

Institut für Massivbau und
Baustofftechnologie (IMB)
Abteilung Massivbau

KIT Stahl- und Leichtbau
Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine (VAKA)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Abschlussbericht

**Konzept für die Wiederverwendung von
Stahlbetonteilen mit stahlbaubasierten
Anschlüssen (RECON)**

von

Ben Stöhr, M.Sc. (IMB)
Jakob Boretzki, M.Sc. (VAKA)
Timo Kozlevcar, B.Sc. (VAKA)
Dr.-Ing. Matthias Albiez (VAKA)
Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer (VAKA)
Prof. Dr.-Ing. Alexander Stark (IMB)

Mai 2025, Karlsruhe

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Methodisches Vorgehen bei der Bearbeitung des Projektes.....	2
Abbildung 2-1: Produktprogramm (in Anlehnung an [KrGe18]) und -architektur (in Anlehnung an [FeGr13])	3
Abbildung 2-2: Potenziale der Modularität in den einzelnen Produktlebensphasen [Blee11].....	5
Abbildung 2-3: Generisches Vorgehen der Modularisierung [Lind16].....	6
Abbildung 2-4: Übersicht zu Modularisierungsstrategien [Rieg12]	7
Abbildung 2-5: Konzeptionierung der Tragstruktur des Baukastensystems	8
Abbildung 3-1: Wiederverwendung von Stahlbetonteilen in Europa von 1967 bis 2023 [KüFi24].....	11
Abbildung 3-2: Verfahren zur Bestandsanalyse nach [DeBF22].....	12
Abbildung 3-3: Entscheidungsstufen [MHAI08] in Anlehnung an [Mett95].....	13
Abbildung 3-4: Übersicht zur standardisierten Prozesskette im Leitfaden.....	15
Abbildung 4-1: Positionspläne des Referenzgebäudes (links oben: Obergeschoss; rechts oben: Erdgeschoss; links unten: Schnitt A:A; rechts unten: Schnitt B:B) [Lohm04].....	20
Abbildung 4-2: Skizze des Tragwerks im Re-Use-Gebäude.....	21
Abbildung 4-3: Mit Aussteifungsdiagonale versehener Stahlbeton-Probekörper [MLWT15]	22
Abbildung 4-4: Ausgewählte, befestigungstechnische Lösungen (a) Schwerlastanker, b) Hinterschnittanker, c): eingemörtelter Anker mit Innengewinde, d) eingemörtelter Bewehrungsanker mit aufgeschweißtem Gewinde; Bild a), c), d) [Stah], Bild b) [Deut].....	23
Abbildung 4-5: Anschluss von Riegel an Stütze mit aufliegendem Durchlaufträger durch Konsole.....	25
Abbildung 4-6: Biegesteife Konstruktionslösung für den Anschluss zwischen Riegel und Stütze, dargestellt als Explosionsansicht, und Rückansicht des Stahlbauteils.....	25
Abbildung 4-7: Anschlusslösung mit Stahlwinkeln für die Anschlussdetails Wand-Riegel und Wand-Stütze.....	26
Abbildung 4-8: Biegesteife Konstruktionslösung für den Stoß Riegel-Riegel bzw. Stütze-Stütze.....	27

Abbildung 5-1: Lebenszyklusphasen eines Produkts gemäß DIN EN ISO 14040; Auszug aus [Umwea].....	30
Abbildung 5-2: Gegenüberstellung der Ökobilanzen: Konventionelle Ortbetonbauweise und Wiederverwendung.....	33
Abbildung 6-1: Übersicht zum Rückbauvorhaben während der Bauwerksbegehung.....	36
Abbildung 6-2: Exemplarische Auszüge aus der Bestandserfassung.....	37
Abbildung 6-3: Eingesetzte Entnahmetechniken sowie beispielhafte Entnahme einer Stütze.....	38
Abbildung 6-4: Schadenspräventive Logistikplanung bei der Dekonstruktion...	39
Abbildung 6-5: Grundlagenermittlung zur Integritätsbewertung am einzelnen rückgebauten Modul.....	40
Abbildung 6-6: Planung des Wiederverwendungsprozess anhand der digitalen Zwillinge.....	40
Abbildung 6-7: Aufbereitung der Stahlbetonbalken durch manuelle Fertigung (On-Site Aufbereitung).....	41
Abbildung 6-8: Montage und Demontage des Demonstrators.....	42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Wichtigste Stärken und Schwächen des Baukastensystems.....	9
Tabelle 3-1: Maßnahmenklassen nach [DeBF22].....	12
Tabelle 4-1: Regelwerke für die Bemessung des Re-Use-Gebäudes	28

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurde ein standardisiertes Konzept zur Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen entwickelt. Damit soll ein Beitrag zur Umsetzung einer zirkulären Bauwirtschaft geleistet werden. Das Ziel bestand darin, ein modulares Baukastensystem zu entwerfen, mit dem rückgebaute Bauteile wiederverwendet werden können. Lösbare stahlbauliche Verbindungen ermöglichen dabei ein kraftschlüssiges Fügen und eine mehrfache Wiederverwendung. Die Bewertung von Rückbauteilen, die Erfassung ihrer Eigenschaften und ihre Aufbereitung wurden in ein einheitliches Vorgehen in Form eines initialen Leitfadens überführt. Mithilfe ökologischer Bewertungen wurde das Potenzial der Bauweise zur Reduzierung von CO₂-Emissionen ermittelt und abschließend anhand eines realen Rückbauvorhabens erprobt.

Mithilfe von Methoden zur Baukastenentwicklung konnte ein Konzept entworfen werden, das eine hohe Flexibilität durch lösbare Schnittstellen bietet. In diesen Ansatz lassen sich unterschiedliche Bauteilarten (Stützen, Decken oder Wände) mit verschiedenen Abmessungen integrieren. Der entwickelte Leitfaden führt strukturiert durch alle Phasen des Wiederverwendungsprozesses, enthält Anforderungen und Hilfestellungen sowie geeignete Methoden zur Eigenschaftserfassung. Die konstruierten stahlbaulichen Anschlussdetails haben sich in der Praxis bewährt und ihre Bemessung ist auf Basis vorhandener Regelwerke möglich. Die ökologische Bewertung des untersuchten Beispiels ergab, dass bei Verwendung des Baukastensystems bis zu zwei Drittel der CO₂-Emissionen im Vergleich zur konventionellen Ortbetonbauweise eingespart werden können. Die Realisierung eines Demonstrators, bei dem rückgebaute Bauteile unter Anwendung des Leitfadens wiederverwendet wurden, demonstriert die technische Machbarkeit und das Potenzial der angestrebten zirkulären Konstruktionsweise.

In zukünftigen Arbeiten sollte die Anschlussbemessung optimiert werden, indem mithilfe experimenteller und numerischer Untersuchungen die zu konservativen Annahmen heutiger Regelwerke überwunden werden. Zudem besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Aufbereitung der Schnittstellen, beispielsweise durch robotergestützte Frästechnologien, die eine höhere Qualität und Wirtschaftlichkeit ermöglichen. Dabei muss eine Optimierung der Aufbereitung unter Berücksichtigung der CO₂-Emissionen im Hinblick auf Logistikprozesse erfolgen. Aufbauend auf den weiteren Erkenntnissen sollte der initiale Leitfaden entsprechend weiterentwickelt und präzisiert werden.

Gefördert durch: Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)

Aktenzeichen: AZ 39080/01

Stöhr, B., Boretzki, J., Kozlevcar, T., Albiez, M., Ummenhofer, T., Stark, A.; Konzept für die Wiederverwendung von Stahlbetonteilen mit stahlbaubasierten Anschlüssen (RECON); Forschungsbericht; Karlsruher Institut für Technologie; 2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	i
Zusammenfassung	iii
Inhaltsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	1
1.2 Methodik und Aufbau des Berichtes	2
2 Modulares Baukastensystem für rückgebaute Stahlbetonbauteile (AP1)	3
2.1 Grundlagen zur Modularisierung	3
2.1.1 Produktgestaltung und Bauweisen	3
2.1.2 Modularität	4
2.1.3 Modularisierungsstrategien	5
2.2 Konzeptionierung und Bewertung eines modularen Baukastensystems mit lösbaren Anschlüssen	7
3 Eigenschaftserfassung und Aufbereitung von Stahlbetonbauteilen für die Wiedergewinnung (AP2)	10
3.1 Übersicht zur Entwicklung der Normungssituation und Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen	10
3.1.1 Entwicklung der Normungssituation	10
3.1.2 Entwicklung der Wiederverwendung	10
3.2 Methodiken zur Bestandsanalyse und Maßnahmenanordnung	11
3.2.1 Ansatz nach Devènes et al.	11
3.2.2 Ansatz nach Gengnagel et al. und Mettke et al.	12
3.2.3 Übertragbarkeit auf die Wiederverwendung in modularen Baukastensystemen	13
3.3 Entwicklung eines initialen Leitfadens und einer standardisierten Prozesskette	14
3.3.1 Zielsetzung und Methodik	14
3.3.2 Vorgehen bei der Modularisierung von Bestandsbauwerken und Wiedergewinnung der rückgebauten Stahlbetonbauteile als lösbare modulare Fertigteile	14
4 Entwicklung von stahlbaulichen Details für das Baukastensystem (AP3)	19
4.1 Referenzbauwerk	19
4.2 Tragwerksanalyse	20
4.3 Anforderungen an die stahlbaulichen Anschlussdetails	22
4.4 Konstruktion verschiedener Ausführungsdetails	24

