermörtel, Die Bautechnik 56 (1979), Heft 10, S. 332-341
- [148] Schubert, P.: Eigenschaftswerte von Mauerwerk, Mauersteinen und Mauermörtel, Mauerwerk-Kalender 2003, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2003, S. 5-24
- [149] Schubert, P.: Zur Biegezugfestigkeit von Mauerwerk. Mauerwerk-Kalender 1991, Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1991, S. 669-684
- [150] Schubert, P.; Friede, H.: Spaltzugfestigkeit von Mauersteinen. Die Bautechnik 57 (1980), Heft 4, S. 117-122
- [151] Schultze, L.: Arbeitsmaterial zur Vorlesung Produktentwicklung, TU Dresden, Institut für Feinwerktechnik und Elektronik-Design
- [152] Schuster, F.: Die Bauelemente - Band 3 Treppen, dritte Auflage, Julius Hoffmann, Verlag Stuttgart, 1970
- [153] Schuster, F.: Die Bauelemente - Band 3 Treppen, erste Auflage, Julius Hoffmann, Verlag Stuttgart, 1951
- [154] Sobek, W.: Entwerfen im Leichtbau; In: „Leichtbau“, Themenheft Forschung Nr. 3/2007, S.70-82, Universität Stuttgart, 2007.
- [155] Staib, G.; Dörrhöfer, A.; Rosenthal, M.: Elemente und Systeme. Basel: Birkhäuser, 2008.
- [156] Stein, A.: Wärmebrücken bei hinterlüfteten Fassaden. In: Fischer, K. (Hrsg.): Connect it – Das Fischer Magazin für Experten (2007) Ausgabe 9, S. 20–23.

- [157] Thomas, W.: Zugfestigkeit von Kalksandsteinen, Teil 1: Betriebsgefertigte Steine. Forschungsbericht Nr.41, Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., Hannover 1976
- [158] Thormark, C.: A low energy building in a life cycle -its embodied energy, energy need for operation and recycling potential, Building and Environment, Bd. 37, Nr. 4, S. 429-435, Apr. 2002.
- [159] Tichelmann, K.; Heller, H.: Vergleichende Ökobilanzbetrachtungen und Lebenszyklusanalyse für Konstruktionen nichttragender Innenwände und tragender Außenwände, Forschungsbericht Technische Universität Darmstadt, Institut für Tragwerksentwicklung und Bauphysik, Darmstadt 17.12.2010
- [160] VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung, „VDI Richtlinie 2243, Recyclingorientierte Produktentwicklung“. Beuth Verlag GmbH, 2002.
- [161] Verordnung über die bauliche Nutzung der Grundstücke, Baunutzungsverordnung (BauNVO), 04.1993
- [162] Verordnung zur Berechnung der Wohnfläche (Wohnflächenverordnung – WoFlV); Bundesministerium der Justiz; 25.11.2003.
- [163] VStättVO 06.2005: Versammlungsstättenverordnung
- [164] Wasmuth, G.; Adler, L; Kowalczyk, G.: Lexikon der Baukunst, Band 3, H bis Ozo, Verlag Ernst Wasmuth, Berlin, 1931
- [165] Weege, R.-D.: Recyclinggerechtes Konstruieren. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1981.
- [166] Wezemaël, J.V.; Corrodi M.: Bauen für die Zukunft – nicht für die Ewigkeit. Studie des ETH Wohnforums im Auftrag des Schweizerischen Verbandes der Gips- und Gipsbauplattenindustrie.
- [167] Willkomm, W.: Recyclinggerechtes Konstruieren im Hochbau. Eschborn: RKW, 1996.
- [168] Wohnhaus in Poenix, Arizona, 1995, Detail Heft 8/1997, Bauen mit Beton, Seite 1322 bis Seite 1325
- [169] wwwu.edu/teched/geology/GeoHaz/eq-iran/eq-iran-10.JPG, Stand 12.01.2012
- [170] www.alphaeos.com, Unternehmensinterne Auskunft der Firma alpha EOS GmbH & Co. KG
- [171] www.an-morgen-denken.de/wissenschaftsdienst/01mar/demontage.htm,
- [172] www.atkingroup.co.uk/atkin_trade_specialists/steel_framing.html, Stand 12.01.2012
- [173] www.autobild.de, Hendrik Dieckmann: Die Brüder des Golf IV. Erschienen am 26.09.07, Zugriff am 31.08.10.
- [174] www.derblindefleck.de/index.php/top-themen/top-themen-2009, Stand 10.10.2011.
- [175] www.dgnb.de, Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen

- [176] www.digitalstrom.org, Produktkatalog Stand 2011
- [177] www.drexel-weiss.at, Stand 04.10.2011.
- [178] www.enocean.com, Webseite der Firma EnOcean GmbH, Stand 02.03.2012
- [179] www.fgt.ieb.kit.edu/downloads/EB-Einfuehrung_WS_2011_12.pdf, Stand 12.01.2012
- [180] www.geberit.de/web/appl/de/wcmsde.nsf/pages/index, Webseite der Firma Geberit Deutschland GmbH, Stand 02.03.2012
- [181] www.halfen.de/s/22_676/halfen/modules/listchilds/list1.php, Web-Seite der Firma HALFEN GmbH
- [182] www.ideers.bris.ac.uk/glossary/gloss_infill.html, Stand 12.01.2012
- [183] www.kdb.de/html/daas-clickbrick.html, Stand 29.09.2011
- [184] www.knauf-perlite.de/PDF/Nivoperl_826.pdf, Webseite der Firma KNAUF PERLITE GMBH, Stand 21.09.2011
- [185] www.ks-tbs.de, Webseite der Firma BVS, Stand 16.10.2010
- [186] www.massa-haus.de, Zugriff am 14.12.2010.
- [187] www.mconag.com, Stand 28.07.2011
- [188] www.mercedes-benz.de, Zugriff am 14.12.2010.
- [189] www.metaklett.de/index.html, Website der Firma VICTOR REINZ, Stand 15.09.2010
- [190] www.munitec.de, Webseite der Firma Munitec GmbH, Stand 02.03.2012
- [191] www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/pdf/aktuelles/Anlage1-Definition-PEH.pdf, Wohnhäuser mit Plus-Energie Niveau - Definition und Berechnungsmethode, Informationsportal Nachhaltiges Bauen des BMVBS, Stand 04.10.2011
- [192] www.nachhaltigkeit.org/200911173395/materialien-produkte/hintergrund/die-welt-als-legobaukasten, Stand 10.10.2011.
- [193] www.passiv.de, Passivhaus Institut Darmstadt, 2011.
- [194] www.passiv.de/komponentendatenbank/files/pdf/uebergang/Z_WBF_mCon_Online_de.pdf, Stand 03.02.2012
- [195] www.produktwegweiser-rockna-vi.rockwool.de/media/135353/1.214.3%20%20fixrock%20035+040%2004.2010.pdf, Stand 06.09.2011
- [196] www.rob-technologies.com/de/projects/bricks, Webseite der Firma ROB Technologies AG, Stand 02.03.2012

