



Teil II Schlussbericht

Modular – Zirkulär – Digital

„Individualisierbare Standardisierung – Ganzheitlicher Modulbaukasten zum Erreichen nachhaltiger Planungskonzepte und hoher planerischer Flexibilität“

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt
AZ: 37476/01-25

Teil II Abschlussbericht

Modular - Zirkulär - Digital

„Individualisierbare Standardisierung - Ganzheitlicher Modulbaukasten zum Erreichen nachhaltiger Planungskonzepte und hoher planerischer Flexibilität“

gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt
AZ: 37476/01-25

Projektnehmer:

Hochschule Bochum
Entwerfen und Konstruieren / Nachhaltiges Bauen
Prof. Dr.-Ing. Architektin Jutta Albus
M.Sc. Arch. Nurcan Akca
M.A. Gavin Hope
Am Hochschulcampus 1
44801 Bochum

TU Dortmund
Lehrstuhl Baukonstruktion
Prof. Piet Eckert, Prof. Wim Eckert
Dipl.-Ing. Kirsten E. Hollmann-Schröter
August-Schmidt-Straße 8
44227 Dortmund

Projektpartner:

Solid.Modulbau GmbH
Silke Schwietering, Hermann Stegink
Otto-Hahn-Straße 1-2, 48683 Ahaus

Design-to-Production (DtP)
Dipl.-Ing. Arnold Walz, Dipl.-Ing. Philipp Rumpf
Augustenstraße 49a, 70178 Stuttgart

Externe Partner:

Bremer Fertigteile Paderborn GmbH & Co. KG
Gründer Weg 28-48
33098 Paderborn

Projektzeitraum

Oktober 2022 – März 2025

Bochum, den 30.06.2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	8
1 Zusammenfassung	1
2 Einleitung	2
2.1 Projektziele	2
2.1.1 Verbesserung der Ressourceneffizienz auf Baustoffebene	3
2.1.2 Umweltentlastung durch Bauweise und Konstruktion	3
2.1.3 Nachhaltiges Gebäudetechnikkonzept	3
2.1.4 Entlastung der Ressource Mensch.....	4
2.1.5 Digitale Nachhaltigkeit	4
3 Systemkonzipierung	5
3.1 Vorgehen und Methodik	5
3.2 Ganzheitliche Nachhaltigkeitsstrategie	6
3.2.1 Zusammenhang aus Kreislaufwirtschaft und individualisiertem Systembau.....	6
3.3 Potenzialanalyse am Beispiel Solid.Modulbau	7
3.3.1 MODULAR	7
3.3.2 ZIRKULÄR	12
3.3.3 DIGITAL	13
4 Forschungsergebnisse	14
4.1 MODULAR.....	14
4.1.1 Anforderungen an die Bauweise und Typologie des adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems	14
4.1.2 Konzeptionelle Systementwicklung und Betonanteilreduzierung	14
4.1.3 Konzeptionelle Entwicklung des kreislauffähigen, adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems	18
4.1.4 Anwendung des kreislaufgerechten, adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems	27
4.2 ZIRKULÄR.....	38
4.2.1 Anforderungen an die Zirkularität des adaptive-assoziativen, hybriden Bausystems	38
4.2.2 Baukonstruktive Systementwicklung der Primärstruktur in Anbetracht reversibler Bauteilaufbauten und Fügeverfahren	38
4.2.3 Anpassungsstrategien und Nachnutzungsszenarien des adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems	42

4.3	DIGITAL	47
4.3.1	Konzeption des digitalen Planungswerkzeugs	47
4.3.2	Umsetzung anpassbarer Konstruktionen innerhalb der digitalen Werkplanung	61
4.3.3	Datenmanagement	61
4.3.4	Lückenlose Entwurfsdatenübertragung in industrielle Fertigung.....	63
4.3.5	Planung eines flexiblen, komplementären Fertigungslayouts	66
4.3.6	Anforderung an die Überführung des hybriden Bausystems in die Produktion mit dem Bausystem	68
5	Prototypische Umsetzung des entwickelten Bausystems	70
6	Abweichungen der Ergebnisse von der Zielsetzung	74
7	Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse	75
8	Fazit	76
8.1	Zusammenfassung der Vorhabensergebnisse.....	76
8.2	Ausblick und Forschungspotenzial	78
9	Literaturverzeichnis.....	79
Teil III Anhang		82
10	Ausgangsbasis und Relevanz	83
10.1	MODULAR.....	83
10.1.1	Industrielles Bauen und Raummodule: Beton und hybride Konstruktionen	83
10.1.2	Typologische & gestalterische Vielfalt durch Kombination von Raummodulen und Bauteilen	85
10.1.3	Wohnqualitätsanalyse von raummodularen und konventionellen Wohngebäuden.....	87
10.2	ZIRKULÄR.....	89
10.2.1	Ziele und Umsetzungsstrategien des kreislaufgerechten Bauens	89
	Design for Disassembly als Grundlage für die Entwicklung eines kreislaufgerechten, hybriden Bausystems.....	92
10.3	DIGITAL.....	96
10.3.1	Prozessebene und Planungswerkzeuge für die Vorbereitung von effizienten Fertigungsprozessen für vielseitige, adaptive Bausysteme.....	96
10.3.2	Produktions- und Automatisierungsprozesse im Hinblick auf die Fertigung eines adaptiven-assoziativen, hybriden Bausystems.....	97
11	Vertiefende Projektdokumentation	102

11.1	Planunterlagen für das Referenzgebäude C	102
11.2	Planmaterial zur Prototyperstellung	103
11.3	Exemplarische Berechnungen zu Ökobilanzierung.....	104
11.3.1	Auszug aus dem im Forschungsprojekt programmierten Excel-Grundlage zur ökobilanziellen Berechnung am Beispiel des Deckenbauteils	104
	Auszug aus dem im Forschungsprojekt programmierten Excel-Grundlage zur ökobilanziellen Berechnung am Beispiel des Moduls 1.1	120
11.3.2	Tatsächlich verwendete Baustoffe im Modul 1.1.	120
11.3.3	Ökobilanzielle Berechnung zu Modul 1.1	121
11.3.4	Vergleich und Ergebnisse am Beispiel des Referenzgebäudes.....	122
11.3.5	Berechnungen der Nachnutzungsszenarien (erweiterte Ökobilanz)	123

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2-1	VERKNÜPFUNG DER FORSCHUNGSPARAMETER MATERIAL UND RESSOURCE, STANDARDISIERUNG UND DIGITALE PLANUNG MIT TRANSFER ZU DEN JEWEILIGEN ARBEITSBEREICHEN	3
ABBILDUNG 3-1	FLUSSDIAGRAMM DER FORSCHUNGSINHALTE IN ABHÄNGIGKEIT MIT DEN KOOPERATIONSPARTNERN	5
ABBILDUNG 3-2	ISOMETRIE EINES BETONMODULS DER FA. SOLID.MODULBAU	8
ABBILDUNG 3-3	GRUNDRISS EG DES WOHNGEBÄUDES GEWO NORDHORN ALS GRUNDLAGE FÜR DIE WOHNQUALITÄTSUNTERSUCHUNG	9
ABBILDUNG 3-4	ERGEBNIS DER WOHNQUALITÄTSANALYSE IN FORM EINES NETZDIAGRAMMS FÜR DAS UNTERSUCHTE WOHNGEBÄUDE GEWO NORDHORN DER FIRMA SOLID.MODULBAU	10
ABBILDUNG 3-5	ANALYSE DES PRIMÄRENERGIEBEDARFS (ERNEUERBAR UND NICHT ERNEUERBAR) DES BETONMODULS DER FA. SOLID.MODULBAU ALS AUSGANGSMODUL FÜR WEITERE VERGLEICHE / UNTERSUCHUNGEN	11
ABBILDUNG 3-6	ANALYSE DES TREIBHAUSPOTENZIALS DES BETONMODULS DER FA. SOLID.MODULBAU	12
ABBILDUNG 4-1	SCHAUBILD DES ADAPTIV-ASSOZIATIVEN, HYBRIDEN BAUSYSTEMS ALS KOMBINATION AUS EIN-, ZWEI- UND DREIDIMENSIONALEN BAUTEILEN.	14
ABBILDUNG 4-2	STAHLBETON-RAUMMODUL ALS BAULICHE AUSGANGSLAGE FÜR DIE ENTWICKLUNG DES ADAPTIV-ASSOZIATIVEN BAUSYSTEMS	15
ABBILDUNG 4-3	STAHLBETON-MODUL OHNE STAHLBETONSOHLE	16
ABBILDUNG 4-4	STAHLBETON-MODUL, REDUZIERT AUF DAS TRAGENDE SKELETT, MIT LEICHTEN RAUMABSCHLIEßENDEN BAUTEILEN	17
ABBILDUNG 4-5	ÖKOBILANZIELLE GEGENÜBERSTELLUNG DES STAHLBETON- UND SKELETTMODULS IN STAHLBETONBAUWEISE, MIT LEICHTEN RAUMABSCHLIEßENDEN BAUTEILEN	17
ABBILDUNG 4-6	AN MZD ANGEPASTES SCHICHTMODELL MIT FOKUS AUF DER PRIMÄRSTRUKTUR UND DER DIFFERENZIERUNG ZWISCHEN GESCHLOSSENEN UND OFFENEN SCHICHTSYSTEMEN	19
ABBILDUNG 4-7	ÖKOBILANZIELLER VERGLEICH VON STAHLBETON- UND STAHLSTÜTZEN	20
ABBILDUNG 4-8	BAUTEILGEOMETRIEN UND -ABMESSUNGEN DER VERSCHIEDENEN STÜTZENTYPEN IM BAUTEILKATALOG	20
ABBILDUNG 4-9	BAUTEILGEOMETRIEN UND -ABMESSUNGEN DER VERSCHIEDENEN TRÄGERTYPEN IM BAUTEILKATALOG	21
ABBILDUNG 4-10	BEISPIELHAFTE BAUTEILGEOMETRIEN UND -AUFBAUTEN VON UNTERSCHIEDLICHEN DECKENTYPEN IM MATERIALOFFENEN BAUTEILKATALOG	22
ABBILDUNG 4-11	ÖKOBILANZIELLER VERGLEICH DER VERSCHIEDENEN DECKEN, DIE IM SYSTEMOFFENEN MODUL VERWENDET WERDEN KÖNNEN	23
ABBILDUNG 4-12	BEISPIELHAFTE BAUTEILGEOMETRIEN UND -AUFBAUTEN VON UNTERSCHIEDLICHEN WANDTYPEN IM MATERIALOFFENEN BAUTEILKATALOG	24
ABBILDUNG 4-13	ÖKOBILANZIELLER VERGLEICH DER VERSCHIEDENEN WÄNDE, DIE IM SYSTEMOFFENEN MODUL VERWENDET WERDEN KÖNNEN	25
ABBILDUNG 4-14	EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG EINES RAUMMODULS BESTEHEND AUS DEM BAUTEILKATALOG: PRIMÄRSTRUKTUR (STÜTZE, TRÄGER, DECKE, WAND)	26
ABBILDUNG 4-15	UNTERSCHIEDLICHE RAUMMODULARE ABMESSUNGEN IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ANZAHL VON KONSOLEN DIE FÜR DAS AUFLAGERN VON DECKENBAUTEILEN ERFORDERLICH SIND	26
ABBILDUNG 4-16	RAUMMODULARE BAUWEISE MIT AUSSTEIFENDEM TREPPENKERN UND LAUBENGANGERSCHLIEßUNG	28
ABBILDUNG 4-17	ANPASSBARE SPANNWEITEN IN WOHNBEREICHEN FÜR MEHR WOHNQUALITÄT UND GESTALTERISCHE FREIHEIT	28
ABBILDUNG 4-18	ANPASSBARKEIT DES HYBRIDEN BAUSYSTEMS AN GRUNDSTÜCKSANFORDERUNGEN DURCH ADAPTIV-ASSOZIATIVE EIGENSCHAFTEN	28
ABBILDUNG 4-19	EINSATZ VON ELEMENTBAUTEILEN ALS ANTWORT AUF KOMPLEXERE GRUNDSTÜCKSGEOMETRIEN	29

ABBILDUNG 4-20 EINSATZ VON ELEMENTBAUTEILEN ZUR ABBILDUNG KOMPLEXER GEBÄUDEKUBATUREN UND BAUTEILFORMEN	29
ABBILDUNG 4-21 MÖGLICHE ERSCHLIEßUNGSFORMEN UND DARAUS RESULTIERENDE VERSCHIEDENE GEBÄUDETYPOLOGIEN	30
ABBILDUNG 4-22 SKELETTSTRUKTUR ALS GRUNDLAGE FÜR GRUNDRISS- UND NUTZUNGSFLEXIBILITÄT VON GEBÄUDEN	30
ABBILDUNG 4-23 MÖGLICHKEIT ZUR GESTALTUNG DURCH OFFENE SYSTEMLÖSUNGEN FÜR GRÜNDUNG, DACHKONSTRUKTION UND AUßENANALGEN.	31
ABBILDUNG 4-24 REFERENZGEBÄUDE A (LINKS), REFERENZGEBÄUDE B (MITTIG) UND REFERENZGEBÄUDE C (RECHTS)	31
ABBILDUNG 4-25 REGELGESCHOSS GRUNDRISSSE REFERENZGEBÄUDE C	32
ABBILDUNG 4-26 ERDGESCHOSS GRUNDRISSSE REFERENZGEBÄUDE C	33
ABBILDUNG 4-27 ANSICHT REFERENZGEBÄUDE C	33
ABBILDUNG 4-28 AUSSCHNITT DES REFERENZGEBÄUDES C MIT WOHNUNGSGRUNDRISS FÜR VIER PERSONEN	34
ABBILDUNG 4-29 NETZDIAGRAMM MIT DEN ERGEBNISSEN DER WOHNQUALITÄTSANALYSE DES REFERENZGEBÄUDES C	35
ABBILDUNG 4-30 ERGEBNISSE DES ÖKOBILANZIELLEN VERGLEICHS DER UNTERSCHIEDLICHEN VARIANTEN DES REFERENZGEBÄUDES	36
ABBILDUNG 4-31 ÖKOBILANZIELLER VERGLEICH DES TRANSPORTS FÜR DIE UNTERSCHIEDLICHEN VARIANTEN DES REFERENZGEBÄUDES	37
ABBILDUNG 4-32 DARSTELLUNG EINES GELENKIGEN UND EINES BIEGESTEIF AUSGEFÜHRTEN ECKANSCHLUSSES	39
ABBILDUNG 4-33 DARSTELLUNG ZWEIER MÖGLICHER ANSCHLÜSSE FÜR DIE AUFNAHME DES DECKENBAUTEILS DURCH DIE STAHLBETONTRÄGER	39
ABBILDUNG 4-34 DETAILKONZEPTIONEN FÜR DEN STÜTZENFUß (UND -KOPF). LINKS STAHLBAUTEIL ALS STÜTZENSCHUH MIT DORN VERBINDUNG FÜR DIE STAPELUNG DER RAUMMODULAREN EINHEITEN. RECHTS STAHLBAUTEILE ALS STÜTZENFUß- UND KOPF	40
ABBILDUNG 4-35 WAND- UND TRÄGERANSCHLÜSSE VON FEST VERBAUTEN WANDELEMENTEN ALS GROßTAFELELEMENTE	41
ABBILDUNG 4-36 WAND- UND TRÄGERANSCHLÜSSE VON ADAPTIVEN WANDELEMENTEN IN KLEINTAFELBAUWEISE, ALS BEISPIEL FÜR RÜCKBAUBARE BAUTEILE	42
ABBILDUNG 4-37 DARSTELLUNG DER EXEMPLARISCHEN NACHNUTZUNGSSTRATEGIEN FÜR DAS REFERENZGEBÄUDE	42
ABBILDUNG 4-38 DARSTELLUNG SZENARIO 1: VERÄNDERUNG DER GEBÄUDEBREITE KANN DURCH DIE 2D-DECKENFELDER AUSGEGLICHEN WERDEN, DIE MODULE WERDEN UNVERÄNDERT EINEM ZWEITEN LEBENSZYKLUS ZUGEFÜHRT	43
ABBILDUNG 4-39 DARSTELLUNG SZENARIO 2: VERÄNDERUNG DER GEBÄUDEGEOMETRIE KANN NICHT ALLEIN DURCH DIE 2D-DECKENFELDER AUSGEGLICHEN WERDEN, RAUMMODULARE EINHEITEN WERDEN EBENFALLS VERÄNDERT UND EINEM ZWEITEN LEBENSZYKLUS ZUGEFÜHRT	44
ABBILDUNG 4-40 ÖKOBILANZ DES BASIS-SZENARIOS UND DER WIEDERVERWENDUNGS-SZENARIEN 1 UND 2	45
ABBILDUNG 4-41 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES DIGITALEN PLANUNGSPROZESSES	47
ABBILDUNG 4-42 AUFBAU DER GRUNDELEMENTE DES TOPOLOGISCHEN MODELS	51
ABBILDUNG 4-43 ZUWEISUNG TOPOLOGISCHER ELEMENTE AM GEBÄUDE	51
ABBILDUNG 4-44 EDGE.FACES, FACE.ROOMS, VERTEX.EDGES VON LINKS NACH RECHTS	52
ABBILDUNG 4-45 REDUZIERTES KLASSENDIAGRAMM DES GESAMTEN SOFTWAREPROJEKTS	53
ABBILDUNG 4-46 ÜBERSICHT DER IN RHINO ANGELEGTE BEFEHLE ZUR INTERAKTION MIT DEM PLUGIN (LINKS), USERINTERFACE ZUR ANPASSUNG DER DARSTELLUNG DES TOPOLOGISCHEN MODELLS (RECHTS)	54
ABBILDUNG 4-47 GEOMETRYSELECTION(UI): USERINTERFACE ZUR AUSWAHL GENERIERTER GEOMETRIE IN EINZELNEN KOMPONENTEN	55
ABBILDUNG 4-48 PARAMETERMANAGER(UI): USERINTERFACE ZUR DARSTELLUNG UND ÄNDERUNG DER PARAMETER EINER KOMPONENTE	55

ABBILDUNG 4-49 GRASSHOPPERSKRIPT ZUR GENERIERUNG DES TOPOLOGISCHEN MODELLS UND ZUWEISUNG DER BAUTEILE IM MUSTERGEBÄUDE	56
ABBILDUNG 4-50 OBEN: INPUTGEOMETRIE TOPOLOGISCHES MODELL, ZUGEWIESENE KOMPONENTEN; MITTE: STÜTZEN UND TRÄGER, BODENPLATTEN, WÄNDE; UNTEN: GESAMTMODELL	57
ABBILDUNG 4-51 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER STÜTZENGENERIERUNG	57
ABBILDUNG 4-52 ABHÄNGIGKEITEN VON NACHBARELEMENTEN BEI DER STÜTZENDETAILLIERUNG	58
ABBILDUNG 4-53 ABHÄNGIGKEITEN VON NACHBARELEMENTEN BEI DER TRÄGERDETAILLIERUNG	58
ABBILDUNG 4-54 ABHÄNGIGKEITEN VON NACHBARELEMENTEN BEI DER BODENPLATTENDETAILLIERUNG	59
ABBILDUNG 4-55 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER WANDGENERIERUNG	60
ABBILDUNG 4-56 SCHEMATISCHER AUFBAU EINER DETAILLIERTEN HOLZTRÄGERWAND	60
ABBILDUNG 4-57 GENERIERTES TOPOLOGISCHES MODELL LINKS, GENERIERTES MODELL MIT FINALER DETAILLIERUNG RECHTS	64
ABBILDUNG 4-58 SZENARIO FÜR EIN KOMPLEMENTÄRES PRODUKTIONS LAYOUT MIT FERTIGUNG ALLER BAUTEILE INNERHALB EINER PRODUKTIONSSTÄTTE	68
ABBILDUNG 4-59 AKTUELLE PLANUNG FÜR DAS PRODUKTIONS LAYOUT AM STANDORT EMSBÜREN	69
ABBILDUNG 5-1 ERSTE KONZEPTION DES PROTOTYPEN AUS RAUMMODUL UND ELEMENTIERTEN KOMPONENTEN	70
ABBILDUNG 5-2 AUSFÜHRUNGSPLÄNE DES PROTOTYPEN ERSTELLT VON DER FA. BREMER SE	70
ABBILDUNG 5-3 PLANUNG DES REVERSIBLEN STÜTZENANSCHLUSSES ÜBER SONDERSTAHLBAUTEIL	71
ABBILDUNG 5-4 AUSFÜHRUNG DES REVERSIBLEN STÜTZENANSCHLUSSES MITTEL HEB100 UND SCHRAUBVERBINDUNG	71
ABBILDUNG 5-5 FERTIGUNGSSCHRITTE DER KOMPONENTEN DES PROTOTYPEN	72
ABBILDUNG 5-6 MONTAGE DER STAHLBETONKOMPONENTEN DES PROTOTYPEN AUF DEM GELÄNDE DER FA. BREMER SE	73
ABBILDUNG 10-1 SCHICHTMODELL NACH STEWART BRANDS „SHARING LAYERS OF CHANGE“	93
ABBILDUNG 10-2 DARSTELLUNG DER TOPOLOGISCHEN ABHÄNGIGKEITEN	97

Tabellenverzeichnis

TABELLE 4.1-1	REDUKTION DES BETONANTEILS UND DER CO2-EMISSIONEN DES ROHMODULS	16
TABELLE 4.1-2	ERGEBNISSE DES ÖKOBILANZIELLEN VERGLEICHES EINES STAHLBETON-MODULS UND EINES AUF LINEARE TRAGELEMENTE REDUZIERTEN MODULS MIT BRETTSPERRHOLZDECKEN UND - WÄNDEN	18
TABELLE 4.1-3	STÜTZENTYPEN, ABMESSUNGEN UND ANZAHL NUTEN	21
TABELLE 4.1-4	TRÄGERTYPEN, ABMESSUNGEN UND ANZAHL KONSOLEN	22
TABELLE 4.1-5	DECKENTYPEN, MATERIALITÄTEN UND ABMESSUNGEN	22
TABELLE 4.1-6	WANDTYPEN, MATERIALITÄTEN UND ABMESSUNGEN	24
TABELLE 4.1-7	TITEL FEHLT MIR?	36
TABELLE 4.2-1	ERGEBNISSE DES ÖKOBILANZIELLEN VERGLEICHES DER NACHNUTZUNGSSZENARIEN	45
TABELLE 4.2-2	EXEMPLARISCHE DARSTELLUNG DER ZUORDNUNG DER BAUTEILE DES ADAPTIV-ASSOZIATI- VEN BAUSYSTEMS ZU DEN CPX-PARAMETERN	46
TABELLE 4.3-1	HIER MUSS TABELLENUNTERSCHRIFT HIN	62

1 Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt „Modular - Zirkulär - Digital“ wurde untersucht, welche Synergieeffekte durch die Verknüpfung einer kreislauffähigen Systembauweise mit einer digitalen Planungs- und Produktionsstrategie erreicht werden können und welche Methoden für die Etablierung eines solchen Prozesses prinzipiell nötig sind, um diesen in eine praxistaugliche Anwendung zu überführen.

Untersuchungen und Entwicklungen: Für das Vorhaben wurde eine umfassende Analyse von Systembauweisen durchgeführt, um zum einen ökologische Potenziale auf Material- und Bauteilebene zu definieren, zum anderen wurden Konstruktionsprinzipien untersucht und weiterentwickelt, die eine Verbesserung der Kreislauffähigkeit dieser Bauweisen fördern. In Anbetracht einer langen Nutzungsdauer von Gebäuden und einer in diesem Zusammenhang stehenden größeren NutzerInnenakzeptanz wurden gleichzeitig die Anforderungen an eine qualitativ hochwertige Umsetzung erörtert und exemplarisch auf das konzipierte Bausystem übertragen. Dabei wurden insbesondere Eigenschaften wie die Anpassbarkeit und Individualisierung eines systematisierten Baukonzepts berücksichtigt, um einheitliche, monotone Erscheinungsbilder von Architektur mit einem hohen Vorfertigungsgrad zu vermeiden. Standardisierte und modulare Systembauweisen bilden den Ausgangspunkt dieser Untersuchungen. Aufbauend darauf wurden prozessuale Verbesserungen angestrebt, welche durch die Einbindung einer kontinuierlichen digitalen Planungs- und Produktionsstrategie in Form eines digitalen Beschreibungsmodells weiterentwickelt und prototypisch umgesetzt wurden.

Ergebnisse:

- Konzeption eines kreislauffähigen, hybriden Bausystems mit hohem Anpassungsgrad
- Demonstrator für ein digitales Gebäudebeschreibungsmodell/Planungswerkzeug
- Prototyp des konstruktiven Bausystems als strukturelle Einheit

Aufbauend auf einer raummodularen Systembauweise des Kooperationspartners **Solid.Modulbau GmbH**, dessen Raumeinheiten bisher in Betonbauweise vorgefertigt werden, wurde federführend von dem Hochschulpartner **HS Bochum und TU Dortmund** ein kreislauffähiges, hybrides Konstruktionsystem mit hohem Anpassungsgrad und individuellen Standardisierungsmöglichkeiten für Wohngebäude entwickelt. Das aus raummodularen Einheiten und flächigen Bauteilen bestehende Konstruktionsystem, das durch eine begleitende Ökobilanzierung im Hinblick auf Primärenergiebedarf und Treibhausgasemissionen material- und bautechnisch optimiert wurde, konnte als strukturelle Einheit am Ende der Projektlaufzeit vom Unternehmen **Bremer Fertigteile Paderborn GmbH & Co. KG** prototypisch realisiert werden. Ein digitaler Demonstrator für ein Gebäudebeschreibungsmodell, der assoziativ die Anforderungen einer Bauaufgabe miteinander in Beziehung setzt und sukzessive durch Anreicherung von relevanten Informationen die Optimierung des Planungsfortschritts unterstützt, wurde parallel und in Rückkopplung mit den Forschungsergebnissen der Kooperationspartner vom Unternehmen **Design-to-Production** aufgesetzt. Hierfür wurde eine topologische Modellumgebung programmiert, durch die eine assoziative Bauteil- und Gebäudegenerierung möglich wird. Alle planungsrelevanten Informationen können so im laufenden Arbeitsfortschritt eingespeist und das Modell sukzessive angereichert werden. Auf diese Weise können Potenziale im Hinblick auf ökologische Verbesserungen (Energiebedarf; Emissionen, Rezyklierbarkeit, Abfallaufkommen), konstruktive Anforderungen (Fügemethoden, Bauteilaufbauten) oder produktionsrelevante Faktoren (Bauteildimensionen, -gewicht) direkt in früher Planungsphase von den Planenden berücksichtigt und während der Planung angepasst werden.

Empfehlungen für das weitere Vorgehen: Das Kooperationsteam empfiehlt den Transfer der Ergebnisse in die Baupraxis. Durch eine reale Entwurfsaufgabe und die Realisierung eines Prototypgebäudes, das die Konzeption der hybriden Bauweise aus Raummodulen und elementierten Komponenten gewinnbringend vereint, können die Forschungsbausteine in einer anschließenden Forschungsleistung zur Marktreife bzw. in die Umsetzung geführt werden. Dies betrifft zum einen die Skalierung des Planungsprozesses und damit die Erweiterung des digitalen Planungswerkzeuges sowie Kopplung mit am Markt verfügbarer Software. Zum anderen erfolgt eine Skalierung der konstruktiven Ausführung, der Logistik sowie der Montage des Bausystems zu einem Gebäude. Das Ganze würde unter einem kontinuierlichen Monitoring der Nachhaltigkeitskriterien erfolgen und die Forschungsergebnisse validieren.

2 Einleitung

In den letzten Jahren wurden auf sozialpolitischer Ebene, insbesondere bedingt durch einen hohen Bedarf an neu zu errichtenden Wohngebäuden, Förderprogramme für den Einsatz und die Weiterentwicklung serieller Bauweisen aufgesetzt. Diese bewirken nicht nur aufgrund herbeigeführter Vereinheitlichung von Planungs- und Produktionsprozessen Skaleneffekte im Hinblick auf Kostensenkungspotenziale, sondern erreichen außerdem einen sparsamen Einsatz von Ressourcen und begünstigen einen schnellen und kontrollierten Bauablauf.

Um die Vorteile des seriellen und modularen Bauens in jeglicher Hinsicht voll auszuschöpfen, muss ein Umdenken schon zu Beginn auf PlanerInnen-Ebene in Entwurf und Ausschreibung stattfinden. Die Optimierung, Weiterentwicklung und Verknüpfung von Planungsmethodik, Prozessqualität und Fertigungsinstrumenten unter den Aspekten der Nachhaltigkeit und einer optimierten Kreislaufwirtschaft sind dafür essenziell.

Aktuelle Entwicklungen zum Thema „Vorgefertigtes Bauen mit Raummodulen“, sowie die Ergebnisse aus eigenen Forschungstätigkeiten belegen, dass Planungsansätze mit Raumzellen vorwiegend eingeschränkte typologische Anwendungsszenarien ermöglichen, was sich defizitär im architektonischen Erscheinungsbild ausweist und die Flexibilität von Gebäudestrukturen auch im Sinne von Nachnutzungsszenarien stark eingrenzt. Weiterhin müssen Anforderungen an Transport und Logistik berücksichtigt werden, denn sowohl Emissionen durch große Distanzen von der Fertigungsstätte zur Baustelle als auch Sondertransporte und hohe Montagegewichte haben Einfluss auf den Lebenszyklus und die Wirtschaftlichkeit dieser Bauweisen.

Der Einsatz von Raummodulen besticht vornehmlich durch äußerst systematisierte Planungsmethoden, eine sehr kontrollierte, (energie-)effiziente Fertigung im Werk und schnelle Montage vor Ort. In Bezug auf den Automationsgrad der Planungs- und Herstellungsabläufe wird jedoch deutlich, dass ein großer Anteil der Ausführungsarbeiten auch im Werk noch manuell stattfindet. Vorhandene Nachhaltigkeitspotenziale mit Blick auf Ressourceneinsparung und die Erweiterung der Zirkularität von der Planung bis in den Rückbau bleiben ungenutzt.

Eine Grundlage in Form eines digitalen Werkzeugs, die verschiedene Bauweisen und deren Verknüpfung mit Nachhaltigkeitspotenzialen schon im Entwurfsstadium liefert, steht aktuell für PlanerInnen als wertvolle Bewertungsgrundlage hinsichtlich des Ressourceneinsatzes, der Lebensdauer und Emissionen, nicht zur Verfügung. Des Weiteren mangelt es an einer nachhaltigen Strategie, welche die Entwurfsdaten kontinuierlich in die Ausführung und darüber hinaus transferiert.

2.1 Projektziele

Die Forschungsleistung stellt die Entwicklung von vorgefertigten Bauteilen oder Baugruppen in Hybridbauweise in den Fokus, die auf einem durchgängig digitalen Planungs- und Produktionsprozess basieren und eine höhere konstruktive Flexibilität und gestalterische Varianz erreichen, wodurch sie zur Verbesserung der nachhaltigen Nutzung von Gebäuden beitragen. Hybridbauweise definiert sich in diesem Kontext wie folgt: Ausgehend von einem adaptiv-assoziativen Bausystem werden vorgefertigte, dreidimensionale raummodulare Einheiten mit linearen Tafel- und Stabelementen systematisch in einer Planungsleistung kombiniert und im Hinblick auf eine automatisierte Produktion baukonstruktiv entwickelt, sodass eine große Bandbreite an Lösungsansätzen für mehrgeschossige Gebäudetypologien bereitgestellt werden kann.

Alleinstellungsmerkmal des Forschungsansatzes ist der komplementäre Mittelweg aus Raummodul- und Elementbauweise im Hinblick auf eine adaptive Baumethode, die dem komplexen Anforderungsgeflecht heutiger Planungsaufgaben durch eine hohe Flexibilität sowohl in der materialkonstruktiven Ausführung als auch der gestalterischen Varianz entspricht.

Im Vergleich zum aktuellen Stand der Technik zielt die Forschungsleistung insbesondere auf eine nachhaltige Systemoffenheit ab, welche durch eine Balance zwischen Flexibilität und damit einer Adaptivität

auf der einen Seite und Systematisierung auf der anderen Seite gekennzeichnet ist. Adaptivität bezeichnet hier die projektspezifische Anpassung der raummodularen Einheiten und Tafелеlemente miteinander und in ihren Dimensionen.

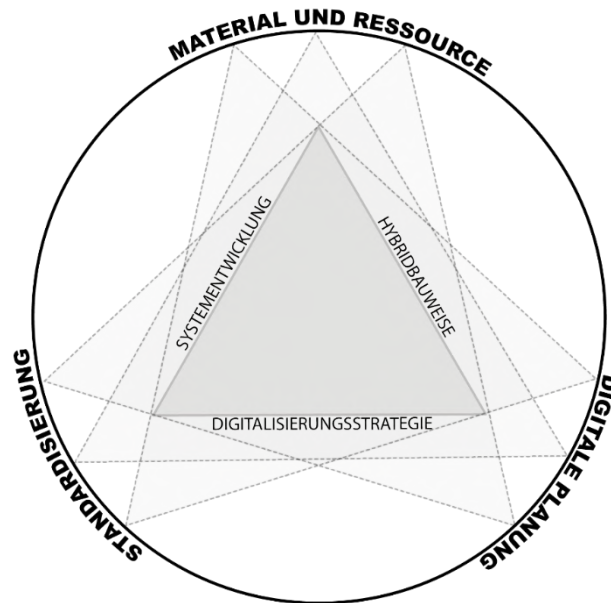


Abbildung 2-1 Verknüpfung der Forschungsparameter Material und Ressource, Standardisierung und Digitale Planung mit Transfer zu den jeweiligen Arbeitsbereichen

Die dabei angestrebten konkreten Forschungsziele werden entsprechend des Arbeitsplans wie folgt zusammengefasst:

2.1.1 Verbesserung der Ressourceneffizienz auf Baustoffebene

Erhöhung des Nachhaltigkeitspotenzials auf Werkstoffebene durch die Reduktion und Substitution der Ausgangsstoffe bei der Betonherstellung, die Verwendung hochfester und vorgespannter Bauteile und die Realisierung schlanker und bedarfsangepasster Konstruktionen. Ermittlung der tatsächlichen Materialeinsparung (Prognose 20-30%), prozessenergetischen Einsparung und Verbesserung der CO₂-Bilanz.

2.1.2 Umweltentlastung durch Bauweise und Konstruktion

Steigerung der Ressourceneffizienz durch die Weiterentwicklung von reinen Beton-, Holz- oder Stahlmodulen zu hybriden Modulkonstruktionen, in denen die spezifischen Materialeigenschaften entsprechend ihrer Leistungsfähigkeit genutzt werden. Entwicklung äußerst materialsparender, schlanker Konstruktionen, die bei gleichen Gesamtabmessungen zu ca. 20 % höheren Nutzflächen führen. In Kombination mit am Markt verfügbaren reversiblen, trockenen Füge-techniken werden demontierbare Konstruktionen entstehen, die einer Wiederverwendung bzw. dem Materialkreislauf zugeführt werden können (design to disassemble). Durch ein neuartiges Fertigungs-Layout für hybride Konstruktionen¹ in der Fabrik werden weitere Nachhaltigkeitspotentiale erschlossen.

2.1.3 Nachhaltiges Gebäudetechnikkonzept

¹ Hybride Konstruktion: in dieser Arbeit definiert hybrid die Komponentenfertigung aus raummodularen Einheiten und zweidimensionalen Bauteilen.

Die Gebäudetechnik wird im Sinne der Suffizienz auf die wesentlichen Erfordernisse reduziert und als vorgefertigte Plug-and-Play-Komponenten berücksichtigt. Durch eine einfache Zugänglichkeit wird eine wirtschaftliche Revisionier- und Austauschbarkeit gewährleistet, was die unterschiedlichen Lebensdauern von Gebäude und Anlagentechnik berücksichtigt.

2.1.4 Entlastung der Ressource Mensch

Durch eine Steigerung des Maßes der Vorfertigung und die Anwendung automatisierter Fertigungstechnologien werden arbeitsintensive Gewerke zusammengefasst und in der Halle ausgeführt werden. Hierbei verbessern sich neben der Arbeitssicherheit signifikant die Arbeitsbedingungen in einem stabilen Umfeld ohne große Wege für die Mitarbeiter und mit einer witterungsunabhängigen kontinuierlichen Möglichkeit zur Produktion.

2.1.5 Digitale Nachhaltigkeit

Aktuell in der Anwendung befindliche digitale Entwurfs- und Planungstools (BIM), die sich noch vorwiegend an analogen Planungsprozessen orientieren, könnten weit mehr als Werkzeuge zur Umsetzung von Ideen und Abläufen werden, wenn eine frühe Bereitstellung der Datengrundlage möglich wird und Informationen fortwährend miteinander verknüpft werden. Dafür muss die digitale Planungsumgebung als assoziatives Werkzeug eingesetzt werden, um Fehler- und Schnittstellenprobleme auf ein absolutes Minimum zu reduzieren und eine kontinuierliche Digitalisierung des Planungs- und anschließenden Ausführungsablaufs zu gewährleisten. Hierzu wird die Entwicklung eines assoziativen Beschreibungsmoduls angestrebt, welches über jetzige BIM-Strukturen herausgeht, jedoch damit kompatibel sein sollte.

3 Systemkonzipierung

3.1 Vorgehen und Methodik

Die interdisziplinäre Forschungsleistung erfolgt formal stets entsprechend der drei Schwerpunkte Modular - Digital - Zirkulär separat, die im Wesentlichen auch die Leistungen der drei Kooperationspartner differenzieren. Die synchrone Erarbeitung der Leistungsschwerpunkte und deren Verzahnung war stets forschungsleitend. Innerhalb der durchgeführten Kooperationstreffen konnten in regelmäßigen Abständen die Arbeitsstände abgeglichen werden sowie der Erkenntnisgewinn geteilt werden.

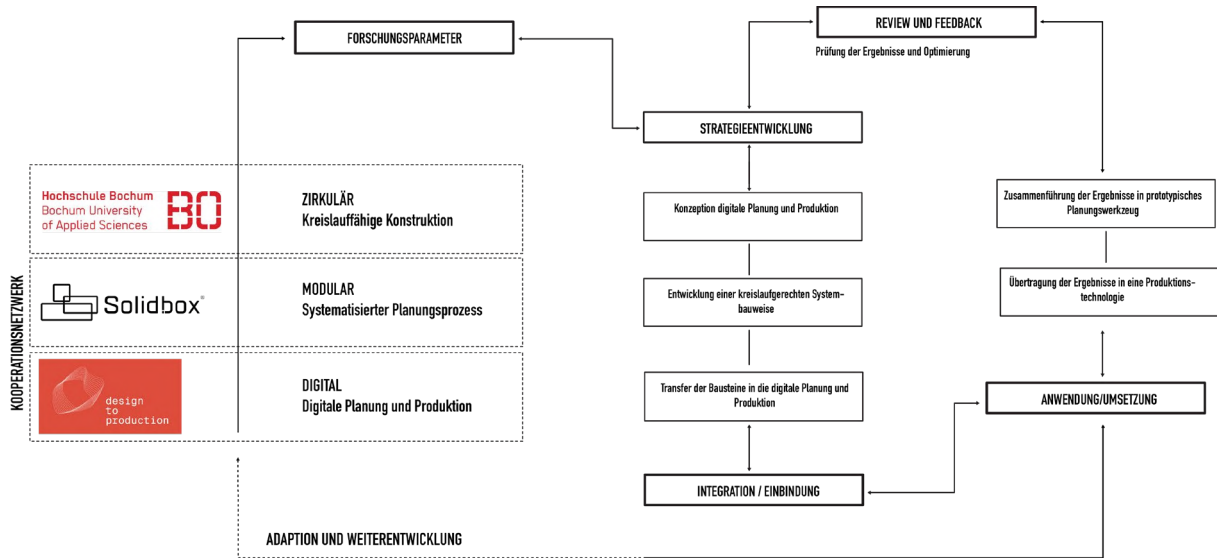


Abbildung 3-1

Flussdiagramm der Forschungsinhalte in Abhängigkeit mit den Kooperationspartnern

Methodisch haben die drei Bereiche unterschiedliche Ansätze verfolgt. Unter dem Thema **Modular** wurde von der HSBO maßgeblich die Gewichtung von Systemansatz zu Anpassungsplanung erarbeitet. Methodisch wurde auf Planungsebene ein eigenes Referenzgebäude konzipiert, welches die konstruktiven Vorteile der entwickelten Forschung in der Kombination von raummodularer Bauweise und elementierten Bauteilen optimal herausstellt. Die bewusste Fokussierung auf das entwickelte hybride System als massive Skelettkonstruktion mit flächigen Leichtbauteilen wurde unter dem Schwerpunkt **Zirkulär** kontinuierlich balanziert. Dazu wurden eine umfassende Datengrundlage zur Ökobilanzierung erstellt, die sowohl Einzelbauteile, also das Raummodul, und gesamtheitlich das Referenzgebäude betrachtet. Die Bilanzierungsergebnisse fungierten als unmittelbare Entscheidungshilfe innerhalb der Forschungsleistung bei der Konzeption des hybriden Systembaus. Unter dem Schwerpunkt **Digital** erfolgte die Forschungsleistung hauptsächlich am digitalen Beschreibungsmodell. Die analog erzeugten Bilanzierungsdaten wurden konsequent in die digitale Konzeption eingespeist und abgeglichen. So erfolgte eine konsequente Schnittstellenkontrolle.

Die Forschungsziele zu Modular - Zirkulär - Digital wurden zuerst durch die Hochschulpartner analysiert, kategorisiert und methodisch gesamtheitlich entwickelt, um anschließend im digitalen Demonstrator durch den Praxispartner Design-to-Production eingesetzt und erprobt zu werden. Die Bewertung des anwendungsorientierten Einsatzes erfolgte durch den Praxispartner Solid.Modulbau. Die ausschnittsweise Fertigung eines realen Demonstrators sowie die Erarbeitung der hierfür erforderlichen Ausführungsunterlagen wurden, durch die Firma Bremer SE durchgeführt.

Methodisch wird stets das ausbalancierte Verhältnis aus der Anwendung eines Systemansatzes und einer Anpassungsplanung abgewogen mit dem Ziel zugleich wirtschaftliche wie architektonisch hochwertige Konstruktionen zu schaffen. Dieser Abwägungsprozess erfolgt auf unterschiedlichen Ebenen in Bezug auf die drei definierten Schwerpunkte modular, zirkulär und digital.

3.2 Ganzheitliche Nachhaltigkeitsstrategie

3.2.1 Zusammenhang aus Kreislaufwirtschaft und individualisiertem Systembau

Der entwickelte Forschungsansatz Modular - Zirkulär - Digital schafft es, durch ein ausgewogenes Verhältnis von Standardisierung und Individualisierung eine Kreislauffähigkeit auf unterschiedlichen Ebenen umzusetzen. Dies äußert sich wie folgt:

Eine projektspezifische Vorfertigung unterstützt die Kreislauffähigkeit einer Gebäudestruktur in dem Sinne, dass aufgrund der individualisierten Standardisierung eine Anpassbarkeit für höhere Nutzerakzeptanz gewährleistet und dadurch längere Lebensdauer von Gebäuden geschaffen werden kann. Sinclair et al. definieren resiliente Konstruktionen wie folgt: "The building systems should be designed with the capacity to cope with future changes with minimum demolition, cost and waste and with maximum robustness, mutability and efficiency" [SM12 S.35-32]. Die Flexibilität eines Gebäudes zielt darauf ab, möglichst lange und unter wechselnden Einflüssen nutzbar zu bleiben.

Die Forschungsleistung schafft diese Flexibilität zum einen durch die Kombination der raummodularen und elementierten Komponenten. So werden flexible Grundrisse generiert, die im Laufe des Nutzungszyklus auf geänderte funktionale Anforderungen reagieren können, was einer langen Lebensdauer zuträglich ist und zu einer längeren Bindung der Emissionen führt. Zum anderen erlaubt die reversible Auslegung des individualisierbaren Systembaus eine strukturelle Flexibilität. Diese äußert sich in der Erweiterbarkeit sowie im Rückbau der Konstruktion und einer Wiederverwendung der Komponenten innerhalb einer neuen Konfiguration an anderer Stelle. Die sich ergebenden Vorteile zeigen sich in der vergleichenden Ökobilanz verschiedener Rückbau- und Wiederverwendungsszenarien (4.2.3.).

Eine digital geplante Anpassung des Entwurfes kann durch die direkte computerbasierte Ansteuerung der Fertigungsmaschinen von modularen oder elementierten Konstruktionen innerhalb des Fertigungsprozesses stattfinden. Ein Beispiel dafür bildet der Sonderforschungsbereich „SSP 2187 Adaptive Modulbauweisen mit Fleißfertigungsmethoden - Präzisionsschnellbau der Zukunft“ (Quelle Mark et. al). Für die Umsetzung adaptiver Konstruktionen werden die von Koren geforderten „rekonfigurierbaren Herstellungssysteme“ benötigt (Quelle Koren). Nagel und Kasperek betonen zudem, dass die Stärke eines systematisierten Prototyps darin liegt, dass er in seiner Gestaltungsqualität differenziert und damit individualisiert werden kann [NK19].

Standardisierungstendenzen beispielsweise zur Zeit der Industrialisierung, aber auch im Modularen Bauen hatten bisher vorrangig eine Produktivitätssteigerung und damit die Steigerung der Effizienz im Blick. Durch die Verquickung von Vorfertigung und Anpassbarkeit innerhalb eines Systems ergeben sich jedoch nennenswerte Vorteile für die Kreislauffähigkeit von Konstruktionen (3.3.1.3erweis Ökobilanz). Digitalisierung und Automatisierung der Fertigung ermöglichen unter anderem architektonische Varianz, den gezielten Einsatz von Ressourcen, eine höhere Produktivität, einen besseren Rückbau und eine digital gesteuerte Wiederverwendung.

Um diese schwierige Aufgabe zu bewältigen, sind digitale Entwurfswerkzeuge und automatisierte Fertigungstechnologien notwendig, die ein adaptives Design und eine individualisierte Vorfertigung über die bisher etablierten Standards hinaus ermöglichen [Hol24]. Das innerhalb der Forschung entwickelte digitale Planungswerkzeug bietet Planenden eine wertvolle Entscheidungshilfe, indem Vorgaben für Tragwerke, Nachhaltigkeit und Design bereits innerhalb des Entwurfsprozesses miteinander verknüpft und bewertet werden können. So wird der Grundstein für eine neue Nachhaltigkeit geschaffen, die durch Digitalisierung und Automatisierung gestützt wird.

3.3 Potenzialanalyse am Beispiel Solid.Modulbau

3.3.1 MODULAR

3.3.1.1 Beschreibung des Ausgangsmoduls

Ausgangsbasis bildet das massive Stahlbetonmodul des Kooperationspartners Solid.Modulbau, welches sich zur Zeit der Antragstellung im negativen durch einen sehr hohen Betonanteil sowie eine begrenzte architektonische Varianz auszeichnete. Im positiven bestach die Bauweise durch die wirtschaftliche Fertigung aufgrund der hohen Vorfertigung sowie der extrem kurzen Bauzeiten, die erreicht wurden. Diese Bauweise bildete sowohl hinsichtlich des Materialeinsatzes als auch der konstruktiven Ausführung und Fügung den Ausgangspunkt für den Forschungsgegenstand, der Entwicklung einer hybriden Bauweise, die durch digitale Werkzeuge assoziativ Anpassbar ist. Diese Adaptivität wird durch die kontinuierliche Anbindung in die automatisierte Produktion sichergestellt.

Das raummodulare System der Firma Solid.Modulbau besteht primär aus Stahlbeton und setzt sich aus einer Stahlbetonsohle, einer Stahlbetondecke, Stahlbetonwänden und / oder -stützen zusammen. Das Standardmodul hat die Abmessungen B/L/H = 3,20m / 9,50m / 3,16m. Maßgebliche Anforderungen an die Struktur und Konstruktion sind in einem Planungshandbuch des Unternehmens Solid.Modulbau definiert, das als Unterstützung für Planen und Bauen mit diesem System dient. Die maximale Breite (Außenmaß) des Moduls beträgt 3,40m. Dieses Maß resultiert aus den transporttechnischen Anforderungen. Eine Überschreitung dieses Maßes bedeutet, dass ab einer Modulbreite von 3,50 m Sondertransporte erforderlich werden, wodurch ökonomische und ökologische Nachteile, wie z.B. ein größerer Aufwand an Fahrzeugen, höhere CO₂-Emissionen, entstehen. Die Standardhöhe eines Moduls beträgt 3,16m in Anlehnung an ein Vollgeschoss. Weitere Faktoren für dieses Maß sind die Durchfahrtshöhe der Tore in der Produktionshalle und die einzuhaltenden Abmessungen für den Straßenverkehr (vgl. Anhang Abschnitt 10.1.1.1). Schließlich spielt das Gewicht eines Moduls eine entscheidende Rolle, da für LKW ein höchstzulässiges Gesamtgewicht von 40,0 t gilt. Ein Betonmodul von Solid.Modulbau mit den Abmessungen 9,50m, wiegt ca. 34-36 Tonnen.

a) Tragstruktur

Strukturell wird standardmäßig mit einer Stahlbetonsohle von 12cm und einer Stahlbetondecke von 10 cm. Stärke geplant. Bei Modulen mit über 3,20m Breite erhöht sich die Deckenstärke auf ca. 12 cm. Offene Module mit weniger als vier Seitenwänden benötigen Über- bzw. Unterzüge, um strukturelle Anforderungen und die notwendige Stabilität zu erreichen. Die Abmessungen der Unterzüge liegen bei b/h = 20/30 cm (inkl. Decke). Die Längswände sind standardmäßig 10cm stark, die Querwände umfassen eine Stärke von 12cm. Wände zu Hausfluren sind aus Schallschutzgründen mit einer Stärke von 18 cm zu planen, Brandwände müssen mindestens 14cm aufweisen.

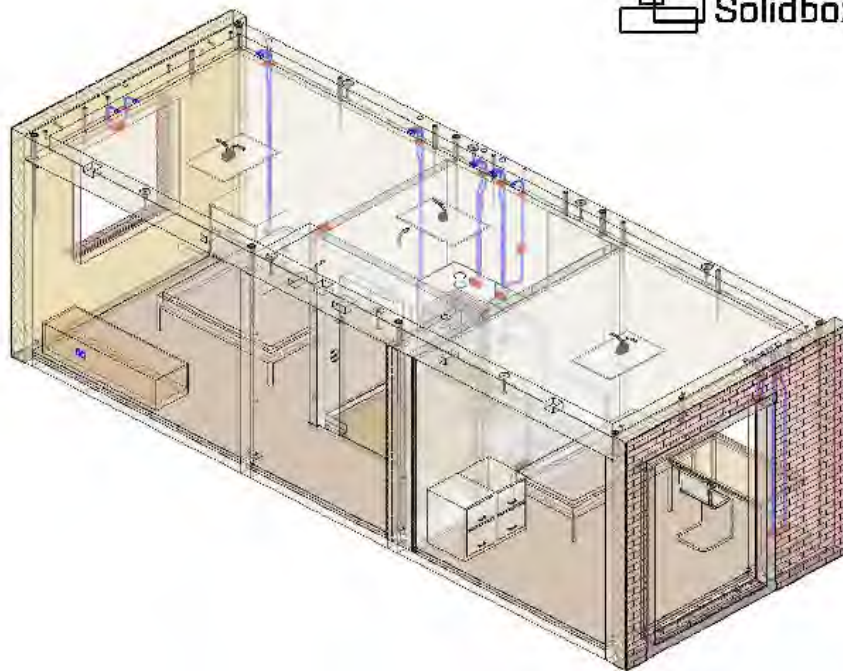
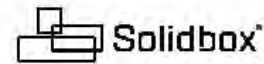


Abbildung 3-2 Isometrie eines Betonmoduls der Fa. Solid.Modulbau

b) Gebäudehülle

Die Betonmodule werden entweder mit Innendämmung und Sichtbetonfassade oder mit Außendämmung angeboten. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden die außengedämmten Module näher betrachtet. Die Fassade wird gemäß Planungshandbuch mit einem Wärmedämmverbundsystem ausgeführt (Putz, Klinkerriemchen usw.), andere Fassadensysteme (Vorhangfassade usw.) sind jedoch auch möglich. Die Module werden in der Regel werksseitig mit Fassade inkl. Fenstern gefertigt und auf die Baustelle geliefert. Fugen zwischen den Modulen werden auf der Baustelle passgenau gefüllt. Balkone oder Laubengänge sind selbsttragend und werden punktuell mit dem Modul verbunden. Die Decke des obersten Moduls dient dabei als raumabschließendes Bauteil, an der die Attika aus Beton mittels Hülsen befestigt wird. Auch Schrägdächer können ausgebildet werden. Diese werden konventionell gefertigt und auf die Deckenplatte der Module montiert. Die Gründung kann über Punkt- oder Streifenfundamente oder auf einem konventionell gefertigten Sockelgeschoss erfolgen.

c) Ausbau

Im Ausbau bietet das Standardmodul aus Beton grundsätzlich verschiedene Gestaltungsoptionen. Dabei werden die meisten Ausbaustufen bereits im Werk vollzogen. Folgende Bauteile werden im Werk verbaut: Trockenbauwände, Elektroarbeiten, TGA-Installation, Bodenbeläge (z. B. Fliesen in Bädern), Türen in Modulwänden, Malerarbeiten (z. B. Raufaser, Anstrich), Sanitärobjekte.

Zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit strebt das Unternehmen Solid.Modulbau hohe Ausbaustufen in der Werksherstellung an. Idealerweise müssen die Raumzellen auf der Baustelle lediglich zusammengesetzt werden. Durch die Präzision im Werk und die Berücksichtigung von baulichen Toleranzen sind dann nur noch wenige Anpassungen bzw. Korrekturen vor Ort erforderlich. Die Materialien und Qualitäten des Ausbaus basieren auf einer Materialcollage der Firma Solid.Modulbau (siehe Anlage bzw. siehe Planungshandbuch).

d) Gebäudetechnik

Die Betonmodule werden grundsätzlich mit Plug- and Play Installationskomponenten konzipiert. Hierzu gehören dezentrale Lüftungsanlagen, Infrarot-Deckenheizungen und Brauchwasserwärmepumpen oder Durchlauferhitzer. Die Elemente der technischen Gebäudeausrüstung werden für die Planung in

eine BIM-Software eingepflegt. Der Einsatz der Infrarot Technik hat sich in der Vergangenheit bewehrt. Die bisher durchgeführten Objekte zeigen deutlich bessere Verbrauchswerte, als vergleichbare Objekte mit Luft-Wasser-Wärmepumpen. Dieses vor allem vor dem Hintergrund, dass die Gebäude durchweg um ca. 1,7 Grad weniger aufgeheizt werden, als bei Heizsystemen mit Konvektionstechnik (Fußbodenheizung und Radiatoren). Zusätzlich ist die IR Heizung ein schnell reagierendes Heizsystem, was es ermöglicht, in einer gut gedämmten Hülle die Heizung über einen längeren Zeitraum bei ungenutzter Wohnung tagsüber abzustellen. Bei betreten der Wohnung kann die Temperatur in sehr kurzer Zeit wieder auf die Wohlfühltemperatur angehoben werden, im Gegensatz zu langsam reagierenden Heizsystemen, wie die Fußbodenheizung. Hier wird im Winter über Monate eine konstante Temperatur vorgehalten, auch wenn die Wohnung nicht genutzt wird.