4.5	Bemessung des Referenzbauwerks in Re-Use-Bauweise	27
4.6	Diskussion von Konstruktions- und Ausführungsempfehlungen	28
5	Ökobilanzielle Bewertung (AP4)	30
5.1	Gebäude in Ortbetonbauweise	31
5.2	Gebäude in Re-Use-Bauweise	32
5.3	Gegenüberstellung der Bauweisen	33
6	Anwendung des Leitfadens und modularen Baukastensystems (AP5)	35
6.1	Zieldefinitionen für den Wiederverwendungsprozess (Schritt 1)	35
6.2	Rückbauvorhaben	35
6.2.1	Integritätserschfassung und Erstklassifizierung der Bestandsgebäudestruktur (Schritt 2)	35
6.2.2	Modulares Baukastensystem für zirkuläre Wiederverwendungen rückgebauter Stahlbetonbauteile (Schritt 3)	38
6.2.3	Dekonstruktionsstrategie zur Modularisierung des Rückbauvorhabens (Schritt 4)	38
6.3	Bauteilumwandlung	39
6.3.1	Wiederverwendungsprozessoptimierung am einzelnen Stahlbetonmodul (Schritt 5)	39
6.3.2	Aufbereitungsstrategie und Datenbankintegration (Schritt 6)	41
6.4	Zirkuläre Nutzungsphasen in Neubauvorhaben (Schritt 7)	42
7	Fazit	43
7.1	Zusammenfassung	43
7.2	Ausblick und weiterer Forschungsbedarf	44
8	Literaturverzeichnis	46
Anhang		50
	Anhang A1 Initialer Leitfaden	50

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Ein Großteil der Abfälle aus dem Bausektor entsteht durch den Abriss bestehender Gebäude. In Deutschland ist dabei Stahlbeton einer der am häufigsten eingesetzten Baustoffe. Für andere Baustoffe existieren bereits etablierte Verwertungsprozesse am Lebenszyklusende, die eine Kreislaufwirtschaft ermöglichen. Beispielsweise werden Stahlbauteile zu ca. 88 % recycelt, indem sie eingeschmolzen und zu neuem Stahl verarbeitet werden sowie weitere 11 % gelangen direkt in die Wiederverwendung [Umwed]. Holzbauteile können, sofern nicht chemisch belastet, energetisch verwertet werden und somit fossile Energieträger ersetzen. Für Stahlbeton hingegen fehlt bislang ein effektives Nutzungskonzept am Ende des Lebenszyklus. Zwar reduzieren Recyclingbetonansätze das Abfallaufkommen, indem gebrochener Beton als Gesteinskörnung wiederverwendet wird, jedoch bleibt die CO₂-Bilanz unverändert. Grund dafür ist der weiterhin notwendige Einsatz großer Zementmengen, der für den größten Teil der Emissionen verantwortlich ist [JBSW04]. Die Wiederverwendung rückgebauter Stahlbetonbauteile kann eine Lösungsmöglichkeit für die beschriebene Problemstellung sein.

Angesichts zunehmender Rohstoffknappheit, hoher globaler CO₂-Emissionen und des wachsenden Rückbauvolumens rückt die Wiederverwendung von Bauteilen aus Stahl und Stahlbeton verstärkt in den Fokus der Forschung (z. B. [Vull24], [DeBF22]) oder [GeHe24]). Allerdings existieren bislang in der Baupraxis und Forschung keine standardisierten Konzepte zur Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft, insbesondere solche, die eine mehrfache Wiederverwendung durch lösbare Verbindungstechniken ermöglichen. Während sich andere Projekte mit der gesamten Wertschöpfungskette, Marktaspekten und baurechtlichen Aspekten befassen (z. B. [Mett95, MHAI08] oder [GeHe24]) soll der Fokus in diesem Projekt auf einen standardisierten Prozessablauf gelegt werden, der die technische Umsetzung des Rückbaus, die Prüfung der Bauteileigenschaften und die Entwicklung geeigneter Verbindungsmethoden für Mehrfachwiederverwendungen berücksichtigt.

Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer standardisierten und praktikablen Methodik zur Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft. Durch den Ansatz einer systematischen Aufbereitung und Nutzung rückgebauter Stahlbetonelemente in modularen Baukastensystemen soll die Grundlage geschaffen werden, um das Abfallaufkommen in der Bauindustrie signifikant zu reduzieren und gleichzeitig große Mengen an CO₂-Emissionen bei der Errichtung neuer Gebäude einzusparen. Kern des Projektansatzes ist der planmäßige, nicht-destruktive Rückbau bestehender Stahlbetonbauteile (z. B. Wände, Decken, Stützen, Träger) mit dem Ziel, diese in standardisierte und wiederverwendbare Bauteile umzuwandeln. Diese sollen anschließend mit geeigneten lösbaren Stahlbauverbindungen ausgestattet und als

modulare Fertigteile in neuen Bauwerken mehrfach wiederverwendet werden können. Zur Umsetzung dieses Vorhabens lassen sich die folgenden vier Hauptziele definieren:

1. Konzeption eines modularen Baukastensystems mit geeigneten stahlbaulichen Details für die Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen;
2. Entwicklung eines Leitfadens und standardisierten Prozessablaufes für die Bewertung, den Rückbau und die Aufbereitung;
3. Bewertung des Emissionsreduzierungspotenzials der angestrebten Bauweise;
4. Anwendung und Validierung des Konzepts an einem realen Vorhaben, um die Praxistauglichkeit zu erproben und Defizite zu identifizieren.

1.2 Methodik und Aufbau des Berichtes

Für das Erreichen der Ziele in diesem Projekt wurden Teilaspekte in mehrere Arbeitspakete aufgeteilt. In der Abbildung 1-1 ist die Methodik zur Erreichung der Projektziele schematisch dargestellt. Der folgende Bericht stellt die Projektergebnisse gemäß der Arbeitspakete (siehe Abbildung 1-1) in fünf Abschnitten dar.

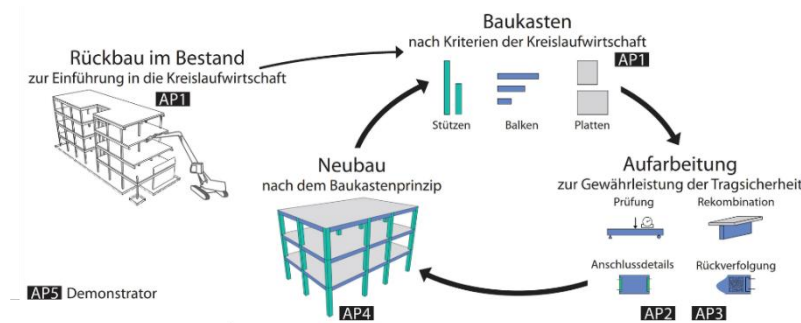


Abbildung 1-1: Methodisches Vorgehen bei der Bearbeitung des Projektes

In Kapitel 2 (Arbeitspaket AP1) werden zunächst die Grundlagen des modularen Bauens zusammengefasst. Auf dieser Grundlage wird die Entwicklung eines modularen Baukastensystems erläutert und bewertet, z. B. hinsichtlich des Rückbaus. In Kapitel 3 (Arbeitspaket AP2) werden im Anschluss bestehende Methoden analysiert, beispielsweise zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften. Auf Basis der Erkenntnisse aus AP1 und AP2 wird ein initialer Leitfaden abgeleitet, der einen standardisierten Prozessablauf vorgibt und spezifische Anforderungen an eine Wiederverwendung mit lösbaren Verbindungen definiert. Der vollständige Leitfaden befindet sich im Anhang A1. In Kapitel 4 wird die Entwicklung lösbarer stahlbaulicher Anschlussdetails (Arbeitspaket AP3) für das Baukastensystem beschrieben. Eine Analyse des Emissionsreduzierungspotenzials und eine Bewertung der Kreislauftauglichkeit der vorgestellten Bauweise (Arbeitspaket AP4) erfolgt im Kapitel 5. Zur Erprobung der erarbeiteten Methoden wurde der Leitfaden zusammen mit dem Baukastensystem an einem realen, beispielhaften Rückbau angewendet und ein Demonstrator (Arbeitspaket AP5) realisiert. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen.

2 Modulares Baukastensystem für rückgebaute Stahlbetonbauteile (AP1)

Modularisierung, als abstrakter Begriff, bezeichnet die zielgerichtete Ausgestaltung der Modularität innerhalb einer Produktstruktur, einschließlich der Definition einzelner Module sowie ihrer Schnittstellen. Hierzu wird die bestehende Produktstruktur unter Berücksichtigung des jeweiligen Betrachtungskontexts, der angestrebten Zielsetzung und relevanter Randbedingungen in geeignete funktionale oder physische Komponenten unterteilt (siehe [KrGe18]). Im Folgenden werden allgemeine theoretische Grundlagen zur Modularisierung erläutert. Im Anschluss sollen diese zum Entwurf eines modularen Baukastensystems angewendet und diskutiert werden.

2.1 Grundlagen zur Modularisierung

2.1.1 Produktgestaltung und Bauweisen

Die Produktgestaltung umfasst ein Produktprogramm, eine Produktstruktur sowie eine Programmarchitektur. Dabei wird die Gesamtheit aller Produkte als Produktprogramm bezeichnet. Dieses Produktprogramm lässt sich hierarchisch untergliedern (siehe Abbildung 2-1 a)). Die Untergliederung erfolgt von allgemeineren bis hin zu spezifischeren Ähnlichkeiten der Produkte, wobei die verschiedenen Produktvarianten die unterste Gliederungsebene bilden. Diese weisen eine starke Ähnlichkeit in Form und Funktion auf, müssen sich aber noch mindestens in einer Eigenschaft unterscheiden [KrGe18].