- [197] www.statistikportal.de/Statistik-Portal, Gemeinsame Webseite der Statistischen Ämter und des Bundes, Stand 2010
- [198] www.sto.de, Webseite der Firma STO AG, 16.10.2010.
- [199] www.umreifung24.de/components/com_virtuemart/shop_image/product/Verpackungsstahl_4e1e9ddd11a13.jpg, Stand 10.10.2011
- [200] www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/open.do, Webseite des Umweltbundesamtes 13.08.2010.
- [201] Xella Deutschland GmbH, Ausführungszeichnung Steinmodifikation, Zuarbeit Heße, M. Stand 14.10.2011
- [202] Xella Deutschland GmbH, Bauvorhaben, Hermann, Auftrag: 50044272, Zuarbeit Heße, M. 29.02.2012
- [203] Xella Deutschland GmbH, Bauvorhaben, Von Buchwaldt, Auftrag: 50043523, Zuarbeit Heße, M. 29.02.2012
- [204] Xella Deutschland GmbH; TU Dresden: Initiative Bauen in Weiß: Vorlesungsskript für Architekten im Mauerwerksbau. TU Dresden, Fakultät Architektur, Lehrstuhl Tragwerksplanung. Dresden 2009.
- [205] Xella Trockenbau-Systeme GmbH, Planungsordner Trockenbau, Xella Trockenbau-Systeme GmbH, Stand 2004
- [206] Zulassung Nr.: Z-1.1-58, Betonstabstahl BSt 500 S (B) mit Gewinderippen (SAS 500) Nenndurchmesser 12,0 bis 32,0 mm, Stahlwerk Annahütte, Max Aicher GmbH & Co. KG, Geltungsdauer bis 31.12.2014.
- [207] Zulassung Nr.: Z-1.5-174, Geschraubte Muffenverbindungen und Verankerungen von Betonstabstahl BSt 500 S mit Gewinderippen (SAS 500) Nenndurchmesser 12,0 bis 32,0 mm, Stahlwerk Annahütte, Max Aicher GmbH & Co. KG, Geltungsdauer bis 28.02.2016.
- [208] Zulassung Nr.: Z-17.1-551, Mauerwerk aus „KS-Quadro E“ Planelementen im Dünnbettverfahren, Quadro Bausysteme GmbH, Geltungsdauer bis 17.10.2010.
- [209] Zulassung Nr.: Z-17.1-639, Trockenmauerwerk aus Kalksandstein, Firma Rüs Kamp GmbH & Co KG, Geltungsdauer bis 23.09.2009
- [210] Zulassung Nr.: Z-17.1-916, Trockenmauerwerk aus Kalksandstein, Kalksandstein- & Baustoffwerk Breitengrüßbach GmbH & Co KG, Geltungsdauer bis 27.03.2011
- [211] Zulassung Nr.: Z-20.1-17, DYWIDAG Daueranker für Boden und Fels aus Spannstahl ST 950/1050 Ø26,5 mm, Ø30 mm, Ø36 mm und Ø40 mm, DYWIDAG-Systems GmbH, Geltungsdauer bis 10.4.2015
- [212] Zusammenfassender Schlussbericht *PRODOMO Produktionsintegrierter Umweltschutz im Bereich des Hochbaus der Beton- und Fertigteilindustrie*, Förderprojekt des

Bundesministeriums für Bildung und Forschung Referat 423 Förderkennzeichen 01 ZB 950, Institut für Fertigteiltechnik und Fertigbau Weimar, Weimar 31.05.2001

[213] Zuwendungsantrag Aktenzeichen II2-F20-09-1 für das Forschungsprojekt ReMoMaB 30.06.2009.

[214] Zwischenbericht zum Forschungsprojekt ReMoMaB *Entwicklung von Grundprinzipien für vollrezyklierbare, modulare, massive Bauweisen in Breitenanwendung auf 0-Energiebasis* vom 20.12.2010. Forschungsprojekt im Rahmen der Forschungsinitiative „Zukunft Bau“. TU Dresden, Lehrstuhl Tragwerksplanung; Institut für Leichtbau, Entwurf und Konstruktion der Universität Stuttgart; Werner Sobek Green Technology Stuttgart.