Die Sanitärausstattung wie WC, Waschbecken und Dusche wird von Solid.Modulbau geplant. Die erforderlichen Wasserleitungen werden dabei positioniert und ggf. mit Vorwandinstallationen ausgeführt. Detaillierte Angaben zu den jeweiligen Maßen der Ausführungen können dem Planungshandbuch entnommen werden. Die Wasserver- und entsorgung der Sanitärausstattung und der Kücheninstallation wird frühzeitig mit der Bauherrenschaft abgestimmt, damit nur eine Installationswand je Wohneinheit erforderlich ist. Hierfür wird der direkte Anschluss an die Installationswände empfohlen. Sind die Leitungen nicht an den Innenwänden vorgesehen, sondern an den Betonwänden, müssen Schlitze und Durchbrüche für Zu- und Abwasser vorgesehen werden. Die Lüftung wird mit einer Umluftabzugshaube im Küchenbereich und mechanischen Lüftern umgesetzt. Die Elektroplanung, wie z.B. die Anordnung von Steckdosen, Schaltern, Lichtvorrichtungen etc., erfolgt durch Solid.Modulbau und wird in die Fertigungsplanung integriert.

3.3.1.2 Wohnqualität eines beispielhaften Wohngebäudes

Für die Untersuchung der Wohnqualität wurde ein beispielhaftes Wohnprojekt (Gewe Nordhorn) der Firma Solid.Modulbau untersucht. Die Analyse steht nicht repräsentativ für alle Wohnbauten der Fa. Solid.Modulbau und dient der Identifikation von Schwachstellen der raummodularen Bauweise und als Basis für die Entwicklung und Optimierung des angestrebten adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems.

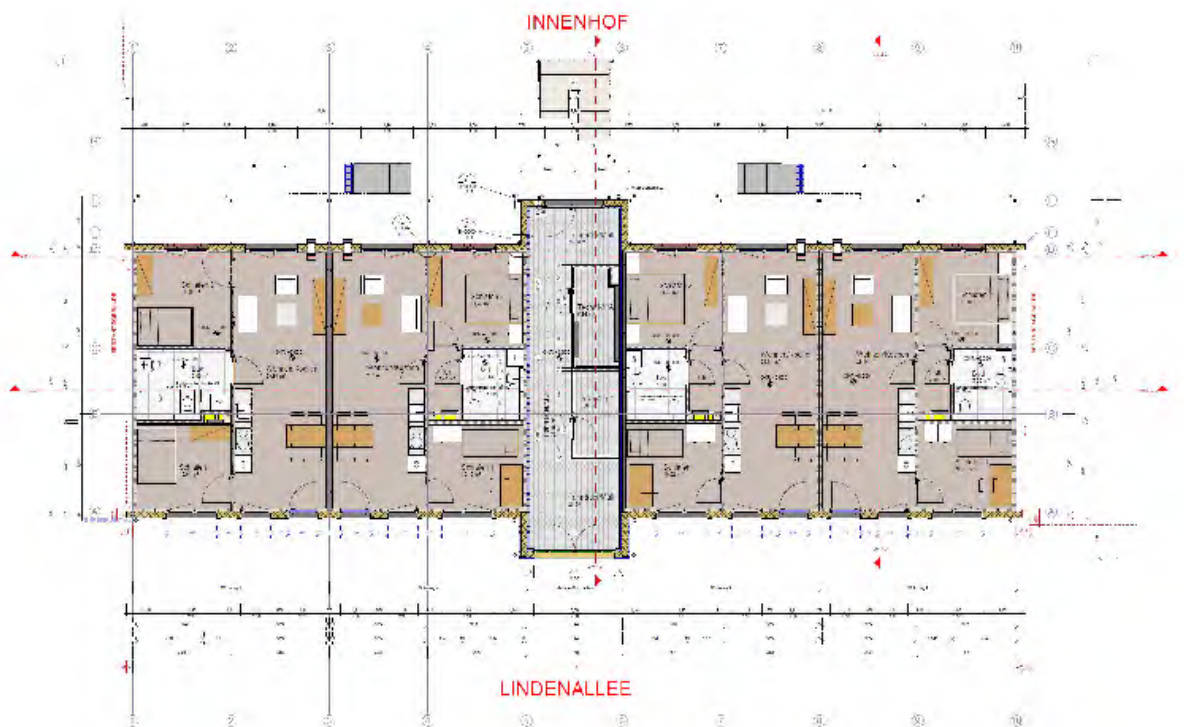


Abbildung 3-3

Grundriss EG des Wohngebäudes Gewo Nordhorn als Grundlage für die Wohnqualitätsuntersuchung

Grundlage für die Wohnqualitätsanalyse stellte eine schnelle und einfache Analysemethodik dar, die auf dem Wohnwert-Barometer aufbaut und im Rahmen der Grundlagenermittlung entwickelt wurde. Im Rahmen der Analyse wird ein Gebäude hinsichtlich der drei übergeordneten Kategorien Gebäude, Grundriss und Raum betrachtet und mittels eines Bepunktungssystems (1-5 Punkte je Unterkategorie) bewertet.

Bewertung Gewo Nordhorn:

Projekt	Gebäude	Grundriss	Raum	Gesamt
Gewo NH	Mittel (9/15)	Schlecht (14/40)	Mittel (14/25)	Mittel (38/80)

Das Projekt weist insbesondere in der Kategorie Grundriss Schwächen auf. Diese sind indirekt auf die raummodulare Bauweise zurückzuführen. Die Positionierung des Technischachts führt zu Zwängen, die den Grundriss in seiner Funktionalität und gestalterischen Qualität erheblich einschränken. Negative Auswirkungen haben außerdem die fehlende Trennung der privaten und öffentlichen Räume, fehlende Raumbezüge (Ankommen/Küche; Schlafen/Bad) und generell eine schlechte Nutzbarkeit des Wohnbereichs. Die mangelnde Barrierefreiheit in den Schlafzimmern ist direkt auf die Modulabmessungen zurückzuführen. Hier stellt der Transport der schweren Betonmodule einen limitierenden Faktor dar (Abmessungen; Gewicht) und schränkt hinsichtlich der gestalterischen Freiheiten ein. Aufgrund des hohen Gewichts der Betonmodule können die Einheiten nicht länger sein, was zu inneren Zwängen führt, die darin resultieren, dass auf ausreichend Bewegungsflächen keine Rücksicht genommen werden konnte.

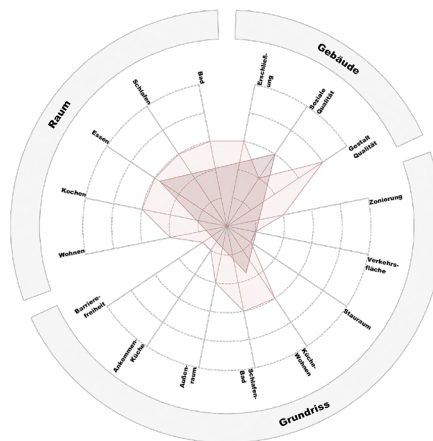


Abbildung 3-4

Ergebnis der Wohnqualitätsanalyse in Form eines Netzdiagramms für das untersuchte Wohngebäude Gewo Nordhorn der Firma Solid.Modulbau

3.3.1.3 Ökobilanz

Innerhalb des Forschungsprojektes wurde durch die Hochschule Bochum eine umfassende Ökobilanz auf Basis einer Excel-Tabelle entwickelt, in der die einzelnen Bauteile der modularen Einheiten in ihrer Dimension und Materialität ökobilanziell und wirtschaftlich untersucht wurden. Die Untersuchung beschränkt sich dabei auf die Bauteile der Primärstruktur. Mithilfe der Tabelle können Module dann unterschiedlich zusammengesetzt, Baustoffe ausgetauscht und gleichzeitig mengenmäßig erfasst werden. Anschließend wurde eine Aufsummierung der ökobilanziellen Ergebnisse durch die Konfiguration von Modulanordnungen in Gebäuden durchgeführt. Im nächsten Schritt werden die Ergebnisse durch die Konfiguration von Modulanordnungen in Gebäuden multipliziert. Weiterhin ermöglicht die Tabelle die unkomplizierte Anpassung der Daten aus den Produkt-EPDs im Rahmen von Nachnutzungsszenarien. Die EPSs stammen aus der Ökobaudat (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen).

In den Ökobilanzen wurden die Lebenszyklusphasen A1-A5 (Rohstoffbereitstellung, Transport, Herstellung, Transport zum Einbauort, Einbau) sowie C1-C4 (Abbruch, Transport, Abfallwirtschaft, Abfallbehandlung) berücksichtigt. Das Recyclingpotenzial aus Lebenszyklusphase D wurde berechnet und für

die Modulvergleiche separat aufgeführt. Bei der Betrachtung verschiedener End-of-Life-Szenarien floss das Recyclingpotenzial in die Berechnungen mit ein und wurde je nach Betrachtung an das Szenario angepasst. Aufgrund der größten Relevanz wurden die erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergiebedarfe sowie das Treibhauspotenzial je Variante berechnet. Eine Erweiterung der Tabelle um zusätzliche Indikatoren der Ökobilanz ist jedoch auch nachträglich noch möglich. Die Berechnungsblätter sind im Abschnitt 10.1 dokumentiert.

Zur Berechnung und Bewertung der Ökobilanz und besseren Vergleichbarkeit mit weiteren Entwurfsansätzen im Projektverlauf wurde, abweichend von den Standard-Maßen, ein Stahlbeton-Modul der Fa. Solid.Modulbau mit den Abmessungen B/L/H = 3,45m / 10,00m / 3,10m betrachtet. Die Abmessungen der einzelnen Bauteile basieren auf den in Abschnitt 7 beschriebenen Daten. Untersucht wurde ein geschlossenes Modul mit einer Türöffnung in der Längswand und einer Fensteröffnung in der Querswand. Die Ergebnisse der Ökobilanz sind in den nachfolgenden Diagrammen dargestellt.

a) Primärenergiebedarf, erneuerbar (PERT) und nicht erneuerbar (PENRT)

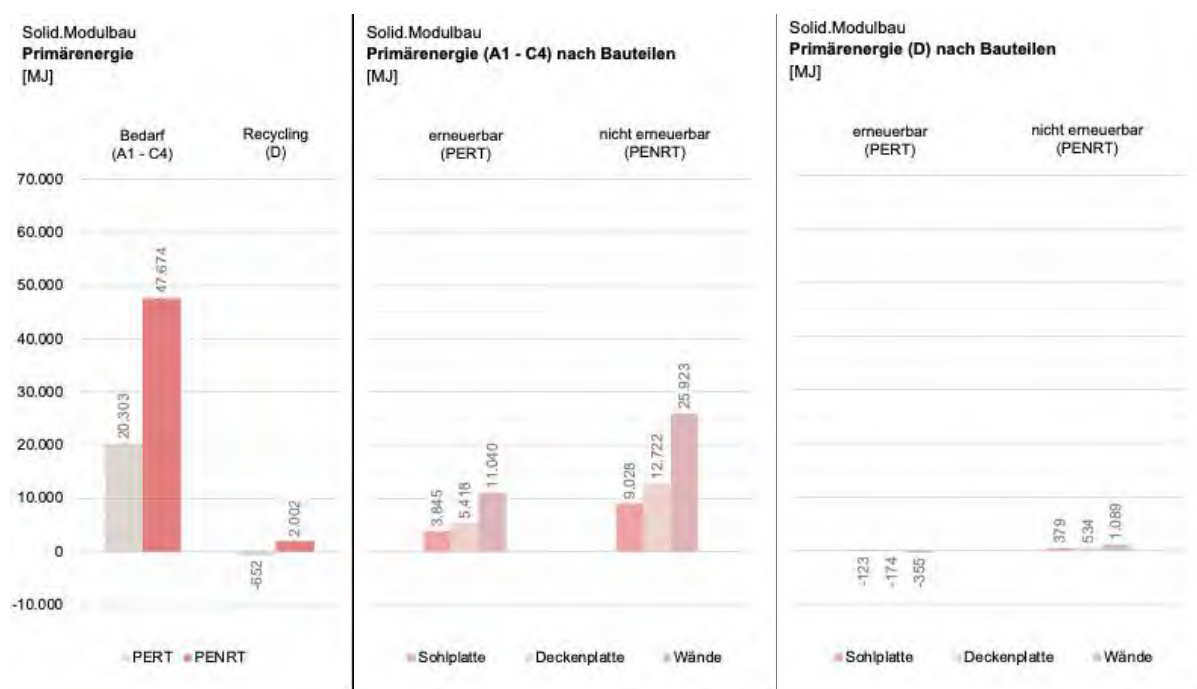


Abbildung 3-5

Analyse des Primärenergiebedarfs (erneuerbar und nicht erneuerbar) des Betonmoduls der Fa. Solid.Modulbau als Ausgangsmodul für weitere Vergleiche / Untersuchungen

Aus den Diagrammen in Abbildung 3.3-4 geht hervor, dass das Betonmodul der Fa. Solid.Modulbau einen Gesamt-Primärenergiebedarf von ca. 69.145 MJ aufweist. Davon ist mehr als 2/3 nicht erneuerbar, stammt also aus fossilen Energieträgern. Nur 1 % des Gesamt-Primärenergiebedarfs kann in der Phase D als wiedergewonnene erneuerbare Energie deklariert werden. Dem gegenüber stehen allerdings ca. 2.037 MJ nicht erneuerbarer Primärenergie, die für den Recyclingprozess aufgebracht werden müssen.

b) Treibhauspotenzial (GWP)

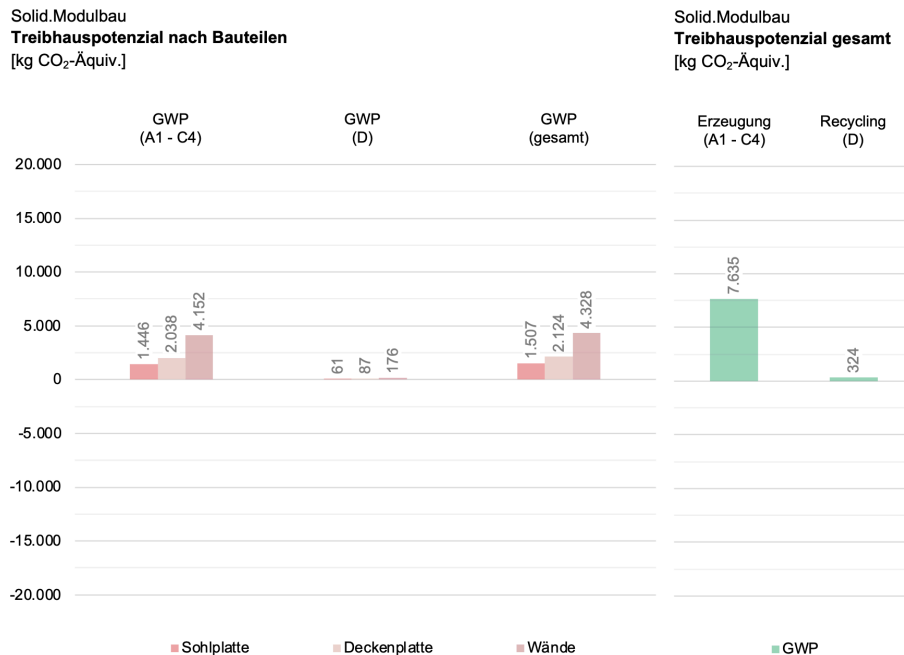


Abbildung 3-6 Analyse des Treibhauspotenzials des Betonmoduls der Fa. Solid.Modulbau

Das Treibhauspotenzial und dessen Verteilung auf die einzelnen Bauteile innerhalb der jeweiligen Lebenszyklusphasen der Betonmodule von Solid.Modulbau wird in Abbildung 3.3-5 dargestellt. Dabei entfällt der größte Anteil des Treibhauspotenzials auf die Herstellungsphase.

Sowohl beim Primärenergiebedarf als auch beim Treibhauspotenzial ist bei der Bauteilbetrachtung die Korrelation zwischen den Ergebniswerten und der verwendeten Betonmenge klar erkennbar. Demnach entfallen die meisten Primärenergiebedarfe und Treibhauspotenziale auf die Wände und auf die Deckenplatte mit den Überzügen.

3.3.2 ZIRKULÄR

3.3.2.1 Einzelbauteilföugung

Die tragenden Elemente (Boden, Decke, Wand) bestehen aus Stahlbeton. Das Recycling von Stahlbeton ist grundsätzlich möglich, jedoch mit einem sehr hohen Aufwand verbunden. Eine zerstörungsfreie Trennung ist für den Bewehrungsstahl möglich, wenn der ihn umgebende Beton kleinteilig zerstört wird. Die direkte Wiederverwendung stellt einen alternativen Umgang mit Stahlbetonbauteilen dar. Die Föugung der Einzelbauteile ist jedoch nicht auf einen zerstörungsfreien Rückbau ausgelegt, was eine Wiederverwendung der Bauteile erschwert. Überdies stellt die Wiederverwendung von flächigen Stahlbetonbauteilen aktuell noch eine große Herausforderung dar.

Die Innenwände hingegen werden als Trockenbauwände, bestehend aus einer Gipskartonständerwand mit beidseitiger Beplankung sowie Verspachtelung, gefertigt. Durch den Einsatz von Schraubverbindungen ist der Rückbau prinzipiell möglich. Optimierungspotenzial besteht in der Vereinfachung der Demontage durch gezielte konstruktive Maßnahmen wie den Verzicht auf Leim, Spachtelung oder die Schichtreduzierung bei mehrschichtigen Bauteilen.

Aktuell wird auch Fließestrich eingesetzt, was hinsichtlich Wartungsfreundlichkeit von Installationsleitungen kritisch zu hinterfragen ist.

3.3.2.2 Raummodulfügung

In Abbildung 3.3-1 werden die Füge- und Detailpunkte der tragenden Stahlbetonbauteile (Decken / Böden, Wände) dargestellt. Die Bodenplatte wird bei Anordnung einer Stütze im Randbereich (Ecke oder Mitte) ausgespart, sodass die Verbindung seitlich über verschiedene Bolzen erfolgt. Wird eine Wand vorgesehen, gelingt die Befestigung über unterschiedliche Ankertypen und Bewehrungsanschlüsse. Auch hier wird die Verbindung seitlich an der Bodenplatte umgesetzt. Die Decke lagert auf den Wänden bzw. Stützen auf und wird mittels Anker befestigt. Die Fugen werden wasserundurchlässig vermörteln. Alles in allem wird die Fügung der massiven Betonelemente mit Ankern und Bolzen realisiert, damit die tragkonstruktiven Anforderungen erfüllt werden. Die wesentlichen Fügungen erfolgen bereits in der Produktionshalle, trotzdem sind z. B. Transportanker zur Montage inklusive Gewährleistung der Sicherheit erforderlich. Anzumerken ist die für diese Bauweise typische Doppelung der Boden- bzw. Deckenelemente, die beim Stapeln der Module entstehen (Zwischenräume können z. B. Flächen für Technik bieten).

3.3.2.3 Gebäudefügung

Raummodule könnten wiederverwendet werden, sind jedoch aktuell nicht explizit darauf ausgelegt. Der Wiedereinsatz ist aufgrund des sehr starren Grundsystems limitiert. Das versetzen eines gesamten Gebäudes scheint hier am realistischsten zu sein. Um Effizienzen zu optimieren müssten sämtliche Montageschritte hinsichtlich einer vereinfachten Demontage überarbeitet und angepasst werden.

3.3.3 DIGITAL

3.3.3.1 Planungsprozess

Im Rahmen der durch das Planungshandbuch zugrundeliegenden Systemanforderungen des Unternehmens Solid.Modulbau basiert die digitale Planung mit dem raummodularen System auf einem integralen Prinzip. Hierbei wird mittels BIM-Methode (Building Information Modeling) in der Planungs-, Produktions- und Bauphase gearbeitet, und das Gebäude mit der Software Revit modelliert. Alle extern beteiligten Gewerke (Elektro, Lüftung, Sanitär, Heizung usw.), ArchitektInnen und FachplanerInnen erstellen ein Fachmodell zu Koordinationszwecken. Diese Fachmodelle können alle in einem einzigen „Zentralmodell“ oder teils in einer separaten Revit-Datei oder mit einer anderen Software erstellt werden. Die Koordination und Prüfung der generierten IFC-Dateien erfolgt mithilfe einer Koordinationssoftware (Solibri, BIMcollab o.ä.). Nach der finalen Abstimmung und Freigabe durch den Bauherrn werden detaillierte 2D-Ausführungspläne für die Produktion und die Baustelle erstellt. Aus den 3D-Fachmodellen lassen sich zusätzlich auch die aktuellen Massen (Bauteillisten) für die Kostenermittlung und Ausschreibung ableiten. Das Planungs- und Baumanagement erfolgt über die Plattformen „Microsoft Teams“ und „Open Experience“.

3.3.3.2 Produktionsprozess

Zum Zeitpunkt der Antragstellung wurden die Raummodule auf einer Art Fertigungsstraße in einer ca. 160 m langen und ca. 20 m breiten Werkshalle produziert. Komplexe Einzelfertigteile (Balkone, Treppen, Massivwände, Doppelwände, Massivdecken, Filigranplatten, Stahlbauteile usw.) werden extern produziert. Die FertigteilplanerInnen erhalten dafür ein IFC-Modell des Rohbaumodells und 2D-Übersichtspläne (PDF- und DWG-Dateien). Nach erstellen der Schal- und Bewehrungspläne für Stahlbetonbauteile, werden diese vom Prüfstatiker geprüft und zur Produktion freigegeben. Die Prüfung und Freigabe erfolgt ausschließlich digital. Werksintern werden Bodenplatten aus Stahlbeton, Fassaden und der Innenausbau inklusive der Ständerwände und des Bodenaufbaus sowie die Gebäudetechnik gefertigt und installiert.

Die Analyseergebnisse der bestehenden massiven Modulbauweise leiten über zur Definition der Anforderungen an den entwickelten adaptiv-assoziativen/individualisierbaren Systembau und die erreichten Forschungsergebnisse.

4 Forschungsergebnisse

4.1 MODULAR

4.1.1 Anforderungen an die Bauweise und Typologie des adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems

Basierend auf der Grundlagenermittlung zur konventionellen und raummodularen Bauweise und der Auswertung der Untersuchungen zu Wohnqualität konnten Anforderungen an das zu entwickelnden adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems abgeleitet werden. Dabei wird die Zielsetzung wie folgt festgelegt:

- Minimierung der CO₂-Emissionen durch die Reduzierung des Betonanteils
- Reduzierung des Gewichts von Raummodulen durch die Implementierung von leichten Bauteilen
- Schonung von Ressourcen durch die Vermeidung von Bauteildopplungen
- Verbesserung der Wohnqualität und Steigerung der gestalterischen Vielfalt und planerischen Freiheiten durch die Kombination von adaptiven ein-, zwei- und dreidimensionalen Bauteilen

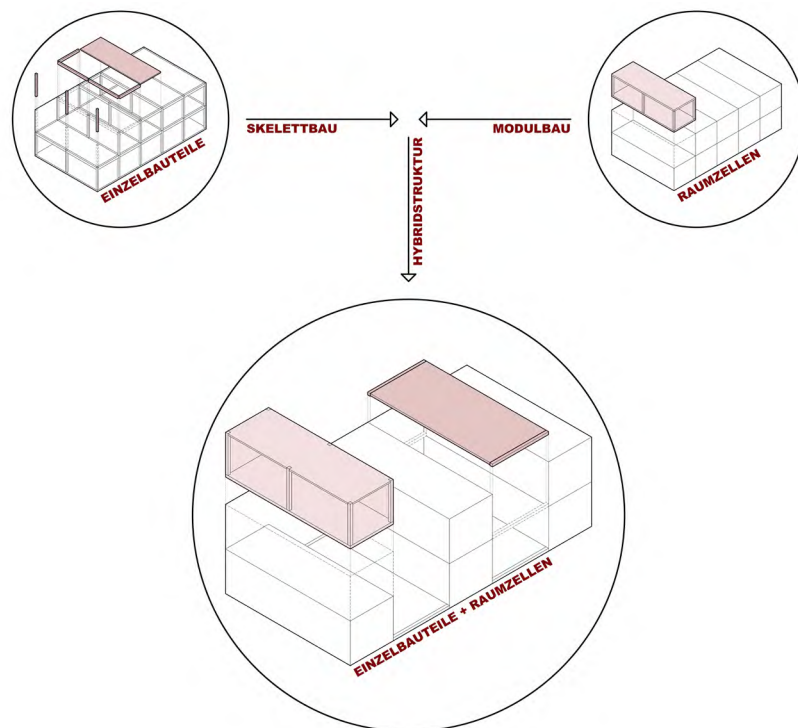


Abbildung 4-1

Schaubild des adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems als Kombination aus ein-, zwei- und dreidimensionalen Bauteilen.

4.1.2 Konzeptionelle Systementwicklung und Betonanteilreduzierung

Im Rahmen der Systementwicklung ist die Reduktion des Betonanteils für die tragenden Bauteile der raummodularen Einheiten angestrebt, um die negativen Umweltwirkungen zu minimieren und das Gewicht der Raummodule zu verringern. Um eine Vergleichbarkeit der baulichen Einheiten zu gewährleisten, wird mit den Grundmaßen des exemplarisch ökobilanziell untersuchten Raummoduls (Ausgangsmodul) in Abschnitt 3.3.1.3 weitergearbeitet.

Abmessungen Raummodul: 3,45m / 10,00m / 3,10m (B/L/H)

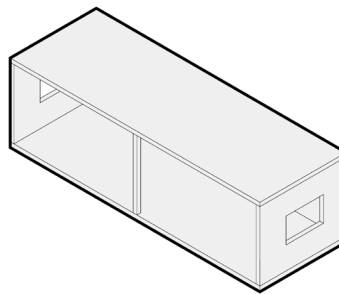


Abbildung 4-2

Stahlbeton-Raummodul als bauliche Ausgangslage für die Entwicklung des adaptiv-assoziativen Bausystems

4.1.2.1 Implementierung der Skelettbauweise zur Betonreduzierung

Das betrachtete Raummodul des Kooperationspartners Solid.Modulbau GmbH zählt zur sogenannten „schweren Vorfertigung“ in Massivbauweise. Eine Reduzierung des Betonanteils wird, ohne den Stahlbeton gänzlich durch Holz oder Stahl zu ersetzen, durch eine Veränderung der Konstruktionsmethode, hier Implementierung der Skelettbauweise, erreicht. Dabei wird das Tragwerk des Moduls auf Stützen, Boden und Decke reduziert. Im folgenden Teil werden die einzelnen Maßnahmen zur Reduzierung des Betonanteils und des Modulgewichts aufgeführt und im Anschluss hinsichtlich ihrer Auswirkungen gegenübergestellt.

Maßnahme 1: Substitution der Betonwände

Im ersten Schritt werden die Stahlbetonwände des Moduls, die gemäß Ökobilanz den größten Anteil am Primärenergiebedarf und am Treibhauspotenzial aufweisen, durch leichte Wände, beispielsweise aus Holztafeln oder Brettspertholz, substituiert. Durch den Lastabtrag über Stützen müssen die Wände keine statischen Funktionen mehr erfüllen. Die Aufgabe reduziert sich auf die Erfüllung bauphysikalischer Anforderungen (bspw. Brand-, Schall- und Wärmeschutz), was auch durch leichte Konstruktionsweisen erreicht werden kann. Die Aussteifung der Module einerseits und des Gebäudesystems andererseits machen vereinzelt Stahlbeton-Wände erforderlich. Im Gesamtgefüge Gebäude kann diese Aufgabe auch durch einen aussteifenden Treppenhauskern erfüllt werden. Die Aussteifung während des Transports muss durch temporär anzubringende konstruktive Maßnahmen (Kreuzverbände etc.) gewährleistet werden.

Maßnahme 2: Subtraktion der Betondecke

Im nächsten Schritt wird auf den oberen Deckenabschluss verzichtet. Dieser dient einerseits als Witterungsschutz während des Transports und als Absturzsicherung auf der Baustelle während der Montage. Insbesondere die offenen Holzbauteile wie Decken Wände und die Installation müssen vor Nässe geschützt werden. Daher wird im Modulbau häufig eine nichttragende Holzdecke eingebaut, welche gleichzeitig auch Raum für Installationsleitungen bietet. Hierdurch geht lichte Raumhöhe verloren und es wird mehr Material verbaut, was nachteilig ist. Wird auf diese Decke verzichtet, müssen der Witterungsschutz und die Absturzsicherung anderweitig temporär gewährleistet werden.

Maßnahme 3: Substitution der Betonsohle

In einem dritten Schritt wird der Boden durch eine leichte Sohlplatte ersetzt. Durch die Implementierung einer leichten Sohlplatte kommt den Randträgern im Sohlbereich eine entscheidende Rolle zu. Die Träger müssen einerseits ein Auflager für die Sohlplatte bieten und andererseits im Zusammenspiel mit der Sohlplatte die Aussteifung des Moduls und des Gebäudes ermöglichen. Eine ausreichende Dimensionierung der Randträger ist daher zu berücksichtigen.

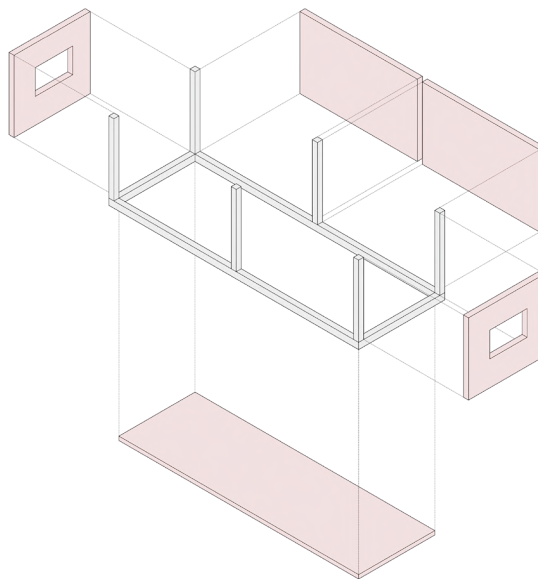


Abbildung 4-3 Stahlbeton-Modul ohne Stahlbetonsohle

Durch die weitestgehende Reduktion der massiven Stahlbetonkonstruktion auf die Tragstruktur in Skelettbauweise wird ein hoher Bedarf an erforderlichem Stahlbeton verhindert. Die Materialeinsparung, aufgeteilt in die Komponenten Beton C50/60 und Bewehrungsstahl, die Reduktion des Modulgewichts und das Einsparpotenzial im Hinblick auf schädliche CO₂-Emissionen können Tabelle 4.1-1 entnommen werden.

Maßnahme	erf. Menge Beton C50/60 [kg]	erf. Menge Bewehrungsstahl [kg]	Gewichts- reduktion [to]	Einsparung Treib- hauspotenzial (A1-C4 + D) [kg CO ₂ -Äquiv.]
Ausgangsmodul	39.260	2.715	42,0	7.959,8
Maßnahme 1	20.540	1.420	- 20,0 (- 48 %)	-3.570,7 (- 45 %)
Maßnahme 2	10.063	696	-31,2 (- 74 %)	-5.694,9 (- 72 %)
Maßnahme 3	6.072	420	-35,3 (- 84 %)	-6.628,6 (- 83 %)

Tabelle 4.1-1 Reduktion des Betonanteils und der CO₂-Emissionen des Rohmoduls

Maßnahme 4: Substitution der raumabschließenden Bauteile

Nach der weitestgehenden Reduktion des CO₂-intensiven Stahlbetonanteils werden die raumbildenden Bauteile durch nachhaltige, leichte Bauteilaufbauten ersetzt. Das entstehende Bausystem soll je nach Anforderung verschiedene Konstruktionen für die flächigen Bauteile ermöglichen. Auf die Dopplung der Geschossdecke, die durch die Stapelung ober- und unterseitig flächig geschlossener Module entsteht, soll verzichtet werden. Hierfür sind Lösungen für den Transport und die witterungsgeschützte Montage auf der Baustelle zu entwickeln.

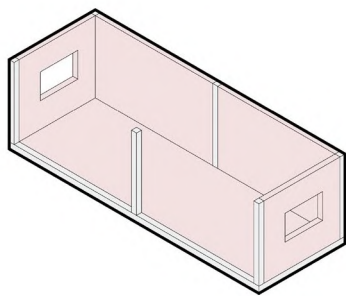


Abbildung 4-4 Stahlbeton-Modul, reduziert auf das tragende Skelett, mit leichten raumabschließenden Bauteilen

4.1.2.2 Ökobilanzieller Vergleich des Ausgangsmoduls und des optimierten Skelettmoduls

Für den nachfolgenden ökobilanziellen Vergleich wird das bautechnisch optimierte Raummodul in Skelettbauweise mit einem Boden und raumabschließenden Wänden aus Brettsperrholz angenommen. Das Recyclingpotenzial beschreibt die energetische Verwertung des Brettsperrholzes (Standardszenario gem. EPD). Ein detaillierter Vergleich der verschiedenen alternativen Materialien für die einzelnen substituierten Bauteile findet in Abschnitt 4.1.3.1 statt.

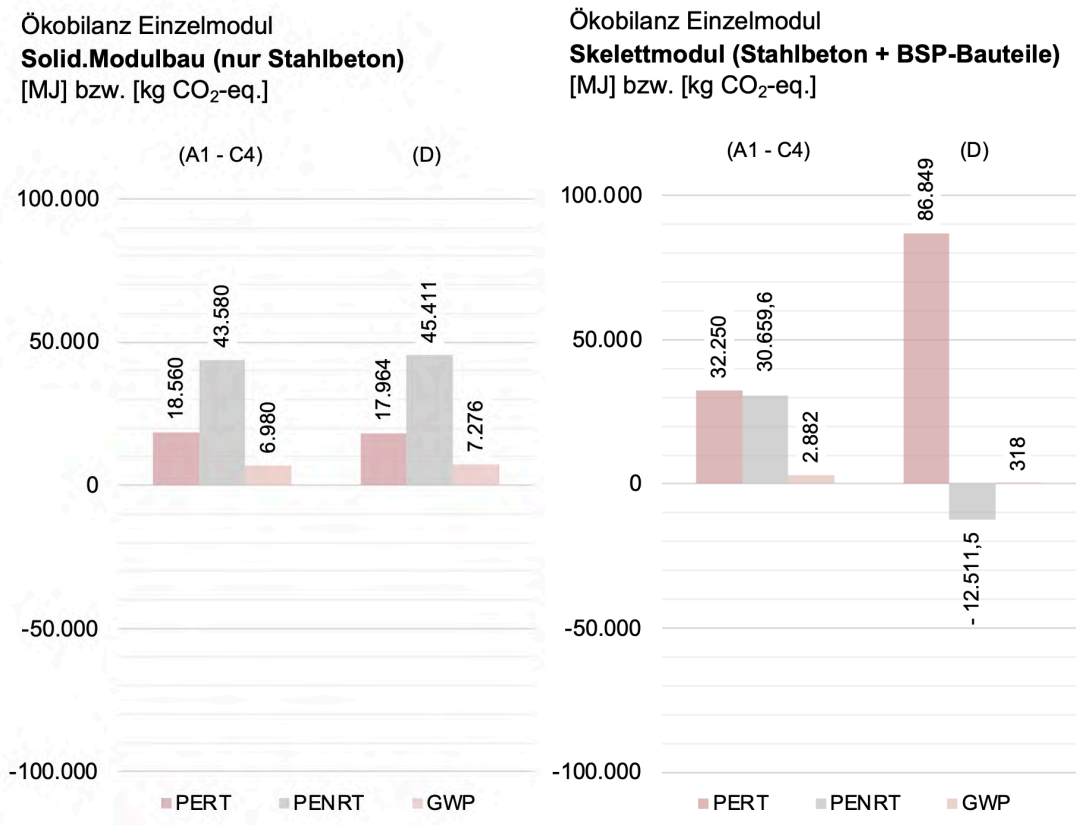


Abbildung 4-5 Ökobilanzielle Gegenüberstellung des Stahlbeton- und Skelettmoduls in Stahlbetonbauweise, mit leichten raumabschließenden Bauteilen

	PERT	PENRT	GWP	PERT	PENRT	GWP	Gesamt- bilanz PERT A-D	Gesamt- bilanz PENRT A-D	Gesamt- bilanz GWP A-D
	A-C	A-C	A-C	D	D	D			
	[MJ]	[MJ]	[kg CO ₂ -eq.]	[MJ]	[MJ]	[kg CO ₂ -eq.]	[MJ]	[MJ]	[kg CO ₂ -eq.]

Stahlbe- ton- Modul	18.560	43.580	6.980	17.964	45.411	7.276	36.524	88.991	14.256
Skelett- Modul	32.250*	30.659	2.882	86.849	-12.512	318	119.099	18.147	3200
Differenz	+ 174 %	- 30 %	- 59 %	+ 484 %	- 128 %	- 96 %	+ 326 %	- 80 %	- 78 %

* einschließlich und im Wesentlichen die Primärenergie als stoffliche Energieträger

Tabelle 4.1-2

Ergebnisse des ökobilanziellen Vergleichs eines Stahlbeton-Moduls und eines auf lineare Tragelemente reduzierten Moduls mit Brettspertholzdecken und -wänden

Im direkten Vergleich der einzelnen Primärenergiebedarfe ist beim Skelettmodul eine Verlagerung von nicht erneuerbaren zu erneuerbaren Primärenergien zu erkennen, wobei bei der Raumzelle in Skelettbauweise ein Großteil der erneuerbaren Primärenergien aus der stofflichen Nutzung (PERM) des Holzes im Brettspertholz resultiert. Beim Stahlbeton hingegen beschreiben die Primärenergiebedarfe ausschließlich die erforderlichen erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energieträger. In Lebenszyklusphase D des Skelettmoduls ist bei den nicht erneuerbaren Primärenergieanteilen sogar eine hohe „Gutschrift“ zu verzeichnen. Das Treibhauspotenzial wird durch die Skelettbauweise während der Lebenszyklusphasen A-C um ca. 60 % reduziert. In diesem Vergleich noch nicht berücksichtigt ist die Reduktion der Treibhausgase aus dem Transport der fertigen Module vom Werk zur Baustelle, die für ein Stahlbetonmodul mit einem Gewicht von ca. 38to höher ausfallen als für ein Skelettmodul mit einem Gewicht von ca. 26to (12to Gewichtseinsparung). Eine Aufstellung der aus dem Transport resultierenden potenziellen Einsparung wird aufgrund des Multiplikatoreffekts in Zusammenhang mit dem Referenzgebäude in Abschnitt 4.1.4.4 vorgenommen.

4.1.3 Konzeptionelle Entwicklung des kreislauffähigen, adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems

Raummodulare Architektur wird häufig mit Defiziten im Bereich der gestalterischen Vielfalt und Flexibilität verbunden. Wie in der Grundlagenermittlung dargestellt werden konnte, ist es bereits heute möglich und auch gängige Praxis, durch die Kombination von ein-, zwei- und dreidimensionalen Bauteilen die Grenzen der Standardisierung und des Raummodulbaus zu überwinden und qualitativ hochwertige Architektur zu schaffen. Eine Grundlage für das adaptiv-assoziative Bausystem stellt die Entwicklung eines Bauteilkatalogs bestehend aus typisierten, teiladaptiven Bauteilen dar. Im Folgenden ist hierbei die Rede von individuell standardisierten Bauteilen.

Das Gesamtsystem wird entsprechend des Schichtmodells nach Stewart Brandt aufgegliedert. Dabei wird zwischen der tragenden Primärstruktur und der Sekundärstruktur unterschieden. Zur Primärstruktur zählt die Tragstruktur. Die Gebäudehülle, Ausbau und Technik sind Bestandteile der Sekundärstruktur und werden konzeptionell teilweise mitgedacht und integriert. Der Fokus der Forschungsarbeit liegt in der Entwicklung einer adaptiv-assoziativen Primärstruktur als geschlossenes Bausystem und der konstruktiven Ausbildung der Bauteile und Standardisierung von Fügepunkten für die flexible Anwendung einer offenen Sekundärstruktur.

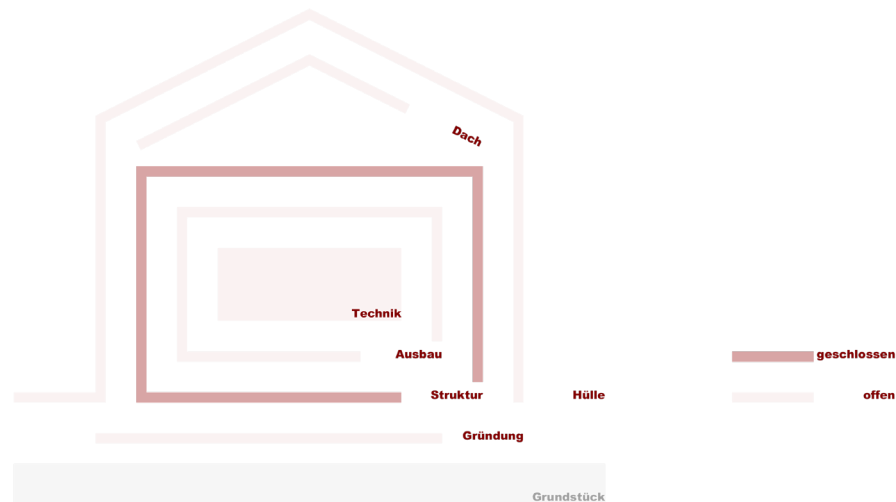


Abbildung 4-6 An MZD angepasstes Schichtmodell mit Fokus auf der Primärstruktur und der Differenzierung zwischen geschlossenen und offenen Schichtsystemen

4.1.3.1 Primärstruktur: Beschreibung des kreislaufgerechten, adaptiv-assoziativen, hybriden Bauteilkatalogs

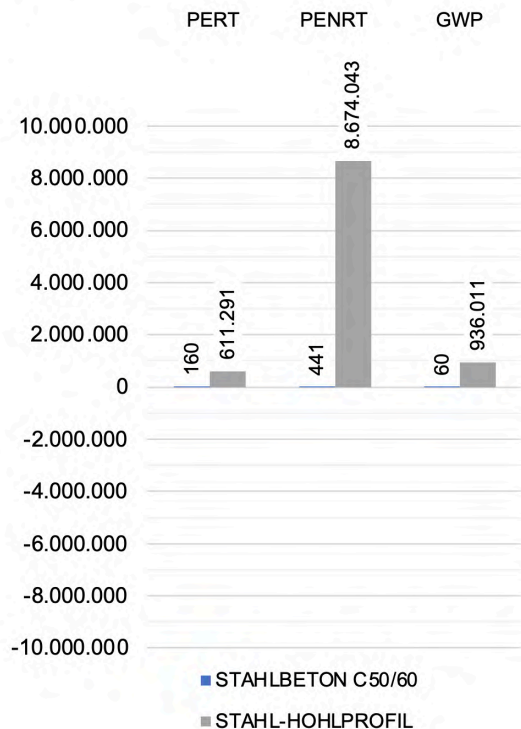
Die Primärstruktur setzt sich aus Einzelbauteilen (Stütze, Träger, Decke) und Raummodulen zusammen. Die Ausfachung der Stützen mittels nichttragender Wandbauteile zählt technisch gesehen nicht zur Tragstruktur, wird aber im Rahmen der Forschungsarbeit gemeinsam mit der Primärstruktur entwickelt. Die vorgefertigten Bauteile entsprechen denen eines Raummoduls mit dem Unterschied, dass sie nicht in der Werkshalle gefügt, sondern als Einzelteile auf die Baustelle geliefert und vor Ort montiert werden. Hierdurch können Komponenten mit abweichenden Geometrien oder Abmessungen gesplittet und effizient transportiert werden. Durch die Entwicklung eines typisierten Bauteilkatalogs für die Primärstruktur wird gestalterische Freiheit erlangt und die Effizienz der Vorfertigung erhalten. Eine Besonderheit des adaptiv-assoziativen Bausystems ist die individualisierte Standardisierung der Bauteile. Im Folgenden werden die Einzelbauteile, die jeweiligen Einsatzbereiche und ihre Adaptivität beschrieben.

a) Stütze

Grundsätzlich ließe sich der Stützenquerschnitt projektspezifisch in Abhängigkeit an die jeweilige Spannweite anpassen. Je nach Gebäudehöhe, Trägerspannweite oder Nutzlast könnte der Querschnitt kleiner oder größer ausfallen. Diese individuelle Adaptivität des Bauteils erschwert jedoch die Wiederverwendung desselben. Eine Stütze mit geringem Stützenquerschnitt kann bspw. für zukünftige Bauvorhaben mit mehr Geschossen statisch nicht ausreichend dimensioniert sein. Die Standardisierung hingegen führt für kleine Gebäude zu einer deutlichen Überdimensionierung der Bauteile, der mit einem übermäßigen Materialverbrauch einhergeht, was sich negativ auf die Ökobilanz auswirkt. Das Verhältnis aus Leistungsfähigkeit und Materialeinsatz muss mit Blick auf eine zukünftige Nachnutzung konzipiert werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde ein standardisierter Stützenquerschnitt umgesetzt.

Für die Wahl des geeigneten Materials sind eine hohe Tragfähigkeit bei möglichst geringem Querschnitt, Dauerhaftigkeit, Verformungsbeständigkeit und Maßhaltigkeit entscheidend. Hierfür sind Stahlprofile und Stahlbetonstützen geeignet. Aufgrund der defizitären ökobilanziellen Ergebnisse beider Baustoffe wurde im Forschungskontext Stahl als Stützenmaterial vernachlässigt. Selbst die Rückführung in den Materialkreislauf und die Gegenrechnung der zurückgewonnenen Energie bzw. eingesparten Treibhauspotenziale in Lebenszyklusphase D führen aufgrund der Ergebnisse für die Herstellungsphase zum aktuellen Zeitpunkt zu keiner nachhaltigen Ökobilanz. Mit der sogenannten „grünen Transformation“ der Stahlindustrie kann sich die Bilanz langfristig jedoch ändern.

Ökobilanz Stütze
Lebenszyklusphase A-C
[MJ]



Ökobilanz Stütze
Lebenszyklusphase D
[kg CO₂-eq.]

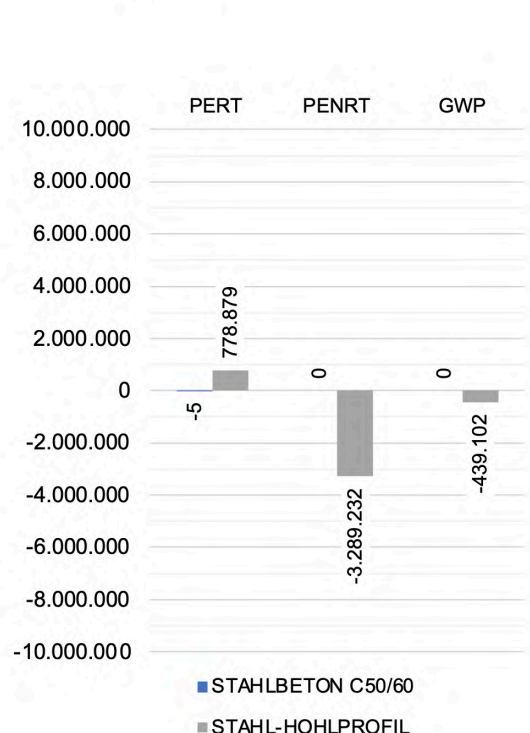


Abbildung 4-7

Ökobilanzieller Vergleich von Stahlbeton- und Stahlstützen

Für die Stützen aus Stahlbeton wird ein Querschnitt von 23 x 23cm als standardisiertes Maß angenommen. Der Querschnitt resultiert aus dem Platzbedarf für die Einbringung der Stahlbauteile und -bewehrung und die erforderliche Betonüberdeckung von mindestens 2,5cm. Die Stützhöhe stellt einen adaptiven Parameter für die Planung dar. Die Stützhöhe sollte mindestens 2,50m betragen um eine erforderliche lichte Raumhöhe zu gewähren. Stützen im raummodularen Bauen sind, durch den Transport und in Abhängigkeit von der Trägerhöhe, auf maximal 2,90m beschränkt. Durch den liegenden Transport von Stützen als Einzelbauteile können diese Limitierungen überwunden und größere Stützhöhen realisiert werden. Aus bauphysikalischen Gründen (Brandschutz, Schallschutz etc.) und zur einfachen Integration von Wänden wird das Stützenprofil mit Nuten hergestellt. Aus den unterschiedlichen Einbausituationen (Eckstütze, Randstütze etc.) und den daraus resultierenden konstruktiven Anforderungen ergeben sich vier unterschiedliche Stütztypen.

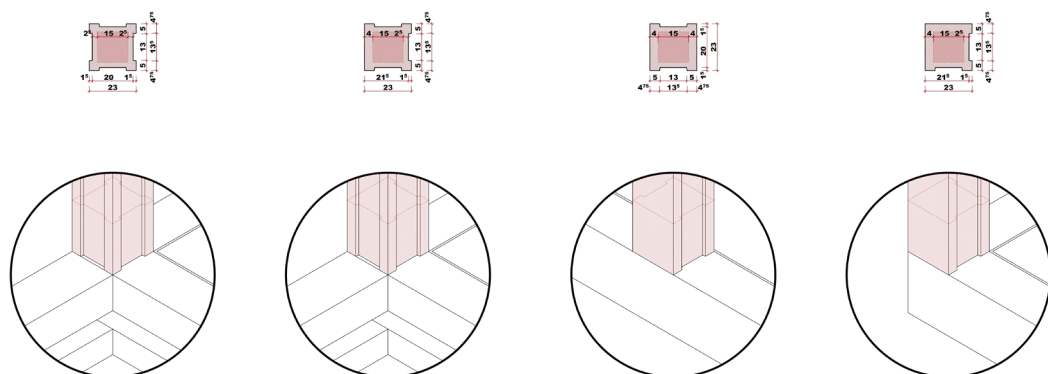


Abbildung 4-8

Bauteilgeometrien und -abmessungen der verschiedenen Stütztypen im Bauteilkatalog

Tabelle 4.1-3 *Stützentypen, Abmessungen und Anzahl Nuten*

b) Träger

Die Materialentscheidung für die Träger verhält sich analog zu dem Prozess bei den Stützen. Die Träger aus Stahlbeton dienen als Auflager für die Deckenelemente und haben einen Querschnitt von 23x30cm. Für die Aufnahme der Lasten aus der Bodenplatte werden die Träger ein- oder zweiseitig mit Stahlbetonkonsolen versehen. Um die Wandsysteme aufzunehmen, werden die Träger unterseitig mit einer Nut hergestellt. Die Anforderungen an die Tiefe der Konsolen sind adaptiv und hängen von dem gewählten Deckensystem ab. Die Standardisierung kann sich jedoch positiv auf die Wirtschaftlichkeit der Produktion und die Wiederverwendbarkeit der Bauteile auswirken. Die Länge der Träger ist adaptiv und ist auf eine maximale Stützweite von 5,00m begrenzt. Bei einer Vorspannung der Stahlbetonträger sind Stützweiten von bis zu 7,50m möglich, wodurch Modullängen von ca. 15m mit nur einer Mittelstütze realisiert werden können. Für die Aussteifung der Einzelmodule und des Gesamtsystems kann die Ausbildung biegesteifer Eckanschlüsse zwischen den Längs- und Querträgern erforderlich sein.

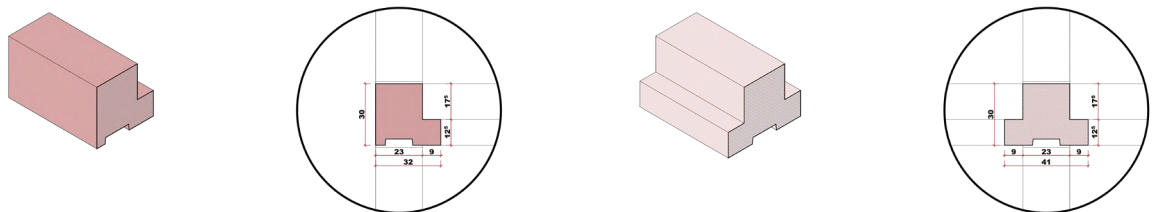


Abbildung 4-9 Bauteilgeometrien und -abmessungen der verschiedenen Trägertypen im Bauteilkatalog

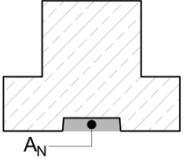
Träger Typ B	Stahlbeton	23x30 cm	Adaptiv	2	
--------------	------------	----------	---------	---	---

Tabelle 4.1-4

Trägertypen, Abmessungen und Anzahl Konsolen

c) Decke

Eine Besonderheit der Deckensysteme ist die systemoffene Adaptivität des einzusetzenden Werkstoffs. Je nach Bedarf können verschiedene Deckensysteme gewählt und dadurch auf unterschiedliche, projektspezifische Anforderungen reagiert werden. Im Rahmen der Forschungsarbeit wird der Einsatz von Stahlbeton-, Massivholz- und Holzbalkendecken betrachtet. Die Deckensysteme sind in Länge, Breite und Stärke anpassbar. Faktoren, die sich auf das Bauteil auswirken sind die Spannweite, der Brand- und Schallschutz sowie die Produktions- und Transportlimitierungen. Die Wahl von Klein- und Großtafelementen stellt eine Möglichkeit dar, um auf Transportanforderungen reagieren zu können. Durch die Implementierung der Decke als zweidimensionales Bauteil, das zwischen zwei Raummodulen aufgelagert wird, lassen sich Räume mit vergleichsweise großer lichter Breite konzipieren, die in der raummodularen Architektur eher untypisch sind.