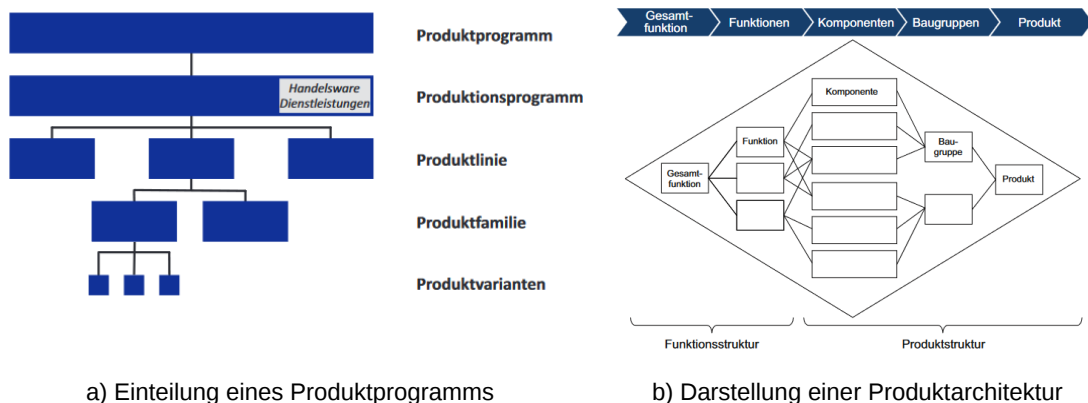


Abbildung 2-1: Produktprogramm (in Anlehnung an [KrGe18]) und -architektur (in Anlehnung an [FeGr13])

Die verschiedenen Produktvarianten lassen sich im Rahmen der Produktentwicklung genauer beschreiben, indem die Produktarchitektur betrachtet wird. Diese zeigt sowohl den physischen Aufbau des Produkts in Baugruppen und Komponenten (Produktstruktur) als auch die funktionale Gliederung in Gesamt- und Teilfunktionen sowie deren Verknüpfungen (siehe Abbildung 2-1 b)). Ein umfassendes Verständnis der

Produktarchitektur unterstützt die gezielte Bildung sinnvoller Module, da diese beispielsweise auf funktionalen Zusammenhängen basieren können [FeGr13].

Im Rahmen der Produktarchitektur definieren verschiedene Bauweisen grundlegende Prinzipien für den Aufbau von Produkten und bilden damit die Basis für die Ausgestaltung der Produktstruktur. Dabei werden sowohl technische als auch wirtschaftliche Zielsetzungen verfolgt, deren Umsetzung durch die spezifische Gestaltung entsprechend der gewählten Bauweise unterstützt wird. Zu den typischen Bauweisen zählen die Integral-, Differential- und Modulbauweise. In der Praxis kommen häufig Mischformen zum Einsatz, um die jeweiligen Vorteile zu kombinieren (siehe [BeGe21]).

Die Modulbauweise basiert auf der Kombination verschiedener Module zur Realisierung unterschiedlicher Produktvarianten. Vielfältige Verwendungsmöglichkeiten der Module ermöglichen nicht nur Kosteneinsparungen, sondern unterstützt auch technische, funktionale und strategische Ziele über den gesamten Produktlebenszyklus hinweg. Module bestehen dabei aus einer oder mehreren eng gekoppelten Komponenten, während die Verbindung zu anderen Modulen möglichst gering ist. Im Gegensatz zur z. B. Differentialbauweise liegt der Fokus auf der vorausschauenden Nutzung der Module über mehrere Produkte hinweg, etwa im Rahmen einer Produktfamilie oder eines gesamten Produktprogramms [KrGe18].

2.1.2 Modularität

In der Literatur finden sich unterschiedliche Definitionen zur Modularität von Produktarchitekturen, da diese vom Anwendungsfall abhängig sind. Die Modularität ist eine abstrakte Eigenschaft der Produktstruktur, die aus physisch und funktionell relativ unabhängigen, logischen Einheiten (Modulen) aufgebaut ist [FeGr13]. Eine Modularität muss dabei nicht vollständig ausgebildet sein, sondern kann in unterschiedlichen Ausprägungsgraden vorliegen. Dabei wird nicht eine größtmögliche Modularität, sondern eine optimierte Ausprägung der Eigenschaften mit möglichst vielen Vorteilen für das Produkt angestrebt [KrGe18]. Hierfür lassen sich beispielsweise nach [KrGe18] die folgenden fünf Eigenschaften der Modularität definieren:

- **Kommunalität:** Die Module können in verschiedenen Produkten über das gesamte Produktprogramm verwendet werden
- **Kombinierbarkeit:** Durch die Kombination der unterschiedlichen Module können verschiedene Produktvarianten erzeugt werden
- **Funktionsbindung:** Jedem Modul werden Funktionen zugeteilt, welche es eigenständig erfüllen kann
- **Schnittstellenstandardisierung:** Die Verbindungen zwischen den Modulen sind standardisiert und ermöglichen eine einfache Kombination
- **Entkopplung:** Die Verbindungen innerhalb eines Moduls sind deutlich stärker ausgeprägt als die Verbindungen zu anderen Modulen

Durch eine sinnvolle, modulare Produktarchitektur können positive Effekte in allen Lebensphasen des Produkts in den angestrebten Zielparametern (z. B. Kosten, Zeit oder

Qualität) erreicht werden. In der Abbildung 2-2 sind nach [Blee11] verschiedene Vorteile in den einzelnen Produktlebensphasen zusammengefasst. Neben den Vorteilen müssen auch die möglichen Risiken und Nachteile modularer Produktstrukturen frühzeitig in der Planung beachtet werden, um die gewünschten Zielgrößen erreichen zu können.

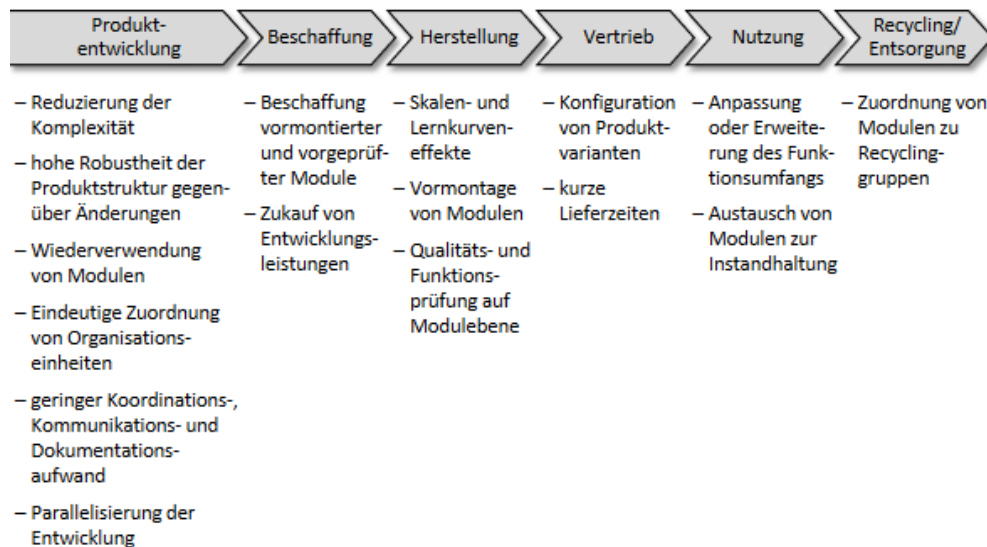


Abbildung 2-2: Potenziale der Modularität in den einzelnen Produktlebensphasen [Blee11]

2.1.3 Modularisierungsstrategien

Modularisierungsstrategien beschreiben Aufbauprinzipien einer modularen Produktstruktur, die auf bereits bestehende Produkte oder Neuentwicklungen angewendet werden können. Das übergeordnete Ziel besteht darin eine hohe Anzahl verschiedener Produktvarianten bei möglichst geringer interner Vielfalt abzubilden. Dabei basiert die modulare Produktstrukturierung auf der Bildung von Modulen, bei denen eng gekoppelte Komponenten zusammengefasst und vom restlichen Produkt entkoppelt werden. Modularisierungsstrategien setzen je nach Zielsetzung unterschiedliche Schwerpunkte, folgen jedoch einem vergleichbaren methodischen Ablauf.

Allgemeines Vorgehen bei der Modularisierung

Das generische Vorgehen bei der Modularisierung einer bestehenden Produktstruktur ist in Abbildung 2-3 schematisch dargestellt. Vorab sollte zusätzlich eine Definition und Priorisierung der zu erreichenden Ziele stattfinden, damit eine klare Aufgabenstellung für die Modularisierung vorliegt (siehe [FeGr13]). Darauf aufbauend ist im ersten Schritt die bestehende Produktstruktur in sinnvolle kleinste Einheiten zu zerlegen. Dazu eignet sich besonders das Konzept der Komponenten, welche aus einem oder mehreren Bauteilen bestehen können. Als Zweites werden diese Komponenten, einschließlich ihrer Schnittstellen zu anderen Komponenten, analysiert. Die Modultreiber bezeichnen die verschiedenen Ziele, die mit der Modularisierung erreicht werden sollen. Diese können technisch-funktional (z. B. räumliche Anordnung der Module), organisatorisch (z. B. Reduktion der Komplexität) oder produktstrategisch (z. B. Integration späterer

Innovationen) definiert sein. Durch eine Analyse der Komponenten kann eine zielgerichtete Modulbildung stattfinden. Die Modulbildung wird dann im dritten Schritt (siehe Abbildung 2-3) auf Grundlage der Analyse und der dort erkannten Ähnlichkeiten zwischen den Komponenten festgelegt. Zum Abschluss müssen die potentiellen Module in die modulare Produktstruktur überführt werden, wo eine entsprechende Anpassung von Komponenten und Schnittstellen nötig werden kann [KrGe18].