Anhang

Vorbereitende Untersuchungen

Einzelwerte der Abmaßermittlung

Tabelle 36 Einzelwerte der Grenzabmessung

Prüfkörper Nr.1	Höhe [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]
	h ₁ 498,0	b ₁ 239,5	l ₁ 501,0
	h ₂ 498,0	b ₂ 239,5	l ₂ 501,3
	h ₃ 497,5		
	h ₄ 498,0		
Mittelwert	497,9	239,5	501,2
gerundet	498,0	239,6	501,2
Sollmaß	498	240	498 + Nut (4)
Zul. Abweichung	≤ 1,0 / ± 1	± 3	± 3
Mittel / Einzelwert	erfüllt	erfüllt	erfüllt

Prüfkörper Nr.2	Höhe [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]
	h ₁ 497,5	b ₁ 239,6	l ₁ 502,5
	h ₂ 496,9	b ₂ 239,5	l ₂ 501,9
	h ₃ 496,4		
	h ₄ 496,7		
Mittelwert	496,9	239,6	502,2
gerundet	497,0	239,6	502,2
Sollmaß	498	240	498 + Nut (4)
Zul. Abweichung	≤ 1,0 / ± 1	± 3	± 3
Mittel / Einzelwert	erfüllt	erfüllt	erfüllt

Prüfkörper Nr.3	Höhe [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]
	h ₁ 497,5	b ₁ 239,6	l ₁ 502,4
	h ₂ 496,9	b ₂ 239,5	l ₂ 502,0
	h ₃ 496,4		
	h ₄ 496,7		
Mittelwert	496,9	239,6	502,2
gerundet	497,0	239,6	502,2
Sollmaß	498	240	498 + Nut (4)
Zul. Abweichung	≤ 1,0 / ± 1	± 3	± 3
Mittel / Einzelwert	erfüllt	erfüllt	erfüllt

Einzelwerte der Ebenheitsbestimmung

Tabelle 37 Einzelwerte der Ebenheitsbestimmung

Prüfkörper Nr.1	Länge [mm]	Abstand ^^	
Diagonale D1	547	0,35	
Diagonale D2	555	0,35	
Mittelwert	551	0,35	
gerundet auf	1	0,1	
	551	0,4	
Zul. Abweichung		≤ 1,0	erfüllt
Prüfkörper Nr.2			
Diagonale D1	549	0,25	
Diagonale D2	557	0,45	
Mittelwert	553	0,35	
gerundet auf	1	0,1	
	553	0,4	
Zul. Abweichung		≤ 1,0	erfüllt
Prüfkörper Nr.3			
Diagonale D1	556	0,35	
Diagonale D2	551	0,30	
Mittelwert	554	0,325	
gerundet auf	1	0,1	
	554	0,3	
Zul. Abweichung		≤ 1,0	erfüllt

Begleitenden Materialtests

Spaltzug Versuche

Tabelle 38 Spaltzugversuche, Material A, Abmessungen 70x70x240 mm

Probe	Länge l_0 [mm]	Breite b_0 [mm]	Höhe a_0 [mm]	A [mm ²]	F_{Max} [kN]	Spz [N/mm ²]	e-F _{max} [mm]
70-AZ-2	159,8	69,98	70	4898,6	12,61	1,65	0,89
70-AZ-3	159,8	69,73	69,99	4880,4	14,324	1,88	0,82
70-AZ-4	159,8	70	70,09	4906,3	16,726	2,18	0,85
70-AX-1	159,8	70,68	70,05	4951,1	13,866	1,79	0,9
70-AX-2	159,8	70,68	70,05	4951,1	15,136	1,96	1,03
70-AX-3	159,8	71,67	70,87	5079,3	12,995	1,64	0,94
70-AY-1	159,8	69,85	70,51	4925,1	17,811	2,31	1,07
70-AY-2	159,8	70,49	70,3	4955,4	11,524	1,49	0,74
70-AY-6	159,8	69,99	70,7	4948,3	16,11	2,08	1,01