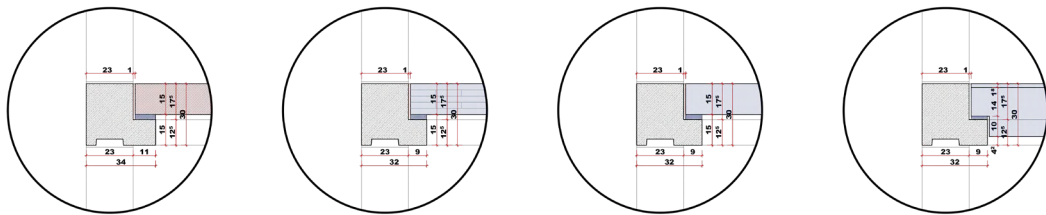


Abbildung 4-10

Beispielhafte Bauteilgeometrien und -aufbauten von unterschiedlichen Deckentypen im materialoffenen Bauteilkatalog

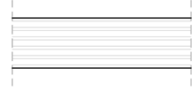
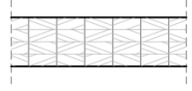
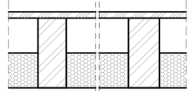
Deckentyp	Materialität	Deckenstärke (d)	Deckenlänge (L)	Deckenbreite (B)	Skizze
Decke Typ A	Stahlbeton	Adaptiv	Adaptiv	Adaptiv	
Decke Typ B	Brettsperrholz	Adaptiv	Adaptiv	Adaptiv	
Decke Typ C	Brettstapel	Adaptiv	Adaptiv	Adaptiv	
Decke Typ D	Holz-Balkendecke	Adaptiv	Adaptiv	Adaptiv	

Tabelle 4.1-5

Deckentypen, Materialitäten und Abmessungen

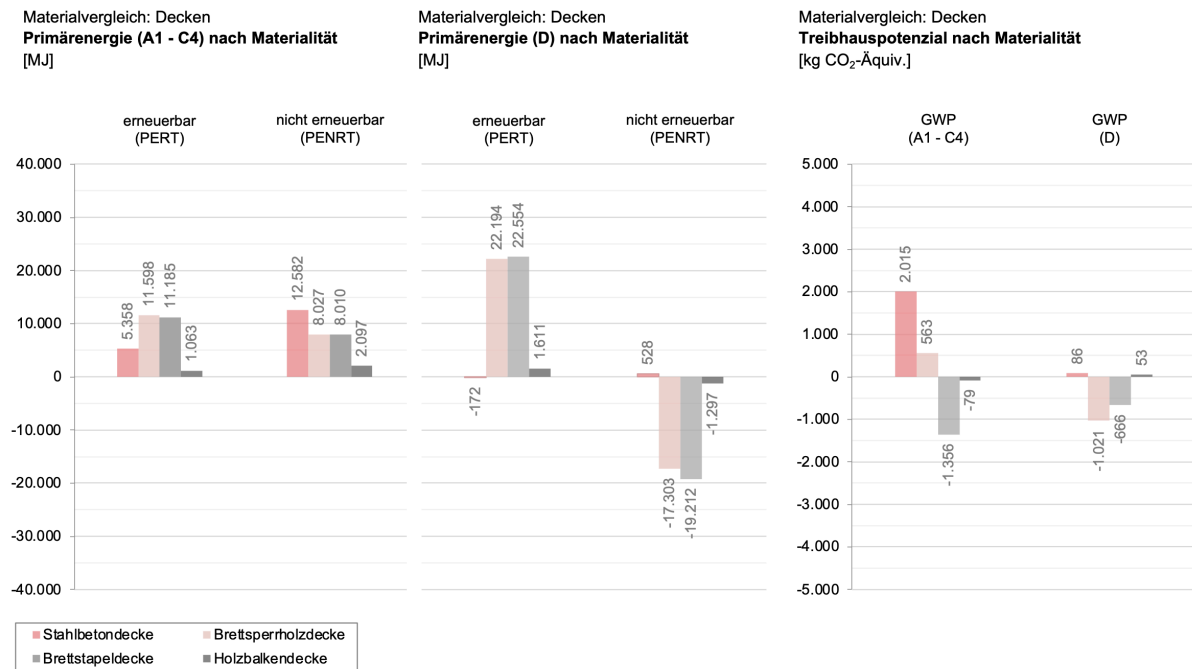


Abbildung 4-11 Ökobilanzieller Vergleich der verschiedenen Decken, die im systemoffenen Modul verwendet werden können

Die ökobilanzielle Betrachtung belegt die zuvor bei der Untersuchung des Solid.Moduls beschriebenen Erkenntnisse zum Stahlbeton: Bei der Herstellung der Stahlbetondecken überwiegt mit 12.582 MJ der Bedarf an nicht erneuerbarer Energie und es liegt mit 2.015 kg CO₂-Äquiv. ein verhältnismäßig hohes Treibhauspotenzial vor. Die Holzbalkendecke weist einen im Vergleich zu den anderen Baustoffen geringen Energiebedarf, sowohl für erneuerbare als auch für nicht erneuerbare Energien auf, wobei die nicht erneuerbaren Energien überwiegen. In Bezug auf das Treibhauspotenzial bilanzieren sich die Herstellungs- und Recyclingwerte zu einem negativen Gesamtwert. Allerdings muss die Holzbalkendecke für höhere Brandschutz- und Schallschutzanforderungen mit Unterdecken und / oder Schüttungen im Balkenzwischenraum versehen werden, was die Adaptivität und den Grad der Vorfertigung beeinträchtigen kann. Die Brettsperrholz- und Brettschichtholzdecke weisen beim erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf im gesamten Lebenszyklus vergleichbare Werte aus. Der Anteil erneuerbarer Primärenergie in der Herstellungsphase liegt jeweils bei rund 11.000 MJ. Dabei ist zu beachten, dass ca. 85 – 90 % dieser Primärenergie den stofflichen Energieanteil im Holz beschreibt. Nur der verbleibende Anteil ist tatsächlich die zwecks Herstellung extern zugeführte Energie. Dem nicht erneuerbaren Primärenergie-Anteil von rund 8.000 MJ während der Herstellung stehen ca. -17.000 bis -19.000 MJ in der Recyclingphase gegenüber, was zu einer nachhaltigen Gesamtbilanz führt. Beim Treibhauspotenzial unterscheiden sich die Werkstoffe in der Herstellungsphase dadurch, dass das Brettsperrholz mit 583 kg CO₂-Äquiv. ein deutlich höheres Treibhauspotenzial aufweist als das Brettschichtholz mit dem negativen Wert in Höhe von -1.356 kg CO₂-Äquiv. Dies liegt zum einen an den Bindemitteln, die für das Brettsperrholz verwendet werden, zum anderen auch an den Transportwegen, die in den EPDs berücksichtigt werden. Laut dem „Arbeitsbericht: Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz“ des Thünen-Instituts stammen 56 % des Holzrohstoffes beim Brettsperrholz aus Österreich, während beim Brettschichtholz 64 % des Holzrohstoffes aus Deutschland, vornehmlich Süddeutschland, stammen [RD12]. Hier kann in der Praxis die Verwendung herstellerspezifischer statt generischer EPDs aufschlussreich sein.

d) Wand

Die nichttragenden Wände, die auf der strukturellen Achse der jeweiligen Einheit anzuordnen sind, werden innerhalb der Forschungsleistung mitbetrachtet. Ähnlich wie bei dem Deckensystem handelt es sich bei dem Wandsystem um ein systemoffenes, materialadaptives Bauteil. Aufgrund der Nutabmessungen

wird eine standardisierte Wandstärke von 12cm festgelegt. Die Wandelemente können als Groß- oder Kleintafelelemente angefertigt werden und sind in der Länge und Höhe adaptiv. Um erhöhte Anforderungen an den Brand- und Schallschutz zu erfüllen kann die Wand durch zusätzliche Vorsatzschalen ergänzt werden.

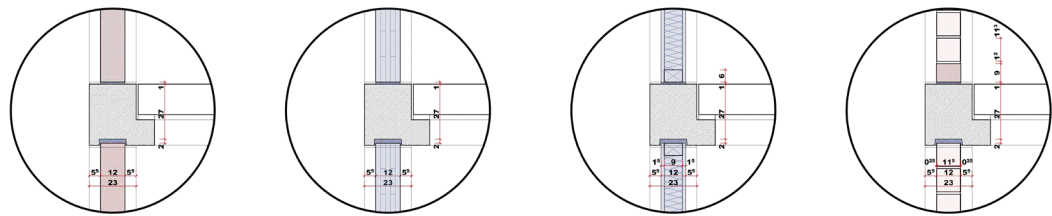


Abbildung 4-12 Beispielhafte Bauteilgeometrien und -aufbauten von unterschiedlichen Wandtypen im materialoffenen Bauteilkatalog

Wandtyp	Materialität	Wanddicke (d)	Wandlänge (L)	Wandbreite (B)	Skizze
Wand Typ A	Stahlbeton	Adaptiv	Adaptiv	Adaptiv	
Wand Typ B	Brettsper Holz	Adaptiv	Adaptiv	Adaptiv	
Wand Typ C	Holz- rahmenbau	Adaptiv	Adaptiv	Adaptiv	
Wand Typ D	Lehmstein	Adaptiv	Adaptiv	Adaptiv	

Tabelle 4.1-6 Wandtypen, Materialitäten und Abmessungen

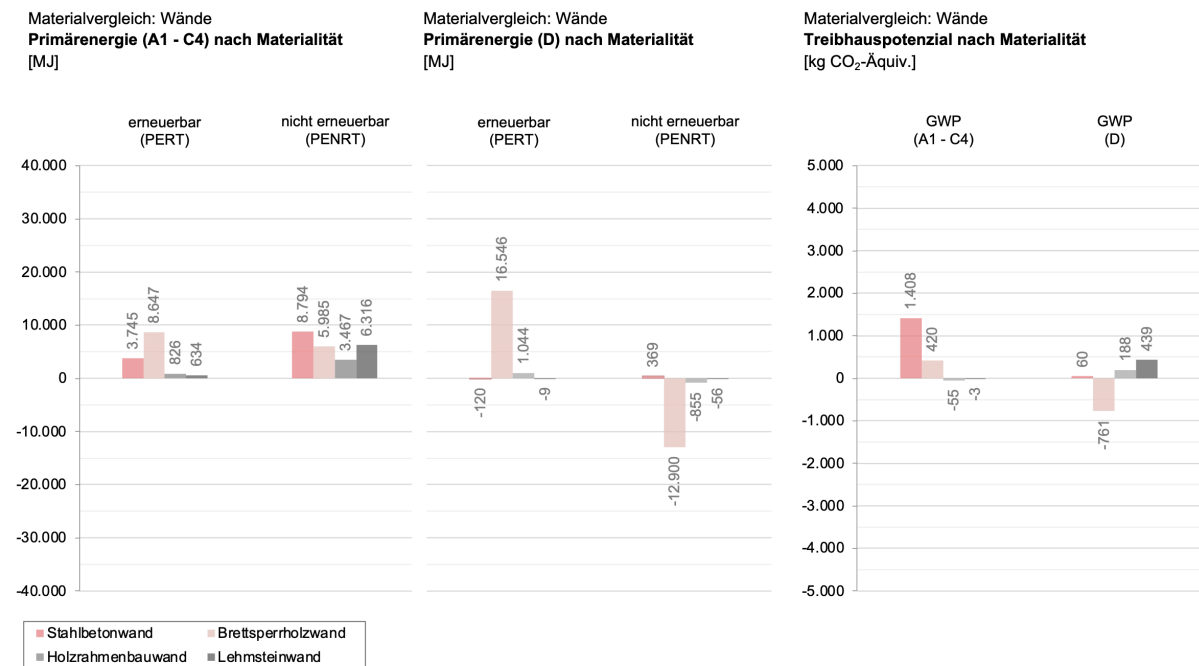


Abbildung 4-13 Ökobilanzieller Vergleich der verschiedenen Wände, die im systemoffenen Modul verwendet werden können

Die Auswertung der Ökobilanz der Wände aus Stahlbeton, Brettsperrholz und in Holzrahmenbauweise spiegelt die Erkenntnisse aus dem Kapitel über Decken wider. Als zusätzliche Option wurden hier Lehm- bausteinwände untersucht. Im Vergleich zum Stahlbeton führen diese zu einer besseren Sachbilanz und bilanzieren sich zu einem geringeren Treibhauspotenzial, fallen jedoch ungünstiger aus als die Holzbauteile.

e) Raummodul

Das Raummodul wird als eine dreidimensionale Einheit betrachtet, welche aus einzelnen, typisierten Bauteilen (Stütze, Träger, Decke, Wand) besteht. Das Raummodul kann, je nach Bedarf, im Werk vor- gefertigt oder auf der Baustelle zusammengesetzt werden.

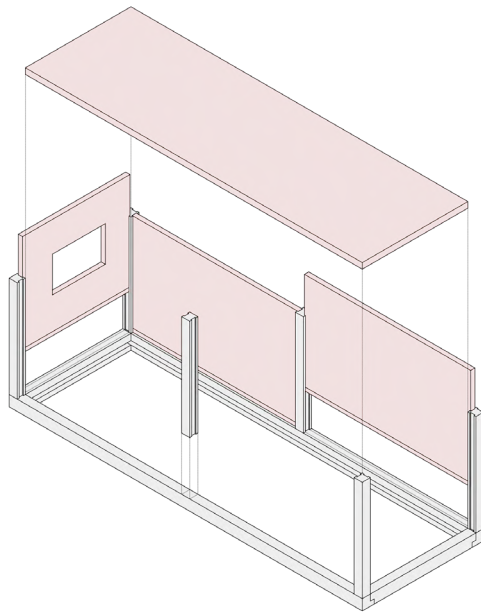


Abbildung 4-14 Exemplarische Darstellung eines Raummoduls bestehend aus dem Bauteilkatalog: Primärstruktur (Stütze, Träger, Decke, Wand)

Die Analyse des strukturellen Rasters im modularen Bauen ergab, dass diese Bedingung dem Wunsch nach gestalterischer Vielfalt und kreativen Lösungen für qualitativ hochwertiges Wohnen entgegenwirkt. Nur durch ein hohes Maß an Planungsfreiheit und eine flexible, individualisierte Standardisierung in der Produktion ist es möglich, ein höheres Maß an gestalterischer Varianz innerhalb eines Systembaus zu erreichen. Mithilfe eines durchgängigen digitalen Planungsprozesses und einer optimierten Datenübergabe an eine flexible und teilautomatisierte Produktion werden adaptive-assoziative Bauteile/Komponenten der Losgröße eins möglich. Dadurch werden Freiheiten im Entwurf gewonnen und die Effizienz des Systems bleibt erhalten. Statt eines Rasters sind projektspezifisch Raummodulgrößen zu definieren, bei denen über einen möglichst hohen Grad der Standardisierung (Abmessungen, Ausbaugrad usw.) die Effizienz gesteigert wird. Auf die Breite der Raummodule wirkt sich beispielsweise auch die Stahlbetonkonsole aus. Es gibt Raummodule die mit keiner Konsole (Raummodulare Bauweise), einer Konsole (Randmodul) oder zwei Konsolen (Mittelmodul) ausgeführt werden, je nachdem ob Deckenbauteile aufgelagert werden müssen.

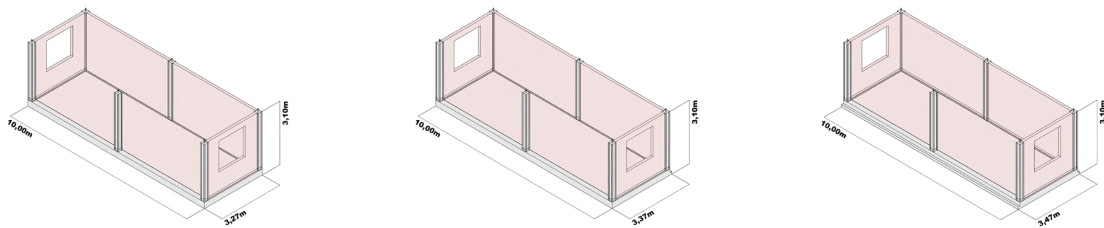


Abbildung 4-15 Unterschiedliche raummodulare Abmessungen in Abhängigkeit von der Anzahl von Konsolen die für das Auflagern von Deckenbauteilen erforderlich sind

Funktionale Anforderungen an Zwei-Personen-Schlafzimmer definieren die Mindestabmessungen von Raummodulen. Bereits ab einer Raummodulbreiten von 3,25m können funktionsfähige Schlafzimmer generiert werden. Ein Raummodul mit diesen Abmessungen ist vgl. problemlos zu transportieren. Größere Raummodule sind möglich, führen jedoch zu Einschränkungen im Transport. Ein erhöhter Transportaufwand kann sich dabei sowohl negativ auf die Wirtschaftlichkeit eines Bauvorhabens als auch auf die Umwelt auswirken. Gewählte Standardabmessungen für die Raummodule sind 3,25 und 3,45m Modulbreite (Außenmaß Rohbau) und max. 15,00m Modullänge. Abweichend vom Standardmodul kann es individuelle Raummodulabmessungen geben. Maximale Effizienz erhält man durch die Steigerung des Wiederholungsgrades gleicher Raummodule.

4.1.3.2 Primärstruktur: Konzeptionelle Entwicklung systemoffener Dach- und Gründungsformen

Das Dach kann als Flachdach oder Schrägdach ausgebildet werden. Flachdächer können einzeln oder zusammen mit den Modulen vorgefertigt transportiert werden. Geneigte Dächer hingegen werden vorgefertigt und in Teilelementen auf der Baustelle montiert. Das Bausystem und die einzelnen Bauteile der Primärstruktur müssen für die Aufnahme der Bauteile und die entstehenden Lasten ausgelegt sein. Dabei spielen individuell standardisierbare fügetechnische Schnittstellen zur Tragstruktur eine entscheidende Rolle.

Die Gründung stellt ebenfalls einen offenen Teil des Gesamtsystems dar. Hierdurch kann auf projektspezifische, funktionale und gestalterische Anforderungen individuell reagiert werden. Gegründet wird entweder auf einem Kellergeschoss, auf Fundamenten, einer Aufständigung oder einem Sockelgeschoss.

4.1.3.3 Sekundärstruktur: Konzeptionelle Entwicklung der Gebäudehülle, des Innenausbaus und der Gebäudetechnik

Die Gebäudehülle stellt ein offenes Teilsystem dar und umfasst die raumabschließenden Bauteile der Fassade, des Daches sowie die Bodenplatte. Die Fassade ist so konzipiert, dass sie als vorgefertigte Elemente entweder bereits im Werk mit den Raummodulen oder auf der Baustelle montiert werden. Grundsätzlich wird dabei von einem mehrschichtigen Aufbau bestehend aus Ausfachung, Dämmebene und Fassadenbekleidung ausgegangen, durch die Offenheit des Systems sollen aber auch WDVS oder Pfosten-Riegel-Fassaden möglich sein.

Innenwände auf Modulachse werden als Teil des assoziativ-adaptiven, hybriden Bausystems berücksichtigt. Der sonstige Innenausbau ist als offenes System geplant. Hierzu zählen Leichtbauwände, Installationswände, Bodenaufbauten, Türen, Fenster, Abhangdecken, welche entsprechend dem aktuellen Stand der Technik und den Wünschen der AuftraggeberInnen geplant und ausgeführt werden können. Die konstruktive Ausbildung des Innenausbaus wirkt sich auf Faktoren wie Transportfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Ökobilanz eines Gebäudes aus.

Die Gebäudetechnik ist ein essenzieller Bestandteil der Sekundärstruktur und trägt bei entsprechender Planung maßgeblich zur Betriebskostenminimierung bei. Das wird einerseits durch die eingesetzte Technik und andererseits durch eine wartungs-, instandsetzungs- und austauschfreundliche Planung gewährleistet.

4.1.4 Anwendung des kreislaufgerechten, adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems

In Abschnitt 4.1.1 wurden die Anforderungen an die Bauweise und Typologie eines adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems formuliert. Hierauf aufbauend wurde die Primärstruktur des Bausystems konzeptionell entwickelt. Im folgenden Teil wird die Anwendbarkeit des Bausystems hinsichtlich der Optimierung der typologischen und gestalterischen Vielfalt an unterschiedlichen Fallbeispielen untersucht und die Erfüllung der Anforderungen geprüft. Hierfür wird eine abstrahierte Form des Bausystems bestehend aus Stützen, Trägern, Decken und Wänden angewandt.

4.1.4.1 Steigerung der typologischen und gestalterischen Vielfalt

Ausgegangen wird von einem Gebäude, welches aus einzelnen raummodularen Einheiten besteht. Der Treppen Kern hat eine aussteifende Wirkung und kann konventionell hergestellt oder vorgefertigt implementiert werden. Diese Bauweise besticht durch einen hohen Vorfertigungsgrad und eine damit einhergehende Wirtschaftlichkeit.

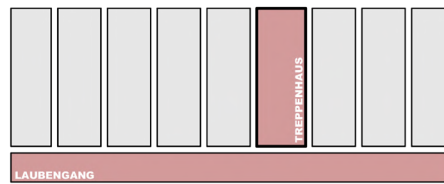


Abbildung 4-16

Raummodulare Bauweise mit aussteifendem Treppenkern und Laubengangerschließung

a) Adaptive Spannweiten und räumliche Qualitäten

Die raummodulare Bauweise stößt bei großen räumlichen Spannweiten aufgrund des Transports häufig an seine Grenzen. Durch den Einsatz von Deckenelementen, welche zwischen Raummodulen aufgela-
gert werden (Schichtmodell), können offene Raumkonfigurationen und größere Spannweiten realisiert werden. Hierdurch kann z.B. ein Wohnbereich an die Größe der Wohneinheit angepasst werden oder rollstuhlgerechte Wohnungen hergestellt werden.

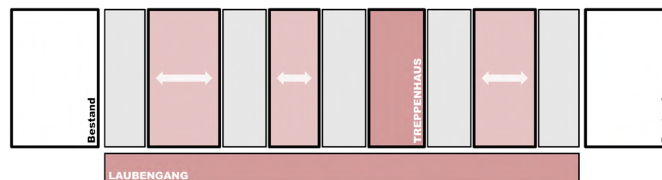


Abbildung 4-17

Anpassbare Spannweiten in Wohnbereichen für mehr Wohnqualität und gestalterische Freiheit

b) Grundstücksanforderungen und Gebäudegeometrie

Ist das Baufeld z.B. durch Bestandsgebäude begrenzt, kann durch das adaptiv-assoziative, hybride Bausystem auf das Grundstück reagiert werden, ohne sonderlich große negative Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit der Produktion durch einen hohen Wiederholungsgrad von gleichen Raummodulen. Der hohe Anteil an Raummodulen führt jedoch aufgrund der Bauteildopplung auch zu einem erhöhten Materialverbrauch.

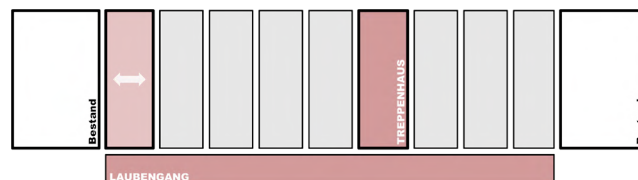


Abbildung 4-18

Anpassbarkeit des hybriden Bausystems an Grundstücksanforderungen durch adaptiv-assoziative Eigenschaften

Erfordert ein Grundstück aufgrund der Baufeld Geometrie eine komplexere Gebäudeform kann durch das adaptiv-assoziative Bausystem flexibel und standortspezifisch auf Anforderungen reagiert werden, insbesondere da, wo von einer rechteckigen Grundstücksform abgewichen wird, wie z.B. bei Eckgrundstücken oder abgeknickten Gebäuden. Für Treppenkern oder Räume mit Sondernutzungen eignet sich der Einsatz ein- und zweidimensionaler Bauteile besonders, um komplexere Geometrien aufzunehmen.

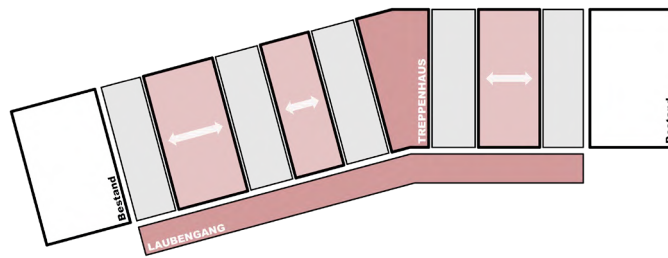


Abbildung 4-19 Einsatz von Elementbauteilen als Antwort auf komplexere Grundstücksgeometrien

In den Bereichen, in denen eine Planung auf komplexe Geometrien reagieren muss, kann mit den ein- und zweidimensionalen Bauteilen gearbeitet werden. Dabei muss möglicherweise von der standardisierten Form von Stützen, Träger oder Decken abgewichen werden. Die Einführung von Sonderbauteilen, welche in Form und Geometrie von den Standardisierten Bauteilen abweichen, bietet planerische und gestalterische Freiheiten, kann in der Produktion jedoch zu einem erhöhten Aufwand und Effizienzverlusten führen. Die Kombination aus standardisierten Bauteilanschlüssen, Steigerung der Produktionsautomatisierung und einer durchgängigen digitalen Planung und Datenübertragung in die Produktion ermöglicht komplexe Gebäudeformen ohne erheblichen Effizienzverlust möglich.

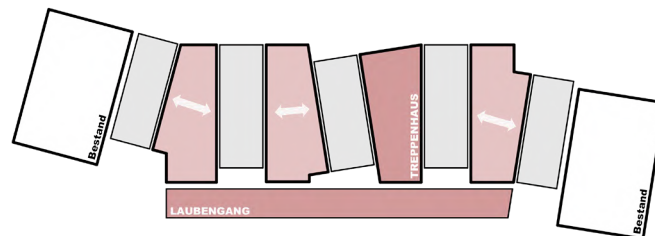
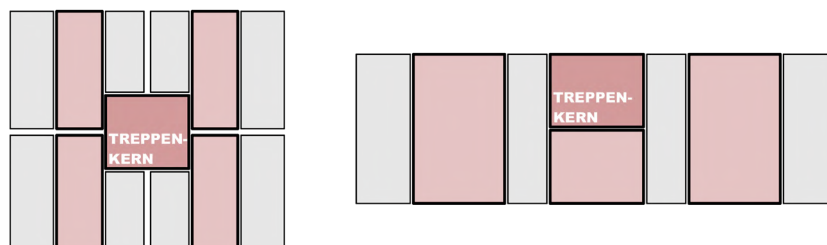


Abbildung 4-20 Einsatz von Elementbauteilen zur Abbildung komplexer Gebäudekubaturen und Bauteilformen

c) Erschließungsformen und Gebäudetypologien

Die Erschließungsformen und Erschließungsflächen bestimmen maßgeblich die Gebäudegeometrie und können über ihre Funktionalität hinaus auch gestalterische und gemeinschaftliche Eigenschaften erlangen. Erschließungen werden differenziert und in vertikale und horizontale Erschließungswege aufgegliedert. Die vertikale Erschließung kann entweder als innenliegende oder außenliegende Treppe ausgeführt werden. Innenliegende Treppen und Treppenkerns werden konventionell aus Ort beton, aus vorgefertigten Bauteilen oder aus Raummodulen hergestellt. Außenliegende Treppen sind systemoffene Bauteile. Die horizontalen Erschließungen sind entweder systemoffen (Laubengang) oder als flächige Deckenelement des adaptiv-assoziativen Bausystems zwischen Raummodulen oder auf Stützen und Trägern aufgelagert.



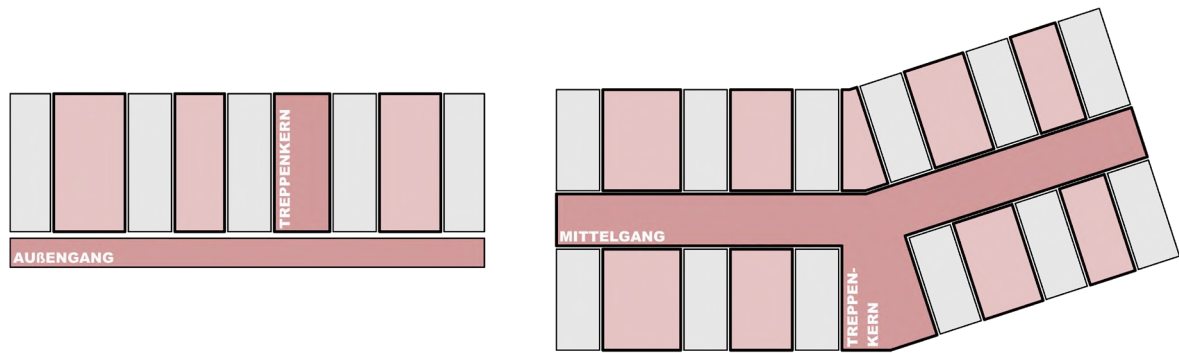


Abbildung 4-21 Mögliche Erschließungsformen und daraus resultierende verschiedene Gebäudetypologien

d) Tragstruktur und Grundrissflexibilität

Durch die Skelettstruktur bestehend aus den tragenden Stützen, Trägern, Decken und den flexiblen, nichttragenden Innenwänden, sind die Grundrisse flexibel und adaptiv. Das System ermöglicht somit eine hohe Flexibilität, sowohl was die Grundrisstypen als auch die Nutzung eines Gebäudes betrifft. Entscheidend für eine gute Nutzbarkeit ist die Wahl eines sinnvollen Tragrasters. Der Anteil ein-, zwei- und dreidimensionaler Bauteile ist projektspezifisch anpassbar, wodurch die gestalterische Freiheit und die Wirtschaftlichkeit eines Bauvorhabens gesteuert werden kann.

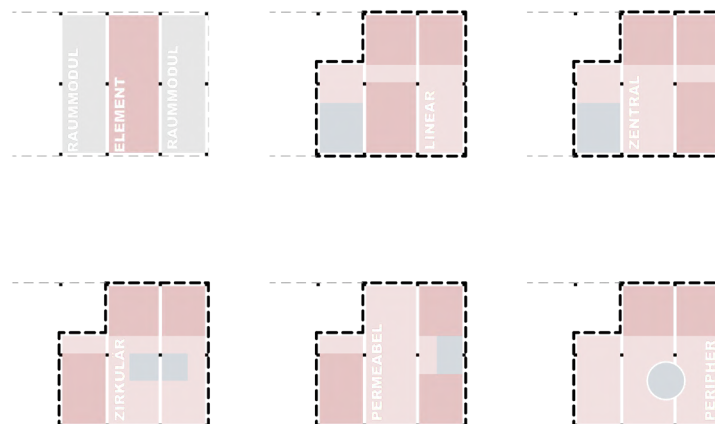


Abbildung 4-22 Skelettstruktur als Grundlage für Grundriss- und Nutzungsflexibilität von Gebäuden

e) Gründung, Dachkonstruktion und Außenanlagen

Die Gründung, Dachkonstruktion und Außenanlagen werden nicht als Teil des adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems betrachtet. Durch die Vereinheitlichung von Fügepunkten soll es möglich sein, systemoffene Lösungen zu entwickeln, was zu einer weiteren Steigerung der gestalterischen Vielfalt der Hybridgebäude betragen soll. Auch die Gebäudehülle wird als offenes System geplant und in die Schichten Haut, Dämmung und Außenwand getrennt. Hierdurch kann die Fassaden gemeinsam mit den Raummodulen oder nachträglich montiert werden. Auch werden Instandhaltungsmaßnahmen hierdurch vereinfacht. Den Planenden wird hierdurch maximale Freiheiten in der äußeren Gestaltung des Hybridgebäudes gegeben.

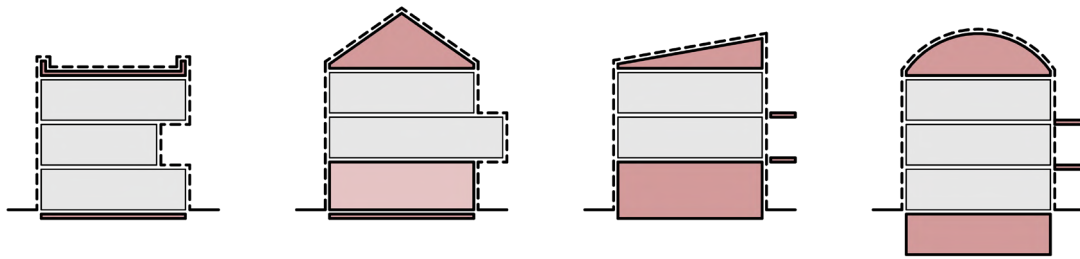


Abbildung 4-23 Möglichkeit zur Gestaltung durch offene Systemlösungen für Gründung, Dachkonstruktion und Außenanlagen.

4.1.4.2 Entwicklung eines Referenzgebäudes für weiterreichende Untersuchungen

Die Entwicklung eines Referenzgebäudes stellt die Grundlage für die Generierung ökologischer (Ökobilanz), ökonomischer und sozialer Erkenntnisse, als auch die Basis für das digitale Beschreibungsmodell dar. Das Referenzgebäude wird in drei Varianten dargestellt:

- Referenzgebäude A: Raummodulare Bauweise (Stahlbetonmodule)
- Referenzgebäude B: Raummodulare Bauweise (Skelettmodule)
- Referenzgebäude C: Hybridgebäude (Adaptiv-assoziatives, hybrides Bausystem)

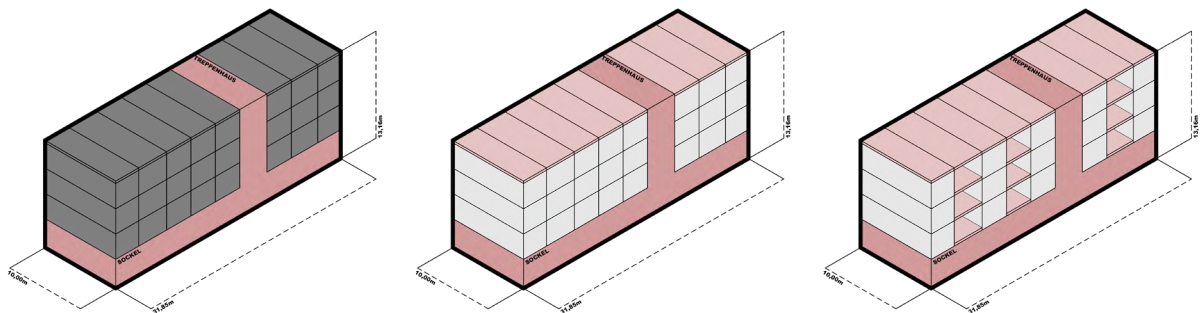


Abbildung 4-24 Referenzgebäude A (links), Referenzgebäude B (mittig) und Referenzgebäude C (rechts)

Das zeilenartige Gebäude ist viergeschossig, ist 30,33m lang, 10,48m tief, 13,80m hoch, hat ein zentrales, innenliegendes Treppenhaus und einen vorgelagerten Laubengang. Bei dem Dach handelt es sich um ein Flachdach und gegründet wird auf Streifenfundamenten. Das Erdgeschoss ist stützenfrei, hat eine lichte Raumhöhe von 3,40m und ist aus vorgefertigten Stützen, Trägern und Wänden hergestellt. Die Varianten unterscheiden sich im Aufbau des Regelgeschosses. Die Obergeschosse der Variante A sind aus Stahlbeton-Raummodulen aufgebaut, bei der Variante B handelt es sich um Skelett-Raummodule und bei der Variante C wird das adaptiv-assoziative, hybride Bausystem abgebildet, welches aus Skelett-Raummodulen und zwischengelagerten Decken besteht. Bei Variante B und C wurden die Wände und Decken durch Brettsperrholz-Bauteile substituiert.

4.1.4.3 Wohnqualitätsanalyse des Referenzgebäudes C

Aufbauend auf der in Abschnitt 10.1.3 entwickelten Analysemethodik für die Bewertung von Wohnqualität wird das Referenzgebäude C untersucht, um zu prüfen, ob das adaptiv-assoziative, hybride Bausystem die gesetzten Anforderungen erfüllen kann und mit konventionellen Bausystemen konkurrieren kann. Hierfür werden die Planunterlagen herangezogen und ausgewertet. Als Beispielgrundriss wird die Wohnung WG1 betrachtet.

Projekt	Gebäude	Grundriss	Raum	Gesamt
RGB B	Gut (11/15)	Sehr Gut (33/40)	Gut (19/25)	Gut (63/80)

a) Gebäude

In der Kategorie Gebäude schließt das Referenzgebäude gut ab. Insgesamt können 11 Punkte gesammelt werden, womit das Referenzgebäude im Vergleich zu den Beispielprojekten eher schlecht abschneidet.

Kategorie Gebäude	Bewertung
Erschließung	Gut (4/5)
Soziale Qualität	Mittel (3/5)
Gestalt Qualität	Gut (4/5)
Gesamt	Gut (11/15)

In der Unterkategorie Erschließung konnten 4 Punkte gesammelt werden. Die Erschließung ist barrierefrei möglich, weist jedoch keine sonderlich hohe Aufenthaltsqualität auf. Der Laubengang ist hell und bietet im Sommer einen gewissen Sonnenschutz. Aufgrund der großzügigen Fenster Öffnungen im Treppenhaus, einem Luftraum neben der Treppe und der offenen Bauweise des Laubengangs, wird ein gutes Sicherheitsgefühl angenommen. Der fehlenden Privatsphäre wird mit einem Abrücken des Laubengangs entgegnet.

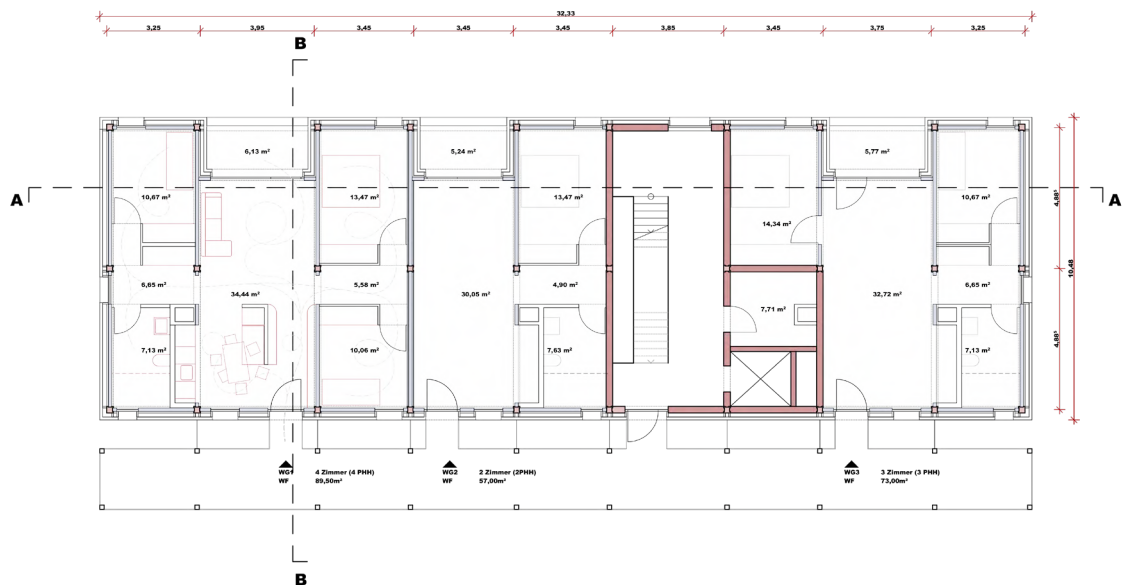


Abbildung 4-25 Regelgeschoss Grundrisse Referenzgebäude C

Die soziale Qualität ist ausbaufähig. In dieser Unterkategorie werden nur 3 Punkte gesammelt. Das ist insbesondere auf fehlende Gemeinschaftliche Nutzräume zurückzuführen. Lediglich im Erdgeschoss wird durch Gewerbeflächen eine Nutzungsmischung geringfügig gefördert. Diese Mängel sind nicht auf das Bausystem zurückzuführen und könnten durch systemunabhängige Entwurfsänderungen vermieden werden. In den Obergeschossen wird durch das differenzierte Wohnungsangebot eine soziale Mischung ermöglicht. Die Wohnungsgrößen sind angemessen und erlauben geförderte Wohneinheiten. Durch das adaptiv-assoziative, hybride Bausystem sind die Raumbreiten der Wohnbereich an die Wohnungsgrößen angepasst.

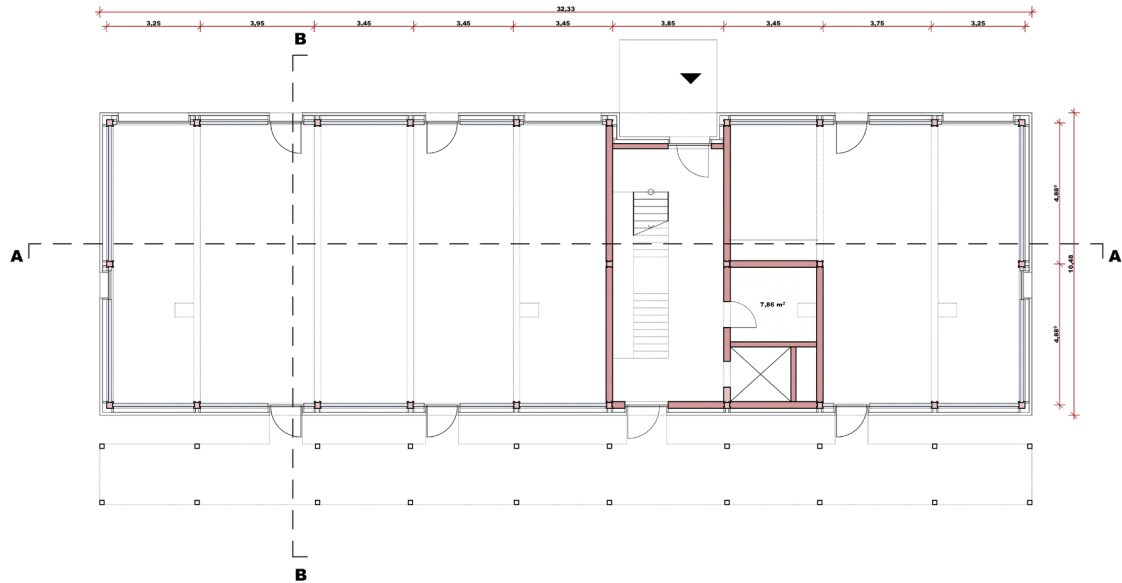


Abbildung 4-26 Erdgeschoss Grundrisse Referenzgebäude C

Gestalterisch lässt sich über das Referenzgebäude keine konkrete Aussage treffen. Die Gebäudehülle, das Dach, die Gründung und die Erschließung wirken sich maßgeblich auf die äußere Gestalt aus. Durch die Ausbildung standardisierter, fügetechnischer Schnittstellen wird eine möglichst große Offenheit und Flexibilität gewährleistet, weshalb von einer guten Gestalt Qualität (4 Punkte) ausgegangen wird.

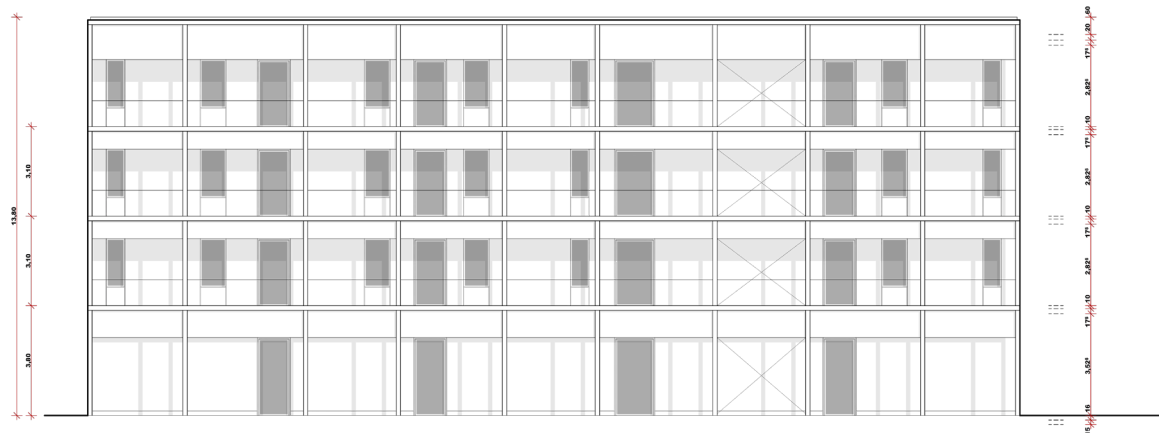


Abbildung 4-27 Ansicht Referenzgebäude C

b) Grundriss

Für die Bewertung auf Grundrissebene fokussieren wir uns auf die Wohnung WG 1. Insgesamt schließt das Referenzgebäude C mit 33 Punkten, auch im Vergleich zu den Beispielprojekten, sehr gut ab.

Kategorie Grundriss	Bewertung
Zonierung	Gut (4/5)
Verkehrsfläche	Gut (4/5)
Staufläche	Gut (4/5)
Raumbezug Küche-Wohnen	Sehr Gut (5/5)
Raumbezug Schlafen-Bad	Mittel (3/5)

Raumbezug Wohnen-Außenraum	Gut (4/5)
Raumbezug Ankommen-Küche	Sehr Gut (5/5)
Barrierefreiheit	Gut (4/5)
Gesamt	Sehr Gut (33/40)

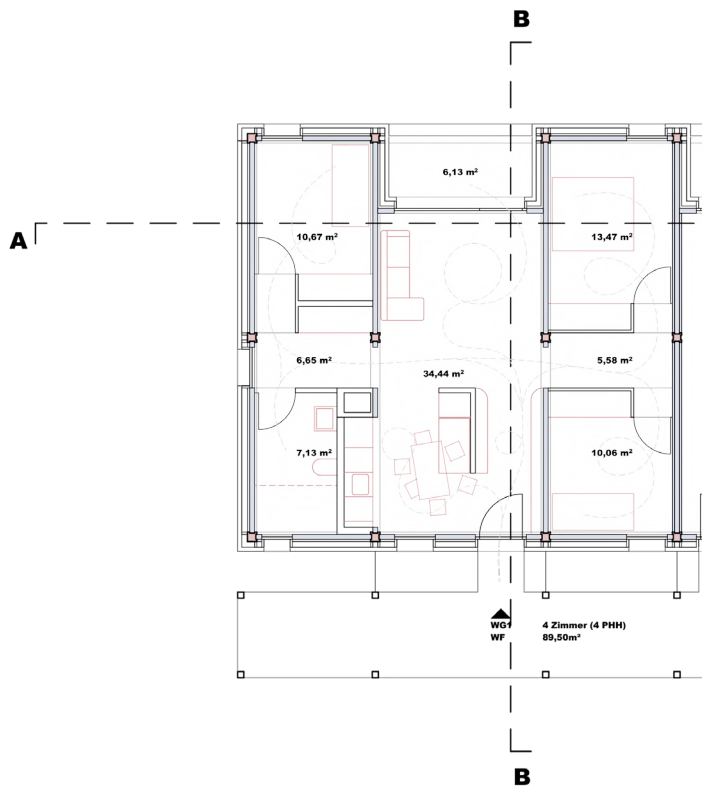


Abbildung 4-28 Ausschnitt des Referenzgebäudes C mit Wohnungsgrundriss für vier Personen

Die Wohnung entspricht, wie alle Grundrisse des Referenzgebäudes, dem permeablen Grundrisstyp, hat vier Zimmer und eine Wohnfläche von ca. 90m². Die Wohnung ist nur bedingt in private und öffentliche Bereiche getrennt. Die privateren Räume, wie Badezimmer und Schlafzimmer befinden sich in den raummodularen Bereichen, die öffentlichen Räume in der zentralen, breiteren Zone. Hierdurch kommt es jedoch zu einer Nutzungsdurchmischung, da das Badezimmer nur über den Wohnbereich erreicht werden kann. Durch eine mobile Trennwand oder einen Vorhang könnte die Privatsphäre verbessert werden. Die Verkehrsflächen sind effizient und klar ablesbar. Stauraum ist in ausreichendem Maße entlang der Verkehrsflächen vorgesehen. Die erforderlichen Raumbezüge zwischen wichtigen Räumen sind, bis auf zwischen Badezimmer und Schlafzimmer, gegeben. Die Wohnung ist barrierefrei, jedoch nur bedingt rollstuhlgerecht, was auf die gewählten Abmessungen der Raummodule zurückzuführen ist.

c) Raum

Insgesamt können in der Kategorie Raum 19 Punkte gesammelt werden, was als gut bewertet wird. Im Vergleich zu den Beispielprojekten ist das eine überdurchschnittlich gute Bewertung.

Kategorie Raum	Bewertung
Wohnen	Gut (4/5)
Kochen	Gut (4/5)
Essen	Mittel (3/5)

Schlafen	Gut (4/5)
Bad	Gut (4/5)
Gesamt	Gut (19/25)

Das Wohnzimmer ist vergleichsweise klein, was jedoch eine bewusste Entscheidung war, um die Gesamtwohnfläche zu reduzieren. Würden sich die Prioritäten in einem Projekt verschieben, ließe sich das Wohnzimmer, durch Veränderung der Spannweite der Deckenelemente oder durch Ausbildung von Balkonen anstatt Loggien, vergrößern. Auf ein Esszimmer wird verzichtet. Der Esstisch ist als Teil der Arbeitsfläche in der Küche integriert und kann, je nach Bedarf, umgestellt werden. Die Schlafzimmer sind barrierefrei jedoch nicht rollstuhlgerecht. Das ist auf die gewählten Raummodulabmessungen zurückzuführen und stellt den Versuch dar den Transportaufwand zu minimieren. Das Badezimmer hat eine angemessene, rollstuhlgerechte Größe.

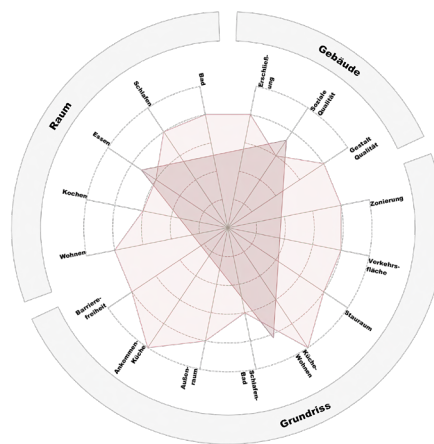


Abbildung 4-29 Netzdiagramm mit den Ergebnissen der Wohnqualitätsanalyse des Referenzgebäudes C

Das Referenzgebäude C kommt auf eine Gesamtpunktzahl von 63 Punkten und schneidet im Vergleich zu den in Abschnitt 10.1.3.2 analysierten Referenzprojekten als zweit bestes Projekt ab. Besonders hervorzuheben ist die Kategorie Grundriss. Die Analyse hat gezeigt, dass das entwickelte Bausystem zu guter Architektur und Wohnqualität führen kann. Die Auswirkungen der systemoffenen Sekundärstruktur auf die gestalterische Qualität der Architektur (Kategorie Gebäude) können im Rahmen der Forschungsarbeit nur angenommen werden. Bei einer vertieften Betrachtung der fägetechnischen Schnittstellen und der Anwendung einer Vielzahl von Fassaden-, Dachaufbauten oder Gründungsformen könnte man hierzu genauere Aussagen treffen.

Die Defizite sind häufig auf bewusste Entwurfsentscheidungen zurückzuführen, die von gestalterischen Wünschen oder wirtschaftlichen und nachhaltigen Zielsetzungen abhängen. Das entwickelte adaptiv-assoziative, hybride Bausystem stellt keine Limitierung dar sondern ermöglicht den Planer:innen flexibel auf sich verändernde Prioritäten zu reagieren.

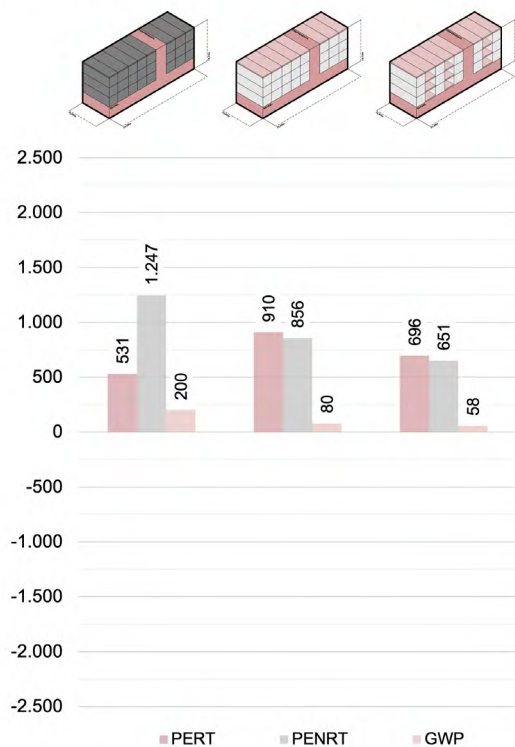
4.1.4.4 Ökobilanzieller Vergleich der Varianten des Referenzgebäudes

Da beim ökobilanziellen Vergleich der Varianten des Referenzgebäudes vordergründig die Ergebnisse der verschiedenen Konstruktionsweisen betrachtet werden sollen, blieben Strukturen, die bei allen Varianten identisch ausgeführt wurden, unberücksichtigt. Hierzu gehören das massiv ausgebildete Erdgeschoss, der Erschließungskern, der vorgelagerte Laubengang und die Gründung. Die Ergebnisse sollen vor allem ausweisen, wie sich eine Skalierung bei der Betrachtung eines ganzen Gebäudes darstellen würde.

Da beim ökobilanziellen Vergleich der Varianten des Referenzgebäudes vordergründig um die Ergebnisse der verschiedenen Konstruktionsweisen betrachtet werden sollen, blieben Strukturen, die bei allen

Varianten identisch ausgeführt wurden, unberücksichtigt. Hierzu gehören das massiv ausgebildete Erdgeschoss, der Erschließungskern, der vorgelagerte Laubengang und die Gründung. Die Ergebnisse sollen vor allem ausweisen, wie sich der Multiplikationseffekt bei der Betrachtung eines ganzen Gebäudes darstellt. Das zugrundeliegende Szenario beschreiben einen gesamten Lebenszyklus des Referenzgebäudes von Phase A bis C und in gesonderter Ausgabe die Phase D. In Tabelle 4.1-7 sind die einzelnen Ergebnisse dann zu einer Gesamtbilanz aufsummiert worden.

Ökobilanz Referenzgebäude
Lebenszyklusphase A-C
[GJ] bzw. [to CO₂-eq.]



Ökobilanz Referenzgebäude
Lebenszyklusphase D
[GJ] bzw. [to CO₂-eq.]

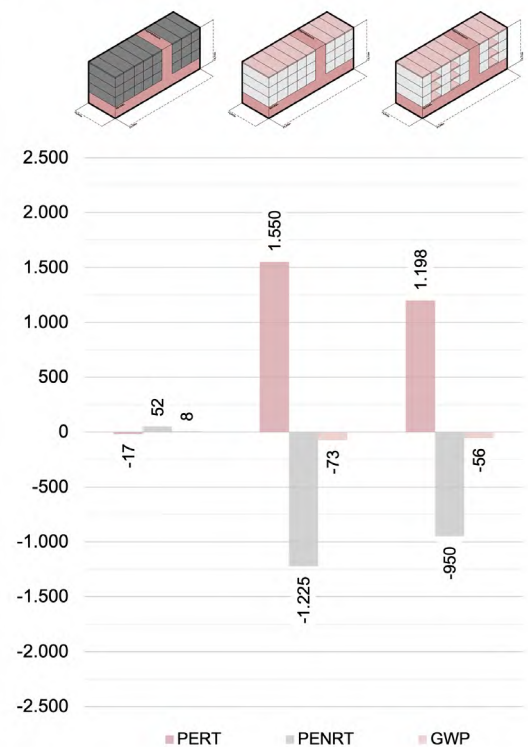


Abbildung 4-30

Ergebnisse des ökobilanziellen Vergleichs der unterschiedlichen Varianten des Referenzgebäudes

	PERT	PENRT	GWP	Gewicht	Kosten	Anzahl Lkw	
						40 to	16 to
V1: Stahlbeton-Modulbau	514 GJ	1.299 GJ	258 to CO ₂ -eq.	1.053 to	277.664 €	27	-
V2: Skelett-Modulbau	2.460 GJ + 479 % *	-369 GJ -128 %	7 to CO ₂ -eq. - 97 %	330 to -69 %	430.578 € +55 %	-	27
V3: Adaptiv-Assoziativer Hybrid-Modulbau	1.894 GJ + 368 % *	-299 GJ -123 %	2 CO ₂ -eq. - 99 %	233 to -78 %	328.367 € +18 %	-	18

* einschließlich und im Wesentlichen die Primärenergie als Energieträger

Tabelle 4.1-7

Tabellarischer Vergleich der Gesamtbilanz der Lebenszyklusphasen A bis einschließlich D mit Benennung der prozentualen Differenzen

Die Kosten wurden auf Grundlage der Kalkulation des Forschungspartners Solid.Modulbau ermittelt und begründen sich durch den unterschiedlichen Materialpreis von Beton C50/60 (145 € / m³, entspricht bei einer Bauteildicke von 15 cm einem Materialpreis von ca. 22 € / m²) und Brettsper Holz (110 € / m²). Dieser Kostensteigerung stehen die Einsparungen beim Transport vom Werk zur Baustelle gegenüber. In der Lebenszyklusanalyse liegen in den Werten aus den EPDs in der Regel keine Angaben für einen Transport zur Baustelle vor, diese müssen aufgrund unterschiedlicher Distanzen projektspezifisch ergänzt werden. Ausnahmen bilden hier z.B. Transportbetone, bei denen eine gewisse Distanz exemplarisch angesetzt wird und projektspezifisch umgerechnet werden kann. Im Falle des Raummodulbaus beschreibt der dort aufgeführte Transportweg jedoch nicht den Weg vom Betonwerk zur Baustelle, sondern zur Produktionshalle, wo die Raumeinheiten vorgefertigt werden. Im raummodularen Bauen ist also zusätzlich der Lkw-Transport der vorgefertigten Raumeinheiten und Elemente zur Baustelle zu berücksichtigen.