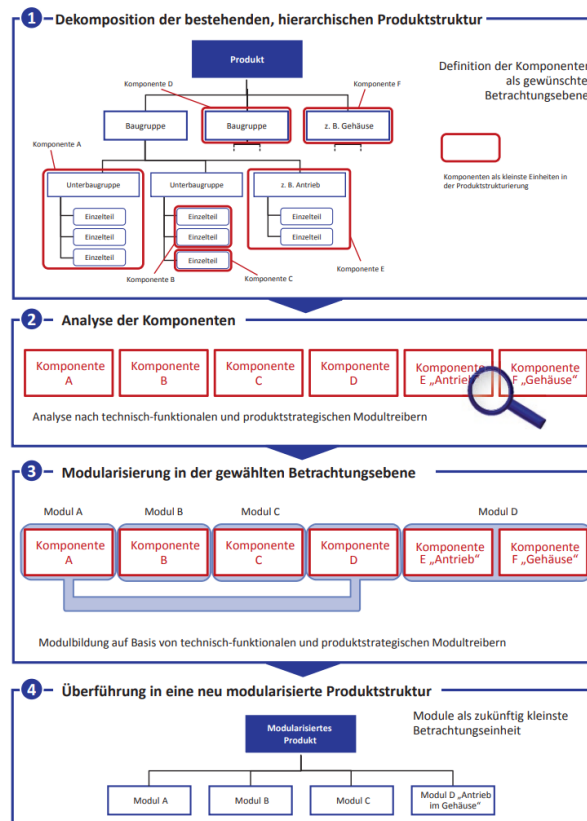


Abbildung 2-3: Generisches Vorgehen der Modularisierung [Lind16]

Prinzipien verschiedener Modularisierungsstrategien

In der Praxis haben sich die Gleichmodul-, Plattform- und Modulbaukastenstrategie als besonders geeignet erwiesen. Die drei Strategien sind beispielhaft in Abbildung 2-4 dargestellt. Diese Strategien müssen in der Anwendung nicht voneinander abgegrenzt, sondern können miteinander kombiniert werden, um die jeweiligen Vorteile synergetisch zu nutzen [KrGe18]. Die Gleichmodulstrategie zielt auf die Mehrfachverwendung von Modulen über das gesamte Produktprogramm ab. Hierfür werden Komponenten gesucht, welche über das gesamte Produktprogramm identisch verwendet werden können. Sie fokussiert vor allem die Erhöhung der jeweiligen Stückzahlen, eine Vermeidung von Neuentwicklungen und resultierende Skaleneffekten [KrGe18]. Bei der Plattformstrategie werden hingegen Module, die in allen Varianten einer Produktfamilie Anwendung finden, zu einer übergreifenden Basis (Plattform) zusammengefasst (siehe [BeGe21]).

In der Modulbaukastenstrategie werden verschiedene Produktvarianten durch die Kombination von Modulen erzeugt. Das Ziel ist eine schnelle und einfache Konfiguration möglichst vieler Varianten aus relativ wenigen Modulen, welche durch hohe Kommunalität auch über das gesamte Produktprogramm eingesetzt werden können. Baukästen können, analog zur Modularisierung, auf unterschiedliche Ziele ausgerichtet sein und dementsprechend verschiedene Eigenschaften aufweisen. Mögliche Ziele sind die Reduktion der Komplexität, des Aufwands, der Kosten sowie die Erhöhung der Flexibilität. In den Eigenschaften können sich Baukästen unter anderem zwischen Hersteller- und Anwenderbaukasten, offen und geschlossen oder Rein- und Mischsystem unterscheiden (siehe [FeGr13]).

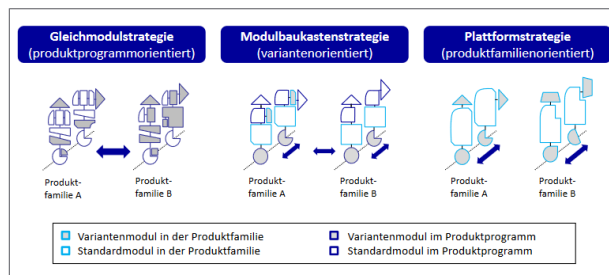


Abbildung 2-4: Übersicht zu Modularisierungsstrategien [Rieg12]

2.2 Konzeptionierung und Bewertung eines modularen Baukastensystems mit lösbaren Anschlüssen

Nach Kapitel 2.1.3 eignet sich vor allem die Modulbaukastenstrategie für die Anwendung auf eine Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen mit lösbaren Anschlüssen, da sich verschiedene Produktvarianten (Gebäudestrukturen) durch die Kombination von Modulen (wiedergewonnene Bauteilsegmente) herstellen lassen und die Konfiguration möglichst vieler Varianten aus relativ wenigen Modulen möglich ist. Daher soll in diesem Kapitel basierend auf der Modulbaukastenstrategie ein modulares Baukastensystem mit lösbaren Anschlüssen konzeptioniert werden.

Der angestrebte modulare Baukasten verfolgt das Ziel, Komplexität und Kosten im Planungs- und Bauprozess durch eine gezielte Standardisierung zu reduzieren und dabei Flexibilität bei der architektonischen und funktionalen Gestaltung zu ermöglichen. Der Einsatz standardisierter, lösbarer Verbindungen ermöglicht die mehrfache Wiederverwendbarkeit der einzelnen Module. Dadurch lassen sich die Kosten und der Zeitaufwand bei der Anwendung des Baukastens weiter optimieren (siehe [FeGr13]).

Unter Anwendung des in Abbildung 2-3 dargestellten allgemeinen Vorgehens soll die Produktstruktur, die aus rückgebauten Stahlbetonbauteilen besteht, in Komponenten aufgeteilt werden. Die meisten Gebäude und Tragwerksstrukturen, wie die Skelett- oder Plattenbauweise, beinhalten hauptsächlich tragende Bauteile mit definierten Tragfähigkeitseigenschaften. Die hierarchische Produktstruktur lässt sich in drei Hauptgruppen einteilen. Die erste Gruppe sind Regelbauteile wie Stützen, Balken,

Decken oder Wandelemente, die sich je nach funktionaler und physischer Eigenschaft (Geometrie, Lastabtragsrichtung etc.) weiter untergliedern lassen. Die zweite Hauptgruppe sind Sonderbauteile, die sich keiner typischen Bauteilgruppe zuordnen lassen. Die letzte Gruppe umfasst Knotenbauteile (siehe auch [StSt24]), die eine kraftschlüssige Verbindung zwischen den geschnittenen Elementen ermöglichen sollen. Zur Erhöhung der Kombinationsfähigkeit und Kommunalität sollen die nach ihren Tragfähigkeitseigenschaften eingeteilten Komponenten auch Umnutzungen ermöglichen, sofern die funktionalen und physischen Eigenschaften (z. B. Bewehrungsführung) dies zulassen. Als kleinste Elemente lassen sich balkenartige Module (Stützen und Riegel), flächige Module (Wände und Decken), Sondermodule (Sonderbauteile) sowie Knotenmodule definieren. Im Rahmen des Wiederverwendungsprozesses muss für balkenartige und flächige Module am individuellen Bauteil eine Funktionsbindung erfolgen, die multifunktionale Umnutzungen zulässt oder eine optimierte Nutzung mit einer definierten Tragfähigkeit aufgabe ermöglicht.

Der Aufbau des Tragwerks soll sich an effizienten Bauweisen orientieren. Daher wird eine schlanke und effiziente Skelettbauweise angestrebt. Die Aussteifung soll durch eine Rahmentragwirkung erreicht werden, was eine hohe Flexibilität ermöglicht. Die balkenartigen Module (gelenkige oder biegesteife Anschlüsse) dienen daher als tragende Rahmenkonstruktion. Flächige rückgebaute Module werden als tragende einachsig gespannte Platten oder als selbsttragende Wände zur Ausfachung zwischen den Stützen wiederverwendet. Die Abbildung 2-5 stellt schematisch das Konzept des modularen Baukastensystems für verschiedene Entwurfsvarianten sowie die Umnutzungen einzelner Balkenmodule dar.

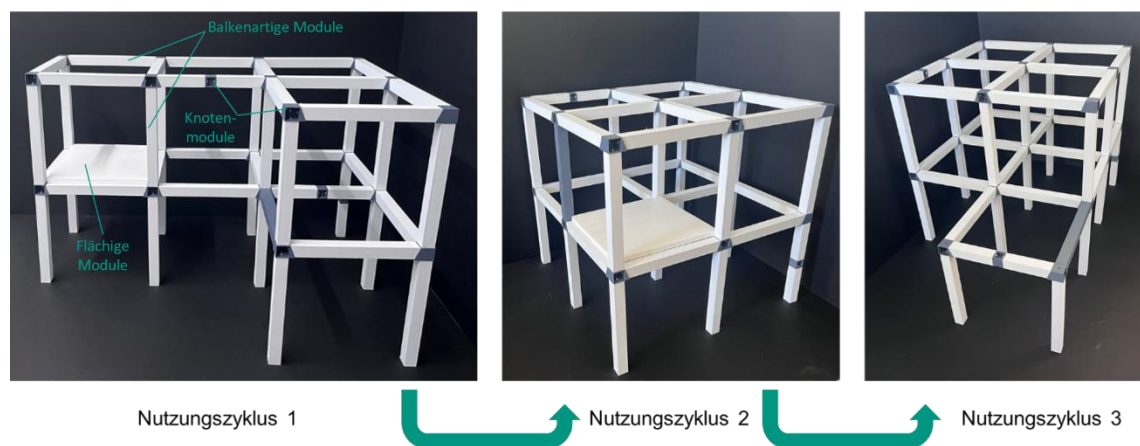


Abbildung 2-5: Konzeptionierung der Tragstruktur des Baukastensystems

Um die Kommunalität (siehe 2.1.2) und die Wiederverwendungsquoten weiter zu erhöhen, sollen die Module aus Komponenten zusammengesetzt werden können. Bauelemente wie beispielsweise ein Riegel könnten daher aus einem oder mehreren Segmenten bzw. Komponenten (siehe Abbildung 2-5) aufgebaut werden. Im Dekonstruktionsprozess können gezielt zu kurze oder zu lange Bauelemente in eine Maßsystematik integriert werden. Dadurch lassen sich verschiedene Stützweiten und somit variablere Gebäudequerschnitte realisieren. Dabei liegt zwischen den