Mittelwert

1,89

0,92

Tabelle 39 Spaltzugversuche, Material B, Abmessungen 70x70x240 mm

Probe	Länge l_0 [mm]	Breite b_0 [mm]	Höhe a_0 [mm]	A [mm ²]	F_{Max} [kN]	Spz [N/mm ²]	e-F _{max} [mm]
70-BZ-1	159,8	68,88	70,45	4852,6	22,123	2,92	1,07
70-BZ-4	159,8	70,03	69,62	4875,5	21,34	2,8	1,53
70-BZ-5	159,8	70,32	70,23	4938,6	23,416	3,03	1,21
70-BX-2	159,8	68,52	70,01	4797,1	22,596	3,01	1,1
70-BX-3	159,8	69,08	69,38	4792,8	21,647	2,89	1,24
70-BX-4	159,8	71	69,82	4957,2	17,256	2,23	1,25
70-BY-2	159,8	70,88	70,44	4992,8	18,045	2,31	1,02
70-BY-4	159,8	70,54	70,04	4940,6	22,942	2,97	1
70-BY-5	159,8	71,6	70,6	5055	21,223	2,69	0,96

Mittelwert

2,76

1,15

Tabelle 40 Spaltzugversuche, Material A, Abmessungen 100x100x240 mm

Probe	Länge l_0 [mm]	Breite b_0 [mm]	Höhe a_0 [mm]	A [mm ²]	F_{Max} [kN]	Spz [N/mm ²]	e-F _{max} [mm]
100-AZ-1	159,8	100,3	99,5	9976,9	23,976	1,54	1,15
100-AZ-3	159,8	100,5	99,43	9988,7	21,457	1,37	1,02
100-AZ-5	159,8	101,1	99,97	10105	25,692	1,63	1,36

Mittelwert

1,51

1,18

Tabelle 41 Spaltzugversuche, Material B, Abmessungen 100x100x240 mm

Probe	Länge l_0 [mm]	Breite b_0 [mm]	Höhe a_0 [mm]	A [mm ²]	F_{\max} [kN]	Spz [N/mm ²]	e- F_{\max} [mm]
100-BZ-3	159,8	104,1	100,2	10425,8	38,644	2,37	1,73
100-BZ-5	159,8	101,1	100	10109	43,465	2,75	1,72
100-BZ-6	159,8	100,5	99,94	10042	41,779	2,66	1,77
Mittelwert						2,59	1,74

Biegezug Versuche

Tabelle 42 Biegeversuche, Material A, Abmessungen 70x70x240 mm

Probe	Länge l_0 [mm]	Breite b_0 [mm]	Höhe a_0 [mm]	F_{\max} [kN]	R_{\max} [N/mm ²]	EMod [N/mm ²]	e- F_{\max} [mm]
70-AZ_2	159,8	69,98	70	2,981	2,504	1003,9	0,35
70-AZ_3	159,8	69,73	69,99	3,023	2,558	1067,4	0,281
70-AZ_4	159,8	70	70,09	3,196	2,68	1089,5	0,288
70-AX_1	159,8	70,68	70,05	3,4	2,805	852,6	0,42
70-AX_2	159,8	70,68	70,05	3,421	2,815	892,6	0,305
70-AX_3	159,8	71,67	70,87	3,919	3,101	1109,1	0,259
70-AY_1	159,8	69,85	70,51	3,717	3,083	924,6	0,321
70-AY_2	159,8	70,49	70,3	3,272	2,705	901,4	0,29
70-AY_6	159,8	69,99	70,7	3,196	2,631	985,1	0,273
Mittelwert					2,76	980,69	0,31

Tabelle 43 Biegeversuche, Material B, Abmessungen 70x70x240 mm

Probe	Länge l_0 [mm]	Breite b_0 [mm]	Höhe a_0 [mm]	F_{\max} [kN]	R_{\max} [N/mm ²]	EMod [N/mm ²]	e- F_{\max} [mm]
70-BZ_1	159,8	68,88	70,45	5,057	4,357	1454	0,309
70-BZ_4	159,8	70,03	69,62	5,761	4,859	1060,4	0,428
70-BZ_5	159,8	70,32	70,23	5,682	4,712	1132,9	0,396
70-BX_2	159,8	68,52	70,01	5,906	5,175	952,8	0,461
70-BX_3	159,8	69,08	69,38	5,47	4,758	1232,9	0,361
70-BX_4	159,8	71	69,82	5,504	4,58	1058	0,393
70-BY_2	159,8	70,88	70,44	6,142	4,998	1225,7	0,373
70-BY_4	159,8	70,54	70,04	2,627	2,186	1042,7	0,292
70-BY_5	159,8	71,6	70,6	5,608	4,462	1092,4	0,351
Mittelwert					4,45	1139,09	0,37