Hier zeigt sich der Vorteil der Skelettmodulweise zunächst einmal durch das geringere Systemgewicht. Dadurch können kleinere Lkw genutzt werden, die eine günstigere Ökobilanz aufweisen. Die Ergebnisse, resultierend aus einer angenommenen Entfernung vom Werk zur Baustelle von 100 km und den Systemgewichten einer Raumzelle, sind in Abbildung 4.1-31 dargestellt. Weiterhin resultieren aus den Vorgaben der Straßenverkehrsordnung StVO zusätzliche Vorteile für das adaptiv-assoziative Hybridgebäude gegenüber dem reinen Modulbau. Für breitere Raumeinheiten mit Abmessungsbreiten von 3,75 – 3,95 m sind Sondertransporte mit einer Begleitung durch Wechselverkehrszeichenanlagen, außerhalb von Autobahnen zusätzlich durch die Polizei, erforderlich. Dieser Faktor kann durch unseren Ansatz vernachlässigt werden, da für große Raumbreiten elementierte Decken eingesetzt werden, die im Falle des Referenzgebäudes maximale Abmessungen von 1,60m x 3,95m x 0,15m aufweisen und unkompliziert auf Lkw üblicher Breite gestapelt und transportiert werden können. Aufgrund unterschiedlicher Auflagen für Begleitfahrzeuge (z.B. Anzahl der Fahrzeuge) sind diese in der nachfolgenden Abbildung nicht berücksichtigt, wirken sich jedoch sowohl ökobilanziell als auch wirtschaftlich auf die Gesamtbetrachtung der Varianten zugunsten des adaptiv-assoziativen Hybridgebäudes aus.

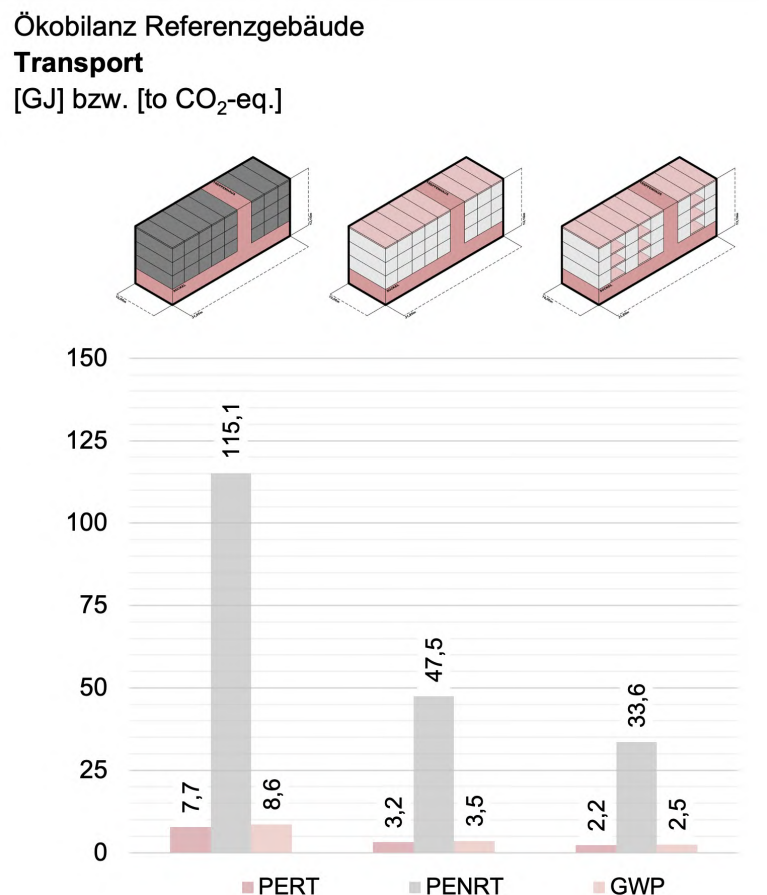


Abbildung 4-31

Ökobilanzieller Vergleich des Transports für die unterschiedlichen Varianten des Referenzgebäudes

4.2 ZIRKULÄR

4.2.1 Anforderungen an die Zirkularität des adaptive-assoziativen, hybriden Bausystems

Die nach Funktion und Lebenszyklus bezogene Trennung der einzelnen Bauteilschichten wurde bereits in Abschnitt 4.1.3 mit der konzeptionellen Systementwicklung bereits erfüllt. In diesem Kapitel wird das Bausystem hinsichtlich der technischen Umsetzung der Anforderungen an die Kreislauffähigkeit untersucht und um konzeptionelle Vorschläge für die Ausbildung von reversiblen Verbindungstechniken als Grundlage für die sortenreine Trennbarkeit und Wiederverwendung von tragenden Bauteilen der Primärstruktur ergänzt. Das kreislaufgerechte, adaptiv-assoziative, hybride Bausystem, die Bauteile und Fügeverfahren müssen:

- in Bauteilschichten nach Funktion und Lebenszyklus gegliedert und getrennt werden
- reversible Verbindungsmethoden integrieren, die eine sortenreine Trennbarkeit fördern
- konstruktiv einfache Bauteilaufbauten beinhalten
- geschlossene und offene Systembauweisen zu kombinieren
- Standardisierte Komponenten und adaptive Bauteile umfassen

4.2.2 Baukonstruktive Systementwicklung der Primärstruktur in Anbetracht reversibler Bauteilaufbauten und Fügeverfahren

Im folgenden Teil soll das in Abschnitt 4.1 entwickelte adaptiv-assoziative, hybride Bausystem hinsichtlich seiner Reversibilität untersucht und weiterentwickelt werden. Dabei werden sowohl die fuge-technischen Schnittstellen zwischen den Einzelbauteilen als auch die Aufbauten der Einzelbauteile für sich betrachtet.

Dabei ergeben sich folgende relevante Detailpunkte:

- Bauteilanschluss Träger – Träger
- Auflagersituation Träger – Decke
- Knotenpunkte Stütze – Träger
- Bauteilanschluss Wand – Träger/Stütze

4.2.2.1 Bauteilanschluss Träger – Träger

Der Anschluss der Längs- und Querträger hat einen entscheidenden Einfluss auf die statische Wirksamkeit der Decke als Scheibe. Diese kann entweder über die Herstellung eines Ringbalkens mit biegesteifen Eckverbindungen oder über gelenkige Trägeranschlüsse in Kombination mit zug- und druckfesten mechanischen Verbindungen zwischen der Decke und den Trägern erreicht werden. Aus Sicht der Reversibilität und Wiederverwendbarkeit der Bauteile ist eine gelenkige Verbindung mit dem geringsten Aufwand verbunden.

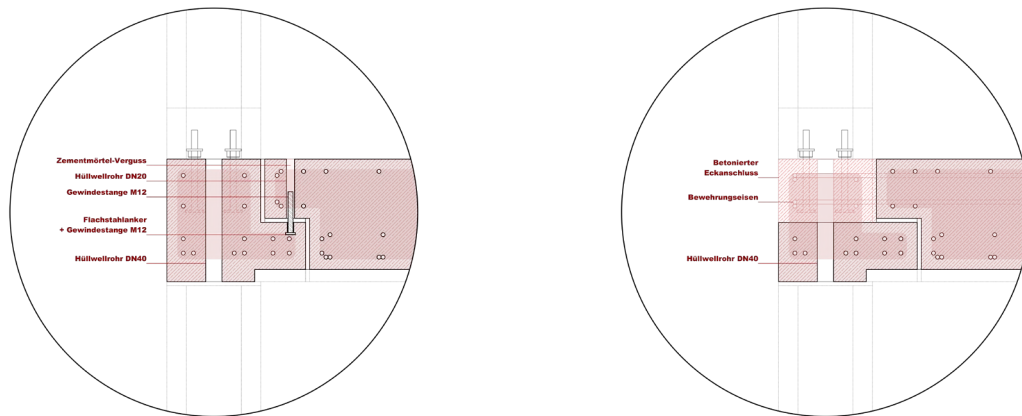


Abbildung 4-32 Darstellung eines gelenkigen und eines biegesteif ausgeführten Eckanschlusses

Die biegesteife Eckverbindung wird auf gängige Art und Weise über die Ausbildung eines Ringbalkens gewährleistet. Dabei werden die Träger in aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten hergestellt, im Bereich der Ecke/Eckbewehrung einbetoniert und sind somit dauerhaft verbunden.

Bei der gelenkigen Verbindung werden die Träger über eine Dornverbindung gefügt. Hierfür wird ein Flachstahlanker in die Betonkonsole des Längsträgers eingebaut, sodass die Aufnahme einer Gewindestange gewährleistet werden kann. Im Querträger hingegen wird ein Hüllwellrohr zur Aufnahme der Gewindestange verbaut.

Im Anschluss wird das Hüllwellrohr mit einem Vergussmörtel verfüllt. Hierfür wird die Verwendung einer Kalkmörtelmischung (ähnlich der Verbindungstechnik „Circle House“-Projekt) angestrebt, um eine sortenreine Trennung der Bauteile zu ermöglichen.

4.2.2.2 Auflagersituation Decke – Träger

Der Träger dient als Auflager für das Deckenelement. Abhängig von der Art der Trägerverbindung wird die Decke mit oder ohne zug- und druckfeste Verbindung zu den Trägern ausgebildet. Die kraftschlüssige Verbindung wird mechanisch durch eine direkte Verschraubung in der Stahlbetonkonsole gewährleistet. Dabei werden, ähnlich wie bei der Träger-Trägerverbindung, Flachstahlanker für die Aufnahme von Gewindestangen in der Konsole verbaut. Aufgrund des Einbaus des Flachstahlankers wird von einer Mindestdiefe der Konsole von 11cm ausgegangen. In den Deckenelementen sind entsprechende Öffnungen vorgesehen, die eine kraftschlüssige Verschraubung mit der Konsole ermöglichen.

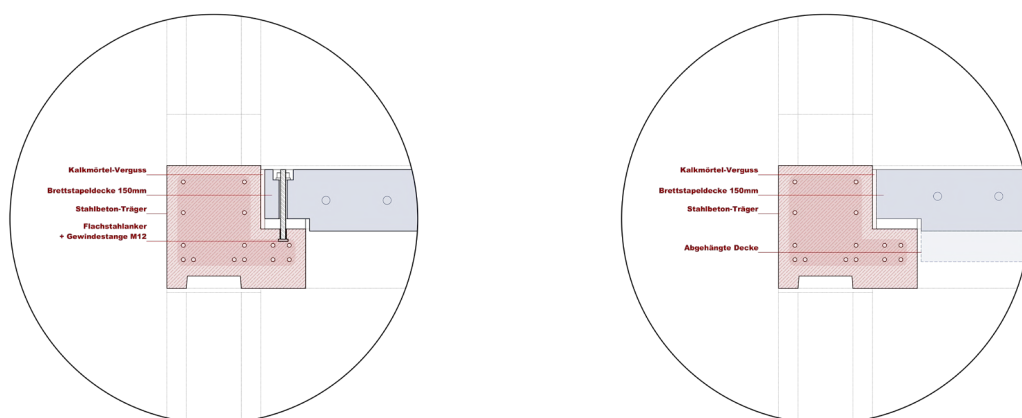


Abbildung 4-33 Darstellung zweier möglicher Anschlüsse für die Aufnahme des Deckenbauteils durch die Stahlbetonträger

Aufgelagert wird das Deckenelement auf einem Elastomerlager, welches auf der Stahlbetonkonsole aufgebracht ist. Das Elastomerlager ist schalltechnisch wirksam. Um die Fuge des Elastomerlagers zu verbergen, kann im Bereich des Auflagers die Decke ausgeklinkt oder eine Abhangdecke vorgesehen

werden. Aufgrund der Nutausbildung muss die Einbringung der Bewehrung berücksichtigt werden, weshalb die Konsole um 2cm erhöht wird. Die Konsolhöhe beträgt nun 14,50cm.

Zur Optimierung des Brand- und Schallschutzes muss die Fuge zwischen Deckenelement und Träger verfüllt werden. Hierfür wird ein Vergussmörtel verwendet, der sich bei der Demontage mit nur geringem mechanischem Aufwand lösen lässt. Das ermöglicht die sortenreine, schadenfreie Trennung der Bauteile. Anstelle des Vergussmörtels ist der Einsatz einer Trockenschüttung mit guten brand- und schallschutztechnischen Eigenschaften denkbar.

4.2.2.3 Knotenpunkte Stütze – Träger

Dieser Knotenpunkt stellt den komplexesten Fügepunkt des gesamten Bausystems dar. Hier müssen die Längs- und Querträger verbunden und gleichzeitig unterseitig und oberseitig des Trägers Anschlüsse für die Stützen vorgesehen werden. Das führt zu einer sehr hohen Bauteildichte in einem sehr kleinen Bereich. Die Anforderungen an die Reversibilität der Bauteilfugungen erschwert diese Problematik zusätzlich.

Grundsätzlich wird bei der Stützenverbindung zwischen dem Stützenfuß und dem Stützenkopf unterschieden. Der Fußpunkt wird in Anlehnung an den Peikko©-Stützenschuh entwickelt, welcher sich aus vier separaten Stützenschuhen zusammensetzt.

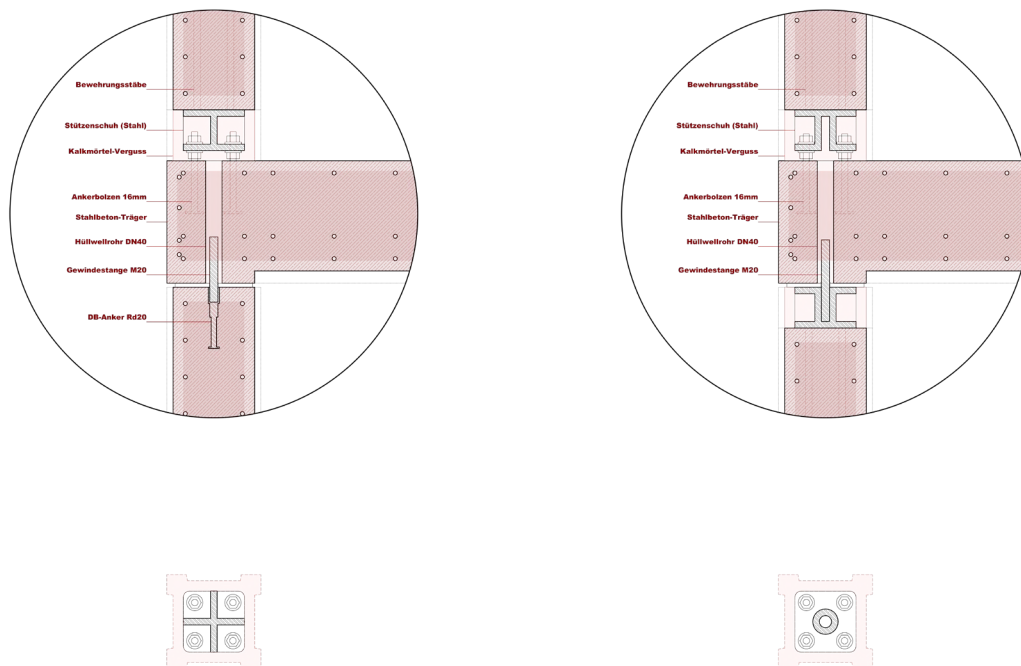


Abbildung 4-34

Detailkonzeptionen für den Stützenfuß (und -Kopf). Links Stahlbauteil als Stützenschuh mit Dorn-Verbindung für die Stapelung der raummodularen Einheiten. Rechts Stahlbauteile als Stützenfuß- und -Kopf

Im Rahmen der Forschungsarbeit haben wir die Weiterentwicklung des Stützenschuhs betrieben, da dieser an die Anforderungen der raummodularen Bauweise und die Nutausbildung in den Stützen angepasst werden musste. Anstatt von vier einzelnen Stützenschuhen ist ein zusammenhängendes Bauteil entwickelt worden, welches über vier Bewehrungsstäbe mit der Stütze verbunden ist. In Anlehnung an den Stützenschuh von Peikko wird die Stütze auf Ankerbolzen im Träger gestellt und verschraubt.

Der Stützenschuh wird nach dem Verschrauben mit einem Vergussmörtel bedeckt, um den Brandschutz des Stahlbauteils zu gewährleisten. Hierfür wird die Verwendung eines Kalkmörtels angedacht, welches sich mit einem Hochdruckstrahler wieder entfernen lässt. Der Mörtelverguss sollte im besten Fall mit Nute ausgeführt werden, was jedoch einen erhöhten Schalungsaufwand bedeutet.

Im Bereich des Stützenkopfes wird eine Dornverbindung vorgesehen. Im Stützenkopf kann ein Dorn in die Schalung integriert, mit der Bewehrung fixiert und einbetoniert werden. Im Träger befindet sich unterseitig eine Hülse zur Aufnahme des Dorns. Zur Positionierung bietet die Hülse, dank eines Federelements, eine Toleranz von ca. 30mm. Alternativ kann ein DB-Anker mit Gewindestange verwendet werden. Der Anker kann gleichzeitig auch für den Transport der Raummodule genutzt werden.

Der Einbau eines standardisierten Stahlbauteils im Stützenfuß und –kopf ermöglicht sowohl eine ober- als auch unterseitige Dorn- oder Schraubverbindung, wodurch der Wiedereinsatz der Stütze durch die Vermeidung einer Ausrichtung optimiert und die nachträgliche Veränderbarkeit vereinfacht wird. Je nach statischer Anforderung können die Ankerbolzen durchgesteckt ausgebildet werden, wodurch eine unterseitige Verschraubung ermöglicht wird.

4.2.2.4 Bauteilanschluss Wand – Träger/Stütze

Zwischen den Stützen werden die Bereiche durch flächige Wandelemente ausgefacht. Zur Aufnahme der Wände werden in den Stützen und unterseitig in den Trägern Nuten vorgesehen. In diese Nuten werden die Wandbauteile eingesetzt. Dadurch werden die Fugen zwischen den Einzelbauteilen verdeckt und der Brand- und Schallschutz verbessert. Die Nuten müssen durch Komprimänder und elastischen Fugenmörtel schalltechnisch von den Stützen und den Trägern entkoppelt werden. Die Nuten sind trichterförmig ausgebildet, um den verbesserten Einbau der Wandelemente zu gewährleisten. Sollen einzelne Wandbauteile aussteifende Eigenschaften aufweisen, müssen die Wände eine ausreichende Tragfähigkeit aufweisen und kraftschlüssig mit den Stützen und Trägern verbunden werden.

Eine Standardisierung der Stützen mit vierseitiger Nut würde die Wiederverwendbarkeit der Stütze verbessern, ist jedoch mit einem höheren Schalungsaufwand in der Produktion verbunden. Je nach Position der Stütze können differenzierte Stütztypen angeboten werden. Die Nut in der Stütze hat eine Tiefe von 15mm und in den Trägern eine Tiefe von 30mm, um die Durchbiegung des Trägers aufnehmen zu können.

Die Wandbauteile sind systemoffene, materialadaptive Bauteile mit einer standardisierten Bauteiltiefe von 12cm. Der Bauteilaufbau des Wandelements kann dabei den Rückbau während der Nutzungsphase berücksichtigen und eine höhere Anpassungsfähigkeit bieten. Dabei kann zwischen zwei Wandaufbauoptionen unterschieden werden:

- Feste Wandelemente
- Anpassbare/reversible Wandelemente

Feste Wandelemente werden als Großtafelement produziert und eingebaut. Wandöffnungen werden an der korrekten Stelle vorgesehen. Diese Wandbauteile lassen nur in geringem Maß eine Anpassung in der Nutzungsphase eines Gebäudes zu.

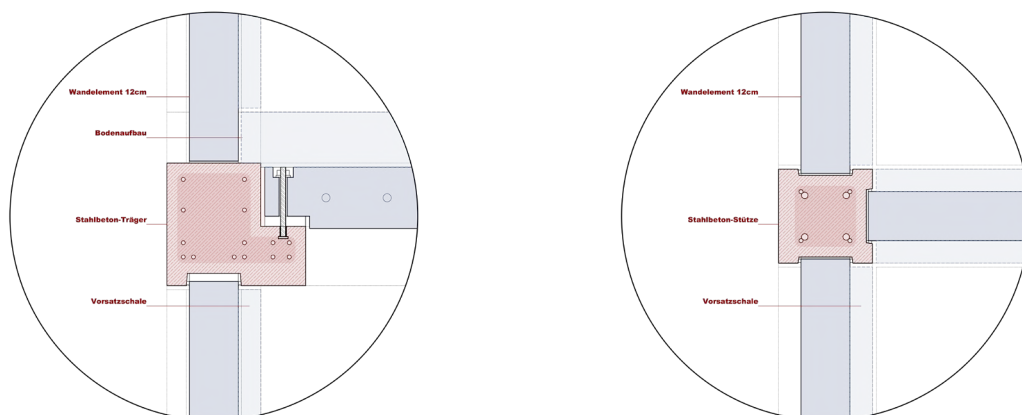


Abbildung 4-35 Wand- und Trägeranschlüsse von fest verbauten Wandelementen als Großtafelemente

Durch den Einsatz einer Kombination aus Holzrahmen und Kleintafelementen kann die Adaptivität eines Gebäudes an sich verändernde Anforderungen optimiert werden. Im Nutzungszustand können

einzelne Wandelemente ausgebaut und Räume somit flexibel umgestaltet werden. Die mechanischen Verbindungen zu dem Holzrahmen bzw. zwischen den jeweiligen Wandelementen können durch den Einbau einer systemoffenen Vorsatzschale verdeckt werden.



Abbildung 4-36 Wand- und Trägeranschlüsse von adaptiven Wandelementen in Kleintafelbauweise, als Beispiel für rückbaubare Bauteile

Zur weiteren Optimierung der Wiederverwendbarkeit der Stütze sollte die Nut achsensymmetrisch zur Mitte der Stütze angeordnet sein. Dies steht im Wettbewerb mit einer optimalen Ausnutzung der Wohnfläche, vor allem im Bereich der Außenwände. Eine Verschiebung der Nut im Bereich von Außenwänden ist daher möglich. Um ein Herausbrechen der Ecke zu vermeiden müssen dem Beton PP-Fasern zugesetzt werden.

4.2.3 Anpassungsstrategien und Nachnutzungsszenarien des adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems

Die zuvor beschriebenen Vorteile der Demontierbarkeit des adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems werden anhand von Nachnutzungsszenarien für das Referenzgebäude aus Abschnitt 4.1.4.2 dargestellt und ökobilanziell untersucht. Auch hier steht die Tragstruktur mit raumabschließenden Bauteilen ohne Innenausbau im Fokus. Hierfür bestehen zwei Konzepte der Nachnutzung, die die Optionen und Grenzen des Bausystems aufzeigen sollen:

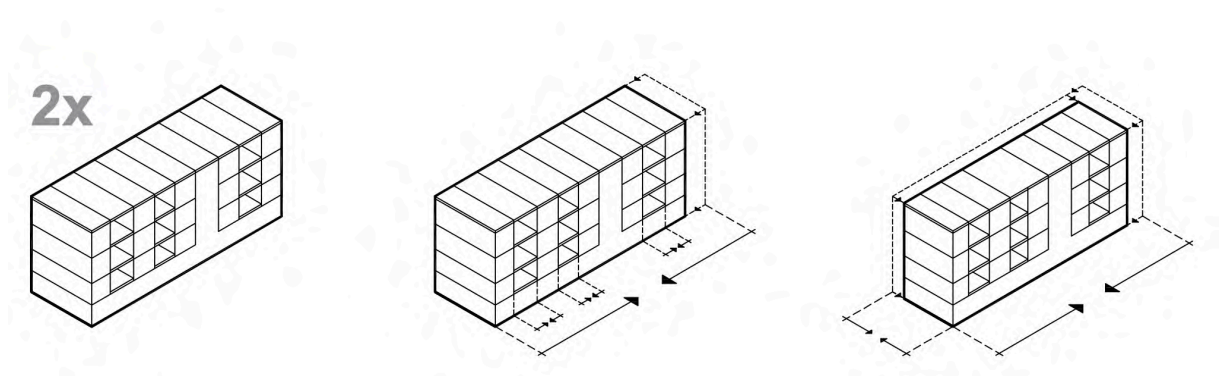


Abbildung 4-37 Darstellung der exemplarischen Nachnutzungsszenarien für das Referenzgebäude

Abbildung 4-37 links beschreibt das Basis-Szenario, bei dem das Gebäudes in konventioneller Art vollständig abgebrochen wird. Die verwendeten Materialien werden entsorgt bzw. verwertet, wie es gemäß Standardszenario in den verwendeten EPDs hinterlegt ist. Für die Stahlbeton-Bauteile bedeutet dies die Zerkleinerung und Entsorgung auf der Deponie und das anteilige Recycling als Zuschlagsstoff, beispielsweise im Straßenbau. Das Brettspertholz wird in diesem Beispiel energetisch verwertet, also der

Verbrennung zugeführt. Im Anschluss wird exakt das gleiche Gebäude an einem anderen Standort wieder errichtet.

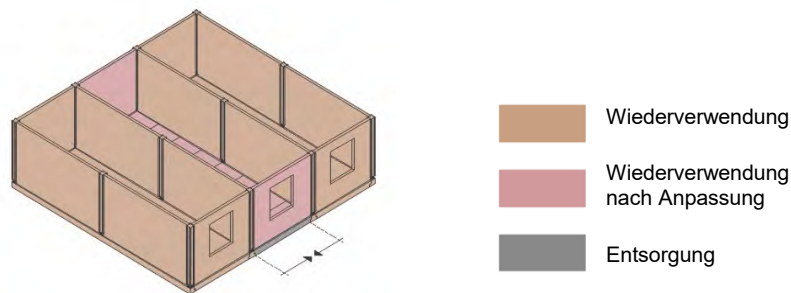


Abbildung 4-38

Darstellung Szenario 1: Veränderung der Gebäudebreite kann durch die 2D-Deckenfelder ausgeglichen werden, die Module werden unverändert einem zweiten Lebenszyklus zugeführt

Die in Abschnitt 4.1.4.4 aufgeführte Ökobilanz für einen Lebenszyklus des Referenzgebäudes wird doppelt angesetzt und jeweils um den Transport der Module und Elemente von der Produktionshalle zum Baugrundstück (hier angenommen mit 100 km) und die ökobilanziellen Daten für die Verwendung eines mobilen Krans bei der Montage ergänzt. Diese Variante bildet den Vergleichswert für die entwickelten Nachnutzungs-Szenarien.

In Szenario 1 (Abbildung 4-37 mittig und Abbildung 4-38) wird das Referenzgebäude nach Ablauf des ersten Lebenszyklus demontiert und an einem anderen Standort mit einer veränderten Gebäudebreite wiedererrichtet. Es wird angenommen, dass die Anpassung der Gebäudebreite im Bereich der frei spannenden Deckenfelder möglich ist. Es ist eine Anpassung der Länge der Decken- und Wandelemente in diesem Bereich erforderlich. Der Stahlbeton-Querträger kann aufgrund der spezifischen Bewehrung nicht wiederverwendet werden. Die Module des Gebäudes hingegen können vollständig an den Gebäudestandort 2 transportiert werden.

In der Ökobilanz sind folgende Schritte berücksichtigt worden:

- Lösen der 2D-Brettspertholz-Deckenelemente durch Freistemmen (Mörtelfuge im Randbereich)
- Lösen des Stahlbeton-Querträgers durch Stemmarbeiten (Lösen der biegesteif vergossenen Ecke)
- Demontage und Abbau der Module und der gelösten Bauteile durch einen mobilen Autokran
- Transport der Module zum Gebäudestandort 2 (Annahme: 100 km)
- Transport der Bauelemente zum Werk zur Anpassung der Geometrie
- Auf- und Abladen der Bauelemente per Deckenkran mit Laufkatze und Zuschnitt
- Transport der Bauelemente zum Gebäudestandort 2 (Annahme 100 km)
- Aufbau mithilfe eines mobilen Autokrans

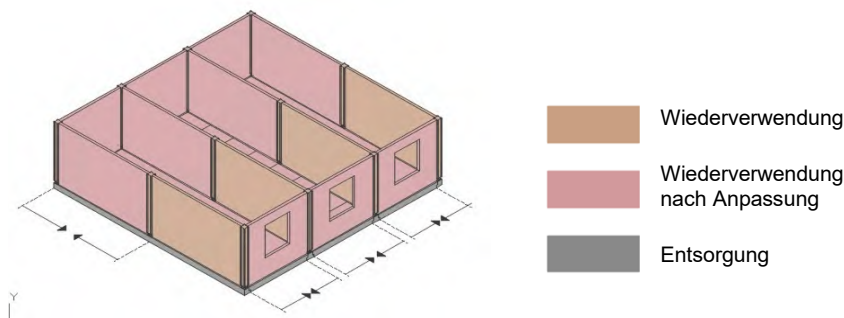


Abbildung 4-39

Darstellung Szenario 2: Veränderung der Gebäudegeometrie kann nicht allein durch die 2D-Deckenfelder ausgeglichen werden, raummodulare Einheiten werden ebenfalls verändert und einem zweiten Lebenszyklus zugeführt

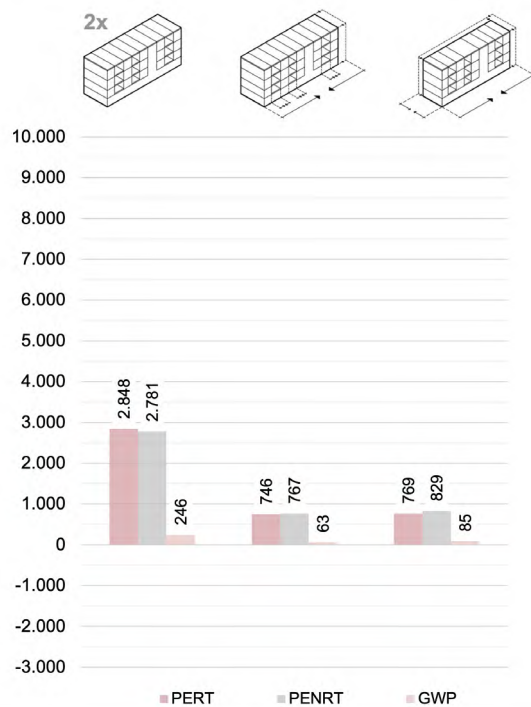
In Szenario 2 (Abbildung 4-37 rechts und Abbildung 4-39) variieren beim neuen Gebäude an Standort 2 sowohl die Gebäudebreite als auch die Gebäudelänge. Hier wird vom ungünstigeren Fall ausgegangen, dass die Differenz in der Gebäudebreite nicht allein durch die 2D-Deckenfelder ausgeglichen werden kann und eine Anpassung der Module erforderlich ist. Auch die Veränderung der Gebäudetiefe macht eine Demontage der Module in seine Einzelelemente erforderlich. Da die Längs- und Querträger in ihren Abmessungen aufgrund der gebäudespezifisch ausgelegten Bewehrung nicht wiederverwendet werden können, werden sie nach dem ersten Lebenszyklus ausgetauscht.

In der Ökobilanz sind folgende Schritte berücksichtigt worden:

- Lösen der 2D-Brettspertholz-Deckenelemente durch Freistemmen (Mörtelfuge im Randbereich)
- Lösen der Deckenplatten in den Modulen durch Freistemmen (Mörtelfuge im Randbereich)
- Lösen der Stahlbeton-Längs- und Querträger durch Stemmarbeiten (Lösen der biegesteif vergossenen Ecken)
- Lösen der Stützen durch Freistemmen (Mörtelfuge unter dem Stützenfuß)
- Demontage und Abbau der in Bauteile zerlegten Module durch einen mobilen Autokran
- Transport der Bauteile zum Werk zur Anpassung der Geometrie
- Auf- und Abladen der Bauteile per Deckenkrane mit Laufkatze und Zuschnitt
- Transport der Bauelemente, zum Teil zu Modulen montiert, zum Gebäudestandort 2 (Annahme 100 km)
- Aufbau mithilfe eines mobilen Autokrane

In den Berechnungen wurden die wesentlichen Energieverbraucher beim Wiederverwendungsprozess berücksichtigt. Montage und Demontearbeiten mit Kleinstwerkzeug und die Energiebilanz der personellen Ressourcen wurde nicht berücksichtigt. Die der Berechnung zugrunde gelegten Daten sind Anlage 11 Exemplarische Berechnungen zur Ökobilanz zu entnehmen. Aus diesen Betrachtungen resultieren nachfolgende Ergebnisse:

Ökobilanz Nachnutzung
Lebenszyklusphase A-C
[GJ] bzw. [to CO₂-eq.]



Ökobilanz Nachnutzung
Lebenszyklusphase D
[GJ] bzw. [to CO₂-eq.]

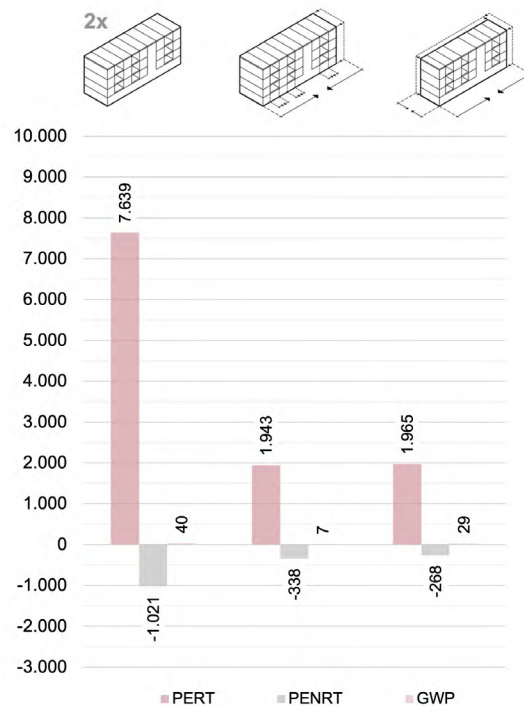


Abbildung 4-40 Ökobilanz des Basis-Szenarios und der Wiederverwendungs-Szenarien 1 und 2

	PERT	PENRT	GWP	PERT	PENRT	GWP	Ge- samt- bilanz PERT A-D	Gesamt- bilanz PENRT A-D	Ge- samt- bilanz GWP A-D
	A-C	A-C	A-C	D	D	D	[GJ]	[GJ]	[to CO ₂ - eq.]
	[GJ]	[GJ]	[to CO ₂ - eq.]	[GJ]	[GJ]	[to CO ₂ - eq.]			
Basis- Szena- rio	2.848	2.781	246	7.639	-1.021	40	10.487	1760	286
Szena- rio 1	746	767	63	1.943	-338	7	2.689	429	70
	-73 %	-72 %	- 74 %	-75 %	+ 66%	-83 %	-74 %	-76 %	-76 %
Szena- rio 2	769	829	85	1.965	-268	29	2.734	561	114
	-73 %	-70 %	-65 %	-74 %	-74 %	-27,5 %	-74 %	-68 %	-60 %

Tabelle 4.2-1 Ergebnisse des ökobilanziellen Vergleichs der Nachnutzungsszenarien

Die Ergebnisse weisen nach, dass die bereits durch die weitestgehende Reduktion des Stahlbetonanteils im Tragwerk und Substitution der flächigen Bauteile durch Holzbaustoffe, in diesem Fall Brettsper Holzdecken und -wände, Einsparungen an Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar) und Treibhauspotenzial durch die Wiederverwendung der Bauteile innerhalb eines zweiten Lebenszyklus drastisch um weitere 60-80 % gesenkt werden können. Der Vergleich zwischen Szenario 1 und Szenario 2 verdeutlicht vor allem, wie deutlich sich die schwierige Wiederverwendbarkeit der Stahlbeton-Träger vor

allem auf das Treibhauspotenzial auswirkt. Deren vollständige Erneuerung im Lebenszyklus 2 ist maßgeblich für die Differenz von insgesamt 34t CO₂-eq. und damit eine Reduktion der möglichen Einsparung von -76% in Szenario 1 zu -60% in Szenario 2 verantwortlich.

Die Ergebnisse zeigen auch, dass durch die vorgenommenen Reduktionen und Substitutionen an der Gebäudestruktur sowie die hohe Wiederverwendbarkeit der einzelnen Bauteile eine derart hohe Einsparung an erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergien sowie am Treibhauspotenzial erreicht werden konnte, dass sich bereits geringe Veränderungen in die konträre Richtung bilanziell deutlich bemerkbar machen.

Bewertung der Kreislauffähigkeit - CircularLCA

Für die Betrachtung der Zirkularität wurde seitens der Concular GmbH eine Lizenz zur webbasierten Circular LCA zur Verfügung gestellt. Da der Circular Performance Index (CPX) ein dynamischer Indikator ist, werden Veränderungen in den Daten kontinuierlich abgebildet.

Nachfolgend wird die manuelle Zuordnung der Bauteile zu den CPX-Parametern vorgenommen. Die Bauteile wurden wie folgt eingeschätzt:

	Qualifizierung / Quantifizierung im Rahmen der CPX-Bewertung			
	Träger	Stützen	Decken	Wände
Wieder- verwendung	Primärrohstoffe 0 Punkte	wiederverwendet 100 Punkte	wiederverwendet 100 Punkte	wiederverwendet 100 Punkte
Demontierbarkeit	einbetoniert 0 Punkte	angeschraubt 85 Punkte	angeschraubt 85 Punkte	angeschraubt 85 Punkte
Wieder- verwendbarkeit	Ökonomisch nicht tragbar 0 Punkte	Aufbereitung ein- fach 90 Punkte	Aufbereitung zeitintensiv 90 Punkte	Aufbereitung zeitintensiv 85 Punkte
Trennbarkeit	nicht verlustfrei möglich 0 Punkte	Maschinell mit Handwerkzeug 85 Punkte	Maschinell mit Handwerkzeug 85 Punkte	Maschinell mit Handwerkzeug 85 Punkte
Recyclbarkeit	25-50 % recyclbarer Ab- fall 25 Punkte	25-50 % recyclbarer Abfall 25 Punkte	50-75 % recyclbarer Abfall 50 Punkte	50-75 % recyclbarer Abfall 50 Punkte

Tabelle 4.2-2 Exemplarische Darstellung der Zuordnung der Bauteile des adaptiv-assoziativen Bausystems zu den CPX-Parametern

Wie am Beispiel der Träger deutlich wird, ist hierbei das betrachtete Nachnutzungs-Szenario relevant und führt zu unterschiedlichen Bewertungen. So können die Träger bei einer Verwendung im Nachnutzungs-Szenario 2 (veränderte Gebäudetiefe und -länge) nicht wiederverwendet werden. Im Nachnutzungs-Szenario 1 können nur die Träger im 2D-Deckenfeld aufgrund der sich ändernden Geometrie nicht wiederverwendet werden, wohingegen die Träger der Module weiterhin verbaut werden können. Bei der gewichteten Mittelwertbildung führt dies zu unterschiedlichen Bewertungen.

Die hier für die einzelnen Bauteile vorgenommene Qualifizierung / Quantifizierung wird in der Anwendung auch für die einzelnen Baustoffe vorgenommen. Baustoffe können zu Komponenten gruppiert werden, die wiederum zu weiteren übergeordneten Komponenten gruppierbar sind. Zur Bestimmung des CPX wird anschließend ein gewichteter Mittelwert errechnet.

Der umfangreichste Arbeitsschritt ist dabei die Erfassung der verwendeten Materialien und Massen. Hier besteht die Möglichkeit, das Bauteil als ifc-Modell in die Anwendung einzulesen oder eine Materialliste aus einem BIM-Modell als csv-Datei zu exportieren und auf Basis einer durch Concular vorgegebenen Struktur in die Anwendung einzulesen. In der Anwendung wird dann die Zuordnung der Materialien zu den hinterlegten Datenbankprodukten vorgenommen. Hierbei kann eine KI unterstützend mitwirken. Da das im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte digitale Planungswerkzeug die Mengen

und Materialien ebenfalls dynamisch anlegt, so dass Änderungen sich automatisch auf die Mengenermittlung auswirken, wurde eine Schnittstelle zur Datenübertragung für die Weiterverwendung in der CPX-Anwendung erfolgreich umgesetzt.

4.3 DIGITAL

4.3.1 Konzeption des digitalen Planungswerkzeugs

4.3.1.1 Funktionsweise des digitalen Beschreibungsmodells

Aus einer einfachen Entwurfsskizze mit grundsätzlichen Informationen soll ein dreidimensionales, topologisch organisiertes Modell generiert werden. Dieses Modell kann sowohl automatisiert anhand einer Datenbank mit Standardwerten für einen bestimmten Bauwerkstyp (Wohnen, Schule etc.), wie auch individuell mit Anforderungen aufgeladen und überprüft werden. Ein automatisierter Planungs- und Optimierungsprozess heißt, all das zu automatisieren, was durch technische oder rechtliche Vorgaben und Normierungen vorgegeben ist. Das generierte Modell besteht zunächst nur aus den typischen Elementen eines topologischen Modells: Punkte, Linien, Flächen, Räumen. Je nach Anforderung können diese Elemente auch zu Gruppen zusammengefügt und mit Informationen verknüpft werden. Durch sogenannte Bauteil-Apps können Produkte frühzeitig in den Entwurf integriert werden. Aus diesem Modell werde Datensätze generiert, die es externen Programmen erlauben, zusätzliche Anforderungen zu generieren (Tragwerksplanung, Haustechnik, Brandschutz etc.), um das Modell weiter aufzuladen und damit zur ermöglichen, das Gebäudemodell als Ganzes zu optimieren.

Zu jedem Zeitpunkt kann man aus diesem einfachen topologische Modell, Renderings ableiten, um den Planungsfortschritt zu überprüfen oder ein detailliertes Nurbs-Modell generieren, um anderen Planungsbeteiligten oder potentiellen Produzenten geeignete Daten zur Verfügung stellen zu können.

Ein wesentlicher Unterschied zu herkömmlichen „digitalen“ Planungsprogrammen (BIM) besteht darin, dass das topologisch organisierte Modell nicht nur Bauteile verwalten kann, sondern im vollen Umfang auch die Beziehung zwischen den Bauteilen. Dies ist die Voraussetzung für eine automatisierte Werkplanung in Hinblick auf eine digital gesteuerte oder auch, übergangsweise, analoge Produktion.

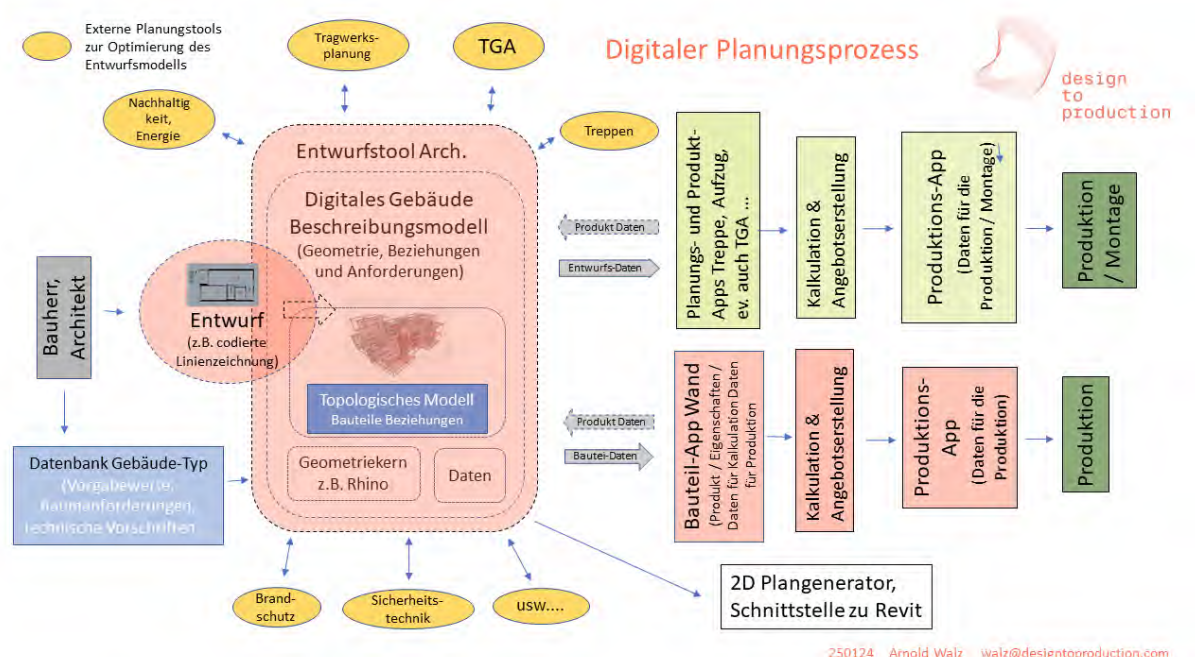


Abbildung 4-41

Schematische Darstellung des digitalen Planungsprozesses

4.3.1.2 Definition der forschungsrelevanten digitalen Bestandteile

Im Folgenden werden die relevanten Bestandteile zur Abbildung der kontinuierlichen Prozesskette eingeführt:

Digitales Gebäudebeschreibungsmodell (DGBM)

Aus den Entwurfsvorgaben und den zusätzlichen Informationen und Anforderungen, die in der Datenbank gespeichert sind, kann ein 3D-Gebäudemodell generiert werden. Dieses DGBM enthält neben der Gebäudegeometrie als topologisches Modell (Bauteile und die Beziehung zwischen den Bauteilen) die Anforderungen an das Gebäude, wie sie von der ArchitektIn und BauherrIn, durch den Gebäudetyp, oder durch baurechtliche oder technische Vorschriften vorgegeben werden. Im Laufe des Planungs- bzw. Optimierungsprozesses kann das Modell durch die Anwendung von externen Planungstools (Optimierungstools) mehr und mehr mit zusätzlichen Informationen aufgeladen werden.

Topologisches Modell

In der Definition des Beschreibungsmodells wird die Gebäudegeometrie als topologisches Modell dargestellt. Ein solches topologisches Modell besteht aus Punkten, Kanten (Linien), Flächen, Räume. Jedes dieser Grundelemente kann unterschiedlichen Gruppen angehören: z.B. Flächengruppen (shells), Raumgruppen (Cluster). Punkte oder Linien (Kanten) können auch frei auf Flächen positioniert werden. Entscheidend ist, dass jedes dieser Elemente seine Nachbarn kennt und somit die Beziehung zwischen Bauteilen und Nutzungen darstellen kann. Jedem dieser topologischen Grundelemente können Bauteil-daten zugewiesen werden. Eine Linie kann eine Stütze oder einen Unterzug repräsentieren, eine Fläche einen bestimmten Wandtyp oder eine Reihe von Anforderungen an die Wand in Bezug auf beispielsweise Bauphysik, Tragwerksplanung und Brandschutz. Diese Anforderungen werden von den PlanerInnen, von FachplanerInnen oder durch allgemeinen Vorschriften und Normen definiert.

Entwurfstool

Das Entwurfstool ist die Arbeitsumgebung der Planenden. Dort kann das Modell editiert werden, indem Standardwerte überschrieben, Bauteile verschoben oder ergänzt, Proportionen verändert usw. werden. Hier können Datensätze generiert werden, die es den Fachplanenden ermöglichen, ihre Arbeit zu automatisieren (Optimierungsmodule) oder es können Bauteil-Apps initiiert werden, die mit den Anforderungsdaten der Bauteile konkrete Produkte konfigurieren und die resultierenden Eigenschaften zurückgeben können.

Optimierungsmodule

Die Optimierungsmodule (Tragwerksplanung, TGA, Bauphysik, Nachhaltigkeit und Energie, Brandschutz und viele andere) sollen vom Beschreibungsmodell all die Daten bekommen, die eine automatisierte Planung benötigt. Für die Tragwerksplanung kann beispielsweise eine Eingabedatei für ein Berechnungsprogramm erstellt werden, die dann von dem TragwerksplanerIn konfiguriert werden kann, um damit die Anforderungen an die Tragwerksplanung zu berechnen. Mit den Ergebnissen wird das Beschreibungsmodell angereichert, dass heißt jedes Bauteil kennt seine statischen Anforderungen oder, falls es schon Materialvorgaben gibt, Bewehrungsgrad und notwendigen Abmessungen. Dies setzt eine konstruktive Zusammenarbeit mit allen Planungsbeteiligten voraus, um das Beschreibungsmodell so zu strukturieren und aufzuladen, damit den externen Programmen all die Daten zur Verfügung gestellt werden können, die benötigt werden, um die gewünschte Planungsleistung zu erbringen. Diese Optimierungsschleifen sollten beliebig oft wiederholt werden können. Das Ziel ist, ein Planungstool zu haben, mit dem ein Gebäude als Ganzes und nicht nur in Teilaspekten optimiert werden kann.

Datenbank Gebäudetyp

In einer Gebäudetyp-Datenbank sollten all die Daten gesammelt oder Verweise erstellt werden, die in Bezug auf einen bestimmten Gebäudetyp (z.B. mehrgeschossiger Wohnbau) relevant sind. Aktuell liegen viele dieser Daten noch nicht in digitalisierter Form vor (z.B. Normen, baurechtliche Vorgaben...). „Digitale Norm 1 umfasst alle relevanten Informationen für eine Normungs- und Standardisierungsaufgabe und stellt diese in einer für die Anwendung passenden Weise und Umfang bereit. Sie kann sowohl von Menschen als auch von Maschinen initiiert, erstellt, aufbereitet, umgesetzt und angepasst werden

(DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Informationstechnik in DIN und VDE).“ Die Initiative zum Erreichen dieser Ziele ist vorhanden, fraglich ist, wann dies auch für Normen gilt, die im architektonischen Planungsprozess relevant sind. Die Daten des fertig geplanten Gebäudes könnten dazu benutzt werden, die ursprüngliche Gebäudetyp Datenbank zu aktualisieren.

Bauteil-App

Die Bauteil-App ist eine Erweiterung des DGBM und stellt die Verbindung zwischen Entwurf / Gebäudemodell und den HerstellerInnen bzw. den ProduzentInnen her. Diese Tools können nur gemeinsam mit der Industrie entwickelt werden. Die App nimmt die im Beschreibungsmodell definierte Geometrie und jeweiligen Anforderungen auf und wirft ein Produkt mit den geeigneten Eigenschaften aus. Die Planenden sehen auf diese Weise direkt, wie das Bauteil auf Grund der Anforderungen und in Bezug auf verfügbare Produkte aussieht und können über Kosten und Liefertermine informiert werden. Produzenten kann kalkulieren, ein Angebot erstellen und bei Beauftragung die Daten generieren, die für die Produktion, Lieferung und Montage nötig sind.

Planungs- und Produkt-App

Hersteller mit einer digitalisierten Planungsabteilung (z.B. Heizung / Lüftung) könnte mit den Daten aus dem Beschreibungsmodell eine entsprechende Anlage generieren und diese mit seinen Produkten unmittelbar umsetzen.

Produktions-App

Nach Beauftragung können Daten generiert werden, die die Produktion (digital/analog) steuern. Details werden nicht als PDF-Datei kommuniziert, sondern als Algorithmus, der definiert, was passiert, wenn zwei Bauteile unter definierten geometrischen Bedingungen aufeinandertreffen.

2D-Plangenerator, Schnittstelle zu BIM

Um 2D-Pläne zu generieren, braucht man entweder einen Generator, der für analoge Planungsprozesse oder Genehmigungen geeignete Unterlagen generiert oder man generiert automatisiert das Gebäude in einem herkömmlichen CAD/BIM Programm und nutzt dort die Möglichkeiten zur Erzeugung von 2D-Plänen.

4.3.1.3 Digitalisierung und Nachhaltigkeit

Es gibt an vielen Universitäten Forschungen zu neuen Materialien, neuen Bauprozessen und Konstruktionen. Ziel ist, die Produktivität zu erhöhen, Energie und Rohstoffe einzusparen sowie die Wiederverwertung von Baustoffen zu ermöglichen. All diese Bestrebungen basieren auf digitalen Modellen und abgeleiteten Daten für die Planung und Produktion. Wenn wir diese Möglichkeiten nutzen wollen, werden konsistente digitale Planungsmodelle benötigt, die in der Lage sind, die Daten zur Verfügung zu stellen, die diese Prozesse als Input erfordern. Es geht um optimierte Beton- oder Hybridkonstruktionen, neue Formen in der Konstruktion wie z.B. Wölbkonstruktionen die, da sie vorwiegend Druckkräfte und wenig Biegung (Beulen) ableiten müssen, wenig Stahl als Bewehrung benötigen, Konstruktionen, die Zug- und Druckelemente konsequent trennen, um so die Wiederverwertung oder das Recycling erleichtern. Ausgehend von den individuellen Anforderungen des Bauwerks können solche Bauteile generiert werden und Daten für die Produktion abgeleitet werden. Wenn es darüber hinaus noch einen Produktionsprozess gäbe, der diese Bauteile individuell produzieren könnte, hätten wir eine unter Umständen nachhaltige konstruktive Lösung. Dies bedeutet, dass uns eine konsequente Digitalisierung im Bauwesen viele neue Möglichkeiten zum nachhaltigen Bauen eröffnen würde.

Da in diesem Modell das Entwurfsmodell letztendlich auch das Produktionsmodell ist, kann im Falle einer Umnutzung oder Wiederverwendung der Bauteile dies zur weiteren Planung eingesetzt werden.

Nachhaltiges Bauen bedeutet, den Energie- und Ressourcenverbrauch zu minimieren und gleichzeitig durch die Verwendung entsprechender Materialien die Umweltverträglichkeit zu maximieren. „Zukunftsfähiges und nachhaltiges Bauen und Betreiben setzt eine ganzheitliche und integrale Planung voraus. Bereits in der frühen Planungsphase werden die Weichen für die spätere Nachhaltigkeitsqualität eines Gebäudes gestellt. (Anmerkung: das gilt nur für die analoge Planung) Daher gilt es, die Aspekte der

Nachhaltigkeit in allen Planungs-, Bau- und Bewirtschaftungsprozessen entsprechend zu berücksichtigen, um die Qualität des Gebäudes herzustellen (Neubau), aufrechtzuerhalten (Betrieb) und zu verbessern (Bauen im Bestand) (Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2019)“. Die erweiterte Verwendung von Bauprodukten, also nicht nur von beispielsweise Türen, Fenster, Sanitärkeramik, sondern auch Wandelemente, Stützen, Fassadenelemente, Geschossdecken usw. würde die Wahrscheinlichkeit einer Wiederverwendung deutlich erhöhen.

4.3.1.4 Zusammenstellung der technischen Anforderungen für die Eigenentwicklung

Grundlage für das digitale Planungswerkzeug, hier das digitale Beschreibungsmodell, des adaptiven Bausystems bildet ein topologisches Modell. Ein solches Modell beschreibt in der Gebäudemodellierung die strukturelle Beziehung zwischen den verschiedenen Elementen eines Gebäudes. Im Gegensatz zu einem geometrischen Modell, das die physische Form und Abmessungen von Bauteilen beschreibt, konzentriert sich ein topologisches Modell auf die Verbindungen und räumlichen Beziehungen zwischen diesen Bauteilen. Merkmale eines topologischen Modells:

- Verbindungen und Abhängigkeiten: Das Modell definiert, welche Elemente über gemeinsame Knoten und Kanten miteinander verbunden sind und ermöglicht so eine algorithmische Detaillierung und umfassende Auswertungen.
- Hierarchische Strukturen: Es kann die hierarchische Organisation von Elementen abbilden, wie etwa die Beziehung zwischen Räumen, Etagen und Zonen.
- Funktionale Abhängigkeiten: Neben der physischen Verbindung kann das Modell auch funktionale Abhängigkeiten darstellen, etwa, dass ein Raum nur durch eine bestimmte Tür erreichbar ist.