Komponenten eines Moduls eine klare Entkopplung zu Komponenten anderer Module vor. Ein Beispiel für eine solche Maßsystematik, die Umnutzungen zulässt und sich an gesetzlich vorgeschriebenen lichten Raumhöhen orientiert, befindet sich im Anhang A1. In Anlehnung an [KBLE24] und [StSt24] sollen die Knotenpunkte in Stahlbauweise ausgeführt werden. Aufgrund der gewünschten hohen Kombinierbarkeit der Module spielt die Schnittstellenentwicklung eine besondere Rolle (siehe z. B. [KrGe18]). Daher wird im Kapitel 4 detailliert auf die Gestaltung der Knotenpunkte sowie auf die Ableitung geeigneter lösbarer Verbindungsprinzipien eingegangen, um eine Grundlage für eine Standardisierung der Schnittstellen zu schaffen.

Zur Bewertung der Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen mithilfe eines modularen Baukastensystems werden in Tabelle 2-1 ausgewählte Stärken und Schwächen des Baukastens gegenübergestellt. Die Anwendung von Baukastensystemen, insbesondere zur Wiedergewinnung typischer Bauteile und Tragwerke wie Skelettbauten, kann eine wirtschaftliche und ökologische Alternative zu konventionellen Techniken (z. B. monolithische Verbindungen) darstellen. Eine zu hohe Segmentierung einzelner Module erhöht zwar die Kommunalität aber auch den Aufwand und die Kosten durch notwendige Stöße. Außerdem ist eine Segmentierung in Abhängigkeit der Eigenschaften der Bestandbauteile (z. B. Endverankerung der Bewehrung) zu wählen. Daher muss eine globale Maßsystematik mit dem jeweiligen Rückbauvorhaben abgeglichen werden. Außerdem lässt sich nicht jede Bauteilgeometrie unmittelbar integrieren, sodass spezifischere Weiterentwicklungen erforderlich werden. Im Rahmen der Anwendung sind Integrationsprüfungen durchzuführen und ggf. spezielle Knotenmodule zu entwerfen sowie der Einsatz von Neubauteilen zu prüfen.

Tabelle 2-1: Wichtigste Stärken und Schwächen des Baukastensystems

Stärken des Baukastensystems		Schwächen des Baukastensystems	
+	Die Kombination der Module ermöglicht geometrisch vielfältige Tragwerksvarianten	-	Es sind ausreichend große Bauteildatenbanken oder Neubauteile nötig, um ganze Tragwerke zu errichten
+	Bauteile lassen sich flexibel in unterschiedlichen Funktionen einsetzen	-	Die Bauteile müssen ggf. an die spezifische Nutzung angepasst werden
+	Eine einheitliche Maßsystematik mit Segmentierungen der Module erlaubt die flexible Integration von Bauteilen	-	In Abhängigkeit der Segmentierung der Module steigt der Aufwand für Dekonstruktion, Aufbereitung und Montage, da diese schonend und präzise ausgeführt werden müssen. Daher sind Vorteile in der Kommunalität mit den Projektzielen abzustimmen
+	Ein Großteil der verbauten Bauteile sind kompatibel und können ins System integriert werden, insbesondere auch flächige Bauteile	-	Konkrete Lösungen zur Integration von Sonderbauteilen, wie beispielsweise gekrümmte Bauteile, sind projektspezifisch zu entwickeln
+	Einfache Integration von Neubauteilen möglich (wenn erforderlich)		
+	Die Segmentierungen der Module ermöglichen eine flexible Planung der späteren Demontage		
+	Der Standardisierungsansatz lässt Skalierungs- und Lerneffekte zu, was die Wirtschaftlichkeit steigern kann		
+	Das offene Baukastensystem ermöglicht Erweiterungen		

3 Eigenschaftserfassung und Aufbereitung von Stahlbetonbauteilen für die Wiedergewinnung (AP2)

3.1 Übersicht zur Entwicklung der Normungssituation und Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen

In diesem Kapitel wird ein Überblick zur historischen Entwicklung der Normung im Stahlbetonbau sowie zur Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen skizziert.

3.1.1 Entwicklung der Normungssituation

In Bestandsbauwerken sind in Abhängigkeit des Baujahrs Bauteile aufzufinden, die nicht alle Anforderungen der aktuellen zulässigen Norm DIN EN 1992 [Dine13] erfüllen. Daher sind Abweichungen im Einzelfall durch Sachgutachten im Hinblick auf Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit zu bewerten [StWS12] und entsprechende Aufbereitungsmaßnahmen abzuleiten. Seit mehr als 120 Jahren werden Dokumente zur Konstruktion mit Stahlbeton veröffentlicht. Durch Forschungsarbeiten wurden kontinuierlich neue technische Regelwerke sowie neue Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften entwickelt. Einen Überblick zur zeitlichen Entwicklung in Deutschland kann [StWS12] bzw. dem Anhang A1 entnommen werden. Demzufolge ist der Errichtungszeitpunkt des rückzubauenden Tragwerks maßgebend für den Umfang der Aufbereitungsmaßnahmen, die erforderlich sind, um die wiedergewonnenen Bauteile in die aktuelle Normung zu überführen.

3.1.2 Entwicklung der Wiederverwendung

Der grundsätzliche Ansatz der Wiederverwendung von Baumaterialien wird bereits seit Jahrhunderten zum Zweck der Ressourcenschonung sowie der Reduktion von Herstellungskosten neuer Baustoffe praktiziert (siehe [Leon96]). Im Zuge der Industrialisierung und der gleichzeitigen Weiterentwicklung des Stahlbetonbaus eröffneten sich kostengünstigere Möglichkeiten zur Produktion neuer Materialien, wodurch der Wiederverwendungsansatz an Bedeutung verlor. Bis heute zeigt die konventionelle Stahlbetonbauweise ökonomische Vorteile, im Vergleich zu Wiederverwendungsansätzen. Im Rahmen einer Studie der *École Polytechnique Fédérale de Lausanne* konnten im europäischen Raum zwischen den Jahren 1967 und 2023 lediglich 75 dokumentierte Anwendungsfälle für die Wiederverwendung vollständiger Stahlbetonbauteile identifiziert werden [KüFi24]. Diese Projekte sind in Abbildung 3-1 chronologisch dargestellt. Dabei erfolgt eine Differenzierung hinsichtlich der Wiederverwendung von Ort beton- und Fertigteilen sowie der geografischen Lage der jeweiligen Bauvorhaben. Der analysierte Zeitraum wird in drei Phasen unterteilt, innerhalb derer sich jeweils charakteristische Gemeinsamkeiten im Umgang mit der

Wiederverwendung erkennen lassen. Im Zuge wachsender Anforderungen an die Nachhaltigkeit tragender Konstruktionen rückt die Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen, insbesondere mit tragender Funktion, zunehmend in den Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen (vgl. u. a. Forschungsprojekte wie [Vull24], [GeHe24] oder [KBLE24]). Ebenso steigt die Anzahl an praktischen Wiederverwendungen in den letzten Jahren deutlich an (siehe Abbildung 3-1).

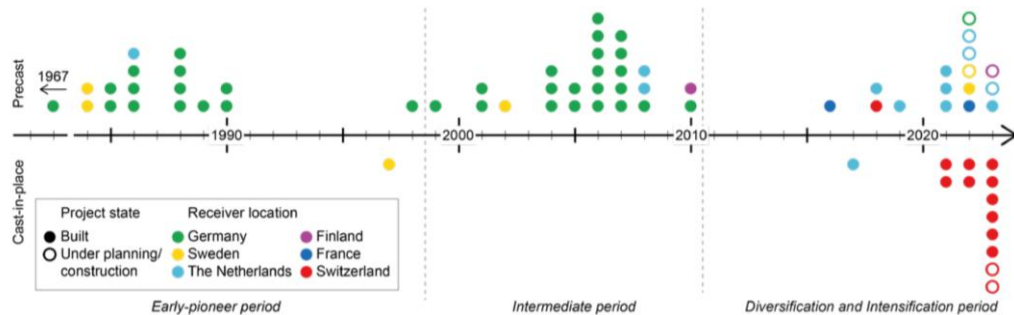


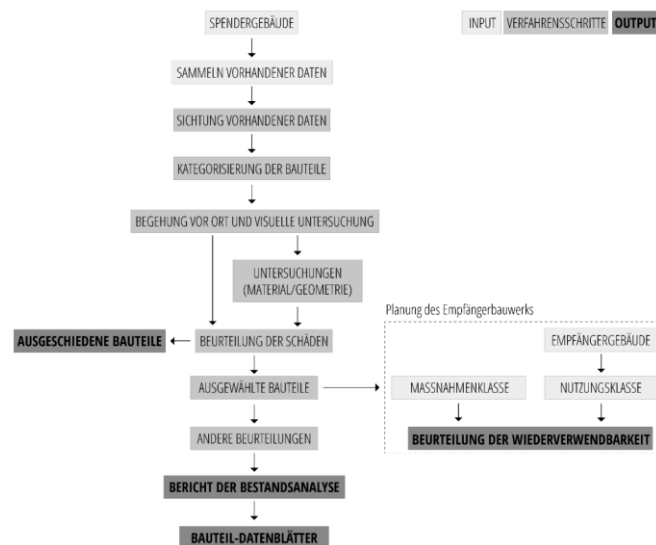
Abbildung 3-1: Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen in Europa von 1967 bis 2023 [KüFi24]

3.2 Methodiken zur Bestandsanalyse und Maßnahmenanordnung

In verschiedenen Forschungsprojekten wurden Methodiken (z. B. [DeBF22], [Mett95, MHA108] oder [GeHe24]) entwickelt, die eine Einschätzung der Wiederverwendbarkeit von Stahlbetonbauteilen ermöglichen. Die Grundlage dafür bilden Prüfmethoden (zerstörend oder zerstörungsfrei). Eine Auflistung und Bewertung solcher Prüfmethoden findet sich in [Mett95] und im Anhang A1. Im Folgenden werden ausgewählte Aspekte verschiedener Ansätze zur Einschätzung der Wiederverwendbarkeit zusammengefasst. Im Anschluss wird die Übertragbarkeit auf eine Wiederverwendung von rückgebauten Bauteilen mit lösbaren Verbindungen diskutiert.