Tabelle 44 Biegeversuche, Material A, Abmessungen 100x100x240 mm

Probe	Länge l_0 [mm]	Breite b_0 [mm]	Höhe a_0 [mm]	F_{max} [kN]	R_{max} [N/mm ²]	EMod [N/mm ²]	e-F _{max} [mm]
100-AZ_1	159,8	100,3	99,5	10,211	2,962	475,9	0,491
100-AZ_3	159,8	100,5	99,43	10,012	2,903	469,7	0,463
100-AZ_5	159,8	101,1	99,97	9,545	2,721	403,5	0,529
Mittelwert					2,86	449,7	0,49

Tabelle 45 Biegeversuche, Material B, Abmessungen 100x100x240 mm

Probe	Länge l_0 [mm]	Breite b_0 [mm]	Höhe a_0 [mm]	F_{max} [kN]	R_{max} [N/mm ²]	EMod [N/mm ²]	e-F _{max} [mm]
100-BZ_3	159,8	104,1	100,2	17,013	4,69	548,7	0,617
100-BZ_5	159,8	101,1	100	16,82	4,791	601,2	0,62
100-BZ_6	159,8	100,5	99,94	15,353	4,406	473,8	0,654
Mittelwert					4,63	541,23	0,63

Druckversuche, Ermittlung des E-Moduls

Tabelle 46 Druckversuche, Material A, Zylinderabmessungen DN=70 mm, Höhe=240 mm

Probe	F_{max} kN	R_{max} N/mm ²	EMod N/mm ²	e-F _{max} mm
AX1	48,567	12,62	6561,5	0,107
AX2	49,058	12,747	7446,6	0,074
AX3	54,34	14,12	8198,4	0,146
AY1	59,765	15,53	7166,4	0,106
AY2	48,919	12,711	8589,8	0,082
AY3	61,195	15,901	8338	0,162
AZ1	61,997	16,11	8115,9	0,156
AZ2	66,715	17,336	9419	0,201
AZ3	71,564	18,596	8999,4	0,252
Mittelwert			8092,78	0,14

Tabelle 47 Druckversuche, Material B, Zylinderabmessungen DN=70 mm, Höhe=240 mm

Probe	Fmax kN	Rmax N/mm ²	EMod N/mm ²	e-F max mm
BX1	86,467	22,468	11591,8	0,279
BX2	79,372	20,625	21101,6	0,155
BX3	85,871	22,313	11973,1	0,168
BY1	85,148	22,125	10128,9	0,156
BY2	80,763	20,986	10608,5	0,14
BY3	77,063	20,024	8960,8	0,088
BZ1	100,617	26,145	12916,7	0,294
BZ2	86,681	22,524	11881,3	-0,083
BZ3	100,026	25,991	12535,6	0,318

Mittelwert	12410,92	0,17
------------	----------	------

Tabelle 48 Druckversuche, Material A, Abmessungen 70x70x240 mm

Probe	Fmax kN	Rmax N/mm ²	EMod N/mm ²	e-F max mm
AZ1	144,171	18,356	14162,1	0,256
AZ2	148,693	18,932	18328,3	0,176
AZ3	148,376	18,892	14403,3	0,262

Mittelwert	15631,23	0,23
------------	----------	------

Tabelle 49 Druckversuche, Material B, Abmessungen 70x70x240 mm 70x70x240 mm

Probe	Fmax kN	Rmax N/mm ²	EMod N/mm ²	e-F max mm
BZ1	210,941	26,858	17863,4	0,331
BZ2	209,543	26,68	11728,7	0,33
BZ3	215,882	27,487	15391	0,353

Mittelwert	14994,37	0,34
------------	----------	------