Das topologische Modell ermöglicht eine effiziente Analyse von strukturellen und baulichen Abhängigkeiten und wird in Kombination mit einem geometrischen Modell verwendet, um ein vollständiges Bild des Gebäudes zu erzeugen. Die untersuchten Vor- und Nachteile der topologischen Modelle wurden in der eigenen Programmierung berücksichtigt. Die Limitation auf Meshmodelle ermöglicht eine leistungsstarke und schnelle Modellierung, in der mit Millionen von Flächen gearbeitet werden kann. Dies ist für Berechnungsmodelle (z.B. FE) sicherlich von Vorteil, beim Abbilden von Gebäuden werden aber kaum so große Modelle benötigt. Es bietet sich an, hier ein Modell zu verwenden, welches auch die Vielzahl architektonischer Formen abbilden kann. Der strukturelle Kern kann dabei durchaus auf dem Meshprinzip beruhen, er ist jedoch so konzipiert, dass auch Kurven und Freiformflächen als Repräsentation von Kanten und Flächen möglich sind. Außerdem bedarf es zusätzlicher geometrischer Informationen im Modell, wie z.B. Punkte auf Kanten, auf Flächen oder in Räumen, um später konstruktive Details (z.B. Befestigungen) und Einbauteile (Fenster, Durchbrüche, Steckdosen etc.) abbilden zu können. Auch sollte es grundsätzlich möglich sein, weitere Gewerke wie zum Beispiel gebäudetechnische Systeme zu integrieren. Hierfür werden weitere topologische Modelle benötigt, welche mit dem architektonischen Modell interagieren.

Prinzipieller Aufbau:

Sämtliche Elemente müssen auf ihre benachbarten Elemente zugreifen können. Hierfür ist sowohl ein top-down Verweis (eine Fläche kennt ihre erzeugenden Kanten), als auch ein bottom-up Verweis (eine Kante kennt alle angrenzenden Flächen) nötig. Nur so können Flächen beispielsweise auch benachbarte Flächen finden.

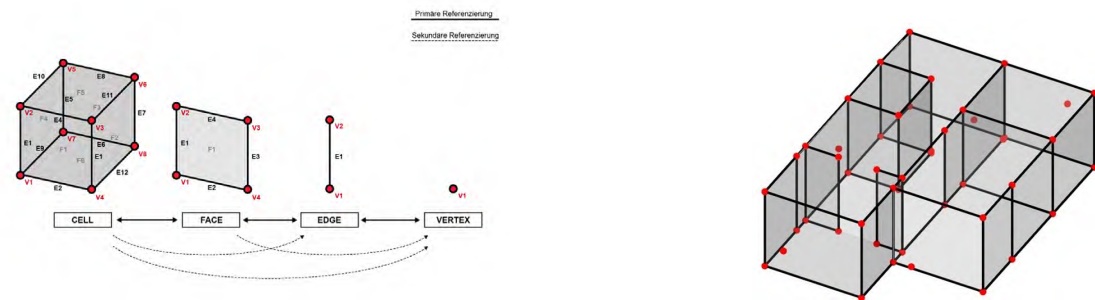


Abbildung 4-42 Aufbau der Grundelemente des topologischen Modells

Gebäude sind somit immer aus den Grundelementen Vertex, Edge, Face und Cell aufgebaut. Das gesamte Gebäude kann so in einem topologischen Modell verwaltet werden und es kann auf sämtliche Elemente zugegriffen werden.

Bauteilrepräsentation



Abbildung 4-43 Zuweisung topologischer Elemente am Gebäude

4.3.1.5 Umsetzung des Kerns

Die Software ist als Plugin für Rhino entwickelt und in C# programmiert. Sie ist modular in mehrere Projekte aufgeteilt, um eine Verwendung auch außerhalb von Rhino zu ermöglichen. So kann das Gebäude beispielsweise über Datenbankabfragen analysiert oder der Kern in eine andere Softwareumgebung integriert werden.

Domain-Namespacer	Dieser verwaltet das topologische Modell und dessen Abhängigkeiten, speichert Parameter und organisiert die Anbindung von geometrischen Bauteilen. Dort sind sämtliche Klassen der topologischen Elemente untergebracht. Diese sind weitgehend unabhängig von einer Geometrie, sodass sie auch außerhalb von Rhino verwendet werden können. Für grundlegende geometrische Elemente wie Punkte, Vektoren und Ebenen wird das OpenSource-Toolkit Rhino openNURBS verwendet. Dieses ist lizenzfrei und ermöglicht sowohl die Nutzung ohne Rhino als auch eine nahtlose Integration in die Rhino-Umgebung.
RHAdapter-Namespace	Hier wird die Integration in Rhino geregelt.
DataAnalyse-Namespace	Dieser bietet Analysefunktionen, wie beispielsweise die CO ₂ -Auswertung, an.
Bauelemente	Die tatsächlichen architektonischen Bauelemente sind als Python-Klassen umgesetzt. Sie werden als Verweise im topologischen Modell gespeichert und können dynamisch geladen werden.

Topologische Klassen des Namespace:

Structure	Verwaltet sämtliche topologischen Informationen eines Systems. Hier werden alle Instanzen der topologischen Elemente (z. B. Vertex, Edge) mit ihren eindeutigen IDs gespeichert. Verweise innerhalb der Elemente speichern dann lediglich die entsprechenden IDs und die Instanzen müssen bei Bedarf aus der Structure geladen werden. Mehrere Structures können in einer Datei enthalten und ineinander verschachtelt werden.
Substructure	Um das topologische Modell übersichtlich zu gestalten, können zusätzliche topologische Modelle an beliebige Elemente angehängt werden. So können beispielsweise Elemente für verschiedenen Gewerke unterschiedlich unterteilt werden. Auch Öffnungen für Fenster und Türen werden als eigene topologische Elemente verwaltet, um diese Produktabhängig neu generieren zu können. Diese hängen beispielsweise an einem Vertex auf dem entsprechenden Face.
Vertex	Das einfachste topologische Element speichert seine Position (X,Y,Z) und die IDs angrenzender Edges. Falls der Vertex OnEdge oder OnFace ist, werden auch die entsprechenden Edges oder Faces gespeichert.
Edge	Repräsentiert eine Kante und speichert die IDs der Start- und Endpunkte (Vertices A und B) sowie die IDs der Loops in denen sie enthalten ist. Zusätzlich werden auch VerticesOnEdge gespeichert.
Loop	Beschreibt eine zusammenhängende, gerichtete Gruppe von Kanten. Hier werden die IDs der Kanten und deren Ausrichtung und die ID des zugehörigen Faces gespeichert.
Face	repräsentiert ein flächiges Element und speichert die IDs des verwendeten, geschlossenen Outerloop und möglicher Innerloops, falls Öffnungen vorhanden sind. Zudem werden die IDs sämtlicher Shells gespeichert, welche das Face verwenden und die RoomShells zu beiden Seiten. Zusätzlich werden auch die IDs von VerticesOnFace gespeichert.
Shell	Repräsentiert eine zusammenhängende, gerichtete Gruppe von Faces und speichert die IDs der Faces und deren Ausrichtung und die ID des Raumes, welcher die Shell verwendet.
Room	Repräsentiert ein Volumen und speichert die ID der verwendeten Shell und die IDs sämtlicher Cluster die den Raum enthalten.
Cluster	Repräsentiert eine Gruppe von Räumen und speichert die IDs der enthaltenen Räume.
Component	Jedem topologischen Element können beliebig viele Komponenten zugeordnet werden. Diese speichern den genauen Bauteiltyp, dessen Parameter sowie die IDs erzeugter Geometrie.

Jedes Element speichert ausschließlich direkte Nachbarn (z. B. Vertices $\leftarrow$ Edge $\rightarrow$ Loops). Entferntere Abfragen werden durch verkettete Verbindungen realisiert (z.B. Vertices $\leftarrow$ Edges $\leftarrow$ Loop $\rightarrow$ Face $\rightarrow$ Shells).

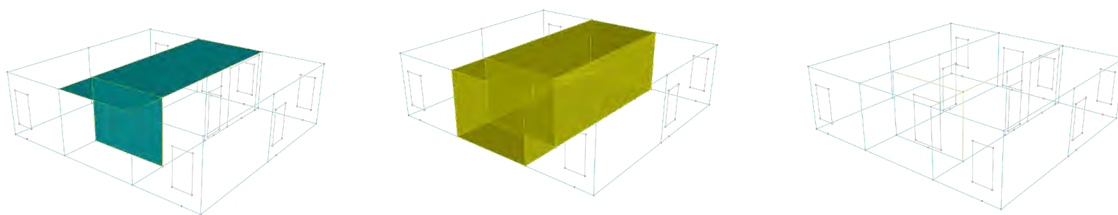


Abbildung 4-44 *Edge.Faces, Face.Rooms, Vertex.Edges von links nach rechts*

Das gesamte topologische Modell kann effizient in einen JSON-String serialisiert und daraus wieder deserialisiert werden. Dies ermöglicht ein benutzerfreundliches Speichern und Öffnen der Modelle innerhalb des Rhino-Plugins, sowie auch die Verwendung außerhalb von Rhino.

Namespace RHAdapeter:

Der RHAdapter-Namespace bietet die geometrische Repräsentation der topologischen Elemente in Rhino. Er ermöglicht deren Darstellung, Zugriff und Manipulation:

- Repräsentative Elemente: Elemente wie Vertex, Edge, Face und Room sind in Rhino als native Geometrien verfügbar, wobei sie die gleiche ID wie ihre entsprechenden Domain-Elemente besitzen.
- Gruppenverwaltende Elemente: Elemente wie Loop, Shell und Cluster organisieren und regeln den Zugriff auf die gruppierten Objekte.

Die repräsentativen Geometrien können freiförmig sein. Kanten und Flächen müssen daher nicht linear oder planar sein, sondern können als beliebige NURBS-Kurven und -Flächen modelliert werden.

Zusätzlich führt der RHAdapter anspruchsvolle geometrische Aktionen durch, die in openNURBS nicht verfügbar sind, jedoch für die Generierung und Analyse benötigt werden. Die Klasse Component lädt dynamisch die Python-Klassen der Bauteile. Zudem sind in diesem Namespace auch Rhino-Befehle implementiert, die die Erstellung, Manipulation und den Zugriff auf topologische Elemente ermöglichen.

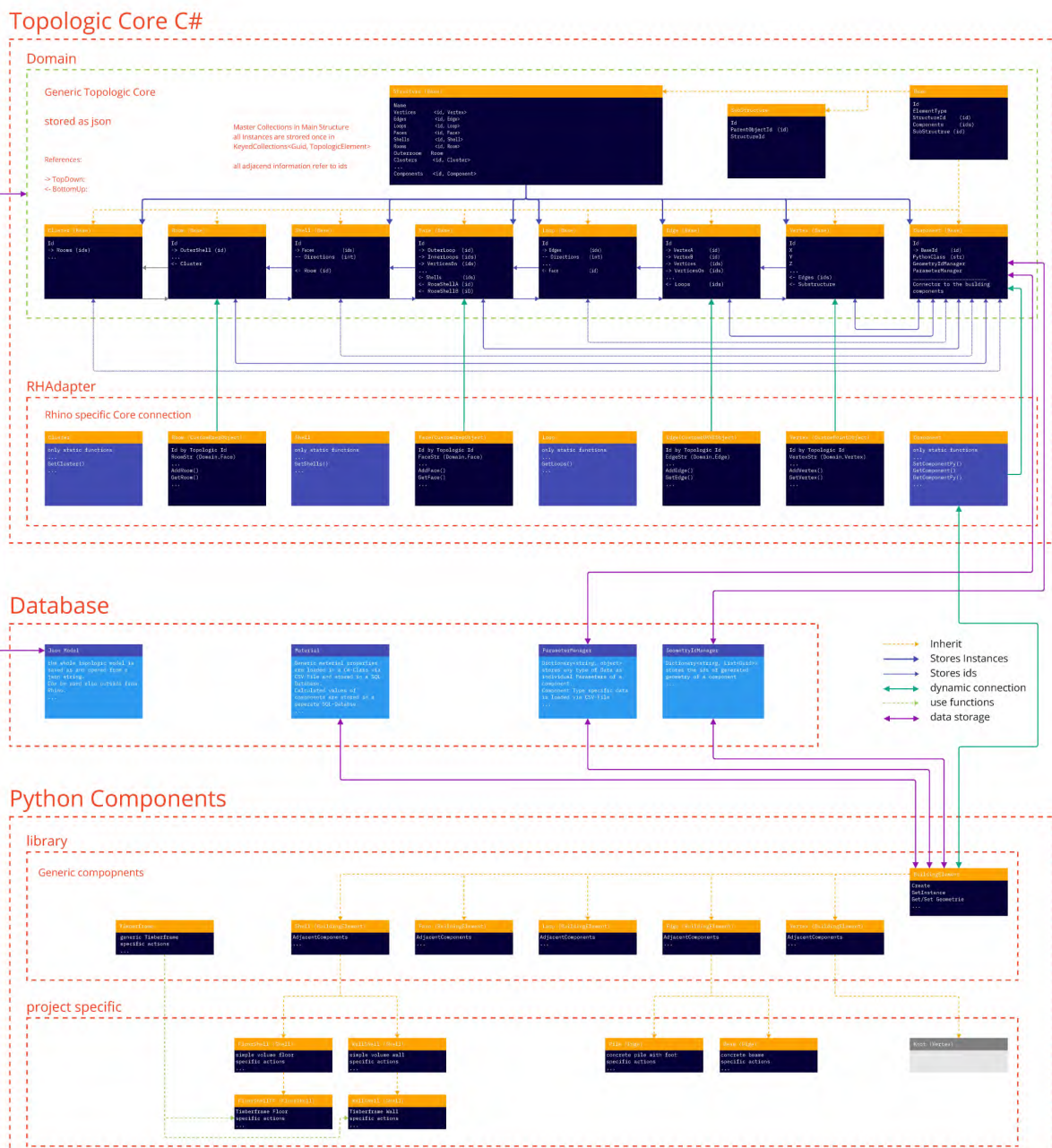


Abbildung 4-45

Reduziertes Klassendiagramm des gesamten Softwareprojekts

Bauelemente:

Die Bauelemente sind als Python-Klassen umgesetzt:

- Basisklasse: Die grundlegende Basisklasse ermöglicht den Zugriff auf das Plugin und stellt Funktionen für Blöcke, CO₂-Kalkulation etc. bereit.
- Spezifische Klassen: Von der Basisklasse erben spezifische Bauteilklassen wie Vertex oder Edge, die auf elementtypische Operationen spezialisiert sind und ihre Nachbarelemente identifizieren können.
- Projektspezifische Klassen: Diese detaillieren und generieren definierte Bauteile und erben von den entsprechenden Basisklassen.

Die Parameter der Bauteile können in CSV-Dateien definiert werden. Unterschiedliche Typen und ihre spezifischen Werte lassen sich so vorab festlegen. Beim Zuweisen eines Bauteils werden die typenspezifischen Parameter in den ParameterManager des Domain.Component geschrieben. Hier können auch weitere Parameter gesetzt oder individuell verändert werden. Der ParameterManager kann für spezifische Parameter beliebig erweitert werden.

Erweiterungen im architektonischen Kontext:

Die Anforderungen aus der Architektur gehen über ein rein topologisches Modell hinaus und sollten dennoch Bestandteil des funktionalen Kerns sein. Im Besonderen werden Punkte auf Kanten und Flächen benötigt, um untergeordnete Bauteile zu platzieren, ohne das topologische Modell zusätzlich unterteilen zu müssen. Hierbei kann es sich um Elemente zur Detaillierung handeln, welche Aussparungen, Befestigungen oder Einbauteile auf Kanten oder Flächen definieren, aber auch die Endpunkte von Stützen auf Flächen oder Durchdringungen von Haustechnik oder weiteren Gewerken. Zudem müssen mehrere topologische Modelle miteinander interagieren können um beispielsweise Haustechnik als eigenes topologisches Modell generieren zu können und Anbindungen, Durchdringung und Integration in die architektonischen Bauteile zu ermöglichen.

Benutzeroberfläche (Userinterface)



Abbildung 4-46

Übersicht der in Rhino angelegten Befehle zur Interaktion mit dem Plugin (links), Userinterface zur Anpassung der Darstellung des topologischen Modells (rechts)

Schwerpunkt der Entwicklung war der funktionale Kern, sowie die Programmierung erster Komponenten. Die Steuerung der Software erfolgt bisher überwiegend durch die Ausführung von Python Skripten. Es sind aber auch erste Befehle angelegt, Mit welchen sich topologische Modelle erstellen, anpassen, detaillieren und analysieren lassen. Mit den Befehlen aus der GenTopo Sammlung lassen sich topologische Modelle von Grund auf neu erstellen oder erweitern. Zusätzlich ermöglichen die Befehle FromBrep und FromLines, beliebige Geometrie in ein Topologisches Modell zu überführen. Die Befehle der Show Sammlung ermöglichen die Selektion von Elementgruppen und die Abfrage der topologischen Beziehungen. Die Befehle der ChangeTopo Sammlung ermöglichen die Anpassung der Darstellung, sowie die Änderung von Namen und die Anpassung von Öffnungen. Die Befehle der PyComps Sammlung führen die Detaillierung mittels der Python Bauteilklassen aus. Hier wird zunächst eine Roh- und Referenzgeometrie aller Bauteile (GenRawGeo) und anschließend die finale Detaillierung (GenFineGeometry) erzeugt. Der Befehle ComponentGeometry ermöglicht den Zugriff auf die erzeugten Geometrien während ShowParameters die in den Bauteilen hinterlegten Parameter zeigt und die Überschreibung von Basiswerten ermöglicht.

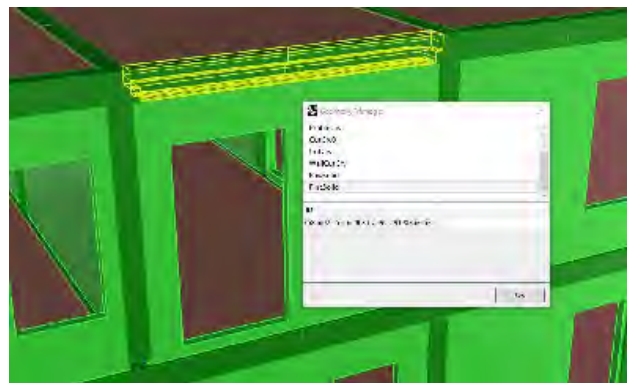
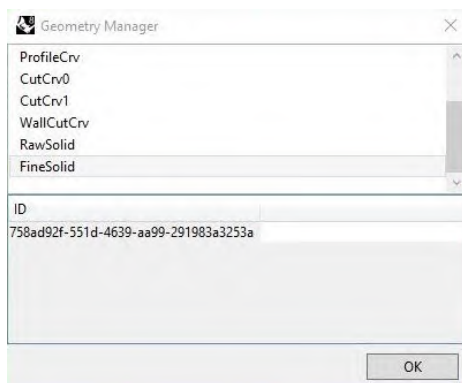


Abbildung 4-47

GeometrySelection(UI): Userinterface zur Auswahl generierter Geometrie in einzelnen Komponenten

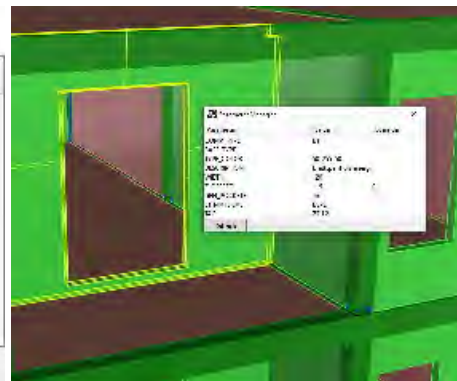
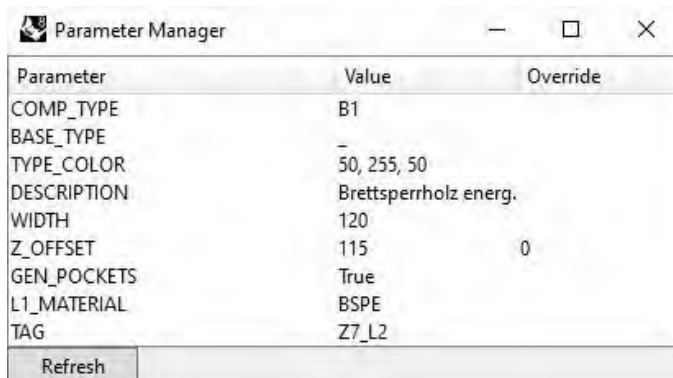


Abbildung 4-48

ParameterManager(UI): Userinterface zur Darstellung und Änderung der Parameter einer Komponente

Die Befehle der CO₂ Sammlung laden die Materialkennwerte, berechnen die einzelnen Bauelemente und Werten das Gebäude, oder Teile davon, aus.

4.3.1.6 Beschreibung der Funktion des digitalen Beschreibungsmodells am konzipierten Systembau

Im aktuellen Modulbau werden die Komponenten Stütze, Balken, Wand und Decke als digitale Bauteile abgebildet. Die einzelnen Module werden im topologischen System als Cluster angelegt und alle Bauteile (Komponenten) eines Moduls referenzieren auf diesen Cluster. So sind die topologischen Edges und Faces zwar Teil mehrerer Module, die Komponenten auf diesen und somit die Bauteilgeometrien

können hingegen eindeutig ihrem Modul zugewiesen werden und auf diese Weise ihre korrekten Nachbarn finden. Für das Mustergebäude wird das topologische Modell sowie die Bauteilzuweisung mittels eines Grasshopper Skriptes generiert. 2D-Kurven auf unterschiedlichen Layern stellen die nötigen Informationen bereit. Die Detaillierung erfolgt anschließend über die entsprechenden Python Scripts.

Grasshopper Generator:

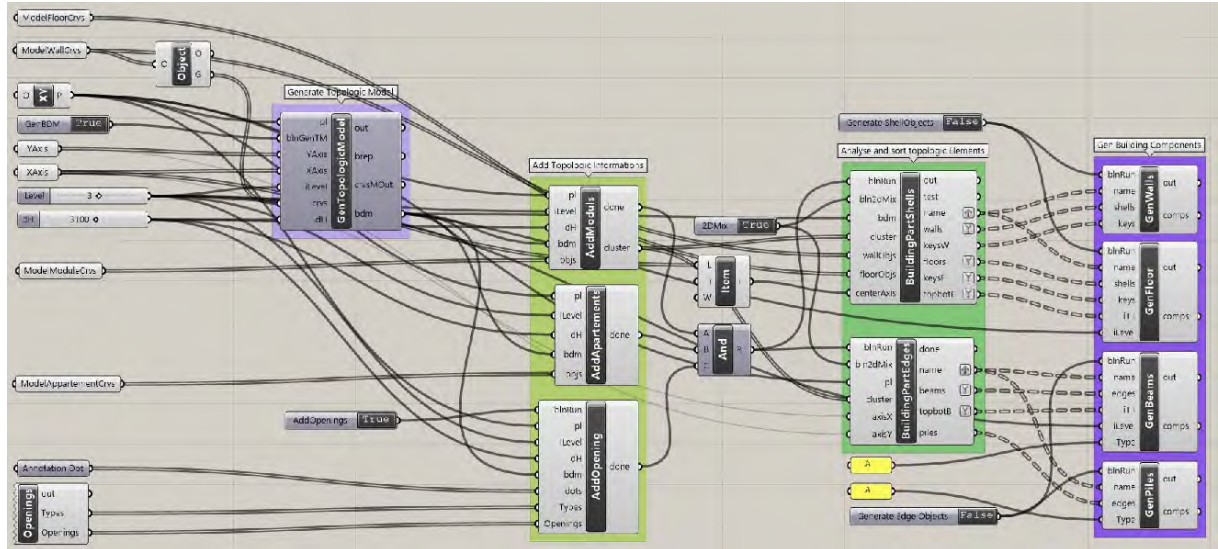


Abbildung 4-49

Grasshopperskript zur Generierung des topologischen Modells und Zuweisung der Bauteile im Mustergebäude

Inputs:

Hauptachsen in X und Y-Richtung	Dienen der Ermittlung der Outline, sowie der späteren Lokalisierung von Stützenpositionen und Wandteilungen
Boden Kurven	Rechtecke für die Bodenbereiche definieren die unterschiedlichen Böden und die zuzuweisenden Typen
Wand Kurven	Linien für die Wände dienen der Erzeugung des topologischen Modells und definieren die unterschiedlichen Wandtypen
Modul Kurven	Rechtecke für die Module definieren die Modul Cluster
Appartement Kurven	Kurven für die verschiedenen Wohnungen definieren die Cluster für zusammenhängende Wohnungen.
Öffnungen	Textdots definieren Positionen und Typ der Öffnungen.

Ablauf der Gebäudegenerierung:

Mittels der Wandkurven sowie Angaben über Stockwerkshöhen und Anzahl der Stockwerke wird zunächst ein topologisches Modell des Gebäudes erstellt. Die Räume des topologischen Modells werden mittels der Modul Kurven zu Clustern für die einzelnen Module und mittels der Appartement Kurven zu Clustern für die einzelnen Wohnungen zusammengefasst. Die topologischen Modelle für die einzelnen Öffnungen werden angelegt und mittels der Textdots den entsprechenden Faces zugewiesen. Das topologische Modell wird analysiert und Faces für die Wände und Böden werden ermittelt und zu Shells zusammengefasst, sowie die entsprechenden Typen und die Modul Zugehörigkeit ermittelt. Ebenso werden die Edges für Stützen und Balken, sowie die entsprechenden Typen und die Modul Zugehörigkeit ermittelt. Für die ermittelten topologischen Elemente werden die entsprechenden Bauteile mit Typ und Modulzugehörigkeit erzeugt. Die Bauteile werden durch die Ausführung der entsprechenden Python Scripts detailliert.

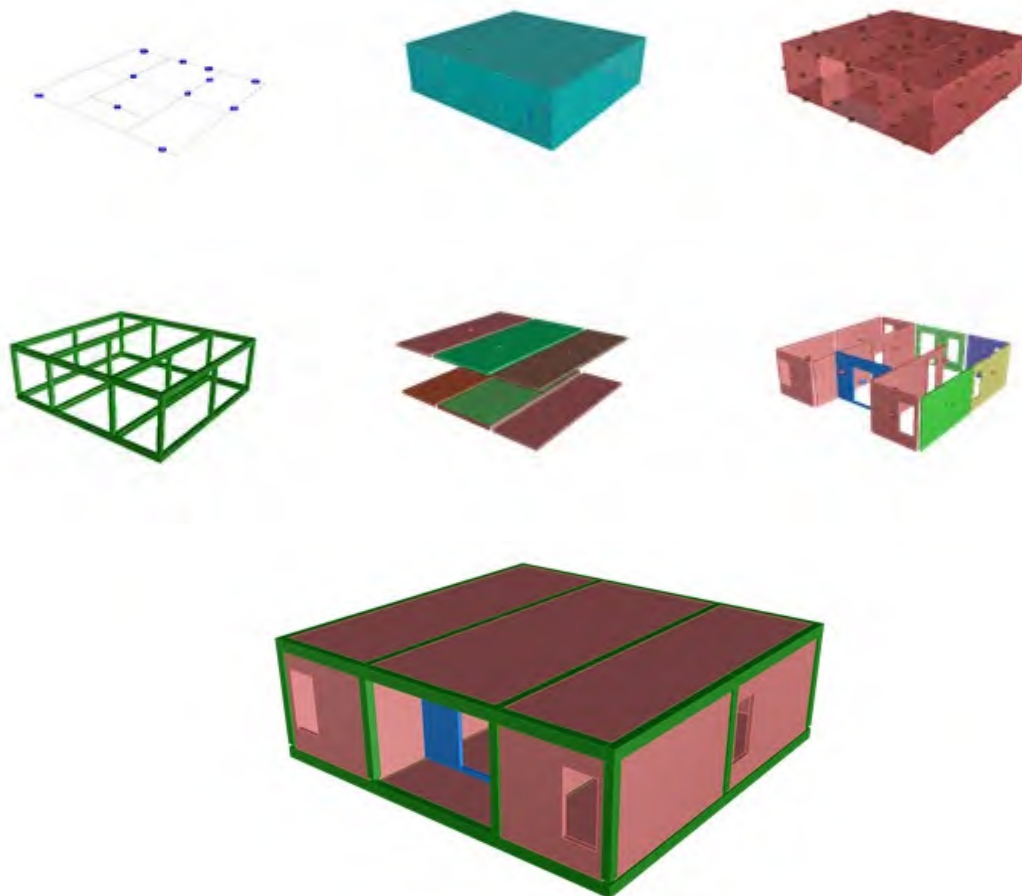


Abbildung 4-50

Oben: Inputgeometrie topologisches Modell, zugewiesene Komponenten; Mitte: Stützen und Träger, Bodenplatten, Wände; unten: Gesamtmodell

Python Bauteil Klassen:

Stütze (Pile):

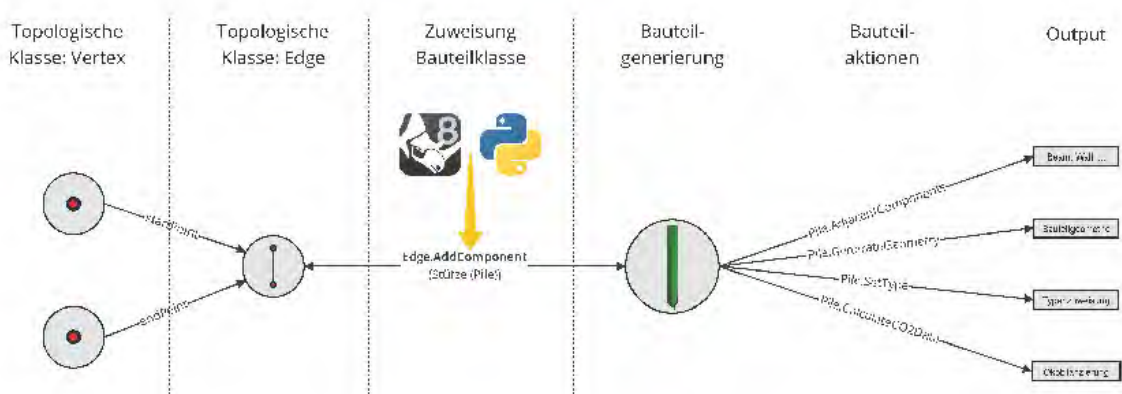


Abbildung 4-51

Schematische Darstellung der Stützengenerierung

Das topologische Edge Element dient als topologische Referenz für die Stütze. Als Bauteilbasisklasse dient somit die Python Edge Klasse. In den Parametern sind die Abmessungen, der spezifische Offset von der topologischen Edge, die Taschengeometrie (Tiefe, Winkel etc.), Angaben zum Stützenfuß

(Höhe, Blockname) und Angaben zur Materialität hinterlegt. Aktuell ist hier nur ein Typ A hinterlegt. Die Orientierung der Stütze wird durch die Abfrage der angrenzenden Flächen innerhalb des Moduls ermittelt. Die Position von Anfang und Ende der Stütze wird aus den Parametern der angrenzenden Beam Komponenten ermittelt. Als Stützenfuß wird der Block des spezifischen Typs platziert. Falls den angrenzenden topologischen Flächen entsprechende Wände zugewiesen sind, werden die dort hinterlegten Taschen-Aussparungen der Stütze hinzugefügt.

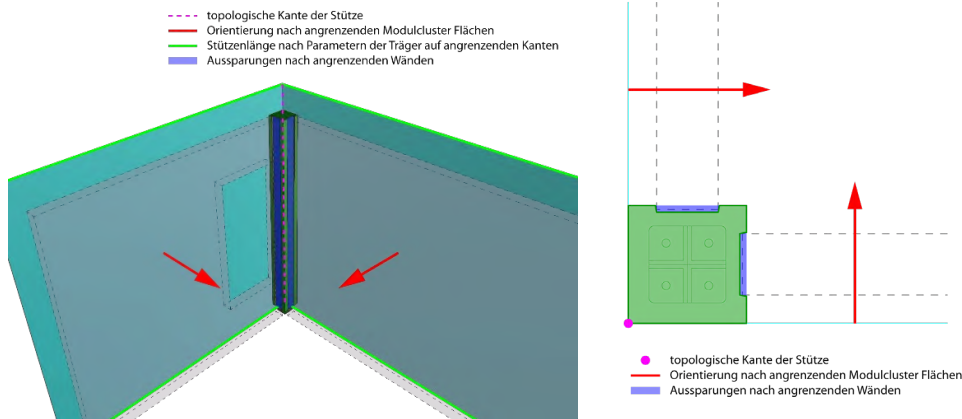


Abbildung 4-52

Abhängigkeiten von Nachbarelementen bei der Stützendetaillierung

Träger (Beam):

Das topologische Edge Element dient als topologische Referenz für den Träger. Als Bauteilbasisklasse dient somit die Python Edge Klasse. Je nach Verwendungszweck könnte es jedoch von Vorteil sein auf einem Loop Element aufzubauen. In den Parametern sind die Abmessungen (Balken und Auflager), der spezifische Offset von der topologischen Edge, die Taschegeometrie (Tiefe, Winkel etc.), die Hierarchie und Angaben zur Materialität hinterlegt. Die aktuellen Typen unterscheiden die Hierarchie der Balken um den korrekten Zuschnitt an den Ecken zu ermöglichen. Ein individueller Offset für den Sonderfall Querbalken innerhalb eines Moduls, wird mittels überschreiben des betreffenden Parameters realisiert. Die Orientierung des Balkens wird durch die Abfrage der angrenzenden Flächen innerhalb des Moduls ermittelt. Ob der Balken kein, einseitig oder beidseitig Auflager besitzt und die Breite des Auflagers wird aus den Komponenten der angrenzenden Faces ermittelt. Dabei werden auch Decken angrenzender Cluster berücksichtigt, falls es sich hierbei um 2D-Elemente handelt, die auf benachbarten Modulen aufliegen müssen. Der Endzuschnitt der Balken erfolgt über einen Hierarchie Vergleich mit den anschließenden Balken Falls den angrenzenden topologischen Flächen entsprechende Wände zugewiesen sind, werden die dort hinterlegten Aussparungen dem Balken hinzugefügt.

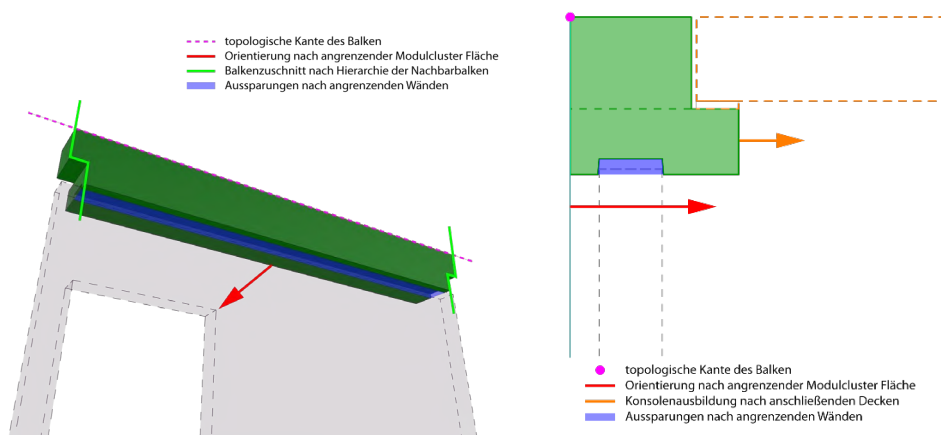


Abbildung 4-53

Abhängigkeiten von Nachbarelementen bei der Trägerdetaillierung

Boden (FloorShell):

Das topologische Shell Element dient als topologische Referenz für den Boden. Als Bauteilbasisklasse dient somit die Python Shell Klasse. Somit können mehrere Faces in der Generierung zu einem Boden zusammengefasst werden. In den Parametern ist die Dicke, der spezifische Offset von der topologischen Shell, die Auflagerbreite, seitliche Toleranzen, maximale Elementbreiten, sowie Angaben zur Materialität hinterlegt. Die aktuellen Typen unterscheiden in Stahlbeton, Brettsperrholz und Brettstapelholz bei unterschiedlicher stofflicher Verwertung. Die exakten Abmessungen und Positionen von Deckenelementen und Auflager wird aus den umgebenden Beam Komponenten ermittelt. Bei elementierten Decken wird entsprechend unterteilt. Holzbalkendecken werden in einer separaten FloorShellITF Klasse verwaltet.

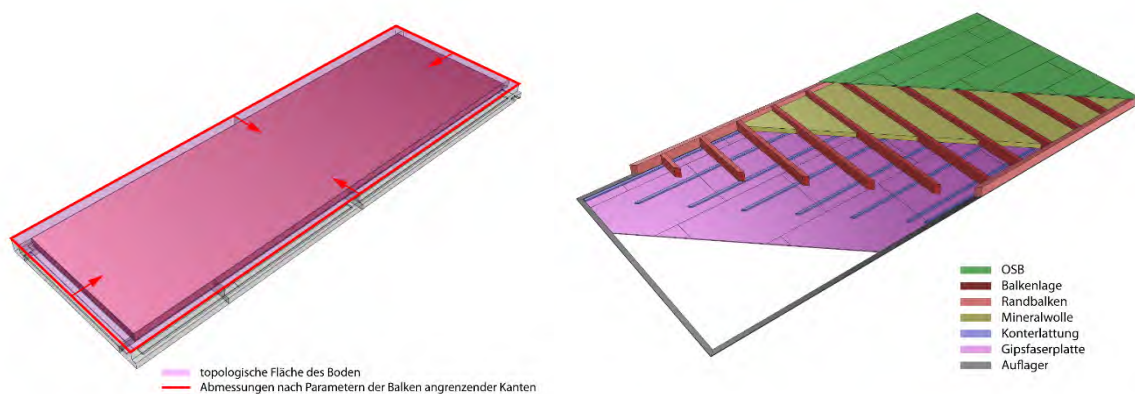


Abbildung 4-54

Abhängigkeiten von Nachbarelementen bei der Bodenplattendetaillierung

Holzbalkendecke (FloorShellITF):

Als Bauteilbasisklasse dient hier die Python FloorShell Klasse, die mit zusätzlichen Funktionen erweitert wird. Zusätzlich ist die Python Timberframe Klasse eingebunden um allgemeine Funktionen für den Holzbau zur Verfügung zu stellen. Die Parameter werden mit zusätzlichen Werten für Abmessungen und Material der unterschiedlichen Schichten erweitert. Die Abmessungen werden wie in der Basis-kategorie ermittelt und durch einen Schichtaufbau ergänzt. Die Plattenstöße und Abmessungen sind beispielhaft und nicht für Fertigung optimiert.

Wand (WallShell):

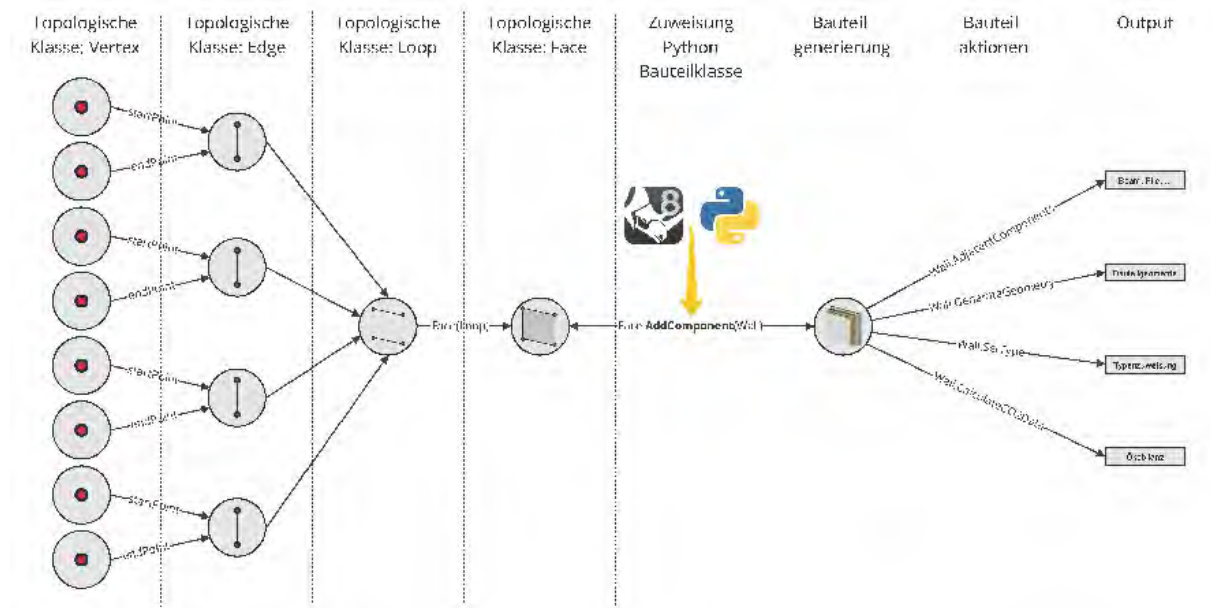


Abbildung 4-55 Schematische Darstellung der Wandgenerierung

Das topologische Shell Element dient als topologische Referenz für die Wand. Als Bauteilbasisklasse dient somit die Python Shell Klasse. Somit können mehrere Faces in der Generierung zu einer Wand zusammengefasst werden. In den Parametern ist die Dicke, der spezifische Offset von der topologischen Shell, sowie Angaben zur Materialität hinterlegt. Die aktuellen Typen unterscheiden in Stahlbeton, Brettsperrholz und Lehmsteine bei unterschiedlicher stofflicher Verwertung. Die exakte Abmessung und Positionen der Wandelemente wird aus den umgebenden Beam und Pile Komponenten ermittelt. Die Öffnungen für Fenster und Türen sind als separate topologische Modelle auf den einzelnen Faces der Shell hinterlegt und können für die Generierung ausgelesen werden. Die Abzugsvolumen für die Taschen in Stützen und Balken werden, aus den auf den jeweiligen Komponenten hinterlegten Parametern, generiert. Holzrahmenwände werden in einer separaten WallShellITF Klasse verwaltet.

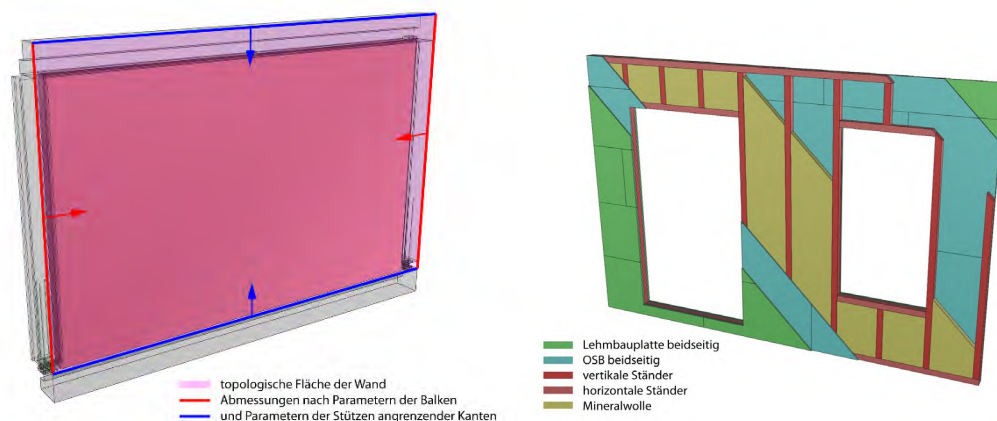


Abbildung 4-56 Schematischer Aufbau einer detaillierten Holzträgerwand

Holzrahmenwand (WallShellITF):

Als Bauteilbasisklasse dient hier die Python WallShell Klasse, die mit zusätzlichen Funktionen erweitert wird. Zusätzlich ist die Python Timberframe Klasse eingebunden um allgemeine Funktionen für den Holzbau zur Verfügung zu stellen. Die Parameter werden mit zusätzlichen Werten für Abmessungen und Material der unterschiedlichen Schichten erweitert. Die Abmessungen und Öffnungen werden wie

in der Basisklasse ermittelt und durch einen Schichtaufbau ergänzt. Die Plattenstöße und Abmessungen sind beispielhaft und nicht für Fertigung optimiert.

4.3.2 Umsetzung anpassbarer Konstruktionen innerhalb der digitalen Werkplanung

Durch die geschaffene Prozesskontinuität kann die computergestützte Fertigung über digitale Planungswerkzeuge angesteuert werden. Erst dadurch wird eine projektspezifische Anpassung der automatisierten Fertigung möglich. So kann das ausbalancierte Maß aus Standardisierung und Individualisierung umgesetzt werden, was gleichzeitig zu einer wirtschaftlichen wie architektonisch hochwertigen Konstruktionen führt [HOL25 S. 105].

Durch assoziative Verknüpfungen erlaubt das digitale Beschreibungsmodell eine individualisierte Planungsumgebung auf unterschiedlichen Ebenen und weitert somit, entsprechend des angestrebten Ergebnisses, die Grenzen von Systembauweisen auf. So sind Dimensionen von Trägern und Stützen, der Anteil von Bewehrung innerhalb der Stahlbetonbauteile oder die Ausbildung konstruktiver Details wie beispielsweise Konsolen in Abhängigkeit der Bauteilposition projektspezifisch anpassbar.

Durch die Verknüpfung sämtlicher Bauteile mit den entsprechenden topologischen Elementen findet jedes Bauteil alle umgebenden Teile und kann prüfen, ob es von diesen in Form und Eigenschaften beeinflusst wird. Ein Träger wird beispielsweise nur dann ein Mittelträger, wenn an jeder Seite eine entsprechende Deckenplatte anschließt. Dies kann innerhalb eines Moduls sein, aber auch „Nachbar-module“ betreffen, falls diese aus 2D-Elementen bestehen. Zudem kann beispielsweise eine Wand über das topologische Modell prüfen, ob sie zu zwei Wohnungen gehört - und sich entsprechend als Wohnungstrennwand ausbilden. Dies ermöglicht es Gebäudestile zu definieren die für verschiedene Bauteilfunktionen unterschiedliche Bauteiltypen definieren und diese dann automatisch zuweisen und global ändern. Die Idee dahinter ist es einen Stil zu definieren, der lediglich definiert das Wohnungstrennwände vom Typ X sind. Durch die topologische Analyse des Gebäudes, in welchem die Wohnungen ja bereits als Cluster definiert sind, kann dieser Typ dann automatisch zugewiesen werden und muss nicht von Hand gesetzt werden.

Ziel einer digitalen Werkplanung ist es, das entsprechende Bauteil mit allen für die Fertigung nötigen Informationen anzureichern, um damit entweder direkt die finale detaillierte Geometrie zu generieren und Fertigungsdaten zu erzeugen, oder, um geeignete Schnittstellen zu anderen Programmen zu bedienen, die bereits für die Fertigung bestimmter Bauteile spezialisiert sind.

Ein Beispiel für parametrische Abhängigkeiten benachbarter Bauteile am System Wand-Träger-Decke kann wie folgt beschrieben werden:

Bei einer Taschengeometrie beruht der Anstellwinkel der Taschen vor allem auf Aspekten der Schalbarkeit. Die Taschentiefe und Abstand zur Wand beruhen auf der Durchbiegung des Trägers, daher sind diese Parameter im Träger zu verorten. Die Wanddicke hingegen ist ein Parameter der auf der Wand abgelegt ist. Um nun die Abmessungen der Wand zu ermitteln, greift diese auf die Position und Abmessungen des Trägers, sowie die dort hinterlegten Werte für Taschentiefe und Wandabstand zu. Zusätzlich wird ein Abzugsvolumen für die Taschen generiert, welches die Stärke der Wand berücksichtigt. Der Träger kann diese Abzugsvolumen für die Generierung der Taschen nutzen.

4.3.3 Datenmanagement

4.3.3.1 Einspeisung von grundlegenden Informationen

Das vereinfachte, modulare System wurde innerhalb der Forschungstätigkeit mit Daten zur Ökobilanz sowie Wirtschaftlichkeit angereicht und verknüpft. Die vorerst manuell angelegten Daten wie die EPDs der Materialien und Massen (Verweis Anhang 11 Tabellen zur Ökobilanzierung) wurden in das digitale Modell integriert. Die Daten zu den unterschiedlichen Materialien wurden zunächst in einer Excel-Tabelle zusammengefasst und als maschinenlesbare CSV-Datei exportiert. Diese Datei kann nun ins Datenanalysemodell des Plug-Ins geladen werden und wird dort in einer SQL Datenbank abgelegt. Die, den einzelnen Bauteilinstanzen zugewiesenen Parameter enthalten Materialinformationen für alle enthaltenen Geometrien und verweisen über Schlüsselwörter auf die entsprechenden Einträge. Es können hier entweder einzelne Materialien oder auch ein Materialmix zugewiesen werden. Bei der Analyse der

Bauteile werden die Volumen oder Massen ermittelt und die spezifischen CO₂-Werte der Bauteile ermittelt. Die ermittelten Werte werden in einer SQL-Datenbank sowohl Bauteil- als auch Materialspezifisch abgelegt.

Bauteilspezifisch: Es wird eine Tabelle für jeden Bauteiltyp (Stütze, Balken, etc.) angelegt, in welcher die Werte der einzelnen Bauteile unter ihrer ID gespeichert werden. Hierbei handelt es sich um die Gesamtberechnung des Bauteils, welches auch mehrere Materialien beinhalten kann.

Materialspezifisch: Es wird eine Tabelle für jedes Material angelegt, in welchem die Werte eines spezifischen Materials unter der ID des entsprechenden Bauteils gespeichert werden.

Durch Datenbankabfragen können daraus beliebige Gesamtwerte ermittelt werden oder detaillierte Datensätze für die Schnittstellen spezialisierter Programme erzeugt werden. Aktuell werden die Funktionen für die Summenberechnung der Spalten A1-C4 und D der Kenngrößen $\sum$ PERT [MJ], $\sum$ PENRT [MJ] und $\sum$ GWP [kg CO₂-Äquiv.] bereitgestellt. Hierbei kann sowohl das gesamte Modell ausgelesen werden, als auch sämtliche Bauteile einer Bauteilkategorie oder Kombinationen beliebiger Einzelteile. Aktuell erfolgt die Ausgabe als einfache Textausgabe der drei Summen, es sind aber Dateieexporte und User-interfaces in jeglicher Komplexität denkbar.

	A1-C4	D
PERT [MJ]:	63261.4	67805.1
PENRT [MJ]:	102377.5	-55548.4
GWP [kg CO ₂ -Äquiv.]:	16269.7	-3396.0

Tabelle 4.3-1 Output aus der Datenbankabfrage

Ebenso kann der Zugriff auf die Daten und deren Auswertung gänzlich unabhängig von Rhino erfolgen. So können beispielsweise mehrere Varianten eines Gebäudes erzeugt und die Ergebnisse detailliert verglichen werden. Auch hier könnte die Berechnung über Schnittstellen und spezialisierte Software erfolgen. So ermöglicht die Webbasierte Software Concular.App beispielsweise den Import einer CSV-Datei mit Bauteilen und Angaben zu Material und Abmessungen. Diese Daten können aus den vorhandenen Informationen des Modells erzeugt werden. Andere Informationen können auf ähnliche Weise integriert werden, wobei stets abzuwägen ist, ob die Berechnungen tatsächlich im Plug-In erfolgen müssen, oder geeignete Schnittstellen für spezialisierte Software bereitgestellt werden soll. So kann ein klar definiertes Modulbausystem, mit vorliegender Typenstatik, als Produkt verstanden werden, bei welchem es sinnvoll erscheint die Typenstatik und Baukosten parametrisch in den Bauteilen zu hinterlegen. So kann die Software während der Generierung die Einhaltung des parametrischen Raums prüfen, Dimensionen und Detaillierung anpassen, sowie die zu erwartenden Kosten bereitstellen. Bei freieren Projekten werden hingegen individuelle Tragwerkskonzeptionen und Kostenkalkulationen benötigt und es könnte zielführend sein, die nötigen Daten über Schnittstellen für spezialisierte Programme bereit zu stellen.

Das digitale Entwurfs- und Planungswerkzeug kann maßgeblich als Stellschraube hin zu einer Kreislaufwirtschaft fungieren. Durch die konsistente Datenbasis vom Entwurf bis zu den Fertigungsdaten steht nun tatsächlich ein digitaler Zwilling zur Verfügung, welcher beim konventionellen Planungsprozess aufwändig mitgeführt oder nachträglich erstellt werden müsste. Dieser kann sowohl zur Bewirtschaftung und Validierung des gebauten Gebäudes genutzt werden, als auch detaillierte Informationen zu jedem Bauteil hinsichtlich Kreislaufwirtschaft und Recycelbarkeit zur Verfügung stellen.

Durch die Verwendung entsprechender Gebäudestile, in welchen unterschiedlichen architektonischen Funktionen (z.B. Innen-, Wohnungstrenn- und Außenwand), konkrete Bauteilklassen zugewiesen werden, sowie die Verknüpfung dieser Bauteilklassen mit zahlreichen Datenpunkten, lassen sich Entwurfskizzen schnell in detaillierte Gebäude überführen und umfassend auswerten. Durch Änderung der Stile und Anpassung der Geometrie ist es möglich zahlreiche Varianten durchzuspielen.

Der erfolgte Abgleich aus analog erstellten Datensätzen und dem digitalen Modell lässt den Rückschluss zu, dass das digitale Modell deutlich präzisere Daten ermittelt. Es bietet aber vor allem den

Vorteil, dass diese Daten automatisch korrekt mitgeführt und ausgewertet werden können und hierfür kein paralleler Prozess notwendig ist.

Zukünftig wird anvisiert, die im Bauwesen vorhandene Komplexität und Vielzahl an Einflussfaktoren zu berücksichtigen und das Beschreibungsmodell entsprechend anzureichern. So soll die Interaktion mehrerer topologischer Modelle implementiert werden, damit separate Modelle, z.B. für Leitungen von Elektrik und Haustechnik, an das architektonische Modell gekoppelt oder automatisiert erzeugt und gespeichert werden können. Auch sollten zumindest Teile der Python-Programmierung direkt im Kern implementiert werden, um beispielsweise Volumenmodelle aus generischen Bauteilen erzeugen zu können. Zudem gilt es, Schnittstellen zu spezialisierten Softwarepaketen für Statik, Kosten, Planerstellung und digitaler Bauteilfertigung bereit zu stellen.

4.3.3.2 Anbindung von externen Datenbanken

Es müssen zahlreiche Informationen mit den unterschiedlichen Bauteilen verknüpft werden. Dabei ist zum einen die nötige Anzahl der Parameter heute noch nicht absehbar, zum anderen können sich die nötigen Parameter je nach Bauteil und Projekt stark unterscheiden. Aufgrund der hohen Flexibilität und Skalierbarkeit bietet sich grundsätzlich eine NoSQL Datenbankstruktur an, da hierbei auch immer nur die bauteilspezifischen Informationen gespeichert werden können. NoSQL-Datenbanken speichern Daten flexibel, oft in Form von Dokumenten, Tabellen oder Schlüssel-Wert-Paaren, anstatt wie klassische Datenbanken in starren Tabellenstrukturen. Sie sind besonders gut geeignet für große Datenmengen, die sich schnell ändern oder nicht gut in ein festes Schema passen. Auch hat sich der Datenaustausch über JSON etabliert, was externe Kooperationen erleichtert. JSON (JavaScript Object Notation) ist ein einfaches Textformat, mit dem Daten strukturiert und leicht lesbar gespeichert oder übertragen werden können. Es wird häufig verwendet, um Informationen zwischen Anwendungen auszutauschen, zum Beispiel zwischen einem Server und einer Website. Auch hat sich der Datenaustausch über JSON etabliert, was externe Kooperationen erleichtert. JSON (JavaScript Object Notation) ist ein einfaches Textformat, mit dem Daten strukturiert und leicht lesbar gespeichert oder übertragen werden können. Es wird häufig verwendet, um Informationen zwischen Anwendungen auszutauschen, zum Beispiel zwischen einem Server und einer Website.