3.2.1 Ansatz nach Devènes et al.

Die Methode zur Bewertung der Wiederverwendbarkeit nach [DeBF22] ist speziell auf Bauteile aus Stahlbeton ausgerichtet und basiert auf einer Weiterentwicklung der risikobasierten Methode von Bertola und Brühwiler [BeBr23]. Der Ansatz lässt sich nur eingeschränkt im Bestand anwenden, da Aspekte wie die Belastungsgeschichte, die Rückbaubarkeit und potenzielle Rückbauschäden nicht berücksichtigt werden. In der Abbildung 3-2 ist der Ablauf schematisch dargestellt. Die Analyse beginnt mit der Auswertung vorhandener Pläne und Dokumente, um grundlegende Informationen wie Standort, Baujahr und Materialeigenschaften zu erfassen. Fehlende Daten werden identifiziert und später ergänzt. Bauteile werden nach Funktion kategorisiert und zu Typen gruppiert [DeBF22]. Bei einer Begehung erfolgt ein Abgleich mit dem Ist-Zustand. Schäden werden visuell erfasst und nicht geeignete Bauteile aussortiert. Ergänzend werden zerstörungsfreie sowie gezielte zerstörende Prüfungen durchgeführt, etwa zur Feststellung von Bewehrungskorrosion, Rissen oder Betonabplatzungen.

**Abbildung 3-2: Verfahren zur Bestandsanalyse nach [DeBF22]**

Die Bauteile werden nach Schadenstyp und -schwere in Schadensklassen eingeteilt, die bei Bedarf durch weitere Untersuchungen angepasst werden können. Die Bewertung umfasst auch qualitative und quantitative Kriterien wie Ästhetik, Zugänglichkeit, Tragfähigkeit und Umweltauswirkungen. Die Ergebnisse werden in einem Bericht mit technischen Datenblättern dokumentiert. Zur Beurteilung der Wiederverwendbarkeit werden, in Abhängigkeit der Stabilität und Wassereexposition (siehe [DeBF22]), die Bauteile einer Nutzungsklasse zugeordnet sowie einer Maßnahmenklasse, je nach notwendigen Verstärkungsmaßnahmen (siehe [DeBF22]). In Tabelle 3-1 sind die drei Maßnahmenklassen für die Bewertung dargestellt.

Tabelle 3-1: Maßnahmenklassen nach [DeBF22]

Massnahmenklasse	Bauliche Massnahmen	Änderungen der Geometrie
a	Keine	Kein weiteres Schneiden nach der Demontage
b	Vorbeugender Unterhalt, leichte Verstärkung	Einfaches Schneiden
c	Kurativer Unterhalt, Sanierung, mittlere bis grosse Verstärkung	Komplexes Schneiden oder Anpassen

Durch die Kombination von Schadensklasse, Nutzungsklasse und Maßnahmenklasse kann für die Bauteile ein Wiederverwendungsgrad (1 = neuwertig bis 5 = nicht wiederverwendbar) bestimmt werden, der als Entscheidungshilfe dient [DeBF22].

3.2.2 Ansatz nach Gengnagel et al. und Mettke et al.

Die Bestandsaufnahme und -analyse nach [GeHe24] sieht eine Erfassung der Eigenschaften entlang des Prozesses vor. Zunächst erfolgt eine Sichtung vorhandener Bauunterlagen (Pläne und Statiken), die durch stichprobenartige Untersuchungen und digitale Erfassungen im Bestand ergänzt werden (z. B. 3D-Laserscanning). Besonders wichtig ist die Beschaffung von Bewehrungsplänen [GeHe24]. Im nächsten Schritt werden das Tragwerk, die statischen Systeme und die Bewehrungslagen geprüft, um statisch relevante Bauteile zu identifizieren und geeignete Schnittstellen für die spätere

Demontage festzulegen [GeHe24]. Anschließend folgt eine detaillierte Untersuchung der Bauteile hinsichtlich ihrer Wiederverwendungseignung mithilfe eines Kriterienkatalogs nach Mettke et al. ([MHA108] und [Mett95]), der für Betonfertigteile entwickelt wurde. Die Bewertung erfolgt in einem vierstufigen Entscheidungsprozess [MHA108]. Dieser Prozess ist schematisch in Abbildung 3-3 dargestellt.

UNTERSUCHUNGEN	im eingebaute Zustand, vor der Demontage.	1. <i>Nullstufe (als vorgeschaltete Stufe):</i> Voruntersuchung Feststellen der Demontierbarkeit des Gebäudes (Zugänglichkeit, Konstruktionstyp etc.)
		2. <i>Entscheidungsstufe 1:</i> Eignungsprüfung Beurteilung des Bauzustandes der Betonelemente (visuelle und bauteildiagnostische Analyse); vorläufige Bewertung der Wiederverwendungsfähigkeit; entsprechende Kennzeichnung der Betonelemente wird empfohlen
	im ausgebaute Zustand, nach der Demontage.	3. <i>Entscheidungsstufe 2:</i> Hauptprüfung Erfassung evtl. Beschädigungen und/oder Schäden infolge des Demontageprozesses (Risse, Kantenabbrüche, Verbindungsmittel, Tragösen etc.); vorläufige Bewertung der Wiederverwendungsfähigkeit, wenn Transport der Bauelemente zur Remontagebaustelle erforderlich wird, ansonsten endgültige Bewertung der Wiederverwendungsfähigkeit, wenn De- gleich Remontagebaustelle ist (Idealfall); endgültige Bewertung jeweils unmittelbar vor der Remontage
		4. <i>Entscheidungsstufe 3:</i> Zusatzprüfung Erfassung evtl. Schäden und/oder Beschädigungen infolge weiterer TUL-Prozesse und/oder längerer Zwischenlagerung der Betonbauteile vor der sekundären Verwendung; endgültige Bewertung der Wiederverwendungsfähigkeit

Abbildung 3-3: Entscheidungsstufen nach [MHA108]

In der Entscheidungsstufe 1 (siehe Abbildung 3-3) wird der Bauzustand in vier Stufen eingeteilt [Mett95, MHA108]:

- BZS 1: funktionsfähig, geringe optische Mängel
- BZS 2: lokal geschädigt, aber funktionsfähig
- BZS 3: eingeschränkte Funktion durch starke Schäden (meist Aufbereitungsmaßnahmen)
- BZS 4: nicht funktionsfähig, erhebliche strukturelle Mängel (keine Wiederverwendung möglich)

Ergänzend erfolgen baustoffliche Prüfungen (z. B. Druckfestigkeit, Karbonatisierung) sowie bauphysikalische Untersuchungen (Schall-, Wärme-, Feuchte- und Brandschutz). Da keine spezifischen Normen für wiederverwendete Betonteile existieren, werden Regelungen für Neubauteile als Maßstab herangezogen (siehe auch [MHA108]).

3.2.3 Übertragbarkeit auf die Wiederverwendung in modularen Baukastensystemen

Die existierenden Methoden zur Bewertung und Verstärkung bestehender Bauteile lassen sich grundsätzlich auf die Wiederverwendung im Rahmen modularer Baukastensysteme übertragen. Dabei sind jedoch spezifische Einschränkungen zu berücksichtigen. So ist beispielsweise nach [DeBF22] der künftige Einsatzzweck zu berücksichtigen, was die Anwendung bei einem reinen Rückbauprojekt nicht möglich macht. In den vorhandenen Ansätzen (z. B. [MHA108] und [Mett95]) fehlen sowohl spezielle Methoden zur Bewertung der Schnittstellen nach der Dekonstruktion als auch geeignete Aufbereitungsmaßnahmen. Aus diesem Grund soll auf der Grundlage bestehender Leitfäden und Bewertungsansätze (z. B. [Vull24], [DeBF22], [GeHe24] oder [MeMe15]) ein ganzheitlicher Prozessablauf in Form eines Leitfadens entwickelt werden. Dieser soll die besonderen Anforderungen der Weiter- und Wiederverwendung in modularen Baukastensystemen berücksichtigen (z. B. Schnittstellenbeschaffenheit, Prozessablauf für Mehrfachwiederverwendungen etc.).