Grundsätzlich muss allerdings zwischen den Datenbanken, welche Bauteilkonfigurationen oder Materialkennwerte und Informationen bereitstellen und die zur Zuweisung verwendet werden, und den innerhalb der Software tatsächlich mit einem Bauteil verknüpften Informationen unterschieden werden. Um eine hohe Ausführungsgeschwindigkeit zu gewährleisten, werden zur Laufzeit bevorzugt klassische Datenstrukturen wie **Listen** (für geordnete Elemente) und **Dictionaries** (für Schlüssel-Wert-Zuordnungen) verwendet. Zahlreiche Informationen, wie beispielsweise Materialkennwerte, in tabellarischer Form vor, so dass sich in Teilen sicherlich auch die Verwendung von finiten SQL Datenbankstrukturen anbietet.

Im Projekt wurde die Anbindung von externen Datenbanken (Format) wie beispielsweise der Ökobaudat etc. zur Anbindung detaillierter Informationen bei der Bilanzierung (LCA) erprobt. Des Weiteren wurde eine Kopplung bestehender Datenbanken (CircularLCA) zur Bewertung des Zirkularitätspotenzials geprüft. Bestehende Datenbanken wie Ökobaudat, sind zwar prinzipiell maschinenlesbar, allerdings ist ein automatischer Zugriff aufgrund zahlreicher ähnlicher Einträge und fehlender Normierung von Baustoffnamen schwer möglich, dies macht eine projektspezifische manuelle Auswahl und Sortierung entsprechender Einträge erforderlich, welche in einer Tabelle zusammengefasst wurden und in das Plugin als CSV-Datei eingelesen wurde.

Onlinetools wie die Concular.App haben ihre eigenen vorsortierten Datenbanken aufgebaut und bieten die Möglichkeit, zusätzlich eigene Bauteile und Baustoffe anzulegen. Aktuell steht von Concular keine API zur Verfügung, es bietet aber die Möglichkeiten CSV-Daten in einer definierten Struktur hochzuladen und zu verknüpfen. Das Plug-In kann diese Schnittstelle bespielen für die angelegten Bauelemente die entsprechenden Daten exportieren.

4.3.4 Lückenlose Entwurfsdatenübertragung in industrielle Fertigung

Das Beschreibungsmodell bietet die Möglichkeit zunächst ein reduziertes architektonisches Gebäudemodell zu erzeugen, welches bereits Algorithmen zur Auswertung enthalten kann, Dieses Modell kann

automatisiert, beispielsweise über Gebäudestile, mit Bauelementen verknüpft werden, welche eine algorithmische Detaillierung ermöglichen. Es können aber nicht nur die Bauteile mit dem topologischen Modell verknüpft werden, sondern auch die Verbindungen zwischen den Bauteilen, so kann beispielsweise ein Wandanschluss variieren, je nachdem ob die Wand an eine Beton- oder Holzwand anschließt. Die Algorithmen für diese Detaillierung können dazu auf der verbindenden Kante abgelegt werden, bzw. automatisch zugewiesen werden. Anzahl und Funktion der Details kann hierbei eine beliebige Komplexität erhalten und die Detaillierung bis zur Generierung der letzten Schraube ermöglichen. Dabei ist jedoch stets zu prüfen, welcher Detaillierungsgrad für welche Ausführung nötig und welche Schnittstellen zur Produktion zur Verfügung stehen. So kann es in einem Projekt sinnvoll sein, eine Holzwand als 3D-Volumen an eine Holzbausoftware (z.B. CadWorks) zu übergeben und dieser die Detaillierung zu überlassen, in anderen Projekten kann es sinnvoll sein, sämtliche Details bis zu den Schraubenachsen im Beschreibungsmodell zu erzeugen und direkt an eine Fertigungssoftware (z.B. Cambrium) zu übergeben, bzw. sogar direkt die Zuschnitts- und Fräsdaten zu erzeugen. In jedem Fall, können so die Fehlerrate, die Bauwerkskosten und die Fertigungs- und Montagezeiten drastisch reduziert werden.

4.3.4.1 Detaillierung des aktuellen Modulbaus

Der Entwurf wird zunächst in ein topologisches Modell überführt. Hierbei kann beispielsweise das Grasshopper-Skript des Mustergebäudes herangezogen werden; alternativ kommen, abhängig vom Entwurf, auch andere Generatoren in Betracht. Für alle Bauteile – etwa Stützen, Balken, Wände, Böden, Dächer, Fundamente etc. – wird eine spezifische Bauteilkategorie erstellt, die sämtliche erforderliche Bauteiltypen umfasst. Da es sich um ein geschlossenes System mit klar definierten Komponenten handelt, wird zunächst ein Gebäudestil festgelegt, der den unterschiedlichen Funktionen (z. B. Wohnungstrennwände) entsprechende Bauteile zuordnet. Anschließend analysiert das System, welche Bauteile benachbart sind, und ordnet den Verbindungen die passenden Fügedetails zu. Die Werte aus der Typenstatik werden algorithmisch in den Bauteilen abgebildet. So können sich beispielsweise die Querschnitte der Stützen in Abhängigkeit von der Gebäudehöhe verändern, während Trägerabmessungen und Bewehrungsanteile entsprechend der Spannweite variieren. Ergänzend werden separate topologische Modelle für die Haustechnik erstellt. In einem speziellen Generator sind die modulbauspezifischen Algorithmen implementiert, sodass diese sich eigenständig im architektonischen Modell verorten und den Bauelementen den Zugriff auf die Haustechnik Komponenten ermöglichen. Jedes Bauteil wird daraufhin automatisch detailliert, indem sämtliche beeinflussende Elemente erfasst und die entsprechenden Algorithmen ausgeführt werden. Abschließend erfolgt der Datenexport für die einzelnen Bauteile, jeweils angepasst an die verfügbare Software- und Produktionsinfrastruktur.

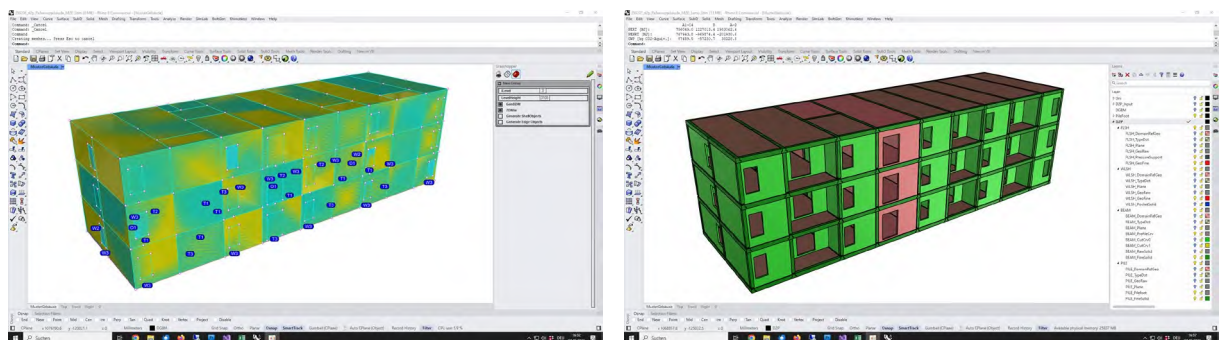


Abbildung 4-57 Generiertes topologisches Modell links, Generiertes Modell mit finaler Detaillierung rechts

4.3.4.2 Produktionsdaten am Beispiel einer Brettsperrholzwand

Eine rechteckige Brettsperrholzwand ohne weitere Detaillierung kann einfach über ihre Abmessungen in X- Y- und Z-Richtung beschrieben werden. Meistens gibt es jedoch zahlreiche zusätzliche Details, wie Öffnungen, Ausklinkungen, Bohrungen und Fräsungen für Einbauteile und Anschlussdetails. Zunächst muss das Bauteil sämtliche beeinflussende Elemente in seinem Umfeld erfassen und die für die Produktion erforderlichen Geometrien und Parameter ableiten. Um diese Funktionen auf die Maschine zu bekommen gibt es mehrere Wege. Rohling und Bearbeitungsfeatures können an eine entsprechende Holzbausoftware wie CadWorks übergeben werden. Dort wird der Rohling automatisch detailliert und bestehende Schnittstellen zur Produktion gewährleisten die Erstellung der nötigen Maschinendaten

(BVX, BTL, etc.). Der Rohling kann auch direkt in Rhino detailliert werden, und das erzeugte Volumen von entsprechender Software analysiert und die Maschinendaten erzeugt werden. Oder die einzelnen Funktionen (features) werden direkt in Rhino in maschinenlesbare Daten übersetzt. Hierfür bieten sich das freie Datenformat BTL (www.design2maschine.com) oder das proprietäre Hundegger Format BVX an. Da hier stellenweise schon Werkzeuge und deren Abmessung berücksichtigt werden müssen, ist eine Zusammenarbeit mit dem Hersteller zwingend erforderlich.

4.3.5 Planung eines flexiblen, komplementären Fertigungslayouts

4.3.5.1 Beschreibung der einzelnen Produktionsabläufe für die Herstellung der Bauteile des adaptiv-assoziativen Bausystems.

Fokus Primärstruktur:

Stützenschuh (Stahl):

Automatisierungsgrad	Vollautomatisiert bzw. teilautomatisiert
Verfahren	Laserverfahren
Produktionsstandort	Zukauf oder Inhouse

Die Stützenfüße können teilautomatisiert gefertigt werden. Die Maschinendaten kommen aus der CAD und können den Laser für die Platten ansteuern. Im Laser werden die Abmessungen und die Bohrungen gesetzt. Ebenso die Sägeanlage für die Abstandsstücke, die als Lagerlängen gesägt werden. Die beiden Teile werden daraufhin manuell auf eine Schweißbank in eine Passform gelegt und dann mittels eines Schweiß-Roboters miteinander verschweißt. Nach dem Vorgang wird die Qualitätssicherung durchgeführt und in eine Transportbox verbracht um diese dann zum Einbauwerk zu liefern.

Stahlbetonstütze:

Automatisierungsgrad	teilautomatisiert
Verfahren	voraussichtlich liegende Fertigung, stehende Fertigung ist in Versuchen zu testen
Produktionsstandort	Ahaus

Für die Herstellung der Stützen muss zunächst die Bewehrung mit dem Stützenfuß zusammengefügt werden. Durch das Zusammenfügen der Teile wird es zu einem Einbauteil, welches vor dem Betonieren durch die Qualitätssicherung zu beurteilen ist. Mittels eines Chips ist es möglich, dieses Bauteil während der gesamten Nutzungsdauer auf seine Spezifikationen zu prüfen. (Herstellungsdatum, Inhaltsstoffe, Qualitäten, usw. Der Chip wird mit einbetoniert und kann immer wieder ausgelesen werden. Letzteres ist als erweiterte Option zu sehen. Aus normtechnischer Sicht ist nur eine liegende Produktion zulässig, wegen der geringen Abmessungen der Bauteile. Hier wäre es sinnvoll über eine Typenzulassung, perspektivisch auf eine stehende Fertigung umzustellen.

Stahlbetonträger (-Rahmen):

Automatisierungsgrad	manuell
Verfahren	liegende Fertigung mit Einlegen der Leisten vor dem Betonvorgang
Produktionsstandort	Ahaus

Für die Herstellung der Balken wird zunächst die Bewehrung zusammengefügt. Weitere Einbauteile wie z.B elektronische Komponenten oder Lüftungsführungen können bei Erfordernis ergänzt werden. In der Schalform werden die einzelnen Nuten durch Formteile in die Schalung gelegt, um dann später entsprechend die Aussparungen für die Wandmontagen ausgebildet vorzufinden. Diese Schalkörper werden wiederverwendet, um das Abfallaufkommen zu vermeiden. Der Korb wird manuell in die Betonierform verlegt. Nach Überprüfung und Freigabe wird der Stahlbetonträger betoniert. Mittels eines Chips ist es möglich, dieses Bauteil während der gesamten Nutzungsdauer auf seine Spezifikationen zu prüfen. Der Chip wird mit einbetoniert und kann immer wieder ausgelesen werden. Letzteres ist als erweiterte Option zu sehen. Nach dem Erhärten des Bauteils wird dieser Manuell entschalt und für den Transport vorbereitet. Die Schalform wird gereinigt und für den nächsten Betonvorgang vorbereitet. Hierbei ist abzuwägen, wie viele Formen vorgehalten werden. Bei einer längeren Aushärtung kann hierdurch CO₂ in der Produktion eingespart werden. Bei Erfordernis eines Rahmens kann dieser im Werk, oder auch vor Ort als biegesteifer Rahmen ausgebildet werden. Dieses erfolgt durch Verguss von Knotenpunkten in hierfür vorgesehene Aussparungskörper oder Taschen.

Bewehrungskörbe:

Automatisierungsgrad	Zulieferung durch Vollautomatik
Verfahren	Schweiß- und Biegeroboter
Produktionsstandort	voraussichtlich in Spelle

Aus der CAD-Datei werden die Daten an die Fertigungsmaschine gegeben. Diese fertigt dann vollautomatisch die Bewehrungskörbe. Sowohl die Längs- als auch die Bügelbewehrung wird damit gefertigt.

Ständerwerk-Wandelemente:

Automatisierungsgrad	teilautomatisiert
Verfahren	Abbundanlage
Produktionsstandort	zu definieren

Aus der CAD-Datei können die Daten direkt auf die Abbundanlage mittels Maschinensprache gegeben werden. Die Hölzer werden auf Länge geschnitten und auf einen Plattentisch gelegt, um die Wand einseitig nach Erfordernis zu beplanken. In den Zwischenraum wird dann die Dämmung verlegt. Alternativ kann das Wandbauteil zu einem späteren Zeitpunkt im „Blasverfahren“ gefüllt werden. In der offenen Wand werden die elektronischen Komponenten und Lüftungsinstallationen verlegt, bevor die zweite Seite der Wand geschlossen wird.

Brettsperrholz-Wand:

Automatisierungsgrad	vollautomatisiert
Verfahren	CNC-Fräse
Produktionsstandort	zu definieren

Aus vorgefertigten Großtafeln werden die einzelnen Wandelemente herausgeschnitten. Diese Wände werden dann mit allen erforderlichen Öffnungen und Leitungswegen, durch Frästechnik so konfektioniert, dass weitere Arbeitsschritte nicht erforderlich sind.

Stahlbetonwand:

Automatisierungsgrad	teilautomatisiert
Verfahren	liegende oder stehende Vorfertigung
Produktionsstandort	zu definieren

Die Wände werden aufliegenden oder instehenden Stahlformen vorgeschalt. Die Bewehrung wird eingelegt und die Wand wird betoniert.

Brettsperrholzdecke/Brettstapeldecke:

Automatisierungsgrad	vollautomatisiert
Verfahren	CNC-Verfahren, liegende Fertigung
Produktionsstandort	zu definieren

Aus vorgefertigten Großtafeln werden die einzelnen Deckenelemente herausgeschnitten. Diese Deckenbauteile haben die statisch erforderliche Deckenstärke, je nach Überspannungslänge der Deckenplatte. Die Deckenplatten werden dann mit allen erforderlichen Öffnungen und Leitungswegen, durch Frästechnik so konfektioniert, dass weitere Arbeitsschritte nicht erforderlich sind. Je nach Gebäudeklasse, können die Deckenplatten ggf. werksseitig mit einer Gipsplatte versehen werden.

Stahlbetondecke:

Automatisierungsgrad	teilautomatisiert
Verfahren	liegende Produktion
Produktionsstandort	zu definieren

Die Stahlbetondeckenplatten werden in der statisch erforderlichen Stärke, im liegenden Verfahren hergestellt. Dabei wird zunächst die Plattengröße geschalt, daraufhin werden die Bewehrung und die Einbauteile eingebaut und dann betoniert. Nach dem Abbinden werden die Teile aus den Formen auf das Versandlager verbracht. Je nach Anzahl der Formen und dem Zeitraum des Abbindeprozesses kann der Zementgehalt deutlich reduziert werden. Durch den Einsatz von Spannstählen, kann die Bewehrung gegenüber einer schlaf bewehrten Betondeckenplatte um bis zu 50% reduziert werden (Verweis zu Ökobilanz möglich).

Sekundärstruktur:

Es wird eine größtmögliche Vorfertigung im Werk angestrebt, dies betrifft besonders die Sekundär- und Tertiärstruktur. So werden beispielsweise die Fassadenkonstruktion, die Innenwände und die Öffnungen zu 100% im Werk vorgefertigt. Eine besondere Herausforderung stellt die Fügung der Module mit den elementierten Komponenten auf der Baustelle dar. Hier spielen die Bauteiltoleranzen eine besondere Rolle. Ebenso wird eine Vorbereitung des luftdichten Anschlusses im Werk und der finalen Fügung vor Ort entwickelt.

4.3.6 Anforderung an die Überführung des hybriden Bausystems in die Produktion mit dem Bausystem

Vor dem Hintergrund der Entwicklung eines adaptiv-assoziativen, hybriden Bausystems bestehend aus ein-, zwei- und dreidimensionalen Bauteilen ist die Implementierung eines hybriden Fertigungslayouts sinnvoll, dass eine Linienfertigung und Zellenfertigung kombiniert. Dabei kann die Produktion der Raummodule mit einem hohen Vorfertigungsgrad auf die Zellenfertigung zurückgreifen, wohingegen die vorgefertigten ein- und zweidimensionalen Bauteile und Komponenten in der Linienfertigung hergestellt werden. Zielführend kann dabei eine kombinierte Fertigung aus mehreren Automatisierungsschritten sein (Steinle, Bachmann, Tillmann 2018, S. 296–299). So können beispielsweise bei der Fertigung der Stahlbetonstützen auf dem Spanntisch die Einlegeteile automatisiert positioniert werden. Die Abbildung zeigt die Konzeption eines komplementären Produktionslayouts. Das heißt, dass die Produktion der Elementfertigung und die Herstellung der raummodularen Einheiten ineinandergreifen.

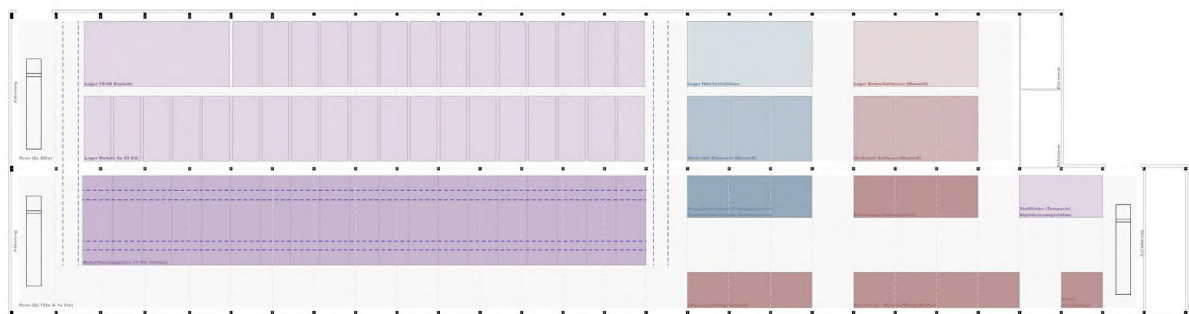


Abbildung 4-58

Szenario für ein komplementäres Produktionslayout mit Fertigung aller Bauteile innerhalb einer Produktionsstätte

4.3.6.1 Logistische Herausforderungen bei der Bereitstellung einer hybriden Bauweise aus linearen Bauteilen und Raummodulen

Grundsätzlich ist sowohl die Herstellung von raummodularen Einheiten als auch eine Elementfertigung möglich. Letzteres erscheint am Ende der Entwicklung als sinnvoller, da die Logistik, der Platzbedarf im Werk, die Sondertransporte und auch die Größe des Autokrans auf der Baustelle erheblich kleiner sind. Bei einer Kombination der Herstellung von Raumeinheiten und flächigen Elementen sollten die raummodularen Einheiten in ihren Dimensionen so konzipiert werden, dass der Aufwand für Produktion und Transport angemessen bleiben und keine Sonderlösungen erforderlich werden.

Es wird verhältnismäßig viel Fläche für die Lagerung von Materialien, die Herstellung der Einzelkomponenten und die Lagerung der fertigen Module benötigt. Das Zusammenfügen der Module verbraucht im Verhältnis zu den anderen Produktionseinheiten wenig Platz.

Die Einzelkomponenten werden mit dem Hallenkran oder über Rollenbändern zu den Modulen verbracht und montiert. Der Zusammenbau der Module kann dadurch sehr zügig erfolgen. Diese Vorfertigung hat viele Vorteile gegenüber einer örtlichen Baustelle. Die Kapazität sieht vor, dass im Einschichtbetrieb vier Module pro Tag gefertigt werden können. Durch den Schichtbetrieb kann die Produktion flexibel gestaltet werden und auf die Erfordernisse der Aufträge eingegangen werden in dem auf zwei oder drei Schichtbetrieb umgestellt werden kann. Durch die Vorfertigung der einzelnen Komponenten an gesonderten Arbeitsplätzen können alle Bereiche optimal und effizient gestaltet werden. Nach dem Zusammenbau der Module oder einzelnen Elemente werden diese dann ins Lager verbracht und für den Transport vorbereitet. Die Transporte für die Module sind überwiegend als Sondertransporte durchzuführen.

4.3.6.2 Anpassung des Hallenlayouts der Firma Solid.Modulbau an die hybride Produktion

Im Hallenplan sind die einzelnen Komponenten einer Produktion mit hohem Vorfertigungsgrad zu erkennen. Es werden sowohl die Spannvorrichtung für die Deckenelemente, als auch die einzelnen Holz- und oder Wandelemente vorgefertigt. Bei der Vorfertigung werden auch die technischen Installationen mitberücksichtigt. Die Fertigung folgt keinem starren Raster, da sowohl Module als auch Einzelkomponenten für den Transport vorbereitet werden. Vor allem bei größeren Bauteilabmessungen kann ein elementiertes Bauen Vorteile bringen. Bei den Modulen ist eine „Stand“-Produktion angedacht. An den Standorten werden dann die einzelnen Komponenten - Beton-, Holz- und Stahlbauteile, Innenausbau und Gebäudetechnikkomponenten - zusammengeführt und nach der Endkontrolle ins Lager transportiert.

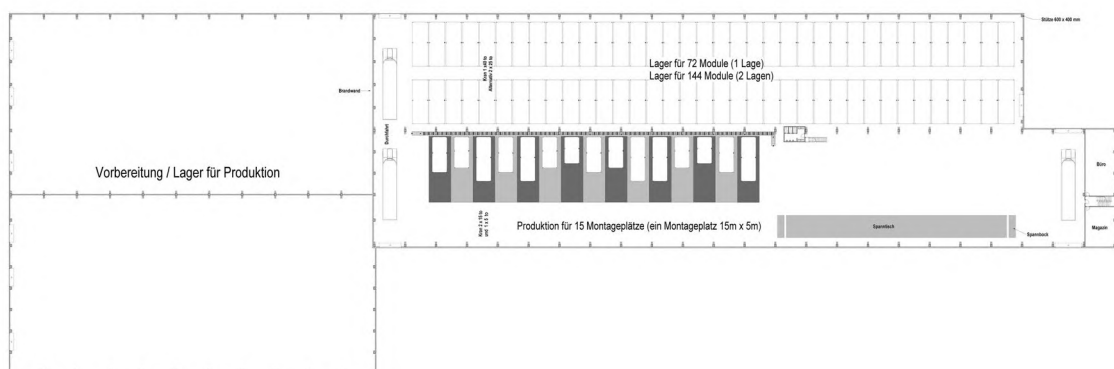


Abbildung 4-59

Aktuelle Planung für das Produktionslayout am Standort Emsbüren

5 Prototypische Umsetzung des entwickelten Bausystems

Zur Untersuchung der Umsetzbarkeit und zur Identifikation von Problemstellen und Hindernissen wurde gemeinsam mit der Firma Bremer SE an der Umsetzung eines Demonstrators für das Bausystem gearbeitet. Im Vordergrund standen dabei die Entwicklung der fûgetechnischen Schnittstellen, die Integration der Stahlbauteile und Bewehrungsführung, die Bauteildimensionierungen, die Kombination ein-, zwei- und dreidimensionaler Bauteile, die Stapelbarkeit der Bauteile (und in der Theorie auch der Raummodule) und die Reversibilität. Ausgehend von dem entwickelten Forschungsstand wurde in einem iterativen Prozess die Umsetzung des Prototypen realisiert.

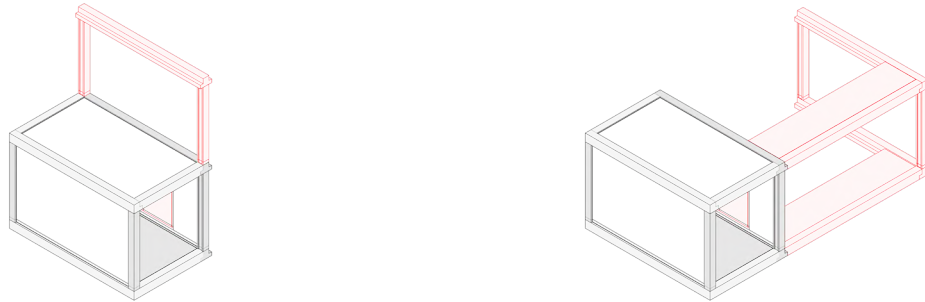


Abbildung 5-1 Erste Konzeption des Prototypen aus Raummodul und elementierten Komponenten

Durch die Rückkopplung der Forschungsentwicklung mit dem Praxispartner wurden die Größe und der Umfangs des Prototypen, der als Skelettstruktur das Tragwerk der raummodularen Einheit repräsentiert, verändert. Weiterhin haben Anpassungen der Knotenpunkte und der Bauteildimensionierungen stattgefunden, wodurch schließlich eine raummodulare Einheit von 3,30m Breite, 4,75m Länge und 3,02m Höhe finalisiert wurde. Dies entspricht in der Länge einem halben Raummodul. Die Struktur der Einheit besteht aus vier Längsträgern, vier Querträgern und sechs Stützen. Die statischen Berechnungen, Ausführungs- und Bewehrungspläne wurden von der Firma Bremer SE angefertigt.

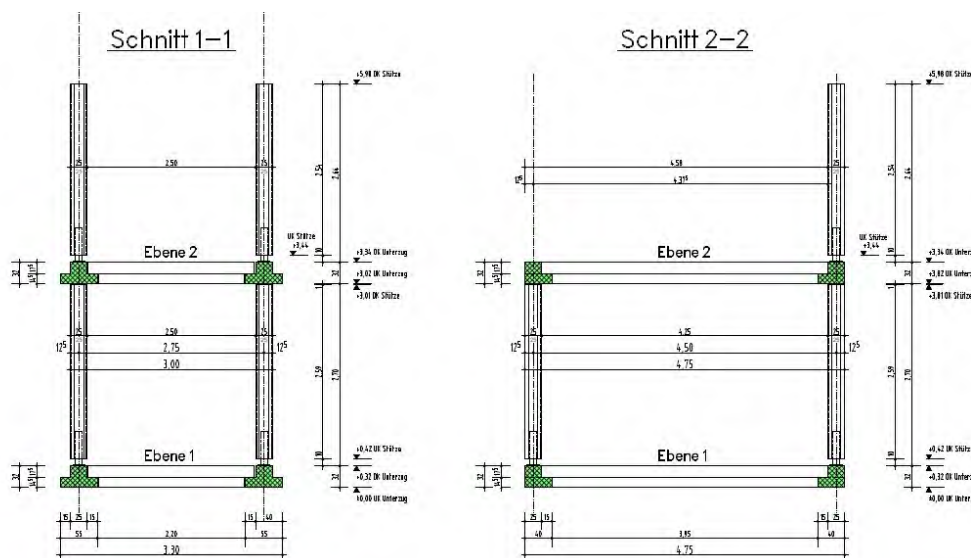


Abbildung 5-2 Ausführungspläne des Prototypen erstellt von der Fa. Bremer SE

Stützenanschluss

Eine wesentliche Veränderung der Planung stellt der in Abbildung 5-3 dargestellte Stützenanschluss dar. Die ursprüngliche Planung des Stahlbauteils wurde durch einen HEB-Träger aus Wirtschaftlichkeitsgründen ersetzt, der mit einer Kopfplatte versehen wurde. Diese Kopfplatte hat zwei Bohrungen, die eine Verschraubung mit dem Träger oder der darunterliegenden Stütze erlaubt. Der ursprünglich geplante Stützenquerschnitt von 23 cm wurde aufgrund der Bewehrungslage und der erforderlichen

Stahlbauteile auf 25cm vergrößert. Da die Verschraubung nur über zwei Bolzen erfolgt, ist der Stützenanschluss aktuell nicht biegesteif. Das Modul ist also ohne Wand- und Deckenelemente nicht ausgesteift, weshalb diagonale Aussteifungen aktuell für Standsicherheit sorgen. Die Entwicklung eines biegesteifen, reversiblen Stützenanschlusses wurde innerhalb der Forschungsleistung vielfältig diskutiert, konnte jedoch noch nicht abschließend gelöst werden. Hier besteht weitergehender Forschungsbedarf.

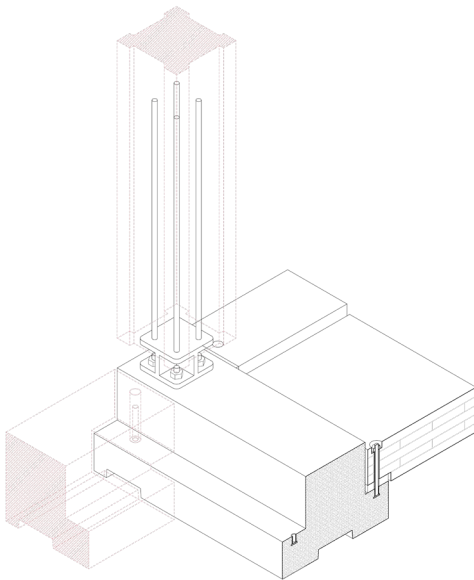


Abbildung 5-3 Planung des reversiblen Stützenanschlusses über Sonderstahlbauteil

Trägeranschluss

Auch die Trägerverbindungen sind in ihrer jetzigen Ausführung nicht biegesteif angeschlossen. Aktuell sind die Querträger (links im Bild) über einen Dorn mit dem Längsträger verbunden. Dieser Dorn dient der Lagesicherung. Eine kraftschlüssige Verbindung könnte über die Verschraubung einer Gewindestange erfolgen. Auch diese Art der Verbindung sollte im Rahmen weiterer Untersuchungen weiterentwickelt werden.



Abbildung 5-4 Ausführung des reversiblen Stützenanschlusses mittel HEB100 und Schraubverbindung

Stapelbarkeit und Reversibilität

Die Stapelbarkeit wurde durch die Verbindung der oberen Stützen mit den darunterliegenden nachgewiesen. Für die Stapelung von Raummodulen ist die Verbindung der Stütze mittels des darunterliegenden Träger erforderlich, damit das Modul als eine Einheit transportiert werden kann. In Bezug auf die Reversibilität am Fügepunkt konnte nachgewiesen werden, dass trotz fehlender Überdeckung des Stützenfußes mit Vergussmörtel davon auszugehen ist, dass ähnlich der konstruktiven Verbindung bei der Forschung zum Circle House eine Reversibilität problemlos möglich ist.

Mit diesem Prototypen wurde demnach sowohl die Ausführung der Einzelbauteile (Stützen, Träger, Decken etc.) als auch deren Fügung zu einem Raummodul validiert. Ein wesentlicher Forschungsschritt war die Reduktion des Betonanteils zugunsten des hybriden Bausystems. Die elementierten Decken- und Wandbauteile aus Holz, die aussteifende Funktionen übernehmen, waren zum Zeitpunkt des Projektabschlusses noch nicht gefertigt und sind entsprechend bei der Darstellung nicht ablesbar.



Abbildung 5-5

Fertigungsschritte der Komponenten des Prototypen



Abbildung 5-6

Montage der Stahlbetonkomponenten des Prototypen auf dem Gelände der Fa. Bremer SE

6 Abweichungen der Ergebnisse von der Zielsetzung

Der kontinuierliche Arbeitsfortschritt ist im Vergleich zu den im Arbeitsplan anvisierten Meilensteinen im Laufe des Projekts in Verzug geraten. Neben organisatorischem Mehraufwand durch den Wechsel des Projektes von der TU Dortmund zur Hochschule Bochum sind weiterhin personelle Ausfälle entstanden. Durch den wirtschaftlichen Abgleich von Gesamtausgaben mit den zum Verzugszeitpunkt zur Verfügung stehenden Mitteln konnte eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts um drei Monate (bis zum 31.12.2024) umgesetzt werden.

Die Entwicklung eines digitalen Planungswerkzeuges im Sinne eines Gebäudebeschreibungsmodells wurde weitreichend vorangetrieben und der topologische Kern ist funktionsfähig. Die Vorbereitung der Softwareanwendung konnte erfolgreich demonstriert und beispielhaft beschrieben werden. Die Anwendung des digitalen Demonstrators wurde jedoch nur auf die Parameter Tragwerk, Materialität und Ökobilanz hin angereichert. Ein weiterer Schritt wäre die grundsätzlichen Funktionen mit weiteren Datenbanken zu speisen. Das bestehende Modell kann beliebig verfeinert werden. Die erarbeitete Entwicklung kann innerhalb einer gewissen Nutzeroberfläche abgerufen werden, konnte jedoch nicht innerhalb der Forschungsleistung in eine Software überführt werden. Die Schnittstellen im csv-Format sind entsprechend vorbereitet, so dass eine Kopplung mit am Markt verfügbaren Tools wie beispielsweise der Software CircularLCA vorbereitet sind. Einer Überführung der Daten in die Produktion steht des Weiteren nichts entgegen.

Eine wesentliche Abweichung zu den Forschungszielen stellt die ausbleibende Integration der anvisierten Gebäudetechnikkomponenten dar, die situationsbedingt nicht vom Praxispartner Solid.Modulbau innerhalb der Forschungsleistung umgesetzt werden konnte. Die Erfahrungen aus den durch den Kooperationspartner in den letzten zwei Jahren realisierten Projekte lassen die Rückschlüsse zu, dass die projektierte Infrarottechnik für die systematisierte Bauweise geeignet ist. Zudem bestätigen sich die Annahmen zur Umsetzung eines nachhaltigen Gebäudetechnikkonzeptes.

Die Zielsetzung, einen prototypischen Demonstrator des adaptiv-assoziativen Bausystems als ein Endergebnis der Forschung bereit zu stellen, ist in Teilen und nur mit großem Mehraufwand gelungen. Aufgrund der defizitären wirtschaftlichen Situation der Solid.Modulbau GmbH zu Projektende war es dem Unternehmen nicht mehr möglich, die entwickelte raummodulare Einheit baulich umzusetzen. Durch einen bereits bestehenden Kontakt zum Unternehmen Bremer SE Paderborn, welches auf den Bau von Betonfertigteilen spezialisiert ist, konnte die Skelettstruktur der Einheit schließlich fertig gestellt werden. Die Zuarbeit der Firma Bremer war in diesem Fall außerordentlich konstruktiv und das Unternehmen sehr bemüht, das Vorhaben gut zu Ende zu bringen. Offen ist aktuell noch die Lieferung eines flächigen Wand- bzw. Deckenbauteils aus Holz, welches noch angefragt wird.

7 Maßnahmen zur Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Folgende Kanäle wurden zur Dissemination gewählt und die Vorhabensergebnisse zur Diskussion gestellt und bei diversen Zielgruppen verbreitet:

Teilnahme an Konferenzen und Veröffentlichungen: Die Forschungsansätze wurden kontinuierlich während der Bearbeitung in externen Forschungskreisen und auf internationalen Konferenzen beispielsweise auf der „ISIC - international conference“ zum Thema „trends on construction in the post-digital era“ in Guimaraes, Portugal, zur Diskussion gebracht. Es erfolgte die Veröffentlichung des Beitrags „prototypical approach for an individualized standardization process in the context of intelligent construction and automation“ im Springer Verlag im Journal Architecture, Structures and Construction [AH23].

Die aktuellen Forschungsergebnisse wurden für die Teilnahme an der Konferenz „Cisbat 2025“ an der EPFL in Lousanne vorbereitet, die im September 2025 stattfinden wird. Die Veröffentlichung des Artikels mit dem Titel „Correlation of enhanced circularity and customized prefabrication“ findet im Anschluss an die Cisbat-Konferenz innerhalb der IOP series statt und stellt Teilergebnisse des Forschungsvorhabens im Kontext der nachhaltigen Gebäudeplanung und ressourcenschonenden Bauausführung vor.

Für die Publikation „Für eine nachhaltige Architektur der Stadt“, deren Veröffentlichung vom Verlag Klaus Wagenbach im Herbst 2025 vorgesehen ist, wurde ein Artikel mit dem Titel „Potentiale von Vorfertigung und seriellen Bauweisen“ verfasst. Hierin werden neben architektonisch-gestalterischen Planungshinweisen außerdem ökologische Vorteile von anpassbaren Systembauweisen im Kontext Gebäude und Stadtraum erörtert und auf die Forschung verwiesen.

Übertragung der Forschungsergebnisse in die Architekturlehre: Die entwickelte und erprobte Nachhaltigkeitsstrategie und damit die synchrone Umsetzung der drei Schwerpunkte modular, zirkulär und digital wurde auch im Rahmen der Konferenz „EAAE - European Association for Architectural Education“ zum Thema „Less is must“ vorgestellt. Es erfolgte eine wertvolle Rückkopplung der Forschungsergebnisse mit den Anforderungen an die didaktischen Konzepte in der Architekturlehre. So können durch die entwickelten Prozesse zukünftig auch Studierende bereits bei der ganzheitlichen Planung von anpassungsfähigen und zugleich kreislauffähigen Konstruktionen unterstützt werden. Des Weiteren wurden die Forschungsansätze innerhalb der Lehrveranstaltung „Material-Einsatz-Wandel“ mit Studierenden der TU Dortmund im Sommersemester 2023 erprobt.

Rückkopplungen in die Industrie: Es erfolgte eine Rückkopplung der Forschungsergebnisse mit unterschiedlichen Praxispartnern. So wurde beispielsweise durch die Realisierung des Prototypen mit der Fa. Bremer SE die Realisierung des Systemansatzes direkt mit den Prozessen aus der Praxis abgeglichen. Die prozessuale und fügetechnische Optimierung konnte im Prototypbau direkt umgesetzt werden. Zudem wurden weitere Lösungsansätze beispielsweise den Transport, die reversible Fügung und automatisierte Fertigung diskutiert, die weiteren Forschungsbedarf und einen Transfer generieren.

8 Fazit

8.1 Zusammenfassung der Vorhabensergebnisse

Die einzelnen Projektziele, die in Kapitel 2.1 vorgestellt wurden, konnten durch das Forschungsvorhaben ergebnisorientiert in Kooperation mit allen Partnern entwickelt werden.

1. Verbesserung der Ressourceneffizienz auf Baustoffebene:

Aufbauend auf der raummodularen Bauweise aus Stahlbeton wurden anhand von weitgreifenden ökobilanziellen Untersuchungen Verbesserungen der Ressourceneffizienz auf Material- bzw. Baustoffebene sowie für die Konstruktion erreicht. Einhergehend mit der Lebenszyklusanalyse der Bauteile und des Gesamtsystems, deren Prüfung in engem Zusammenhang mit alternativen Bauweisen stattgefunden hat, ist die Weiterentwicklung des baukonstruktiven Systems zugunsten einer kreislaufgerechten Konstruktion mit einem hohen Wiederverwendungspotenzial erarbeitet worden. Der kontinuierliche Abgleich der Ergebnisse aus der Ökobilanz mit der konstruktiven Systemidee, die gleichzeitig den Anforderungen an eine qualitativ hochwertige Wohnarchitektur entsprechen sollten, führte dazu, Bauteile und Komponenten dahingehend zu erarbeiten, dass deren effizienter Einsatz gewährleistet und gleichzeitig eine hohe Flexibilität eines auf diese Art und Weise geplanten Gebäudes erreicht werden kann. Daraus resultierte die Prämisse, dass zwar eine standardisierte Herstellung zugunsten eines wirtschaftlichen, ressourcenschonenden und emissionsarmen Bauprozesses der Komponenten grundsätzlich zutreffend ist, gleichzeitig aber auch zugunsten von Materialeinsparungen und größerer Planungsfreiheit eine Systemoffenheit forciert wird. Entsprechend dieser Anforderungen wurde ein adaptives Bausystem mit einer hybriden Konstruktionsmethodik entwickelt, was vielschichtig auf das komplexe Anforderungsgeflecht heutiger Bauaufgaben reagieren kann.

2. Umweltentlastung durch Bauweise und Konstruktion

Die Entwicklung der hybriden Konstruktionsmethodik, durch die eine Kombination von flächigen Bauteilen und raummodularen Einheiten in einer Systemidee möglich wird, führt zu einer sehr effizienten und leistungsstarken Bauweise, die konkret auf die jeweiligen Anforderungen einer Bauaufgabe reagieren kann. Mittels dieser Vorgehensweise wird nicht nur die architektonische Flexibilität erweitert, sondern auch auf Konstruktions- und Bauteilebene ein material- und ressourcensparender Planungsansatz entwickelt. Je nachdem wie sich die Anforderungen einer Bauaufgabe darstellen, werden die Bauteile und Komponenten entsprechend ihres effizienten Einsatzes zugewiesen. Die Anpassung des Tragwerks von einem auf Wänden und Decken basierenden System zu einer Skelettstruktur zeigt bereits Materialeinsparungen auf Bauteilebene. Durch die Ergänzung von Wand- und Deckensystemen in Holzbauweise ist eine Verbesserung der Ökobilanz für den Primärenergiebedarf aus nicht erneuerbaren Energieträgern um ca. 130% möglich gewesen, für die Treibhausgasemissionen liegen die Verbesserungen bei um die 80% für das Einzelmodul und bei knapp 100% für das Gesamtgebäude. Gerade vor dem Hintergrund der Systemoffenheit der hybriden Konstruktion stellt sich in der Ökobilanz dar, welche Potenziale durch die Einbindung von Werkstoffen, die mit keinem oder geringem Primärenergiebedarf hergestellt werden, für ein zu planendes Gebäude entstehen. Weiterhin sind in Anbetracht einer kreislauffähigen Konstruktionslogik für die strukturellen Bauteile reversible Fügemethoden entwickelt worden, was sich insbesondere für die Wieder- und Weiterverwendung von Bauteilen und Materialien positiv auswirkt. Momentan zeichnen sich Hersteller von raummodularen Systemen dadurch aus, dass die einzelnen Einheiten als Ganzes wieder ab- und aufbaubar konstruiert werden. Das trägt aber dazu bei, dass einzelne Schichten entweder komplett ersetzt oder erneuert werden müssen, wenn diese beim Rückbau beschädigt werden. In dem von uns entwickelten Ansatz werden Bauteile so gefügt und verbunden, dass man einen sortenreinen Rückbau gewährleistet und die Kreislauffähigkeit der Bauweise als sehr gut eingestuft werden kann.

3. Nachhaltiges Gebäudetechnikkonzept

Siehe Erläuterung zur Abweichung des Ergebnisses von der Zielsetzung in Abschnitt 6, Seite 68.

4. Entlastung der Ressource Mensch

Der angestrebte Planungs- und Bauprozess, der sich in großen Teilen durch einen digitalen Arbeitsfortschritt und die stärkere Einbindung von automatisierten Fertigungsschritten auszeichnet, schafft eine Reduzierung der körperlichen Arbeit und eine Verbesserung der Arbeitsbedingungen für die ausführenden Gewerke. Dies kann helfen, dem Fachkräftemangel durch attraktivere Arbeitsbedingungen entgegen zu wirken. Durch das witterungsgeschützte Umfeld, in dem der Großteil der Produktionsarbeit stattfindet, können wetterbedingte Ausfälle vermieden, bessere ergonomische Bedingungen geschaffen und die Arbeitsqualität erhöht werden. Diese positiven Rahmenbedingungen tragen dazu bei, dass gesundheitliche Probleme weniger häufig auftreten und Entlastung von körperlich anstrengender Arbeit geschaffen wird. Gleichzeitig werden effizientere Abläufe gewährleistet, Fehlerquoten reduziert und Redundanzen vermieden. Weiterhin ist durch die Vorfertigung eine Spezialisierung von Fachkräften möglich, sodass der Fokus auf den Kernkompetenzen der Mitarbeiter liegt und Routinearbeiten vernachlässigt werden können.

5. Digitale Nachhaltigkeit

Parallel zu den Entwicklungen auf Material- und Konstruktionsebene wurde die adaptive Systembauweise mittels eines digitalen Planungswerkzeuges erweitert. Um den Planungsprozess gesamtheitlich entsprechend der komplexen Anforderungen an eine ressourcenschonende, nachhaltige Gebäudeentwicklung aufzusetzen und gleichzeitig Aspekte einer zukunftsfähigen Bau- und Prozessumsetzung zu gewährleisten, wurde eine digitale Softwareanwendung für ein Gebäudebeschreibungsmo- dell erarbeitet, die assoziativ auf Veränderungen und Anpassungen eines Entwurfs reagieren kann. Durch die Anreicherung dieses Gebäudemodells mit Informationen und Daten, die im Laufe des Planungsfortschritts hinzukommen, verändert oder angepasst werden, kann eine kontinuierliche Rückkopplung der Planungsleistung erfolgen und Defizite oder Fehlerquellen geringgehalten werden. Die Modellierung der einzelnen Komponenten und des Gebäudes trägt nicht nur zur Optimierung der ökologischen, werkstofftechnischen oder baulichen Eigenschaften bei sondern berücksichtigt gleichermaßen produktionsrelevante Faktoren des Herstellungsprozesses. Im Sinne einer abgestimmten Bauteilherstellung werden auf diese Weise schon in einem frühen Planungsstadium Anforderungen des Fabrikations- und Montageprozesses definiert und innerhalb der Systembauweise mit geplant werden.

6. Verbesserung der architektonischen Qualität zur Steigerung der NutzerInnenakzeptanz

Die Voraussetzung über serielle, standardisierte Bauweisen eine qualitativ hochwertige Architektur zu schaffen, stellte eine weitere Zielsetzung des Vorhabens dar. Durch die Planung von - in diesem Projekt wurde insbesondere die Typologie des Wohnens betrachtet - Wohngebäuden, die durch eine gute räumliche Aufteilung, intelligente Zonierung und einwandfreie Behaglichkeit dazu beitragen, eine Wohnumgebung mit hoher Nutzerakzeptanz zu schaffen, werden soziale Aspekte gestärkt und gleichzeitig lange Nutzungszyklen eines Gebäudes ermöglicht. Auch vor diesem Hintergrund ist die Befreiung von der stringenten strukturellen Systematisierung durch eine anpassbare, hybride Bauweise von enormem Vorteil. Die Kombination von raummodularen Einheiten mit flächigen Deckenbauteilen erlaubt zum einen durch den hohen Vorfertigungsgrad einen effizienten und fehlerfreien Bauprozess und trägt zum anderen zu einer vorteilhaften Grundrissorganisation, z.B. gut aufteilbare Wohn- und Aufenthaltsbereiche bei.

8.2 Ausblick und Forschungspotenzial

Die Entwicklung der Arbeitsergebnisse zeigt, dass die anvisierten Optimierungen für einen gesamtheitlichen Planungs- und Bauprozess für eine individualisierbare Systembauweise auf den unterschiedlichen, entsprechend der Aufgabenstellung definierten Ebenen in großen Teilen erreicht werden konnte. Synergieeffekte zwischen den Bausteinen Modular - Zirkulär - Digital wurden dargestellt und sind für das erfolgreiche Zusammenwirken im Sinne einer zukunftsfähigen Anwendung und Übertragbarkeit unumgänglich.

Um eine praxisorientierte Anwendung des Vorhabens zu stützen, wäre die Einbindung der prototypischen Software bzw. des digitalen Beschreibungsmodells in einen Planungs- und Bauprozess erforderlich. Im Zuge der aktuellen Arbeit wurde ein Demonstrator entwickelt. Dessen volle Funktionsfähigkeit sollte im nächsten Schritt für den Anwendungsfall geprüft und erweitert werden. Diesbezüglich könnte man in einem simulierten Planungsvorhaben für ein reales oder fiktives Grundstück den Einsatz der Software testen. Je nach Einsatzgebiet und den funktionalen Anforderungen der Planungsaufgabe ist eine Anpassung der Software vgl. einfach aus den Kernkomponenten ableitbar.

Die Einbindung des notwendigen gebäudetechnischen Systems wurde bisher nicht ausreichend und nur in Teilen im Rahmen der Forschungsarbeit betrachtet. Lösungen, die ein robustes bauklimatisches Konzept verfolgen und auf einer auf passiven Prinzipien beruhenden energetischen Nutzung basieren, stehen dabei im Vordergrund. In einem nächsten Schritt sollte daher die sinnhafte Einbindung dieser Komponenten vor dem Hintergrund eines angemessenen Temperierungs- und Lüftungskonzepts und mithilfe regenerativer Energienutzung entwickelt werden. In Anlehnung an einen minimalen Einsatz von Technik steht in diesem Zusammenhang die Rückkopplung der Bauweise um die Gewährleistung eines effizienten Gebäudebetriebs.

Weiterhin gilt es zu prüfen, ob die etablierten Strategien sich auf andere Bauaufgaben übertragen lassen und welche Potenziale und Hemmnisse dabei möglicherweise auftreten. Durch die Rückkopplung der beim Transfer erreichten Ergebnisse können die etablierten Prinzipien geschärft, ergänzt oder angepasst werden. Durch die praxisbezogene Anwendung und Übertragung der Strategien auf alternierende Planungsaufgaben sollten die bisher prototypischen Entwicklungen noch integraler verknüpft und in den drei Schwerpunkten Modular - Zirkulär - Digital implementiert werden. Diese ganzheitliche Sichtweise sollte integral im Bauwesen weiterverfolgt werden.

9 Literaturverzeichnis

- [AH23] ALBUS, J.; HOLLMANN-SCHRÖTER, K. E.: *Prototypical approach for an individualized standardization process in the context of intelligent construction and automation*. In: *Architecture, Structures and Construction*, <https://doi.org/10.1007/s44150-023-00081-0>, S. 275–287, 2023
- [AH21] ALBUS, J.; HOLLMANN-SCHRÖTER, K. E.; LOWIN, F.; NOWAK, M. J.: *Systematisierte Planungs- und Bauprozesse: Hintergründe, Strategien und Potenziale industrieller Vorfertigungstechnologien*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2021
- [ALH25] ALHO SYSTEMBAU AG: *Kosten im ALHO Modulbau: Informationen zu Quadratmeterpreis, Preisgarantie und Planungskosten*. URL <https://www.alho.com/ch/modulbau/faq/antworten-investition/>. – Überprüfungsdatum: 25.06.2025
- [AH17] ASAM, C. (Hrsg.); HAFERKORN, W. (Hrsg.); DEILMANN, C. (Hrsg.); REICHENBACH, J. (Hrsg.); KRAUß, N. (Hrsg.); GRUHLER, K. (Hrsg.): *Materialströme im Hochbau : Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft*. Stand: Dezember 2016. Bonn: Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, 2017 (Schriftenreihe Zukunft Bauen Band 06)
- [BRA95] BRAND, Stewart: *How buildings learn: What happens after they're built*. New York: Penguin Books, 1995
- [BB25] BUNDESMINISTERIUM FÜR WOHNEN, STADTENTWICKLUNG UND BAUWESEN: *Ökobaudat: Informationsportal Nachhaltiges Bauen*. URL <https://oekobaudat.de> – Überprüfungsdatum 27.06.2025
- [COM25] COMPACTHABIT: *Compacthabit: Concrete module, eMii-C*. URL <https://www.compacthabit.com/modular-solutions/characteristics/#concrete> – Überprüfungsdatum 29.06.2025
- [DM15] DECHANTSREITER, P. H.; METTKE, A.; ASMUS, S.; SCHMIDT, S.; KNAPPE, F.; REINHARDT, J.; THEIS, S.; LAU, J. J.: *Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen*. 2015
- [DGN25] DGNB GMBH: *Der Gebäude-Ressourcenpass der DGNB*. URL <https://www.dgnb.de/de/nachhaltiges-bauen/zirkulaeres-bauen/gebaeuderessourcenpass> – Überprüfungsdatum 26.06.2025
- [DKE25] DKE DEUTSCHE KOMMISSION ELEKTROTECHNIK INFORMATIONSTECHNIK IN DIN UND VDE: *Digitale Norm*. URL <https://www.vde.com/de/presse/pressemitteilungen/whitepaper-zu-digitaler-normung>
- [GH18] GXN INNOVATION, M. Højgaard: *Circle House: Denmark's first circular housing project*. 1. udgave. Denmark: KLS PurePrint, 2018
- [HA15] HAMM, O. G.; AUERNITTY, M.: *Puukuokka Housing Block*. In: *Bauwelt* (2015), 28-29, S. 20–25
- [HAN15] HANSES, K.: *Basics Betonbau*. Basel/Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH, 2015 (Basics Ser)
- [HH22] HEBEL, D. E.; HEISEL, F.; WEBSTER, K.: *Kreislaufgerechtes Bauen und Kreislaufwirtschaft*. Basel: Birkhäuser, 2022 (Besser, weniger, anders Bauen)
- [HW23] HEBEL, D. E. (Hrsg.); WAPPNER, L. (Hrsg.); CALAVETTA, V. (Hrsg.); HÄBERLE, L. (Hrsg.); HOFFMANN, P. (Hrsg.); HOLTMANN, P. (Hrsg.); HOSS, H. (Hrsg.); LENZ, D. (Hrsg.); SCHNEEMANN, F. (Hrsg.): *Sortenrein bauen : Methode, Material, Konstruktion*. München: Edition DETAIL, 2023
- [HEG10] HEGGER, M. (Hrsg.): *Wohnwert-Barometer: Erfassungs- und Bewertungssystem nachhaltiger Wohnqualität*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2010 (Bauforschung für die Praxis 90)

- [HK22] HEINZMANN, A.; KARATZA, N.: *Automatisierung und Digitalisierung im Holzbau*. Wiesbaden, Heidelberg: Springer Vieweg, 2022
- [HR18] HILLEBRANDT, A.; RIEGLER-FLOORS, P.; ROSEN, A.; SEGGEWIES, J.: *Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource*. Erste Auflage. München: Detail Business Information GmbH, 2018 (Edition DETAIL)
- [HS24] HILLEBRANDT, A.; SCHWEDE, Dirk A.; STERETZEDER, J.: *Position der Kommission nachhaltiges Bauen am Umweltbundesamt (KNBAU): Transformation zu einer zirkulären Bauwirtschaft als Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung*. Dessau-Roßlau, 2024
- [Hol24] Hollmann-Schröter, K. E.: *Pyramidal circularity against the background of individualized standardization* EAAE conference MSA, Münster; 2024
- [HOL25] HOLLMANN-SCHRÖTER, K. E.: *Individualisierte Standardisierung monolithischer (Beton)Konstruktionen: Austarierte Implementierung der Leitfaktoren Technik, Konstruktion und Gestaltung vor dem Hintergrund einer Verbesserung der Nachhaltigkeit*. <https://doi.org/10.60628/9783738810165>, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2025
- [HK18] HUß, W.; KAUFMANN, M.; MERZ, K.: *Holzbau: Raummodule*. Erste Auflage. München: Detail Business Information GmbH, 2018 (Edition DETAIL)
- [JAN13] JANSON, A.: *Grundbegriffe der Architektur: Das Vokabular räumlicher Situationen*. Basel, Schweiz: Birkhäuser
- [Jös22] JÖSCH, G.: Bauen mit vorgefertigten Raumsystemen. In: SOLLBERGER, Raphael (Hrsg.): *System & Serie: Systembau in der Schweiz - Geschichte und Erhaltung*. Zürich: gta Verlag, 2022, S. 8–19
- [KK24] KAUFMANN, H.; KRÖTSCH, S.; WINTER, S.: *Atlas mehrgeschossiger Holzbau: Grundlagen - Konstruktionen - Beispiele*. 5. Auflage. München: Detail Business Information GmbH, 2024 (Edition DETAIL)
- [KOY25] KOYA ARCHITEKTUR GMBH: *Koya: Akkordeon Wohnungsbau Genossenschaft*. URL <https://koyaa.ch/akkordeon/> – Überprüfungsdatum 24.06.2025
- [KF21] KÜPFER, C.; FIVET, C.: *Selektiver Rückbau - Rückbaubare Konstruktion: Studie zur Förderung der Abfallreduktion und der Wiederverwendung in der Baubranche*: Zenodo, 2021
- [BMI19] BUNDESMINISTERIUM DES INNERN, FÜR BAU UND HEIMAT (Hrsg.): *Leitfaden nachhaltiges Bauen: Zukunftsfähiges Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden*. 3. Auflage. 2019
- [NK19] NAGEL, R., KASPAREK, D.: *Ohne Bezug zum Ort geht es nicht – Möglichkeiten und Grenzen von Typ und Serie*. In: *der architekt*, 2, S 51–55; 2019
- [NAG22] NAGLER, F. (Hrsg.): *Einfach Bauen: Ein Leitfaden*. Basel: Birkhäuser, 2022
- [REI22] REICH, K.: *Seriell und individuell - so entstehen modulare Gebäude*. In: *DBZ*, Nr. 12. URL <https://www.dbz.de/artikel/seriell-und-individuell-so-entstehen-modulare-gebaeude-3878000.html> – Überprüfungsdatum 24.06.2025, 2022
- [RC25] RIOS, F.; CHONG, W. K.; GRAU, D.: *Design for Disassembly and Deconstruction - Challenges and Opportunities*. In: *Procedia Engineering* 118, S. 1296–1304, 2015
- [RD12] RÜTER, S.; DIEDERICH, S.: *Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz: Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz*. 2012
- [SD22] SCHOOF, J. (Hrsg.); DREY, S. (Mitarb.); FUCHS, C. (Mitarb.); JACOB-FREITAG, S. (Mitarb.); JAKOB, T. (Mitarb.): *Modulbau: Planen und Bauen mit Raummodulen und vorgefertigten Elementen: Erfahrungen aus der Praxis für die Praxis*. 2. vollständig überarbeitete Auflage. München: Detail Business Information GmbH, 2022 (DETAIL corporate)
- [SM12] SINCLAIR, B. R., MOUSAZADEH, S., SAFARZADEH, G.: *Agility, Adaptability + Appropriateness: Conceiving, Crafting & Constructing an Architecture of the 21st Century Enquiry* The ARCC

Journal for Architectural Research 9, S. 35–42 <https://doi.org/10.17831/eng:arcc.v9i1.65>.
2012

- [SOL22] SOLLBERGER, R. (Hrsg.): *System & Serie: Systembau in der Schweiz - Geschichte und Erhaltung*. Zürich: gta Verlag, 2022
- [SD08] STAIB, G.; DÖRRHÖFER, A.; ROSENTHAL, M.: *Elemente + Systeme: Modulares Bauen; Entwurf, Konstruktion, neue Technologien*. 1. Aufl. Basel, Berlin: Birkhäuser, 2008 (Edition DETAIL)
- [SB18] STEINLE, A.; BACHMANN, H.; TILLMANN, M.: *Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau*. 3. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn a Wiley Brand, 2018 (Bauingenieur-Praxis)
- [TES21] TESSMANN, O; DDU - Digital Design Unit, TU Darmstadt; Institut für Tragwerksentwurf (ITE), TU Braunschweig; THING TECHNOLOGIES GmbH; FARO Europe GmbH: *Fertigteil 2.0: Real-digitale Prozessketten zur Gewinnung von eingebauten Betonbauteilen für die Weiterverwendung als fertige Bauteile*
- [W21] WIRTSCHAFTSVEREINIGUNG STAHL: *Wasserstoff als Basis für eine klimaneutrale Stahlproduktion: Positionspapier*. 2021

Teil III Anhang

10 Ausgangsbasis und Relevanz

10.1 MODULAR

10.1.1 Industrielles Bauen und Raummodule: Beton und hybride Konstruktionen

Industrielle Vorfertigung im Bauwesen definiert sich durch die Verlegung der Herstellung von Bauprodukten von der Baustelle in einen Fertigungsbetrieb. Dabei werden z.B. Einzelbauteile (Stützen, Träger, Decken, Wände usw.) oder ganze Raumsysteme hergestellt. Der Vorfertigungsgrad wird dabei durch den Montageaufwand und die Bauzeit auf der Baustelle definiert. Durch das industrielle Bauen mit industriellen, teilautomatisierten Arbeitsmethoden können Vorfertigungsgrade von bis zu 95% erreicht werden [SD08 S. 41]. Dem gegenüber steht das konventionelle Bauen, bei dem ein hoher Anteil manueller Ausführungsarbeiten auf der Baustelle und geringer Vorfertigungsgrad anfällt, jedoch mehr gestalterische Freiheit durch projektspezifische, individuelle Konstruktionslösungen sowie die Unabhängigkeit von Transport- und Produktionslimitierungen entstehen.

Vorteil der industriellen Fertigung ist ein hohes Maß an Planungssicherheit und verbesserte Qualitätskontrolle durch die Ermöglichung einer witterungsunabhängigen Produktion und die Vermeidung unvorhersehbarer, äußerer Einflüsse am Fertigungsstandort. Außerdem können durch die Systematisierung und Standardisierung Produktionsprozesse optimiert und durch die Steigerung der Automatisierung Fehler minimiert werden [AH21].

10.1.1.1 Merkmale der raummodularen Bauweise

Für vorgefertigte Raumsysteme gibt es keine einheitliche Bezeichnung. Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden diese als **Raummodule** bezeichnet. Industriell gefertigte Raummodule stellen eine dreidimensionale Fügung von vorgefertigten Bauteilen und Komponenten dar (Schoof 2022, S. 8). Die raummodulare Bauweise bietet spezifische Vorteile, ist jedoch auch durch klare Einschränkungen geprägt, die sich aus den Anforderungen an Statik, Bauphysik, Transport und Wirtschaftlichkeit ergeben. Raummodule müssen sowohl eigenständig als auch im Verbund eines Gebäudes stabil sein. Während einzelne Module ihre Eigen- und Nutzlasten tragen, erfordert die Stapelung und Reihung der Module die Weiterleitung vertikaler und horizontaler Lasten, beispielsweise durch Wind. Die Gesamtaussteifung kann durch Modulwände, Abspannungen oder unabhängige Bauteile wie Treppenkerne erfolgen. Die Verbindungen zwischen Modulen sind dabei entscheidend, da sie sowohl das statische als auch das bauphysikalische Verhalten beeinflussen [HK18 S. 31–35].

Typisch für die raummodulare Bauweise ist die Bauteildopplung im Bereich von Wänden und Decken bzw. Böden, welche aus der Stapelung und Reihung der Module resultiert. Besonders im Holzbau lassen sich dadurch Schall- und Brandschutzanforderungen erzielen. Systembedingt kommt es jedoch auch dort zu Bauteildopplungen, wo diese nicht erforderlich sind, was zu einem erhöhten Materialverbrauch führt. In Kombination mit Entkopplungsmatten / Elastomerlagern erzielt die raummodulare Bauweise eine sehr gute Luft- und Trittschalldämmung. Bei Raummodulen ohne Decke werden der Schall- und Brandschutz über den Betonboden oder im Holzbau übliche Maßnahmen wie schwimmende Estriche und schwere Schüttungen gewährleistet [HK18 S. 36–37].

Die Modulabmessungen und -gewichte sind durch Produktionskapazitäten, Baustellengegebenheiten und Transportmöglichkeiten begrenzt. Module mit Längen bis 13,50 m, Höhen bis 3,20 m und Breiten bis 3,25 m sind wirtschaftlich transportierbar, größere Maße erfordern Sondertransporte, die zusätzliche Kosten verursachen. Das Modulgewicht, abhängig von Bauweise und Ausbaugrad, darf die maximale Transportkapazität nicht überschreiten, die bei gängigen Lkws bei 28 bis 40 Tonnen liegt [HK18 S. 58–59].

Die raummodulare Bauweise bietet signifikante Kostenvorteile, insbesondere durch bis zu 70 % kürzere Bauzeiten und optimierte Produktionsprozesse. Während die Baukosten für Arbeiten vor Ort kaum von der konventionellen Bauweise abweichen, reduzieren verkürzte Vorfinanzierungszeiten und frühere Ka-

pitalrückflüsse die Gesamtkosten um bis zu 15 %. Zudem verbessern witterungsunabhängige Fertigungen im Werk die Ausführungsqualität und Ressourceneffizienz. Zusammengefasst vereint die Raummodulbauweise statische und wirtschaftliche Effizienz mit hoher bauphysikalischer Leistung. Ihre Limitierungen erfordern jedoch eine präzise Planung, um Materialverbrauch, Transportkosten und Anpassungsaufwände zu minimieren. Die Primärstruktur von Raummodulen kann aus Holz, Stahl, Beton oder einer Kombination der Baustoffe gefertigt sein. Ziel der Forschungsarbeit ist die Entwicklung eines hybriden, adaptiv-assoziativen Bausystems und die Materialoptimierung eines Betonmoduls und Reduzierung des Betonanteils [SD22 S. 18].

Wie Gebäude lassen sich Raummodule als Massiv- oder Leichtbauweise differenzieren. Massive Konstruktionen bestehen z.B. aus Stahlbeton und sind durch schwere, monolithische und flächige Bauteile (Wände, Decken) geprägt, die gleichzeitig als Raumabschluss und Tragstruktur dienen. Der Werkstoff Holz kann ebenfalls eine Form des Massivbaus darstellen, wenn Wände und Decken als tragende Bauteile aus massiven Brettspertholz- oder Brettstapelelementen hergestellt werden. Im Gegensatz zur Massivbauweise mit Stahlbeton handelt es sich hierbei um eine vergleichsweise leichte Bauweise. Der Holzrahmenbau ist ein Beispiel für die Leichtbauweise und im Vergleich zum Holzmassivbau noch leichter und ressourcenschonender [KK24 S. 52–53].

Eine besondere Form des Leichtbaus stellt der Skelettbau dar. Dieser kann sowohl aus Stahl, Holz oder Stahlbeton bestehen und ist gekennzeichnet durch eine strenge Regelmäßigkeit des Tragrasters und der Fügung der Einzelbauteile. Die Tragstruktur des Skelettbaus setzt sich aus linearen Einzelbauteilen, den Stützen und Trägern, sowie flächigen, aussteifenden Decken- und Wandelementen zusammen. Durch die Reduzierung der Tragstruktur auf das Stabwerk, können Innen- und Außenwände nichttragend und reversibel ausgeführt werden, wodurch sowohl in der Fassade als auch im Grundriss eine hohe Flexibilität geboten und gleichzeitig Material eingespart werden kann [SD08 S. 54].

a) Betonmodule

Beton ist ein universeller Baustoff mit hoher Tragfähigkeit und Robustheit. Er bietet hervorragenden Schall- und Brandschutz und ist aufgrund seiner Masse für thermische Speicherfähigkeit bekannt. Diese Eigenschaften machen Raummodule aus Beton besonders geeignet für dauerhafte Gebäude mit hohen Anforderungen an Tragfähigkeit und Nutzungssicherheit [SD22 S. 9].

Anforderungen an Brand- und Schallschutz werden durch die Materialeigenschaften, die Bauteildicken und die aus der An- und Übereinanderreihung der Raummodule resultierende Bauteil-Dopplung (Wand-Wand; Decke-Boden) ohne zusätzliche Maßnahmen erfüllt. Der bauliche Wärmeschutz wird durch außenseitig angeordnete Dämmmaßnahmen gewährleistet [SD22 S. 9].

Die hohen negativen Umweltwirkungen von Stahlbeton (CO₂-Emissionen, PENRT, GWP usw.) und hohe Rohdichte des Materials stellen Limitierungen des Baustoffs dar. Eine Minimierung des Betonanteils kann durch die Ausbildung von Rippen, die Vorspannung von Bauteilen oder die Reduzierung der Tragstruktur auf eine Skelettbauweise erreicht werden. Dies zeigen beispielsweise das von dem Architekten Fritz Stucky mit Rudolf Meuli entwickelte Raumelementsystem Variel [SOL22] oder auch die Bauweise der spanischen Firma Compact habit [COM25].

Als Hybridmodule werden Raummodule bezeichnet, deren Primärstruktur, also die tragende Struktur, aus verschiedenen Baustoffen besteht. Beispiele hierfür sind Raummodule mit Holz-Beton-Verbunddecken oder einer Kombination aus Stahlbetondecke und Holzwänden. Hybride Konstruktionen ermöglichen es die Vorteile der jeweiligen Bauteile oder Baustoffe Materialien zu nutzen. Ausgehend von einem Stahlbetonmodul, kann die Implementierung einer hybriden Konstruktion nach Jösch folgende Vorteile bieten [Jös22 S. 15–17]:

- Statische Anforderungen: Bauteile und Baustoffe können gezielt hinsichtlich der statischen Anforderungen eingesetzt werden, was zu einer effizienten Verteilung der statischen Lasten und einem optimierten Ressourcenverbrauch beiträgt.
- Bauphysikalische Anforderungen: Durch die Kombination von Beton mit Holz oder Stahl können spezifische bauphysikalische Eigenschaften, wie Schalldämmung, Brandschutz, Wärmedämmung oder Wärmespeicherung gezielt verbessert werden.

- **Transporttechnische Anforderungen:** Hybridmodule ermöglichen eine Reduktion des Modulgewichts, durch den Einsatz leichter Bauteile aus Stahl oder Holz. Dies ist entscheidend für den wirtschaftlichen Transport, insbesondere bei den üblichen Größen- und Gewichtsbeschränkungen.
- **Umwelttechnische Anforderungen:** Die Reduzierung des Betonanteils durch den Einsatz nachhaltiger Baustoffe wie Holz verbessert die ökologische Bilanz von Raummodulen und Gebäuden und schont Ressourcen.
- **Gestalterische Anforderungen:** Hybride Konstruktionen eröffnen eine Vielzahl räumlicher und ästhetischer Möglichkeiten. Sichtbetonoberflächen können mit warmen Holzstrukturen kombiniert werden, um eine ansprechende Optik zu schaffen, ohne auf die Vorteile tragfähiger Betonelemente zu verzichten.

Um unterschiedlichen Materialien gezielt und flexibel einsetzen und die entsprechenden Vorteile nutzen zu können, müssen konstruktive Voraussetzungen, wie z.B. standardisierte Verbindungen innerhalb eines Systems geschaffen werden. Beton als Tragstruktur stellt, durch seine bauphysikalischen und statischen Vorteile, eine solide Grundlage für die Entwicklung eines Hybridmoduls dar. Die Integration von hybriden und materialflexiblen Bauteilen ermöglicht eine Anpassung an spezifische Anforderungen, sei es durch Reduktion des Gewichts, Verbesserung der Ästhetik oder Optimierung der Nachhaltigkeit. Diese Kombinationen steigern die Effizienz und Vielseitigkeit von Raummodulen und leisten einen wesentlichen Beitrag zu einer zukunftsfähigen Architektur. Eine Voraussetzung für Materialflexibilität von Bauteilen und Raummodulen in dieser Forschungsleistung war die Auflösung der Massivbauweise hin zu einer Leichtbauweise (Skelettbau-, Holzrahmenbauweise).

10.1.2 Typologische & gestalterische Vielfalt durch Kombination von Raummodulen und Bauteilen

In der Architektur stellt die Typologie oder der Typus die Zusammenfassung von Gebäuden nach bestimmten funktionalen, aber auch konstruktiven oder gestalterischen Eigenschaften dar. Das Bauwerk ist in besonderer Form von der Nutzungsart, dem städtischen Kontext und den damit einhergehenden Anforderungen abhängig. Der Entwurf stellt hierbei eine architektonische Lösung dar, dessen Kubatur, Gestalt oder Bauweise z.B. durch die Nutzungs-, Erschließungs- und Grundrisstypen geprägt werden.

„Das Charakteristische am Typus ist ein besonderes Verhältnis von Identität und Differenz oder von Schema und Variation. Ähnlich wie die Struktur ist der Typus eine Abstraktion. Da er dem Bauwerk nur eine bestimmte räumliche Struktur vorgibt, ohne dessen konkrete Ausformung festzulegen, ist der Typus die Akkumulation und Abstraktion räumlicher Erfahrung in einem Schema, das unendliche Variationen der Konkretisierung erlaubt [JAN13 S. 339].“ Im folgenden Teil werden die wichtigsten typologischen und gestalterischen Eigenschaften der raummodularen Bauweise analysiert. Dabei liegt der Fokus darauf, ob die „Variationen der Konkretisierung“ tatsächlich unendlich oder doch limitiert sind. Im Anschluss daran wird erläutert, welche Hürden bereits durch die Kombination von ein- und zweidimensionalen Bauteilen und Raummodulen überwunden werden können und welche Anforderungen für das zu entwickelnde Bausystem resultieren.

10.1.2.1 Typologische und gestalterische Eigenschaften und Limitierungen der raummodularen Bauweise

Die raummodulare Bauweise findet im Bildungs-, Gesundheits-, Büro- und Gewerbebau als auch im Wohnungsbau Anwendung. Häufig umgesetzte Wohntypologien sind studentische Wohnanlagen, Seniorenwohnheime, Unterkünfte für Geflüchtete oder Hotels. Diese sind geprägt von einem hohen Maß an Standardisierung, einer klaren Rasterung und oftmals kleinen Wohneinheiten, bei denen ein Raummodul entweder abgeschlossene Räume oder eine ganze Wohneinheit abbildet. Jedoch lassen sich auch klassische Wohnungstypen für Mehrpersonenhaushalte generieren [HK18 S. 16].

Die raummodulare Bauweise ist durch seine Systematisierung oft von einem strengen Raster geprägt, was mit einem hohen Maß an (Bauteil-)Standardisierung und (Prozess-)Effizienz einhergeht. Eine häufig gewählte Gebäudeform ist der Zeilenbau oder eine Abwandlung hiervon (U-Form, L-Form usw.).

Insbesondere die vergleichsweise rigide Grundstruktur und der Wunsch nach Effizienz kann zu stereotypen Gebäudeformen führen. Flächig begrenzte und komplexe Grundstücksformen, wie z.B. kleinteilige Baulücken oder Eckgrundstücke stellen für die raummodulare Bauweise eine größere Herausforderung dar.

Die raummodulare Bauweise findet eher bei größeren, mehrgeschossigen Projekten ab ca. 500m² BGF Anwendung, da die Wirtschaftlichkeit eines Bauvorhabens mit der Anzahl der eingesetzten, identischen Raummodule zunimmt. Kleinteilige Wohntypologien wie Ein- und Zweifamilienhäuser sind grundsätzlich aber möglich [ALH25].

Einschlägige Unternehmen der Branche sprechen erst ab 1.000-1.500m² von einem wirtschaftlichen Einsatz der raummodularen Bauweise (Interview Fa. Kleusberg) [REI22].

Von entscheidender Bedeutung für die typologische Qualität der Gestalt eines Gebäudes, ist die gewählte Erschließungsform. Dabei werden in dieser Arbeit zwei Grundtypen unterschieden:

- Die lineare Erschließung (Innen- oder Außengang)
- Die punktuelle Erschließung (Spänner)

Beide Formen kommen in der raummodularen Architektur zum Einsatz, wobei der Laubengang in Kombination mit innen- oder außenliegenden Treppen eine gängige Erschließungsform darstellt. Treppenkerne werden in der raummodularen Bauweise häufig für die Aufnahme der horizontalen Lasten und somit für die Aussteifung des Gesamtsystems genutzt [HK18 S. 19–21].

Die Limitierung der Raumabmessungen aufgrund von Produktions- und Transportanforderungen stellt eine Herausforderung für Grundrissstypen dar. Großzügige Bereiche, wie z.B. der Wohnraum sind schwer umsetzbar und erfordern konkrete planerische Maßnahmen. Das Zusammenschließen mehrerer Module erlaubt z.B. große Wohneinheiten oder Wohnbereiche, die über die Modulbreite hinausgehen.

Weiterhin stellen raumbildende, tragende Wände und Decken eine Beschränkung der Nutzungsflexibilität, Anpassbarkeit und Nutzungsmischung von Gebäuden dar. Abhilfe wird durch Ausbildung einer Skelettstruktur und der reversiblen Fügung von Bauteilen geschaffen, um die Anpassbarkeit von Gebäuden zu steigern und die Lebensdauer zu verlängern.

10.1.2.2 Hybridgebäude als ökonomische Lösung zur Überwindung von Grenzen der raummodularen Bauweise

Bei der Ausbildung komplexer Gebäudegeometrien stößt die reine raummodulare Bauweise schnell an ihre Grenzen. Die Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit, die Modulgrößen und das Rastermaß begrenzen oft die Anpassungsfähigkeit und gestalterische Freiheit in der Planung.

Hybridgebäude, also die Kombination der raummodularen und konventionellen Bauweise, stellen eine Lösung für die Überwindung von typologischen und gestalterischen Grenzen der reinen raummodularen Bauweise dar [SD22 S.10].

Durch den Einsatz standardisierter Raummodule und vorgefertigten Einzelbauteilen (Stützen, Träger, Decken, Wände usw.) können gestalterische Freiheiten gewonnen werden, ohne die Wirtschaftlichkeit der seriellen Fertigung gänzlich zu verlieren. Bei der Kombination von Raummodulen und linearen und flächigen Bauteilen unterscheiden Huß, Kaufmann et. al. grundsätzlich zwischen zwei Ansätzen unterschieden [HK18 S. 20–21]:

1. Schichtenmodell
2. Dienenden Raummodulen

Das Schichtenmodell beschreibt die alternierende Anordnung von Raummodulen und zwischengelagerten flächigen Deckenelementen, wodurch offene Raumkonfigurationen und weitgespannte Räume generiert werden. Auch können alternierende Bereiche dafür genutzt werden um komplexere Gebäudeformen zu schaffen. (Koya Architektur GmbH)

Das Modell der dienenden Raummodule hingegen reduziert den Anteil der Raummodule auf hochinstallierte Kerne, die als Auflager für Decken dienen und im Zusammenspiel mit Wänden, Stützen und

Trägern eine Lösung für mehr gestalterische Freiheit darstellen kann. Die Wirtschaftlichkeit der Produktion sinkt mit geringer werdendem raummodularem Anteil.

Ein besonders gutes Beispiel für die Umsetzung eines hybriden Bausystems stellt das Puukuokka Housing Block dar [HA15]. Hierbei wurden die Raummodule im Bereich der hochinstallierten Wohneinheiten eingesetzt. Dabei wurde zwischen den Nass-Modulen und Wohn-Modulen unterschieden. Um jedoch mehr gestalterische Freiheiten beim Entwurf zu gewinnen, setzte man unter anderem bei der Gründung, Erschließung, Fassade, Dachkonstruktion und den Balkonanlagen auf den Einsatz konventionell hergestellter oder vorgefertigter Bauteile, die auf der Baustelle gefügt wurden.

10.1.3 Wohnqualitätsanalyse von raummodularen und konventionellen Wohngebäuden

Seriell vorgefertigte Gebäude werden primär mit Funktionalität und Wirtschaftlichkeit in Verbindung gebracht. Beispiele wie der Großtafelbau der 50er- und 60er Jahre verleihen dem Begriff der seriellen Fertigung noch heute eine negative Konnotation. In dem Zusammenhang herrscht die Vorstellung architektonische Qualität, gestalterische Vielfalt und Nutzungsflexibilität müsse zugunsten einer effizienten Planung und Produktion im Sinne der standardisierten Fertigung weichen. Die öffentliche Wahrnehmung ist noch stark von negativen Vorurteilen geprägt, die ihren Ursprung in den seriell gefertigten Gebäuden der Nachkriegszeit haben. Häufig wird die raummodulare Bauweise mit einer gestalterischen Monotonie, einer sozialen Anonymisierung, baulichen Mängeln und dem Verlust von Baukultur verbunden [AH21 S. 27–29].

Das serielle und raummodulare Bauen hat sich jedoch seit den 1950er Jahren weiterentwickelt. Um zu verstehen, wovon die Wohnqualität von Gebäuden der modularen Bauweise beeinflusst wird, wurden exemplarische Referenzprojekte im Hinblick auf spezifische Qualitätsmerkmale untersucht, und mittels einer einfachen, quantitativen Bewertung eingeordnet [HK18 S. 23–24].

Da die Forschungsarbeit die Entwicklung eines Bausystems aus vorgefertigten Einheiten anstrebt, welches auf eine Kombination aus dreidimensionalen Raumzellen und ein- und zweidimensionalen Bauteilen abzielt, wurden Beispiele der konventionellen Bauweise und der raummodularen Fertigung herangezogen. Durch die Betrachtung sowohl raummodular als auch konventionell gefertigter Wohnbauprojekte soll eine Abhängigkeit zwischen der Wohnqualität und Fertigungsweise untersucht werden. Die Auswertung der Ergebnisse hinsichtlich aktueller Limitierungen und den damit zusammenhängenden Optimierungspotenzialen der raummodularen Bauweise dient als Grundlage für die Entwicklung des Bausystems und der Identifizierung von Einsatzmöglichkeiten von ein- und zweidimensionalen Bauteilen. Bei der Wahl der Referenzprojekte wurden Beispiele herangezogen, die objektiv eine hohe architektonische Qualität aufweisen und eine möglichst große Varianz darstellen.

Analysiert werden die folgenden vier Projekte:

- | | |
|----------------------|---|
| 1. E3 | Mehrfamilienhaus E3 – Kaden + Klingbeil – Berlin, DE – 2008 – Konventionell |
| 2. BH
nell | Wohnüberbauung Brunnenhof – Gigon Guyer – Zürich, CH – 2007 – Konventionell |
| 3. PHB | Puukuokka Housing Block – OOEPA – Jyväskylä, FI – 2018 – Raummodular |
| 4. W500 | Wohnen 500 – JK&P – Mäder, AT – 2016 – Raummodular |

10.1.3.1 Methodik der Wohnqualitätsanalyse

Die Wohnqualitätsanalyse der Referenzprojekte erfolgte mittels eines Kriterienkatalogs, welches in Anlehnung an Bewertungssysteme wie dem Wohnwertbarometer entwickelt wurde (Hegger 2010).

Im Rahmen der Wohnqualitätsanalyse werden die Referenzgebäude in den folgenden Kategorien untersucht:

- Gebäude
- Grundriss
- Raum

Die Kategorie **Gebäude** umfasst die Erschließungsform, die Integration von Gemeinschaftsflächen und die Gestalt des Gebäudes. Bei der Kategorie **Grundriss** werden unter anderem die Grundrisszonierung, Raumbeziehungen und Barrierefreiheit bewertet. Unter **Raum** wird die Qualität der einzelnen Räume untersucht. Die Bewertung der Kriterien erfolgt durch die Einstufung in „sehr schlecht“ bis „sehr gut“ (1-5 Punkte), wobei keine Gewichtung stattfindet.

10.1.3.2 Analyse und Bewertung der Referenzprojekte

Projekt	Gebäude	Grundriss	Raum	Gesamt
E3	Sehr gut (13/15)	Mittel (23/40)	Gut (19/25)	Gut (55/80)
BH	Gut (12/15)	Sehr gut (35/40)	Gut (19/25)	Sehr gut (66/80)
PHB	Sehr gut (14/15)	Gut (30/40)	Mittel (15/25)	Gut (59/80)
W500	Mittel (9/15)	Gut (28/40)	Mittel (16/25)	Gut (53/80)

Die Analyse hat gezeigt, dass seriell gefertigte, raummodulare Architektur nicht zwangsläufig mit defizitärer Wohnqualität einhergehen muss. Wohnqualität wird durch verschiedene Faktoren bestimmt, die sowohl funktionale als auch gestalterische Aspekte von Gebäuden, Grundrissen und Räumen betreffen. Aus diesen Gründen sind funktionale und architektonische Aspekte eine wesentliche Voraussetzung für gute Wohnqualität, die sich in Abmessungen, Proportionen, Erschließungswegen und Belichtung eines Raumes manifestieren. Eine weitere elementare Anforderung ist die Barrierefreiheit, wodurch die Dimensionierung der Räume maßgeblich bestimmt wird. Die Analyse exemplarischer Wohnprojekte hat gezeigt, dass sich zweckmäßig erforderliche Raumgrößen mittels transportfähiger Raummodule abbilden lassen und räumlich-funktionale Mängel durch planerische Eingriffe sowohl in raummodularen als auch konventionellen Projekten vermieden werden können. (Für eine detaillierte Betrachtung der funktionalen Anforderungen an Raumzuschnitte und Grundrissanordnungen siehe Anlage 2).

Neben der Funktionalität spielt auch die Gestaltung von Räumen und Grundrissen eine bedeutende Rolle in der Wohnqualität. Besonders in Bereichen wie Wohnzimmer, Küchen und Esszimmer, die eine soziale und kreative Entfaltung ermöglichen sollen, ist es wichtig, dass diese Räume den BewohnerInnen Freiraum für persönliche Entfaltung bieten. Bei der raummodularen Bauweise können großzügige Räume über das Zusammenschalten von Modulen und die Ausbildung breiter Module generiert werden.

Die Grundrissgestaltung hat ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Wahrnehmung von Wohnqualität. Ergebnis der Wohnqualitätsanalyse ist, dass verschiedene Grundrisstypologien (linear, zentral, zirkulär, peripher, durchwohnt usw.) auch durch die raummodulare Bauweise abbildbar sind. Eine klare Struktur, die private und öffentliche Bereiche gut voneinander trennt, sorgt für eine intuitiv verständliche Nutzung der Räume. Schlecht ablesbare Verkehrswege oder fehlende Raumbeziehungen können zu Unzufriedenheit durch Nutzungsstörungen führen und die Wohnqualität negativ beeinträchtigen.

Die Integration der Gebäudetechnik spielt eine wichtige Rolle, insbesondere in Bezug auf die Anordnung von Bereichen wie Küche und Badezimmer. Eine wirtschaftliche Anordnung der technischen Elemente kann die Effizienz der Bauweise steigern und gleichzeitig zur Steigerung der Wohnqualität beitragen. Bei der Gestaltung von Wohngebäuden sollten technische Anforderungen so berücksichtigt werden, dass sie die Raumgestaltung nicht einschränken. Mängel auf der Grundrissebene bei konventionell gefertigten und raummodularen Projekten zeigten, dass Zwänge durch die technische Gebäudeausstattung nicht an die Bauweise eines Gebäudes gekoppelt sind.

Wenn Grundrisse anpassbar sind, können sich Gebäude mit den Bedürfnissen der Nutzer:innen weiterentwickeln, was Sicherheit bietet und eine stärkere emotionale Bindung fördert. Ein sinnvoll gewähltes Raster und die Implementierung der Skelettbauweise als Tragstruktur ermöglicht flexible Grundrisse durch rückbaubare, nichttragende Innenwände.

Die Art der Erschließung und die Gestaltung der Gemeinschaftsflächen haben ebenfalls Einfluss auf die Wohnqualität. Eine gut geplante Erschließung sorgt nicht nur für eine effiziente Nutzung der Verkehrsflächen, sondern trägt auch zur ästhetischen und funktionalen Gestaltung des Gebäudes bei. Eine durchdachte Erschließungsform kann das Wohlbefinden der BewohnerInnen steigern, den täglichen Wohnablauf erleichtert und gleichzeitig angenehme Aufenthaltsbereiche schaffen.

Am meisten beeinflusst der Faktor Kosten die Wahrnehmung der Wohnqualität. Der Wunsch nach kostengünstigem Wohnraum führt häufig zu Kompromisse bei der Raumgestaltung und Ausstattungsqualität. Mängel, die aufgrund von wirtschaftlich getriebenen Entscheidungen auftreten, haben sich in allen Kategorien gezeigt. Da raummodulare Architektur, mit seiner effizienten, kostensparenden Bauweise, ein entscheidendes Werkzeug für die Schaffung bezahlbaren Wohnraums darstellen kann, wird die Bauweise häufig mit geringerer Wohnqualität gleichgesetzt. Eine gut durchdachte und effiziente Bauweise kann jedoch auch in günstigeren Wohngebäuden eine hohe Wohnqualität ermöglichen, wenn die funktionalen und gestalterischen Anforderungen beachtet werden.

Im Ergebnis der Analyse wird konstatiert, dass Wohnqualität nicht allein von der Bauweise, sei es raummodular oder konventionell, sondern vielmehr von der funktionalen Gestaltung der Räume, der Flexibilität der Nutzung und der Integration technischer sowie gestalterischer Aspekte abhängt. Eine durchdachte Raumgestaltung, die den Bedürfnissen der NutzerInnen gerecht wird, trägt wesentlich zur Wohnqualität bei. Dabei sind es vor allem die funktionalen Anforderungen, die in jedem Fall erfüllt werden müssen, während gestalterische Freiheiten und Flexibilität im Ausbau den Raum subjektiv bereichern und das Wohlbefinden bzw. die Behaglichkeit der BewohnerInnen steigern. Die Wohnqualitätsanalyse hat gezeigt, dass raummodulare Architektur grundsätzlich die Anforderungen einer guten Wohnqualität erfüllen kann.

10.2 ZIRKULÄR

10.2.1 Ziele und Umsetzungsstrategien des kreislaufgerechten Bauens

Das zunehmende weltweite Bewusstsein über die katastrophalen Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels beeinflusst die langfristigen Ziele von Politik und Wirtschaft. In der Europäischen Union wird das Ziel verfolgt, Europa zum ersten klimaneutralen und zirkulär wirtschaftenden Kontinent zu transformieren. Die Handlungsweisen im Bauwesen tragen entscheidend zum Erreichen dieses Ziels bei: 2019 war das Bauwesen für ca. 50% des Primärrohstoffverbrauchs und ca. 36% des Festmüllaufkommens innerhalb der EU verantwortlich [HH22 S. 30].

Als Reaktion auf diese Erkenntnis wurden, aufbauend auf dem Beschluss des Pariser Abkommens von 2015 zur Begrenzung der globalen Erwärmung auf +1,5 °C, im Dezember 2019 verbindliche Klimaschutzziele mit verschärften Anforderungen zur Reduzierung von Treibhausgasen vereinbart. Um eine deutliche Verbesserung im Bauwesen in Form von weniger Abfallproduktion, geringerem Ressourcenverbrauch und weniger umweltschädlichen Einflüssen zu erzielen, sind diese Aspekte in die Planung und Umsetzung von Bauvorhaben zu integrieren. Ziel ist dabei auch die Erhöhung der Zirkularität und damit das Erreichen einer höheren Resilienz der Ressourcenverfügbarkeit gegenüber äußeren Einflüssen. Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen DGNB e.V. beschreibt die dabei zu verfolgenden Kernaktivitäten wie folgt [DGN25 S. 3]:

1. Weitestmöglich Werkstoffe und Ressourcen aus der Kreislaufwirtschaft einsetzen
2. Abfallfrei in allen Prozessen wirtschaften – von der Herstellung über Baustellenprozesse und Nutzung bis zum Lebenszyklusübergang
3. Kreislauffähigkeit als Potenzial für die Zukunft sicherstellen

Methoden zur strukturierten Untersuchung und Bewertung der o.g. Kriterien, die in diesem Forschungsprojekt bei der Entwicklung der hybriden Gebäudekonstruktion zur Bewertung einer verbesserten Kreislauffähigkeit, Ressourceneffizienz und Klimafreundlichkeit herangezogen werden, sind die Betrachtung von Lebenszyklusanalysen und die Berechnung von Zirkularitätsindizes. Hierbei reduziert die höhere Kreislauffähigkeit sowohl den Ressourcenverbrauch als auch den Umfang schädlicher Umweltwirkungen, die in der Lebenszyklusanalyse ermittelt werden. Die Berücksichtigung der Prinzipien des kreis-

lauffähigen Bauens wird in der Forschung angewandt. Hierfür sollen Materialien und Bauteile so eingesetzt werden, dass die natürlichen Rohstoffvorkommen entlastet werden und es zur Reduzierung von Emissionen kommt. Im Hinblick auf die Erhöhung der Wiederverwendung und Wiederverwertung eingesetzter Materialien und Bauteile ist mindestens für zukünftige Neubauten, idealerweise jedoch auch für Bestandsgebäude, die Erstellung von Gebäuderessourcenpässen / Materialkatastern erforderlich.

Unter dem Sammelbegriff „Recycling“ wird zwischen vier Strategien im Umgang mit Materialien, mit unterschiedlichen Qualitätsmerkmalen unterschieden: Wiederverwendung, Weiterverwendung, Wiederverwertung und Weiterverwertung [HW23 S. 19]. Die Wiederverwendung steht für den geringsten Qualitätsverlust von Materialien, da es sich hierbei um einen funktionsgleichen Wiedereinsatz handelt. Eine Grundvoraussetzung für die Wiederverwendung ist die Rückbaubarkeit durch reversible Fügeverfahren. Aus der Betrachtung von Stahlbetonbauteilen ergeben sich vier weitere Grundbedingungen für die Wiederverwendung [DM15 S. 82]:

1. Für die Demontage ist die Zugänglichkeit im Gebäude zu realisieren,
2. Es ist ein Nachweis über die Restgebrauchseigenschaften und eine Prognose zur Restnutzungsdauer zu erbringen,
3. Die Standsicherheit während und nach dem Rückbau ist zu gewährleisten,
4. Eine (Re-)Montierbarkeit ist sicherzustellen.

Was für die Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen gilt, gilt vom Prinzip her auch für Bauteile aus Holz oder Stahl. Die Nachweisführungen und die Wiederverwendungspotenziale werden sich vermutlich stark unterscheiden, jedoch können dieselben Entscheidungsstufen durchlaufen werden, um die Wiederverwendungsfähigkeit der Bauteile zu prüfen (Dechantsreiter u. a. 2015, S. 88).

Nach Hillebrand eignet sich der aktuelle Gebäudebestand aufgrund des hohen Arbeitsaufwands nur bedingt als Materialquelle und sieht sich einer Vielzahl von Hürden (Schadstoffbelastung, Verunreinigung, Verbundbaustoffe usw.) gestellt, weshalb zukünftige Systeme, die als Rohstoffzwischenlager der Zukunft dienen sollen, einen kreislaufgerechten Planungsansatz erfordern, bei dem bereits von Beginn an die schadenfreie, sortenreine, unbelastete Demontage und Wiederverwendbarkeit von Materialien und Bauteilen mitgedacht und geplant wird [HR18 S. 10].

10.2.1.1 Lebenszyklusanalyse

Die Lebenszyklusanalyse (auch Ökobilanz oder Life Cycle Assessment LCA) umfasst den gesamten Weg eines Produkts von der Rohstoffgewinnung und Aufbereitung über die Herstellung und Nutzung bis zum Recycling oder zur Entsorgung. Die übergeordnete Norm, die das Verfahren standardisiert, ist die „ISO 14040 – Prinzipien und allgemeine Anforderungen“, ergänzt durch „ISO 14044 – Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen“. Darin sind Inhalte und die grundsätzliche Gliederung einer Lebenszyklusanalyse definiert. Die Auswertung gehört nicht zum normativen Umfang, um keine Automatismen oder Handlungsempfehlungen zu implizieren. Lebenszyklusanalysen sind projektspezifisch aufzustellen und iterativ im Planungs- und Bauprozess anzupassen. In Varianten ermöglichen Sie eine Vergleichbarkeit in Bezug auf Ressourceneffizienz und schädliche Umwelteinflüsse.

In der Lebenszyklusanalyse wird zwischen einer Sachbilanz und einer Wirkungsabschätzung unterschieden. Die Sachbilanz umfasst keine direkten Umweltwirkungen, sondern Parameter wie den erneuerbaren (PERT) und nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf (PENRT), den Einsatz von Sekundärstoffen (SM), den Nettoeinsatz von Süßwasserressourcen (FW), gefährlichen Abfall zur Deponie (HWC) und weitere. Die Wirkungsabschätzung umfasst Indikatoren für die Umweltwirkung, wie z.B. das globale Erwärmungspotenzial (GWP), das Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (ODP), das Versauerungspotenzial (AP), das Eutrophierungspotenzial (EP) für Land und Wasser und weitere. Im Rahmen einer Ökobilanz müssen nicht alle Parameter und Indikatoren untersucht und ausgegeben werden. Häufig beschränken sich Lebenszyklusanalysen in der Praxis aufgrund der Verfügbarkeit der Datengrundlagen und der thematischen Aktualität insbesondere auf den Primärenergiebedarf (erneuerbar / nicht erneuerbar) und das globale Erwärmungspotenzial. Es ist jedoch davon auszugehen, dass mit der aktuell steigenden Zahl und Qualität der vorhandenen Datensätze zukünftig auch andere Umweltwirkungen stärker beachtet werden.

Die erforderlichen produktspezifischen Umweltproduktdeklarationen (EPD) sind in verschiedenen Datenbanken – zum Teil kostenpflichtig - abrufbar. Die wichtigste nationale Datenbank ist die ÖKOBAUDAT des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, die kostenfrei online zur Verfügung steht. Dort werden sowohl generische als auch firmen- oder verbandsspezifische EPDs zur Verfügung gestellt und laufend aktualisiert. Zudem besteht die Möglichkeit für Entwickler von Bilanzierungstools, die ÖKOBAUDAT in ihre Software einzubinden.

Das Erfordernis der Erstellung einer Lebenszyklusanalyse findet zunehmend Einzug in das Bauwesen. So ist die eine Lebenszyklusanalyse bereits für verschiedene Gebäudezertifizierungen verpflichtend. Dabei werden die zu betrachtenden Parameter und Indikatoren sowie zu erreichende Zielwerte von den Zertifizierungsstellen definiert. Seit Juli 2021 existiert das staatliche Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) des Bundesinstituts für Bau- Stadt- und Raumforschung (BBSR), welches ebenfalls eine Lebenszyklusanalyse umfasst. Diese unterscheidet sich allerdings durch einen eigenen, verpflichtend zu verwendenden Datensatz (QNG Rechenwerttabelle), der nur eine eingeschränkte Anzahl von Bauprodukten enthält. Zum aktuellen Zeitpunkt sind die Ergebnisse der QNG-Lebenszyklusanalysen daher nicht aussagekräftig, da bauherrInnen- und planerseitige Bemühungen, z.B. die CO₂-Bilanz des Gebäudes durch standortnah produzierte Baustoffe oder den Einsatz von Recyclingmaterialien zu verbessern, nicht berücksichtigt werden können. Ein Wechsel auf EPDs war für Herbst 2024 angekündigt, steht allerdings bisher noch aus. Die QNG-LCA ist verpflichtend für eine staatliche Neubauförderung über die Kreditanstalt für Wiederaufbau KfW.

Zirkularitätsindex

Der Zirkularitätsindex ist eine Kennzahl, die im Bauwesen zur Bewertung und zum Vergleich der Kreislauffähigkeit verschiedener Bauprodukte, Bauteile oder Gebäude herangezogen werden kann. Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es noch keine standardisierte Berechnungsmethode. Die vorhandenen Rechenansätze berücksichtigen jedoch typischerweise folgende Aspekte:

- Recyclingfähigkeit der verwendeten Materialien
- Wiederverwendungsfähigkeit der Bauteile
- Anteil recycelter und wiederverwendeter Materialien
- Langlebigkeit der Materialien und Bauteile
- Reparaturfähigkeit der Bauteile
- Effizienz im Materialeinsatz (minimale Abfälle)

Dabei wird der Transparenz und Nachvollziehbarkeit ein großer Wert beigemessen. Momentan spiegeln folgende Berechnungsmethoden den aktuellen Forschungsstand wider: **Madaster – Madaster-Circularity-Indicator**

Der Madaster-CI basiert auf dem Material-Circularity-Indicator der Ellen MacArthur Foundation. Bei der Berechnung werden die Primärrohstoffe zu den verwendeten Materialien in Verhältnis gesetzt, die Lebensdauer der Materialien und Bauteile zur durchschnittlichen Lebensdauer in Verhältnis gesetzt und am Ende der Lebensdauer die wiederverwendbaren / recycelbaren Materialien und Bauteile zu der Abfallmenge zur Deponie oder Verbrennung in Verbindung gesetzt.

Concular – Circularity Performance Index CPX

Bei der Berechnung des CPX wird das Verhältnis Primär- und Sekundäranteil, Trennbarkeit, Demontagefähigkeit, Wiederverwendungspotenzial und Schadstoffbelastung berücksichtigt. Außerdem fließt der Aufwand zur Demontage in die Berechnung mit ein. Dieser wird unterschieden in trennbar mit einfachem Werkzeug, trennbar mit maschinellen Prozessen, chemische Trennung und untrennbar. Die Datenbasis ist generisch und kann auf Anfrage an projektspezifische Daten angepasst werden. Ansonsten handelt es sich um eigendefinierte Bewertungskriterien.

Urban Mining Index UMI

Der UMI wurde 2020 an der Bergischen Universität von Dr. Anja Rosen im Zuge ihrer Promotion entwickelt und zunächst als Excel-Tool angelegt. Bei der Berechnung wird die materielle Ebene durch den

Sekundäranteil im Materialeinsatz Pre-Use und Materialverbleib Post-Use, die konstruktive Ebene durch die Lösbarkeit und Trennbarkeit von Schichten und Verbindungen und die wirtschaftliche Ebene durch die Ermittlung eines verbleibenden Materialwertes berücksichtigt. Der UMI wurde zwischenzeitlich in die ECO-Pass Bilanzierungssoftware der Fa. Hottgenroth implementiert [HS24 S. 27–28].

DGNB Zirkularitätsindex DGNB-ZI

Die DGNB hat einen eigenen Zirkularitätsindex entwickelt und verfolgt dabei nach eigenen Angaben eine höchstmögliche Transparenz zur gesellschaftlichen Anerkennung der Kreislaufwirtschaft. Auch hier werden zwei Kriterien und Lebenszyklusphasen definiert, die als Teil-Zirkularitätsraten getrennt oder gemeinsam bewertet werden können: die Kreislaufführung betrachtet den Beitrag zur Kreislaufwirtschaft während der Planung der Errichtung des Gebäudes (Pre-Use-Phase), die Kreislauffähigkeit benennt einen potenziellen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft nach dem Rückbau (Post-Use-Phase) [DGN25].

Der umfangreichste Arbeitsschritt ist dabei die Erfassung der verwendeten Materialien und Massen. Hier besteht die Möglichkeit, das Bauteil als ifc-Modell in die Anwendung einzulesen oder eine Materialliste aus einem BIM-Modell als csv-Datei zu exportieren und auf Basis einer durch Concular vorgegebenen Struktur in die Anwendung einzulesen. In der Anwendung wird dann die Zuordnung der Materialien zu den hinterlegten Datenbankprodukten vorgenommen. Hierbei kann eine KI unterstützend mitwirken. Da das im Rahmen des Forschungsprojektes entwickelte digitale Planungswerkzeug die Mengen und Materialien ebenfalls dynamisch anlegt, so dass Änderungen sich automatisch auf die Mengenermittlung auswirken, wurde eine Schnittstelle zur Datenübertragung für die Weiterverwendung in der CPX-Anwendung erfolgreich umgesetzt.

10.2.1.2 Gebäuderessourcenpass / Materialkataster

Aus den beschriebenen Bewertungssystemen können aus den zu Grunde gelegten BMI-Modellen oder Datentabellen und weiteren Eingaben bereits zum aktuellen Zeitpunkt Gebäuderessourcenpässe erstellt werden. Diese stellen ein digitales Kataster für die verbauten Materialien dar und geben zudem Informationen zur Demontierbarkeit und Wiederverwend- bzw. -verwertbarkeit. Denkt man das Gebäude als Rohstoff- oder Bauteilmine, sollen die Gebäuderessourcenpässe als aufschlussreiche Dokumentation und Datenbasis für zukünftige Projekte aus wiederverwendeten Materialien und Bauteilen angesehen werden. Während Gebäuderessourcenpässe im Rahmen von Gebäudezertifizierungen verpflichtend vorausgesetzt werden.

10.2.2 Design for Disassembly als Grundlage für die Entwicklung eines kreislaufgerechten, hybriden Bausystems

Vor dem Hintergrund einer kreislaufgerechten Konstruktionsidee widmet sich das modulare Gebäudesystem der Herangehensweise des „Design for Disassembly“ (DfD). Hierbei wird über die sorgsame Planung ein schadensfreier Rückbau vereinfacht und somit der Gebäudeabbruch verhindert. Ziel dieses Prinzips ist die Lebensdauer von Gebäuden und Bauteilen zu verlängern, Ressourcen zu schonen, Emissionen zu reduzieren und Abfallaufkommen zu minimieren. Als Grundlage dienen die folgenden fünf Schlüsselprinzipien [RC25 S. 1297–1298]:

1. Trennung nach Rezyklierbarkeit der Komponenten und Bauteile,
2. Verwendung reversibler Fügeverfahren zur Vereinfachung des Rückbaus,
3. Wahl simpler Bauteilaufbauten und -formen zur Optimierung der Standardisierung,
4. Dokumentation der Materialien, Komponenten und Bauteile inklusive ihrer Demontage,
5. Berücksichtigung gängiger Baupraktiken, Wirtschaftlichkeit und Sicherheit bei der Planung.

Für eine kreislaufgerechte Architektur ist eine Gliederung von Bauteilen und Komponenten in Teilsysteme essenziell. Daher eignet sich ein Bausystem aufgrund seines geometrischen Ordnungsprinzips grundsätzlich für diesen Ansatz, sodass die daraus resultierenden Gebäude adaptiv auf vorhersehbare und unvorhersehbare Veränderungen reagieren können (Brand 1995, S. 179). Analog zu Stewart Brands „Sharing Layers of Change“ werden Gebäude nach ihrer Funktion und Lebensdauer in die

Schichten Ort, Tragwerk, Hülle, Gebäudetechnik, räumliche Konfiguration und Ausstattung gegliedert [HW23 S. 121].

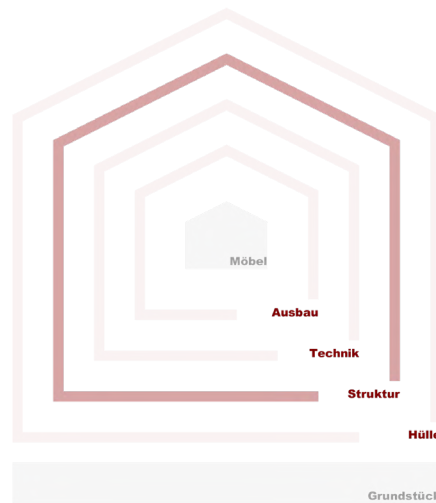


Abbildung 10-1 Schichtmodell nach Stewart Brands „Sharing Layers of Change“

Die jeweiligen Schichten können entsprechend ihrer tragenden oder nicht tragenden Eigenschaften der Primärstruktur (Tragwerk) oder Sekundärstruktur (Hülle, Innenausbau, Gebäude-/Haustechnik) zugeordnet werden [SD08 S. 42]. Für die kreislaufgerechte und emissionsarme Konstruktionsentwicklung ist bedeutsam, dass bis zu 75% der grauen Energie eines Gebäudes in der Primärstruktur stecken, wodurch die Verlängerung der Lebensdauer des Tragwerks eine oberste Prämisse darstellt [HW23 S. 120]. Entscheidend für die Verbesserung der Kreislauffähigkeit sind die Wahl der Bauweise/des Tragwerks sowie die konstruktive Fügung der systemimmanenten Gebäudeteile.

Im Vergleich zur konventionellen Bauweise kann ein kreislaufgerechtes, hybrides Bausystem hinsichtlich einer Wiederverwendung wie folgt hierarchisiert werden:

1. Nachnutzung eines Gebäudes
2. Nachnutzung eines Raummoduls
3. Nachnutzung eines Bauteils
4. Nachnutzung eines Materials

Die Fügung und damit auch die Demontageprinzipien der baulichen Komponenten müssen bei der Entwicklung von hybriden Bausystemen stets berücksichtigt werden und wirken sich direkt auf die unterschiedlichen Nachnutzungsszenarien aus.

Veränderungen eines Bauteils durch Anpassung nach dem Ausbau sind technisch aufwendig und wenig erforscht. Ein Beispiel hierfür stellt das Forschungsvorhaben „Fertigteil 2.0“ dar [TES21].

10.2.2.1 Voraussetzung für eine schadenfreie und sortenreine Demontage und Wiederverwendung der Primärstruktur

Eine sortenreine, schadenfreie und selektive Demontage, bildet die Grundlage für die Wiederverwendung von Bauteilen mit geringem Qualitätsverlust und kann nur durch die reversible Fügung der Einzelbestandteile gewährleistet werden. Sortenreinheit kann auf Konstruktions- oder Materialebene gegeben sein [HW23 S. 22]. Insbesondere beim Bauen mit Stahlbeton, der aufgrund seiner Leistungsfähigkeit, Langlebigkeit und Robustheit sowie dem wirtschaftlichen Einsatz in der Baubranche des 20. Jahrhunderts großen Zuspruch erfahren hat, sind nicht lösbare Verbindungen bzw. Verbindungen, die mit großem technischem Aufwand und nicht schadenfrei umsetzbar sind, gängige Praxis. Daher liegt der Fokus der Forschungsarbeit hier bei der Wiederverwendung des Baustoffs [HW23, S. 46]. In der Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen steckt für die Reduzierung der negativen Umwelteinwirkungen ein

hohes Potenzial. Durch die Wiederverwendung von rückgebauten Betonfertigteilen beispielsweise, lassen sich ca. 97% der energetisch bedingten Emissionen reduzieren. In rückgebauten Betonbauteilen ist „Graue Energie“ gespeichert. Durch den erneuten Einsatz kann der Primärenergieaufwand für die Herstellung einer neuen Decke mit der gleichen Abmessung eingespart werden [DM15S. 18].

In Hinblick auf die Wiederverwertung des Baustoffs Betons als Rezyklat bzw. die Verwendung von Sekundärgesteinskörnung in Betonbauteilen muss allerdings auch ein Appell an die Normung gerichtet werden. In Deutschland werden hohe Anforderungen an den Anteil und die Reinheit von Sekundärrohstoffen in Betonbauteilen gestellt. So liegt der maximal zulässige Anteil an Sekundärgesteinskörnung gem. DIN 10452:08/2023 Anhang E bei 20 - 45 %, bei hochfesten Betonen ist gar keine Sekundärgesteinskörnung zulässig. Zum Vergleich: in der Schweiz beträgt dieser Anteil 85 %. Eine Überprüfung der strengen Vorgaben ist vor dem Hintergrund der in Nachbarländern vorbildlich genutzten Potenziale zur Ressourceneinsparung und Verringerung von schädlichen CO₂-Emissionen während der Betonherstellung dringend erforderlich [AH17].

Auch hybride Konstruktionen bestehend aus Fertigbauteilen mit Ort betonverbindungen sind, wie die Praxis bereits gezeigt hat, nur unter bestimmten Bedingungen und unter großem Aufwand demontierbar. Mittlerweile haben sich jedoch marktaugliche Produkte durchgesetzt, die eine verschraubte Verbindung von Stahlbetonfertigteilen ermöglichen und eine Lösung für die optimierte (De-)Montage und Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen darstellen [KF21 S. 86].