3.3 Entwicklung eines initialen Leitfadens und einer standardisierten Prozesskette

3.3.1 Zielsetzung und Methodik

Das Hauptziel des Leitfadens ist es, einen ganzheitlichen Prozessablauf für die Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen bereitzustellen. Dabei sollen identifizierte Hürden bei der Wiederverwendung von tragenden Stahlbetonbauteilen überwunden werden. Dies soll durch eine Prozesskette und Wiederverwendungsstrategie in Form der Wiedergewinnung als modulare lösbare Fertigteile realisiert werden, die mehrere Nutzungszyklen zulässt. Aufgrund der hohen Individualität bestehender Bauwerke und den daraus resultierenden notwendigen Individualmaßnahmen soll eine hohe systematische Prozessstandardisierung erreicht sowie die Praxistauglichkeit durch eine anwendungsorientierte Vorgehensweise mit konkreten Anforderungen und Handlungsempfehlungen sichergestellt werden. Hierdurch sollen ökologische sowie ökonomische Aspekte berücksichtigt und ein schneller Einzug in die Praxis gewährleistet werden. Die Grundlage für den Leitfaden bildet eine systematische Literaturrecherche in den Bereichen „Modularisierung“, dem „Bauen im Bestand“, sowie zur „Wiederverwendung von Stahlbetonteilen“. Eine Zusammenfassung relevanter Literatur sowie Regelwerke findet sich zu Beginn des Leitfadens. Es wurden Methoden aus der Literatur integriert sowie eigene Methoden und Weiterentwicklungen eingebaut, die speziell auf die Anforderungen der Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen als lösbare Fertigteile zugeschnitten sind. Zur Erprobung und Validierung des entwickelten Prozesses wurden zwei reale selektive Rückbauvorhaben herangezogen. Darüber hinaus erfolgte eine fiktive integrale Rückbauplanung zweier realer Gebäude auf Basis vorhandener Bestandsunterlagen. Ergänzt wurde dieser Prozess durch Rücksprachen mit Abbruch- und Rückbauunternehmen, um die Praxistauglichkeit der Vorgehensweise sicherzustellen. Diese erste Version des Leitfadens ist als initial zu bewerten und soll in zukünftigen Arbeiten kontinuierlich weiterentwickelt werden. Im Folgenden wird dieser in seinen wichtigsten Punkten vorgestellt. Der Leitfaden befindet sich im Anhang A1.

3.3.2 Vorgehen bei der Modularisierung von Bestandsbauwerken und Wiedergewinnung der rückgebauten Stahlbetonbauteile als lösbare modulare Fertigteile

Der entwickelte Wiederverwendungsprozess für Stahlbetonbauteile folgt einem iterativen, mehrstufigen Ablauf, in dem alle Schritte eng miteinander verzahnt sind und sich an der übergeordneten Prozesskette orientieren. Der zugehörige initiale Leitfaden gliedert sich in sieben Hauptschritte, die vier übergeordneten Prozessabschnitten (Zieldefinition, Bestandsbauwerk, Bauteilumwandlung und Nutzungszyklen) zugeordnet sind. Diese wiederum bestehen aus verschiedenen Einzelschritten, die den Anwender chronologisch durch den gesamten Wiederverwendungsprozess führen. Das Konzept sieht über alle Schritte eine umfangreiche Digitalisierung vor. Je nach Anwendungsfall

sind nicht alle Schritte gleichermaßen relevant. Der Leitfaden ist modular aufgebaut und erlaubt eine selektive Anwendung einzelner Schritte. Die folgende Abbildung 3-4 stellt den iterativen Prozessablauf zur Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen als modulare, lösbare Fertigteile sowie die Abhängigkeit einzelner Prozessschritte in schematischer Form dar.

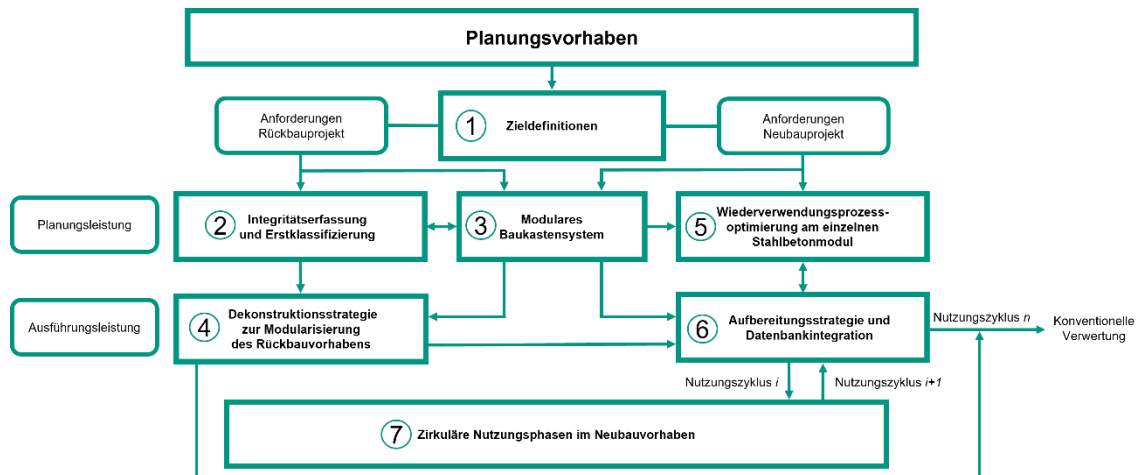


Abbildung 3-4: Übersicht zur standardisierten Prozesskette im Leitfaden

Schritt 1: Zieldefinition für den Wiederverwendungsprozess

Im ersten Schritt ist die Art des spezifischen Planungsvorhabens zu differenzieren. Hierbei können drei grundsätzliche Vorhabenarten unterschieden werden:

1. Rückbauprojekt/e
 - 1.a Rückbauprojekt/e mit angegliedertem Neubauprojekt (Prozessschritte 1 bis 7)
 - 1.b Reine/s Rückbauprojekt/e (Prozessschritte 1 bis 6)
2. Neubauprojekt/e (Prozessschritte 1, 3, sowie 5 bis 7)

In Abhängigkeit der Art des Wiederverwendungsprozesses ergeben sich unterschiedliche Anforderungen und Ziele, die den Prozessablauf beeinflussen. Die Prozessschritte zwei und vier (siehe Abbildung 3-4) befassen sich dabei mit dem Bestandsgebäude im Falle eines Rückbauvorhabens. Die Schritte fünf und sechs befassen sich mit der Umwandlung für die Weiter- oder Wiederverwendung des einzelnen rückgebauten Moduls in Abhängigkeit eines konkreten oder potenziellen Neubauvorhabens. Schritt drei stellt die Verknüpfung zwischen der Dekonstruktion des Rückbauvorhabens und der Weiter- oder Wiederverwendung im Neubauvorhaben dar. Schritt sieben umfasst die Umsetzung und den Einsatz der aufbereiteten Module in einem Neubauprojekt. In diesem ersten Prozessabschnitt stehen die folgenden Fragestellungen im Vordergrund:

- Welche Anforderungen und Ziele bestehen beim Vorhaben?
- Ist im Falle eines Rückbauvorhabens das Bestandsgebäude für die Wiederverwendung im Sinne dieses Leitfadens geeignet?
- Ist die Anwendung des Leitfadens für das angestrebte Neubauvorhaben möglich?

Als Ergebnis des ersten Prozessschritts wird eine Anwendbarkeitsprüfung in Abhängigkeit der allgemeinen Zielsetzungen der Wiederverwendungsstrategie in diesem Leitfaden sowie der spezifischen Anforderungen und Ziele des Planungsvorhabens abgeschlossen. Dabei kann der gesamte Prozess oder auch nur einzelne Prozessschritte als Module Anwendung finden.

Schritt 2: Integritätserfassung und Erstklassifizierung der Bestandsgebäudestruktur

In diesem zweiten Prozessschritt wird eine systematische und digitalisierte Bestandsaufnahme zur Vorbewertung durchgeführt, um die Grundlage für die Modularisierung des Rückbauvorhabens zu bilden. Bei einem integralen Rückbau eines ganzen Gebäudes gibt es im Vergleich zu einem selektiven Rückbau einzelner Bauteile deutliche Unterschiede in den Projektanforderungen und Zieldefinitionen. Daher haben die Rückbauart und die Verfügbarkeit von Prüfungsunterlagen einen erheblichen Einfluss auf den Planungsumfang. In diesem Prozessabschnitt stehen die folgenden Fragestellungen im Vordergrund:

- Welche Informationen und Dokumente sind erforderlich, um eine fundierte Erfassung des Bestandsgebäudes zu ermöglichen?
- Welche Methoden und Verfahren sind anzuwenden, um in-situ alle relevanten Daten systematisch zu erfassen?
- Welche Integrität besitzen die einzelnen Bauteile?
- Wie ist die Tragstruktur des Gebäudes aufgebaut und welche Erkenntnisse lassen sich hinsichtlich ihrer Eignung für die Wiederverwendung von Bauteilen in modularen Baukästen gewinnen?
- Welche Bauteile eignen sich grundsätzlich für eine Weiter- oder Wiederverwendung, um den weiteren Prozess effizient zu gestalten?

Insbesondere die Grundlagenermittlung und die praktische Bestandserfassung vor Ort sind eng miteinander verknüpft. Je nach Projektanforderungen kann dies iterativ in mehreren Abschnitten erfolgen und einen hohen Detaillierungsgrad erfordern. Als Ergebnis dieses Prozessabschnitts wird hinsichtlich der individuellen Integrität der Bestandsgebäudestruktur die Grundlage für einen wirtschaftlichen und ökologischen Wiedergewinnungsprozess geschaffen. Dies wird erreicht, indem frühzeitig eine Selektion ungeeigneter Bauteile erfolgt (z. B. durch Vermeidung kostenintensiver Demontagen und nicht erforderlicher Transportwege).