Am Beispiel des von der Firma Realdania und der dänischen Umweltschutzbehörde beauftragten Projekts „Circle House Demonstrator“ wurden lösbare Verbindungen für Stahlbetonbauteilen untersucht und nachgewiesen. Insbesondere der Kalkmörtelverguss, welcher die biegesteifen Stahlverbindungen (Stützenschuhe, Ankerbolzen usw.) vor äußeren Einflüssen schützt, stand im Fokus der Untersuchungen. Es konnte gezeigt werden, dass der Kalkmörtel nach Nutzungsende mittels Hochdruckstrahler entfernt und die Stahlbetonbauteile schadenfrei demontiert werden konnten [KF21 S. 86].

Gesteckte Dornverbindungen oder Balkenschuhe stellen weitere lösbare, dafür jedoch statisch weniger leistungsstarke Verbindungsmethoden dar. Entscheidend für die Realisierbarkeit von lösbaren Verbindungen ist die Funktion des Bauteils und die damit einhergehenden Anforderungen, z.B. ob eine Verbindung biegesteif ausgeführt werden muss. Lösbare Verbindungen sind im Holzbau bereits gängige Praxis, wobei Akteure der Baubranche sich sowohl von traditionellen, zimmermannsmäßigen Verbindungsmethoden der Vergangenheit inspirieren lassen oder von einer Vielzahl innovativer, ingenieurmäßiger Produkte der Bauindustrie bedienen. Bauteile können dabei monomaterielle (Brettstapelholz, Brettsperrholz usw.) oder heterogene Materialaufbauten (Holzbalkendecken, Holzrahmenbau usw.) aufweisen. Ausschlaggebend für die Trennbarkeit und Wiederverwendbarkeit der Einzelbestandteile ist die Fügung und Behandlung der einzelnen Schichten. Bei den Verbindungsmethoden ist insbesondere auf die Vermeidung einer chemischen Belastung von Bauteilen durch Lacke oder Leime zu achten. Mechanische Verbindungen mittels Metallschrauben sind grundsätzlich kreislauffähig und erlauben eine einfache Anpassung und Reparatur von Bauteilen. Der Einsatz monomaterieller Verbindungen (Holzdübel, Holznägeln usw.) hingegen vereinfacht die Weiterverarbeitung von Bauteilen nach Nutzungsende deutlich [HW23 S. 133].

Reversible Fügetechniken stellen eine Grundvoraussetzung für die Wiederverwendung von Bauteilen dar. Durch die Wahl eines einfachen, vielleicht sogar monomateriellen Bauteilaufbaus, lässt sich das Kreislaufpotenzial optimieren, in dem der Rückbau und der damit verbundene Aufwand vereinfacht wird. Hierbei kann eine Verbesserung der Wiederverwendbarkeit eines Bausystems und seiner Bestandteile erreicht werden. Entsprechend des Leitfadens „Einfach Bauen“, welcher unter Leitung der TU München (Lehrstuhl für Entwerfen und Konstruieren, Prof. Florian Nagler) entwickelt wurde, lassen sich folgende Anforderungen für Gebäude und ihre Bausysteme ableiten:

Reduzierung der Gebäudekomplexität durch einen energieoptimierten Entwurfsansatz; Verwendung nachwachsender oder mineralischer Baustoffe; Einsatz robuster, langlebiger Baumaterialien und Bauteilaufbauten; Minimierung der Bauteilschichten; Trennung technischer Systeme und bauhandwerkliche Gewerke; Reduzierung der Gebäudetechnik auf ein Minimum [NAG22 S. 16]. Dauerhafte Konstruktionen können reversibel geplant werden und somit flexibel auf zukünftige Veränderungen reagieren. Die Standardisierung, als Werkzeug zu Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bei der Erstellung eines Gebäudes

hat jedoch einen entscheidenden Einfluss auf die Wiederverwendung von Gebäuden und seiner Bauteile. Je spezieller ein Bauteil auf eine bestimmte Funktion ausgelegt ist, desto schwieriger wird der Wiedereinsatz. Entscheidend für den adaptiven Wiedereinsatz von Bauteilen sind die Ausrichtung, die Dimensionen, die Fügepunkte oder statischen und bauphysikalische Limitierungen eines Bauteils.

10.2.2.2 Anforderungen an die konzeptionelle Entwicklung einer kreislaufgerechten Sekundärstruktur

Moderne Bausysteme können offen oder geschlossen ausgebildet werden. Geschlossene Systeme werden aus einer Hand geliefert, offene Systeme hingegen erlaubt einen flexiblen Einsatz und die Kombination verschiedener vorgefertigter Elemente. Eine Kombination aus geschlossenen und offenen Teilsystemen ist möglich [SD08 S. 43].

Innerhalb des Forschungsprojekts wird die Entwicklung eines geschlossenen Systems für die Primärstruktur fokussiert. Die Sekundärstruktur wird als offenes System konzeptionell betrachtet. Einzeln betrachtet ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die kreislaufgerechte Ausführung der Teilsysteme der Sekundärstruktur. Ziel ist es die Bauteilaufbauten einfach zu halten, die Bauteilschichten zu reduzieren und den Aufwand für den Rückbau durch die Wahl der lösbaren Verbindungsmittel zu minimieren. Hierdurch sollen Austauschbarkeit und Reparatur relevanter Bauteile während der Nutzungsphase eines Gebäudes optimiert werden ohne die Lebensdauer des Gesamtsystems zu verschlechtern [HW23 S. 121]. Eine Trennung der Baukonstruktion von der Gebäudetechnik wird vorausgesetzt. Leicht auffindbare Revisionsöffnungen oder offene Leitungsführung können Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten deutlich erleichtern. Durch die Anordnung der Technikräume und Hauptleitungen in öffentlich Bereichen, kann die Zugänglichkeit optimiert werden. Das Projekt „Circle House“ verfolgt den Ansatz die Leitungen in den offenen Treppenhäusern zu verorten, wodurch das technische Fachpersonal nicht auf die Nutzenden angewiesen ist und Reparaturarbeiten effizienter ausgeführt werden können [GH18 S. 81].

Kreislaufgerechtes Bauen stellt für Planende, Ausführende und Nutzende eine große Herausforderung dar. Diese Herausforderung besteht in der kritischen Hinterfragung der gängigen Baupraktiken sowie der aktuellen Vorstellung von Ästhetik in der Architektur.

10.3 DIGITAL

10.3.1 Prozessebene und Planungswerkzeuge für die Vorbereitung von effizienten Fertigungsprozessen für vielseitige, adaptive Bausysteme

10.3.1.1 Stand der Technik regelbasierter parametrischer Softwaretechniken

Parametrische Planungsmethoden basieren auf einer Konstruktionsform, in der durch Parameter Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen verschiedenen (Modell-)Elementen gebildet/modelliert werden. Sobald eine Konstruktionsänderung vorgenommen wird, aktualisiert sich das (Gebäude-)Modell automatisch, während die etablierten Beziehungen zwischen den Komponenten beibehalten werden. Auf dieser Grundlage kann eine hohe gestalterische Varianz und eine gleichzeitige Effizienz in der Planungsumsetzung erreicht werden. Als Parameter werden hier Grenzwerte, wie z.B. Gebäudekennwerte, Grundstücks- und Umweltfaktoren bestimmt.

Trotz gleichbleibender komplexer Zusammenhänge um eine Gebäudeentwicklung findet so eine Vereinfachung des Gesamtprozesses statt, der zu höherer Effizienz und damit Produktivität im Bauen führen kann. Die Erstellung von parametrischen Gebäudemodellen findet in der Praxis in der Regel über CAD-Programme mit funktional spezifischen Erweiterungen statt, die zum einen über Script-Funktionen mittels einfacher oder komplexer Programmier-Sprache angewendet werden. Dem gegenüber steht die visuelle Programmierung, z.B. durch die Software /das Software-Plug-In Grasshopper, wodurch grafisch vordefinierte Komponenten miteinander verknüpft und eine logische Konstruktionsabfolge generiert wird. Ändert man innerhalb dieser Vernetzung einen Punkt, verändern sich alle relevanten Verknüpfungen des Gesamtmodells mit.

Die Anwendungsmöglichkeiten des parametrischen Planens sind vielfältig einsetzbar. So sind z.B. Konstruktionsvarianten für komplexe geometrische Fassaden generierbar, gleichzeitig jedoch auch Fertigungsdaten für die Produktion von Bauteilen mittels CNC-Maschine ableitbar. Durch diesen Ansatz kann die generative Designprozesskette um eine fachplanerische Analyse erweitert werden, wodurch der Entwurfsprozess feedbackorientiert verbessert wird.

Herkömmliche BIM-Software wie z.B. Revit, ArchiCAD, AutoDesk BIM 360 ermöglichen es, geometrische Bauteilinformationen mit alphanumerischen Bauteilinformationen zu verknüpfen, darzustellen und zu verwalten. Diese Art der individuellen Objektverwaltung genügt für eine rein visuelle Darstellung des Bauteils, ist jedoch für die Weiterbearbeitung und anschließende Produktion unzureichend.

Um eine lückenlos-automatisierte Prozesskette vom Entwurf bis zur Fertigung zu gewährleisten, sind die Ausarbeitung von konstruktiven Anschlussdetails und die Integration von Haustechnik im Entwurfsstadium unabdingbar. Aktuelle BIM-Software schafft es nicht, diese notwendigen Anschlüsse in Form assoziativer Verknüpfungen zu generieren und diese darüber hinaus in die automatisierte Fertigung zu übertragen. Um eine Rückkopplung des Planungsfortschritts über das anpassbare digitale Modell zu gewährleisten, sind etablierte Beziehungen zu benachbarten Bauteilen entscheidend, da nur so die tatsächliche Geometrie des fertigen Bauteils generiert werden kann. Die derzeitige Praxis hinkt hier noch hinterher und führt dazu, dass eine aufwändige Detailausarbeitung notwendig ist, die sich bei Entwurfsänderung als redundanter, kostspieliger Anpassungsprozess im späteren Projektverlauf auswirkt.

Die Abbildung des Stands der Technik findet im Folgenden anhand von zwei Software-Entwicklungen über die Flächenbeschreibungsfunktionen? Mesh und Brep (Boundary Representation) statt:

Geometrische Repräsentation von Flächen und Volumina erfolgt in den meisten CAD-Programmen durch Meshes und Breps. Während beim Mesh nur gerade Kanten und einfach planare Flächen möglich sind, kann ein Brep auch Kurven und Freiformflächen abbilden. Beide Ansätze sind jedoch auf Flächenbeschreibungen limitiert und enthalten somit keine Raumdefinitionen, welche im architektonischen Kontext unentbehrlich sind. Erste Forschungsansätze zur Verwendung von Meshes als architektonische Raumzellen im Kontext topologischer Gebäudeverwaltung wurden bereits im Forschungsfeld untersucht, sind jedoch aufgrund von Entwicklungsstopps, überholter Softwareanforderungen und limitierter Interoperabilität nur unzureichend verwendbar.

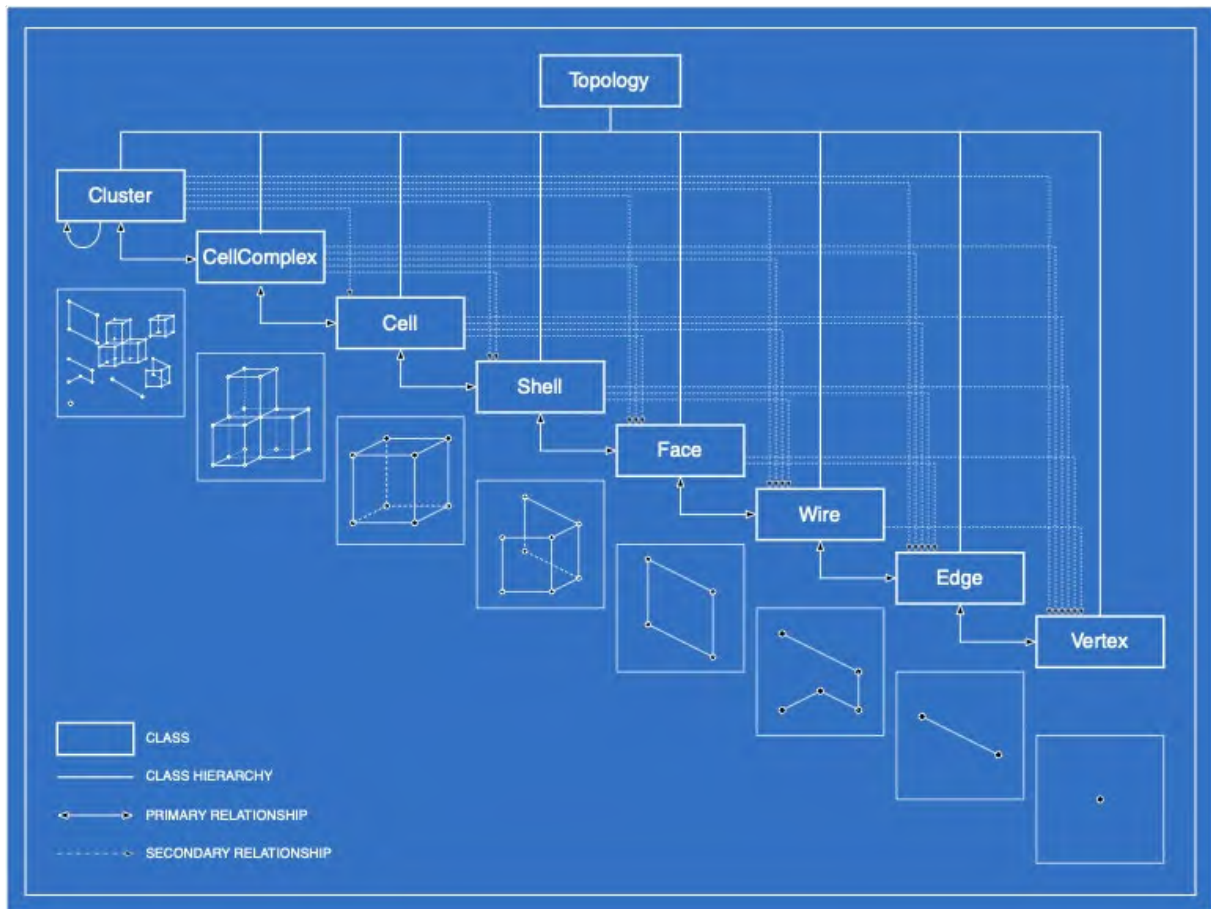


Abbildung 10-2 Darstellung der topologischen Abhängigkeiten

10.3.2 Produktions- und Automatisierungsprozesse im Hinblick auf die Fertigung eines adaptiven-assoziativen, hybriden Bausystems

Im Rahmen des Projekts wird die Begrifflichkeit der hybriden Konstruktion eingeführt. Dabei handelt es sich um die Differenzierung zwischen ein- und zweidimensionalen Bauteilen und dreidimensionalen Raumeinheiten, welche je nach Bedarf in der Werkstatt oder auf der Baustelle gefügt werden können. Bei der Betrachtung der Produktionsprozesse innerhalb einer Werkhalle muss daher in Bauteilproduktions- und Montageprozesse unterschieden werden.

Das adaptiv-assoziative, hybride Bausystem kombiniert sowohl verschiedene Bauweisen als auch Materialien. Für die Entwicklung eines solchen Systems und die Optimierung der Produktions- und Automatisierungsprozesse ist es wichtig zu verstehen, was die verschiedenen bauweise-, bauteil- und materialbezogenen Besonderheiten sind, wie sie sich unterscheiden und wie sie sich in einem zusammenhängenden System vereinen lassen. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Produktion und Montage von vorgefertigten Bauteilen und Raummodulen. Hier gilt es insbesondere bei dem Prozess, nicht nur die Fertigung zu optimieren, sondern auch den Verlade- und Transportprozess mit einzubeziehen.

In den folgenden Abschnitten gehen wir separat auf die genannten Aspekte der Produktion ein, um den aktuellen Stand der Technik zu definieren, Hemmschwellen zu erkennen und mögliche Synergien zu identifizieren. Im Anschluss gehen wir auf die Automatisierung in der Baubranche ein und zeigen Optimierungspotenziale auf.

Ein entscheidender Vorteil von serieller Vorfertigung ist die Produktion von Bauteilen unter witterungsunabhängigen Bedingungen, wie beispielsweise in Produktionshallen. Ziel der seriellen Fertigung ist die wirtschaftliche, störungsfreie Produktion und Montage von Bauteilen. Diese Art der Fertigung bietet neben der höheren Prozesssicherheit eine verlässliche Qualitätskontrolle und gestaltet sich außerdem, durch die technologische Unterstützung von Maschinen und Anlagen, als arbeitserleichternd für Arbeitskräfte im Vergleich zur konventionellen Fertigung und Montage auf der Baustelle.

Bei der Produktion von Raummodulen liegt der Fokus klar auf der Produktion mit hohem Vorfertigungsgrad. Ob alle Fertigungsprozesse innerhalb einer Werkshalle stattfinden, hängt von der Komplexität und Varianz der Fertigungs- und Montageprozesse und den räumlichen und technischen Kapazitäten eines Unternehmens ab. Bei sehr komplexen Fertigungsabläufen mit vielen einzelnen Stationen kann es sinnvoll bzw. wirtschaftlicher sein die Produktion einzelner Teile (an Subunternehmen oder wohin?) auszulagern. Komplexe Produktionsketten können zu einem erhöhten Lagerbedarf führen, was wiederum ein Grund für die Auslagerung gewisser Produktionsprozesse ist. Nachteil einer Auslagerung solcher Abläufe ist der Verlust der Qualitätskontrolle sowie eine logistische Abhängigkeit von Dritten bei der Lieferung von Komponenten.

Der Automatisierungsgrad des Herstellungsprozesses in der Vorfertigung variiert. Die Produktion eines Bauteils kann, je nach technischer Ausstattung einer Fertigungsstation, mit oder ohne manuelle Leistung stattfinden. Insbesondere in dem Bereich der Automatisierung liegt zukünftig ein großes Potential für eine effizientere Produktion und kann eine Lösung für den bevorstehenden Arbeitskräftemangel in der Baubranche darstellen.

10.3.2.1 Bauteilproduktionsprozesse

Ausgehend von einem Betonmodul ist ein Ziel des Forschungsvorhabens die Verbesserung der Ökobilanz, was u.a. durch die Reduzierung des Betonanteils der Betonmodule erreicht werden soll. Dies wird durch Materialoptimierung, –Reduktion oder –Substitution von Betonbauteilen erreicht. Neben den Produktionsabläufen für vorgefertigte Betonbauteile werden daher partiell Fertigungsstrategien für ein und mehrschichtige Holzbauteile dargestellt. Auf die Betrachtung von Verbundbaustoffen und Verbundbauteilen wie Holz-Beton-Verbunddecken wird aus Gründen der schlechten Reversibilität verzichtet.

Stahl zeichnet sich durch seine Leistungsfähigkeit, Bauteilpräzision und seinen hohen Vorfertigungsgrad aus und stellt einen der wichtigsten Baustoffe der Bauindustrie dar. Das Herstellen und Formen von Stahlbauteilen ist energieintensiv. Die Stahlindustrie ist für ca. 30% der industriellen Emissionen verantwortlich und sieht den Einsatz von Wasserstoff als unerlässlichen Beitrag zur Produktion von „grünem Stahl“ und der Einhaltung der Ziele des Pariser Klimaabkommens. Erste ökobilanzielle Vergleiche der Primärstruktur haben diese Aussage bestätigt, weshalb Stahl als Primärstruktur ausgeschlossen wurde und der Stahlanteil im Rahmen des Vorhabens so gering wie möglich gehalten werden soll. Lediglich Stahlbauteile wie Stützenschuhe, Wandschuhe, Ankerbolzen oder Bewehrungsstahl kommen zum Einsatz (Wirtschaftsvereinigung Stahl 2021).

Je nach Bauteilanforderung, räumlicher Kapazität sowie der finanziellen und technischen Möglichkeiten des Herstellers kann die Produktion der Einzelbauteile intern in Eigenleistung geschehen oder an externe Hersteller vergeben werden. Die internen Fertigungsprozesse können mit entsprechenden Fertigungsmaschinen einen hohen Automatisierungsgrad aufweisen oder stark handwerklich geprägt sein.

Betonfertigteile

Die Herstellung von Betonfertigteilen besteht im Wesentlichen aus den Arbeitsschritten Schalen, Bewehren, Betonieren, Aushärten, Ausschalen und der Qualitätskontrolle. Die logistischen Arbeitsschritte (Anliefern, Sortieren, Lagern usw.) werden als Teil der Prozesskette nicht berücksichtigt.

Ob vor Ort auf der Baustelle oder in der Werkhalle produziert, die Schalentechnik spielt bei Bauteilen aus Beton eine entscheidende Rolle. Die Schalung hat eine formgebende Funktion und muss so dimensioniert sein, dass der Druck des eingebrachten Betons während des Aushärtens aufgenommen werden kann. Die Schalung besteht neben der Schalhaut (Holz oder Stahl) aus einer Vielzahl von Komponenten. In der Vorfertigung kommen, je nach Bauteilart (Stütze, Träger, Decke usw.), verschiedene Fertigungsanlagen zum Einsatz. Lineare Bauteile (Stützen, Träger) werden meist liegend in Einzel- oder Zwillingschalungen hergestellt und bestehen aus Schalungsrost, höhenverstellbaren (oder fixen) Böden, Rahmenelementen, einer Schalhaut und einer Seitenschalung. Über die Verstellbarkeit (mechanisch oder hydraulisch) der einzelnen Bestandteile werden verschiedene Bauteildimensionen ermöglicht. Die Einfüllseite der Bauteile muss nachträglich bearbeitet werden, da diese keine schalungsglatte Oberfläche besitzt [SB18 S. 291–292].

Die Komplexität der Bauteilgeometrie hat unmittelbaren Einfluss auf die Kosten und somit die Wirtschaftlichkeit der Produktion, sowohl auf die Einzelkomponenten als auch das Gesamtbauwerk. Aus

diesem Grund weisen Betonbauteile, insbesondere vorgefertigte Bauteile, meist geometrisch einfache Formen auf. Durch die Standardisierung von Bauteilen, die Digitalisierung der Planungs- und der Automatisierung der Produktionsprozesse kann die Effizienz gesteigert werden, wodurch auch komplexere Geometrien wirtschaftlich umgesetzt werden können. Für komplexe Schalungen kann die CAM-Methode eingesetzt werden. Nuten können bei der Wahl einer Stahlschalung mittels Magneten einfach in die Schalvorrichtung integriert, Konsolen durch das oben aufbetonieren hergestellt oder nachträglich mit entsprechenden Einbauteilen anbetoniert werden. Die liegende Herstellung erfordert viel Fläche, weshalb die stehende Produktion von Stützen eine Alternative darstellen könnte [SB18 S. 291].

Für die Fertigung von flächigen Bauteilen (Wände, Decken) werden feststehende Schalungstische oder Kipptische verwendet. Feststehende Schalungstische wurden mittlerweile überwiegend durch Kipptische abgelöst, da das Abheben bzw. Lösen der Fertigteile von der Schalhaut hierdurch deutlich vereinfacht wird. Die Grundfläche und Seitenschalungen der Schalungstische sind meist fest montiert und aus Holz oder Stahl. Durch die Einbringung zusätzlicher Seitenschalungen können Bauteile mit unterschiedlichen Dimensionen angefertigt werden. Die Abmessungen von Schalungstischen variieren zwischen 10 bis 15m Länge und 3,5 bis 5m Breite [SB18 S. 294].

Batterieschalungen, also stehende Schalungen, kommen aufgrund begrenzter Herstellungsmöglichkeiten nur selten zum Einsatz. Vorteile der Batterieschalung sind der geringere Platzbedarf sowie die schalungsglatten Oberflächen. Bei standardisierten Bauteilen kann die Batterieschalung sowohl für stabförmige als auch flächige Bauteile aus Beton eine interessante Alternative darstellen um in der Fertigungshalle Platz zu sparen [SB18 S. 295].

Nach Steinle sind die Bewehrungsarbeiten ein wesentlicher Bestandteil der Betonierarbeiten und machen etwa 30% der Gesamtkosten von Betonfertigteilen aus [SB18 S. 310]. Bewehrungskörbe oder -matten aus kalt- oder warmgewalztem Betonstahl werden in der Regel extern produziert und nachträglich in die Schalung gehoben. Bei flächigen Bauteilen wird die Bewehrung häufig direkt verlegt. Vollautomatische Schneid-, Schweiß und Biegemaschinen kommen in Fertigteilwerken aufgrund der hohen Investitionskosten nur selten zum Einsatz. Automatische Richt-, Abschnideanlagen und Biegeautomaten werden hingegen öfter verwendet [SB18 310-215]. Neben dem klassischen Betonstahl können auch andere Bewehrungsmaterialien zum Einsatz, wodurch in einigen Fällen auf den Betonstahl verzichtet werden kann [HAN15 S. 18–19]. Stahlbauteile (Stützenschuh, Ankerbolzen etc.) und Einbauteile können als marktreife Produkte eingekauft oder als Sonderbauteile speziell für ein Bausystem entwickelt und an externe Hersteller vergeben werden. Die Stahlbauteile werden anschließend in die Schalung eingebaut mechanisch mit der Bewehrung verbunden und einbetoniert.

Der Beton wird bei der Vorfertigung von Betonbauteilen üblicherweise direkt vom Transportfahrzeug, mittels Betonkübel oder Betonpumpe in die Schalung eingebracht [HAN15 S. 36]. Alternative Betonierprozesse wie das Betonieren mit Spritzbeton, Stampfbeton oder Schleuderbeton finden in der Regel keine Anwendung. Aufgrund von anderen Anforderungen an den Beton bei der Herstellung im Fertigteilwerk, wird im Fertigteil mit speziell entwickeltem Beton gearbeitet [SB18 S. 300–301].

Vorgefertigte, flächige Holzbauteile

Im Holzbau beginnt die Produktionskette mit der Rohstoffgewinnung und der Verarbeitung des Holzes zu verwertbaren Bauteilen in Sägewerken. Im Anschluss findet eine Weiterverarbeitung zu verschiedenen Holzprodukten statt, welche sich in ihren Eigenschaften, Einsatzbereichen und Produktionsweisen unterscheiden. In der raummodularen Bauweise werden sowohl lineare, flächige Elemente eingesetzt. Projektrelevant sind nur die flächigen Bauteile (Decken- / Wandelemente), die in der Fertigungshalle verbaut oder auf der Baustelle zwischen zwei Modulen montiert werden.

Flächige Elemente stellen in der raummodularen Bauweise mit Holz häufig eingesetzte Bauteile dar und sind von einem hohen Vorfertigungsgrad geprägt. Grundsätzlich kann zwischen massiven Holzwerkstoffen, stabförmigen und stab- und plattenförmigen Werkstoffen unterscheiden [KK24 S. 39].

Brettsperrholz ist ein Beispiel für einen massiven Holzwerkstoff und wird sowohl für Decken- und Wandelemente eingesetzt. Brettsperrholzelemente bestehen in der Regel aus kreuzweise verleimten Brettern. Eine leimfreie, ökologische Alternative stellt die Verbindung der Brettlagen mittels Hartholzdübeln dar. Die Bauteile werden meistens extern auf Grundlage von CAM-Dateien vergeben, produziert und in

der Fertigungshalle montiert. Alle erforderlichen Öffnungen, Durchbrüche oder Fräsungen werden mittels CNC-Abbundmaschine hergestellt, was die Montage in der Werkshalle noch effizienter gestaltet [KK24 S. 54].

Auch Brettstapelelemente (stabförmiger Holzwerkstoff) werden für Decken- und Wandelemente eingesetzt und extern vergeben. Die einzelnen Holzlamellen werden mittels Hartholzdübeln verbunden und können so, ähnlich wie Brettsperrholzelemente, als Vollholzelement verarbeitet und recycelt werden. Im Gegensatz zu Brettsperrholz kann der Einsatz von Sturzbalken für Öffnungen erforderlich sein [KK24 S. 50].

Stab- und plattenförmige Holzwerkstoffe, wie Tafelbauelemente, Kasten- oder Rippendecken, werden noch handwerklich oder in Teilen schon automatisiert mittels Abbundanlage und halbautomatischer Riegelwerkstation gefertigt. Das Maß an Automatisierung hängt von der Größe sowie den finanziellen und räumlichen Kapazitäten des Unternehmens ab. In kleinen bis mittleren Unternehmen ist mit einem relativ hohen handwerklichen Anteil zu rechnen, wohingegen bei großen Betrieben eine höhere Effizienz über die Automatisierung implementiert werden kann. Je größer das Unternehmen, desto eher lohnt sich die Investition in Produktionsmaschinen wie in z.B. eine halbautomatische Riegelwerkstation oder Multifunktionsbrücke. Auch die externe Vergabe der Herstellung der Elemente ist denkbar [HK18 S. 54–55].

10.3.2.2 Montageprozesse

Der Montageprozess ist die Fügung der Einzelbauteile (Stütze, Träger, Decke, Wand etc.) zu einem Raummodul. Bei dem angestrebten hybriden Bausystem soll das nach Bedarf entweder in der Werkshalle oder auf der Baustelle erfolgen. Entscheidend hierfür sind die Verbindungselemente zwischen den jeweiligen Einzelbauteilen. Eine Standardisierung der Bauteile und der Verbindung ermöglicht es flexibel zu entscheiden wo die Bauteile tatsächlich montiert werden und vereinfacht den Montageprozess.

Grundsätzlich werden Raummodule in der Werkshalle montiert. Bei der Montage von Raummodulen gibt es unterschiedliche Fertigungsstrategien. Die Linienfertigung, auch Fließfertigung genannt, stellt eine häufig angewandte Fertigungsstrategie dar. Sie ist durch eine Aneinanderreihung der einzelnen Prozessbereiche auf einer Produktionsstraße (Linienförmig; U-Förmig; Kreisförmig) gekennzeichnet. Da die verschiedenen Stationen innerhalb der Prozesskette direkt voneinander abhängig sind, kommt es bei unterschiedlichen Prozesszeiten schnell zu erhöhten Planungsaufwand und gegebenenfalls zu Wartezeiten. Diese Art der Fertigung eignet sich daher für die Produktion von Bauteilen mit berechenbaren und wiederholenden Abläufen [HK22 S. 7–8].

Bei der Zellenfertigung, auch bekannt als Gruppen-, Inselfertigung oder stationäre Fertigung, handelt es sich um einen Fertigungsprozess, bei dem Maschinen und Arbeitsplätze an einem Ort gebündelt werden. Vorteil dieses Fertigungsprinzips ist die Loslösung von allen vor- und nachgelagerten Produktionsprozessen. So kann an mehreren Stationen gleichzeitig und in unterschiedlichem Tempo gearbeitet werden, ohne dass Wartezeiten entstehen [HK22 S. 7].

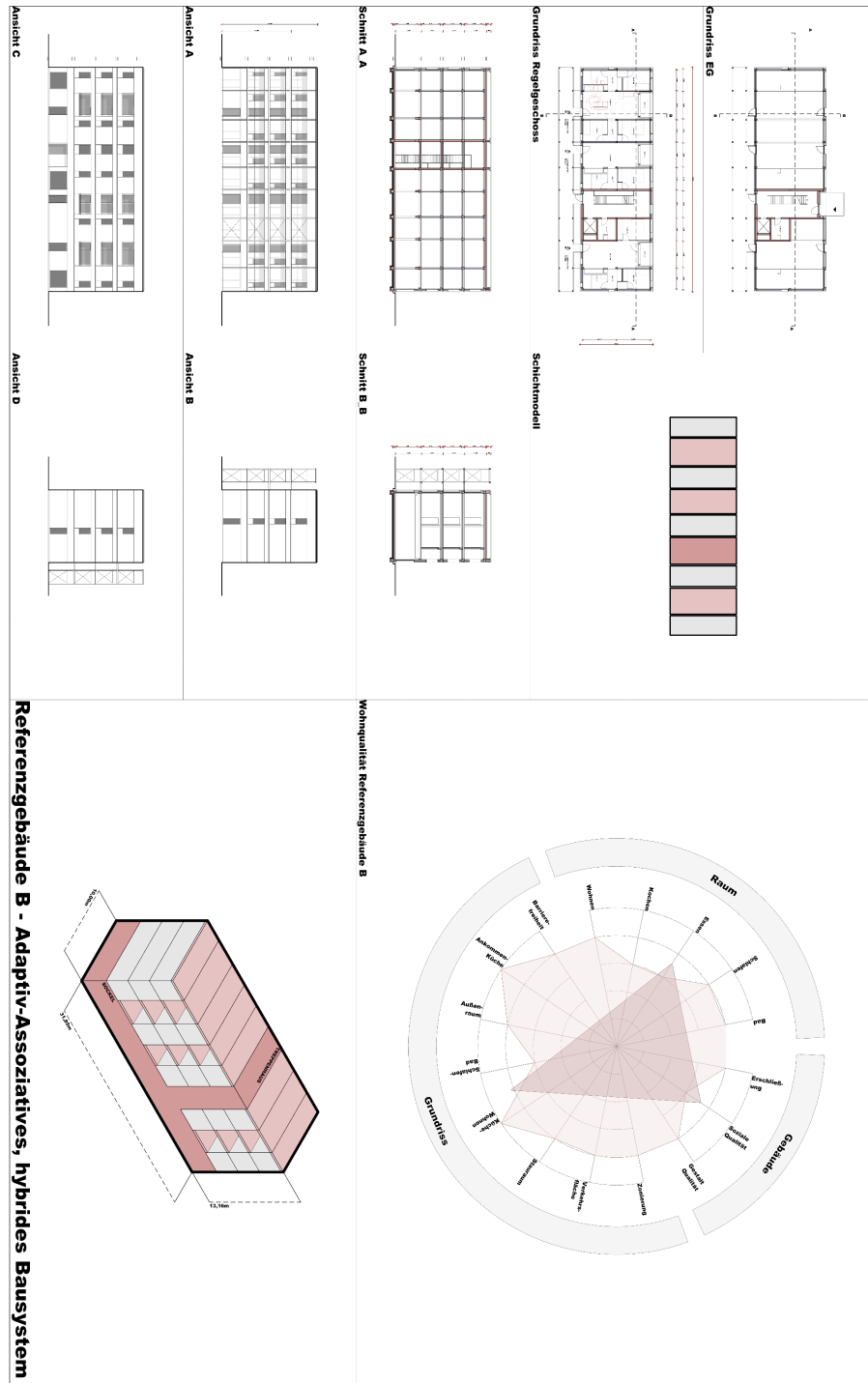
Nach der Montage der raumbildenden Bauteile erfolgen typischerweise die restlichen Ausbauarbeiten wie die Installationsarbeiten, die Montage der Fensterelemente, der Trockenbau, die Malerarbeiten, die Bodenarbeiten, die Fliesenarbeiten, der Bodenbelag und die Abschlussinstallation. Im Anschluss an die Fertigstellung des Raummoduls wird das Modul für den Transport vorbereitet und in der Werkshalle gelagert. Für die Lagerung der Einzelbauteile und die Raummodule ist entsprechend viel Platz entweder in der Produktionshalle oder extern in einer Lagerhalle vorzusehen. Um Raummodule und schwere Einzelbauteile zu versetzen ist meist ein Hallenkran erforderlich. Das maximale Bauteilgewicht definiert dabei die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Krans [HK18 S. 57–58].

Beim Raummodulbau verweist eine hybride Bauweise darauf, dass das Gefüge eines Moduls aus Bauteilen/Komponenten mit unterschiedlicher Materialität besteht. Dies kann zur Folge haben, dass der Platzbedarf für die Fertigung der Komponenten innerhalb einer Werkstatt/Fabrik sich deutlich vergrößert. Beispielsweise kann es erforderlich sein, zwei Spanntische vorzuhalten um Wände in Holzrahmenbauweise oder aber auch aus Stahlbeton fertigen zu können. Bei der Produktion von Bauteilen und Raummodulen stellen sowohl strukturelle, baukonstruktive und produktionstechnische Anforderungen begrenzende Faktoren dar, sondern vor allem auch der Transport. Jedes Bauteil oder Modul muss

transportfähig sein. Transportfähigkeit hängt von straßenbaulichen und genehmigungstechnischen Vorgaben ab, welche sich teilweise von Land zu Land unterscheiden. Jeder Transportweg muss auf mögliche Engstellen geprüft werden. Hierdurch können sich projektspezifische Limitierungen ergeben. Bauteile und Raummodule sind entsprechend der maximal möglichen Abmessungen zu planen, welche sowohl von den Produktions- als auch den Transportbedingungen abhängen. Raummodule sollten Längen von 15,00m und eine Gesamttransporthöhe von 4,30m nicht überschreiten. Aus Gründen der Handhabbarkeit und des Transports sollten Raummodule 20to einhalten [HK18 S. 57–58]. Die Abmessungen von Einzelbauteilen welche auf der Baustelle montiert werden sind deutlich weniger limitiert, wodurch höhere Stützen, längere Träger und breitere Deckenfelder transportiert werden können.

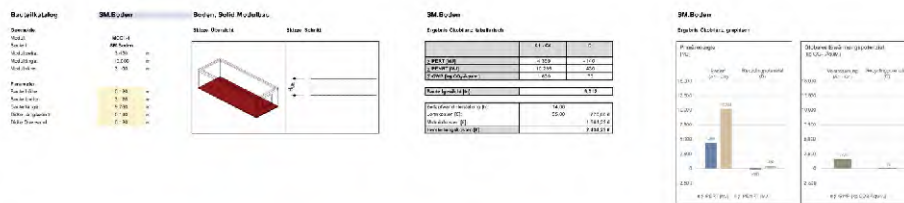
11 Vertiefende Projektdokumentation

11.1 Planunterlagen für das Referenzgebäude C



11.3.1 Auszug aus dem im Forschungsprojekt programmierten Excel-Grundlage zur ökobilanziellen Berechnung am Beispiel des Deckenbauteils

11.3.1 Auszug aus dem im Forschungsprojekt programmierten Excel-Grundlage zur ökobilanziellen Berechnung am Beispiel des Deckenbauteils

[illegible][illegible][illegible][illegible][illegible][illegible]

Local ID	Sampling date	Latitude	Longitude	Water level (m)	Water temp. (°C)	Water salinity (psu)	Water depth (m)	Wind (m/s)	Benthos			
									Number of individuals	Number of species	Number of individuals	Number of species
1	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
2	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
3	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
4	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
5	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
6	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
7	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
8	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
9	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
10	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
11	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
12	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
13	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
14	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
15	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
16	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
17	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
18	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
19	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
20	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
21	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
22	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
23	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
24	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
25	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
26	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
27	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
28	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15
29	2010-01-10	42° 40' N	51° 35' E	1.5	10.5	34.5	0.5	2.5	15	4	20	15

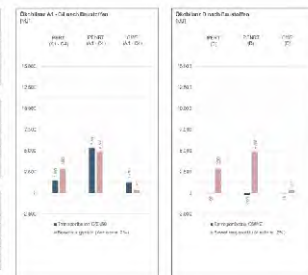
[illegible][illegible][illegible][illegible][illegible]

Figure 2: Effect of the 2007-2008 financial crisis on the number of employees in the manufacturing sector in the UK

Left Chart: Number of employees in the manufacturing sector in the UK

Year	Number of employees
2007	2,000,000
2008	1,800,000
2009	1,600,000
2010	1,500,000
2011	1,400,000
2012	1,300,000
2013	1,200,000
2014	1,100,000
2015	1,000,000
2016	900,000
2017	800,000
2018	700,000
2019	600,000
2020	500,000

Right Chart: Number of employees in the manufacturing sector in the UK, broken down by region

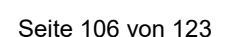
Region	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
North East	100,000	90,000	80,000	70,000	60,000	50,000	40,000	30,000	20,000	10,000	0	0	0	0
North West	200,000	180,000	160,000	140,000	120,000	100,000	80,000	60,000	40,000	20,000	0	0	0	0
Yorkshire and the Humber	300,000	280,000	260,000	240,000	220,000	200,000	180,000	160,000	140,000	120,000	100,000	80,000	60,000	40,000
East of England	400,000	380,000	360,000	340,000	320,000	300,000	280,000	260,000	240,000	220,000	200,000	180,000	160,000	140,000
London	500,000	480,000	460,000	440,000	420,000	400,000	380,000	360,000	340,000	320,000	300,000	280,000	260,000	240,000
South East	600,000	580,000	560,000	540,000	520,000	500,000	480,000	460,000	440,000	420,000	400,000	380,000	360,000	340,000
South West	700,000	680,000	660,000	640,000	620,000	600,000	580,000	560,000	540,000	520,000	500,000	480,000	460,000	440,000

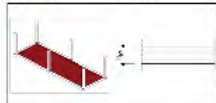
Figure 1: Number of people who did not vote in the 2004 US Presidential election by age group.

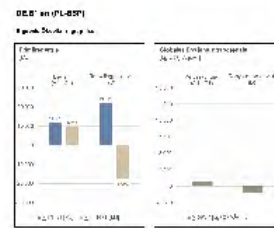
Age Group	Did Not Vote	Voted
18-24	1,400,000	1,600,000
25-34	1,800,000	2,200,000
35-44	2,200,000	2,600,000
45-54	2,000,000	2,400,000
55-64	1,800,000	2,200,000
65+	1,600,000	2,000,000

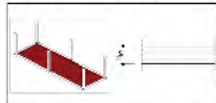
Figure 2: Number of people who did not vote in the 2004 US Presidential election by gender.

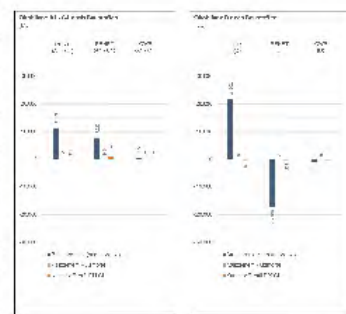
Gender	Did Not Vote	Voted
Male	1,600,000	2,000,000
Female	1,800,000	2,200,000



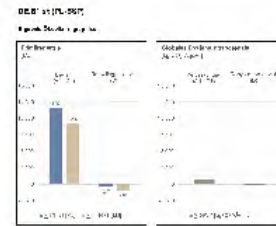
Bauteilbeschreibung		Decke als Platte, Einseitigbeton, wärmt.		CEB-ler (1,55%)	
Zus. Info:	1.000		Einheit: m, mm Skizze: 1:1	Einheit: m, mm Skizze: 1:1	Einheit: m, mm Skizze: 1:1
	1.000				
	1.000				
	1.000				
	1.000				
Zus. Info:	1.000				
	1.000				
	1.000				
	1.000				
	1.000				



Bauteilbeschreibung		Decke als Platte, Einseitigbeton, wärmt.		CEB-ler (1,55%)	
Zus. Info:	1.000		Einheit: m, mm Skizze: 1:1	Einheit: m, mm Skizze: 1:1	Einheit: m, mm Skizze: 1:1
	1.000				
	1.000				
	1.000				
	1.000				
Zus. Info:	1.000				
	1.000				
	1.000				
	1.000				
	1.000				



Bauteilbeschreibung		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		CEB 2.1 (TL-BS)	
Zur Info:	Decke	1000	1000	1000	1000
	Decke	1000	1000	1000	1000
	Decke	1000	1000	1000	1000
	Decke	1000	1000	1000	1000
	Decke	1000	1000	1000	1000
Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.	
Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.	
Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.	
Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.	
Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.	



Bauteilbeschreibung		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		CEB 2.1 (TL-BS)	
Zur Info:	Decke	1000	1000	1000	1000
	Decke	1000	1000	1000	1000
	Decke	1000	1000	1000	1000
	Decke	1000	1000	1000	1000
	Decke	1000	1000	1000	1000
Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.	
Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.	
Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.	
Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.	
Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.		Decke als Platte, Einseitigbetonig, untl.	

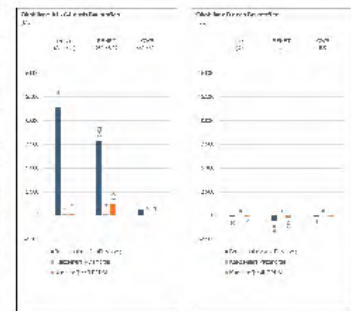


Figure 2: Schematic representation of the experimental design.

Fertilization: A female (w^{1118}/w^{1118}) is crossed with a male ($w^{1118}/w^{1118}; \Delta w^{1118}$). The resulting eggs are categorized by genotype: w^{1118}/w^{1118} , $w^{1118}/w^{1118}; \Delta w^{1118}$, $w^{1118}/w^{1118}; \Delta w^{1118}; \Delta w^{1118}$, and $w^{1118}/w^{1118}; \Delta w^{1118}; \Delta w^{1118}; \Delta w^{1118}$. The number of eggs (n) is shown for each category.

Growth conditions: A female (w^{1118}/w^{1118}) is crossed with a male ($w^{1118}/w^{1118}; \Delta w^{1118}$). The resulting eggs are categorized by genotype: w^{1118}/w^{1118} , $w^{1118}/w^{1118}; \Delta w^{1118}$, $w^{1118}/w^{1118}; \Delta w^{1118}; \Delta w^{1118}$, and $w^{1118}/w^{1118}; \Delta w^{1118}; \Delta w^{1118}; \Delta w^{1118}$. The number of eggs (n) is shown for each category.

[illegible]

Empirical results

Iteration	Time (s)
Proposed	0.0001
Existing	0.0002

Gaussian random process

Iteration	Log-likelihood
Proposed	0.0001
Existing	0.0002

[illegible]

Figure 1(a) shows the number of iterations for the two methods across different values of α . The x-axis represents α with values 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0. The y-axis represents the number of iterations, ranging from 0 to 1500. The legend indicates that the blue bars represent the proposed method and the red bars represent the standard method. The proposed method consistently requires fewer iterations than the standard method across all values of α .

Figure 1(b) shows the number of iterations for the two methods across different values of α . The x-axis represents α with values 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0. The y-axis represents the number of iterations, ranging from 0 to 1500. The legend indicates that the blue bars represent the proposed method and the red bars represent the standard method. The proposed method consistently requires fewer iterations than the standard method across all values of α .

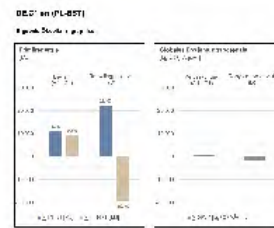
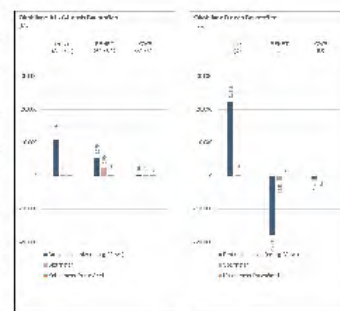
[illegible]

Figure 2: Effect of the 1000-hour requirement on the number of students who passed the CPA exam

Left Chart: Number of students who passed the CPA exam

Year	With 1000-hour requirement	Without 1000-hour requirement
2000	~10,000	~10,000
2001	~10,000	~10,000

Right Chart: Number of students who passed the CPA exam

Year	With 1000-hour requirement	Without 1000-hour requirement
2000	~10,000	~10,000
2001	~10,000	~10,000

[illegible][illegible]

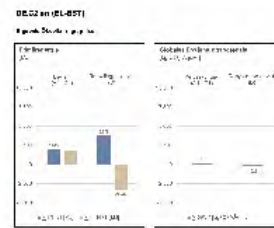
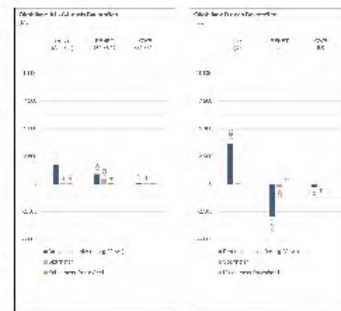
[illegible]

Figure 1: Distribution of the number of children per woman

Left Chart: 1970-1974 Cohort

Number of Children	Proportion
0	~0.05
1	~0.25
2	~0.45
3	~0.20
4	~0.05

Mean = 2.05, SD = 0.75

Right Chart: 1975-1979 Cohort

Number of Children	Proportion
0	~0.05
1	~0.20
2	~0.50
3	~0.20
4	~0.05

Mean = 2.05, SD = 0.65

[illegible]Seite 115 von 123

Figure 2

Left Chart: Estrone (pg/ml)

Condition	Estrone (pg/ml)
100 μM 17β-E2	~0.0005
100 μM 17β-E2 + 100 μM 17β-E2	~0.0015

Right Chart: Estradiol (pg/ml)

Condition	Estradiol (pg/ml)
100 μM 17β-E2	~0.0005
100 μM 17β-E2 + 100 μM 17β-E2	~0.0015

[illegible]

Figure 1

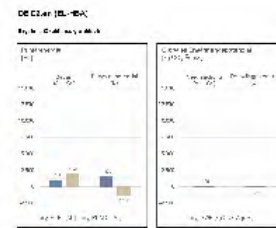
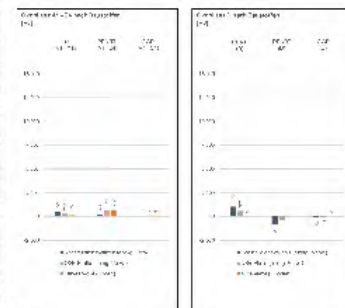
Left Chart: Estradiol Levels (pg/ml)

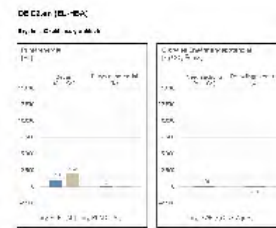
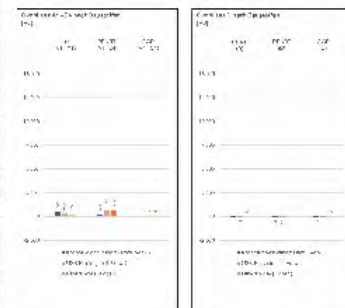
Group	Estradiol (pg/ml)
Control (blue)	~1.5
17β-OH-Estradiol (yellow)	~1.5

Right Chart: Estrone Levels (pg/ml)

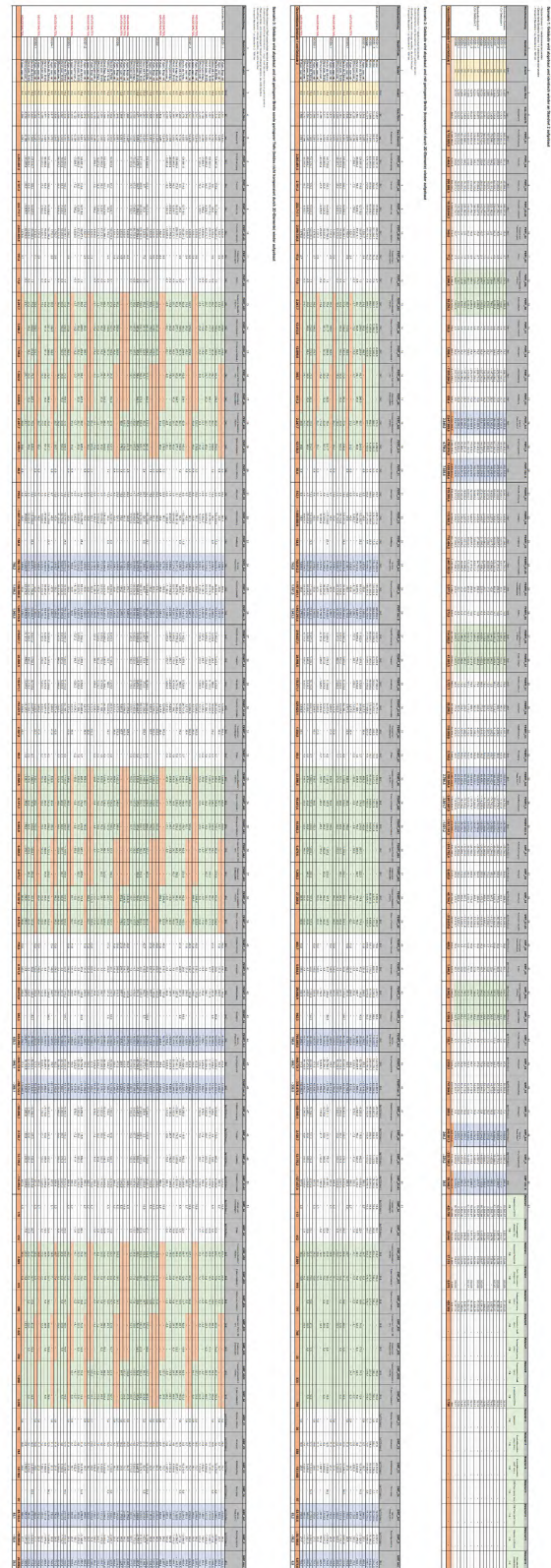
Group	Estrone (pg/ml)
Control (blue)	~1.5
17β-OH-Estradiol (yellow)	~1.5

[illegible]

[illegible]

[illegible]

11.3.4 Vergleich und Ergebnisse am Beispiel des Referenzgebäudes



The image displays three large tables side-by-side, each containing detailed energy performance data for a reference building. The tables are organized into columns representing different energy metrics, building components, and simulation results. The data is presented in a structured, tabular format with multiple rows and columns. The tables are color-coded with orange, green, and blue headers and footers, and the data rows are white. The tables are labeled 'Energieausweis' and 'Energieausweis' at the top. The first table on the left is titled 'Energieausweis' and contains data for the building's energy performance. The second table in the middle is also titled 'Energieausweis' and contains data for the building's energy performance. The third table on the right is titled 'Energieausweis' and contains data for the building's energy performance. The tables are organized into columns representing different energy metrics, building components, and simulation results. The data is presented in a structured, tabular format with multiple rows and columns. The tables are color-coded with orange, green, and blue headers and footers, and the data rows are white. The tables are labeled 'Energieausweis' and 'Energieausweis' at the top.

11.3.5 Berechnungen der Nachnutzungsszenarien (erweiterte Ökobilanz)

Nebenberechnungen zur Ermittlung der Energiebedarfe für Rückbau, Anpassung, Wiederaufbau

Leistung mobiler 40 t Kran 209 kW 5,225 kWh (Annahme) | Quelle: Datenblatt Liebherr Mobilkran LTM 1030-2.1

Annahme: Modul heben, absetzen, platzieren -> 0,75 h (Annahme)

Annahme: Element heben, absetzen, platzieren -> 0,25 h (Annahme)

daraus folgt Strombedarf pro Modul	2,81 kWh / t*Modul	9,405 MJ / t*Modul
daraus folgt Strombedarf pro Element	1,31 kWh / t*Element	4,7025 MJ / t*Element

Strombedarf Laufkatze, 20 t: 1,25 kW 0,063 kWh | Quelle: Recherche in verschiedenen Datenblättern und Mittelwertbildung

Annahme: Element heben, absetzen, platzieren -> 0,50 h (Annahme)

daraus folgt Strombedarf pro Element	0,63 kWh / t*Modul	2,25 MJ / t*Element
--------------------------------------	--------------------	---------------------

Leistungsaufnahme Formatkreissäge 7,97 kW

Annahme: Zuschnitt je Fertigdecke / Wand 0,05 h (Annahme) | Quelle: Datenblatt Casadei Xenia 70 / 32 A

daraus folgt Strombedarf pro Element	0,40 kWh	1,4346 MJ / Element
--------------------------------------	----------	---------------------

Zusätzlicher Demontageaufwand	kW	s/m	h/m	kWh/m	kWh	MJ
Stb.-Trägerverbindung	1,6	600	0,167	0,267	0,267	0,960
Decke	1,6	60	0,017	0,027	0,720	2,592
Stütze	1,6	60	0,017	0,027	0,027	0,096

Quelle: Datenblatt Scheppach 1600 W Abbruchhammer

Umrechnung kWh in MJ 3,6