Schritt 3: Modulares Baukastensystem für zirkuläre Wiederverwendungen rückgebauter Stahlbetonbauteile

Der dritte Prozessschritt bildet sowohl für Rückbau- als auch für Neubauvorhaben die Grundlage für die angestrebte Wiederverwendung der rückgebauten Bauteile als modulare, lösbare Fertigteile. In diesem Prozessabschnitt stehen vor allem die folgenden Fragestellungen im Vordergrund:

- Welche allgemeinen Anforderungen liegen beim Bestandsbauwerk vor?
- Sind Neu- oder Weiterentwicklungen durch Adaption von Methoden zur Baukastenentwicklung für das Rückbau- sowie Neubauvorhaben erforderlich?

- Welche Bauteile sind hinsichtlich des spezifischen Baukastensystems für die Wiederverwendung geeignet und können integriert werden?
- Welches Aussteifungskonzept, welche lösbare Schnittstellenausbildung und Maßsystematik werden für den Wiederverwendungsprozess vorgesehen?

Als Ergebnis dieses Prozessabschnitts steht ein modulares Baukastensystem zur Verfügung, das eine Dekonstruktion gemäß der spezifischen Maßsystematik sowie eine Integration der potenziell wiederverwendbaren Bauteile in das Baukastensystem erlaubt. Im Fall eines reinen Rückbauprojektes ohne unmittelbare Wiederverwendung ist vorzugsweise eine Integration in ein vorhandenes Baukastensystem anzustreben, das vielfältige Wiederverwendungsmöglichkeiten erlaubt und keine zu konkreten Aufbereitungsmaßnahmen beinhaltet. Bei einem angegliederten Neubauprojekt können auch spezifische Anforderungen in die Entwicklung des Baukastens einfließen und Individuallösungen umgesetzt werden.

Schritt 4: Dekonstruktionsstrategie zur Modularisierung des Rückbauvorhabens

Die Ergebnisse der Erstklassifizierung in Abhängigkeit der Bauteilbeschaffenheit (Schritt 2) sowie die Anforderungen des gewählten Baukastensystems (Schritt 3) werden in diesem Prozessabschnitt verknüpft und in eine Dekonstruktionsstrategie überführt, die eine Modularisierung des Bestandsgebäudes oder einer definierten Teilstruktur ermöglicht. In diesem Prozessabschnitt stehen vor allem die folgenden Fragestellungen im Vordergrund:

- Welche statischen Rückbauzustände sind zu berücksichtigen, um eine sichere Entnahme zu gewährleisten?
- Welche Entnahmetechniken sind unter Berücksichtigung des Bauteilzustands und der Gegebenheiten auf der Baustelle anzuwenden?
- Welche technischen, logistischen und sicherheitsrelevanten Anforderungen ergeben sich an die Lagerung, Direktmaßnahmen an Bauteilen und die Qualitätssicherung während der Ausführung?

Das Ergebnis dieses Schritts ist die praktische Umsetzung der digitalen Dekonstruktionsanweisungen. Hierdurch stehen die rückgebauten Bauteile für die individuellen Aufbereitungsmaßnahmen bereit.

Schritt 5: Wiederverwendungsprozessoptimierung für die rückgebauten Stahlbetonmodule

In Prozessschritt fünf wird durch eine systematische und iterative Bemessung sowie eine ökologische und ökonomische Bewertung eine optimierte Weiter- oder Wiederverwendung für jedes aus einem Bestandsgebäude rückgebaute (monolithische Verbindung) oder rückgeführte (lösbare, modulare Verbindung) Bauteil angestrebt. In einem reinen Rückbauprojekt ohne konkrete Optimierungsanforderungen sind notwendige Aufbereitungsoptionen so zu wählen, dass eine hohe Flexibilität gewährleistet ist. Dabei sind die folgenden Fragestellungen relevant:

- Welcher Bauteilzustand (Modul und Schnittstellen) liegt nach der Entnahme vor?

- Welche Tragfähigkeiten (Modul und Schnittstelle) können in unterschiedlichen Nutzungen unter Berücksichtigung von Verstärkungsmaßnahmen erreicht werden?
- Welche Klassifizierung wird dem Bauteil zugeordnet unter Berücksichtigung der gewählten Nutzungsszenarien?

Als Ergebnis der Optimierung des Wiederverwendungsprozesses liegen für das einzelne entnommene Modul verschiedene Aufbereitungsstrategien vor. In Abhängigkeit der Zielgrößen (z. B. Kosten) führt dies zu einer Klassifizierung in ein Kaskadensystem, wodurch die konkreten Wiederverwendungsmöglichkeiten (Nutzungen im Baukasten) und Aufbereitungsmaßnahmen sowie Verstärkungen, festgelegt werden.

Schritt 6: Aufbereitungsstrategie und Datenbankintegration

Im sechsten Schritt werden für die einzelnen rückgebauten Module standardisierte Aufbereitungsstrategien gemäß dem Baukastensystem sowie der Optimierung nach Schritt 5 abgeleitet und auf Bauteil- und Schnittstellenebene durchgeführt. Dabei stehen die folgenden Fragen im Vordergrund:

- Welche Aufbereitungsstrategien sind für die wiedergewonnenen Bauteilsegmente notwendig?
- Ist die Ausführungsqualität für eine Zulassung und Datenbankintegration ausreichend?

Als Ergebnis stehen aufbereitete Bauteilmodule für ein konkretes Neubauprojekt oder für zukünftige Nutzungen (ggf. sind weitere Aufbereitungen erforderlich) in einer physischen und digitalen Bauteildatenbank zur Verfügung.

Schritt 7: Zirkuläre Nutzungsphasen in Neubauvorhaben

Im siebten Schritt werden mithilfe der Bauteildatenbank und des Baukastensystems Entwurfsvarianten für das Neubauvorhaben geplant. Diese werden in Abhängigkeit der in Schritt 1 definierten Ziele sowie der Realisierbarkeit in eine Planungs- und Ausführungsphase überführt. Dabei werden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- Welche Entwurfsvarianten sind unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit der Bauteile realisierbar und welcher Neubauteileinsatz wäre notwendig?
- Wie sieht die konkrete Ausführungsplanung aus?
- Wie kann der Prozess der zirkulären Weiternutzung im Falle der zukünftigen Dekonstruktion vorbereitet werden?

Nach dem Ende der Nutzungs- und Lebensdauer müssen die demontierten Bauteile für jede neue Nutzungsphase die Prozessschritte fünf bis sieben unter Berücksichtigung von Schritt eins und drei wiederholen, um neu eingesetzt werden zu können.

4 Entwicklung von stahlbaulichen Details für das Baukastensystem (AP3)

Essenzieller Bestandteil des erarbeiteten Konzepts sind die stahlbaulichen Anschlussdetails zur Verbindung der Stahlbetonbauteile. Nachfolgend wird die Entwicklung der Anschlussdetails vorgestellt. Dies erfolgt am Beispiel eines Referenzbauwerks. Zunächst wird das Referenzbauwerk vorgestellt. Anschließend wird analysiert, an welchen Stellen im Bauwerk stahlbauliche Anschlussdetails erforderlich sind bzw. welche Bauteile verbunden werden müssen. Dabei werden weitere potenzielle, nicht im Referenzbauwerk auftretende Anschlussdetails betrachtet. Die spezifischen Beanspruchungskomponenten der Verbindungskomponenten können aus dem Referenzbauwerk übernommen werden. Darüber hinaus werden weitere Anforderungen wie die baustellentaugliche Montierbarkeit und der Korrosionsschutz definiert. Auf Basis dieser Anforderungen werden die Anschlussdetails konstruktiv ausgebildet und dimensioniert. Abschließend erfolgt eine Bemessung des Gesamttragwerks in der angestrebten Bauweise (Re-Use-Bauweise).

4.1 Referenzbauwerk

Das nachfolgend vorgestellte Referenzbauwerk dient als Vorlage für die Entwicklung und Dimensionierung der stahlbaulichen Details. Beim ausgewählten Bauwerk [Lohm04] handelt es sich um ein Stahlbetonskelettbauwerk, welches in konventioneller Ortbetonbauweise konzipiert ist. Die Bemessung des Bauwerks in Ortbetonbauweise ist in [Lohm04] dokumentiert. Ziel ist es, im Rahmen dieses Arbeitspakets ein neues Bauwerk in Re-Use-Bauweise zu entwickeln und zu bemessen, welches die gleichen Abmessungen und Nutzflächen aufweist wie das Bauwerk in Ortbetonbauweise. Darüber hinaus sollen möglichst viele der im Bauwerk in konventioneller Bauweise vorhandenen Bauteile/Tragwerkskomponenten im Re-Use-Bauwerk wiederverwendet werden.

Beim ausgewählten Referenzgebäude handelt es sich um ein zweigeschossiges Bürogebäude in Skelettbauweise. Das Ortbetonbauwerk ist durch die Deckenplatten, die Treppenhauswände und einzelne weitere Wandscheiben ausgesteift. Im Obergeschoss werden die Decken über Unterzüge zu den Stützen abgetragen. Die Deckenplatte über dem Erdgeschoss ist punktgestützt. Da der Fokus dieses Projekts auf Stahlbetonskelettbauten im Hochbau liegt, werden nachfolgend nur die Bauteile über der Geländeoberkante betrachtet. Die Eignung der vorgestellten Re-Use-Bauweise für Gründungsbauwerke ist gesondert zu untersuchen. Abbildung 4-1 zeigt die Positionspläne von Ober- und Erdgeschoss sowie Positionspläne in den Schnitten A:A und B:B.

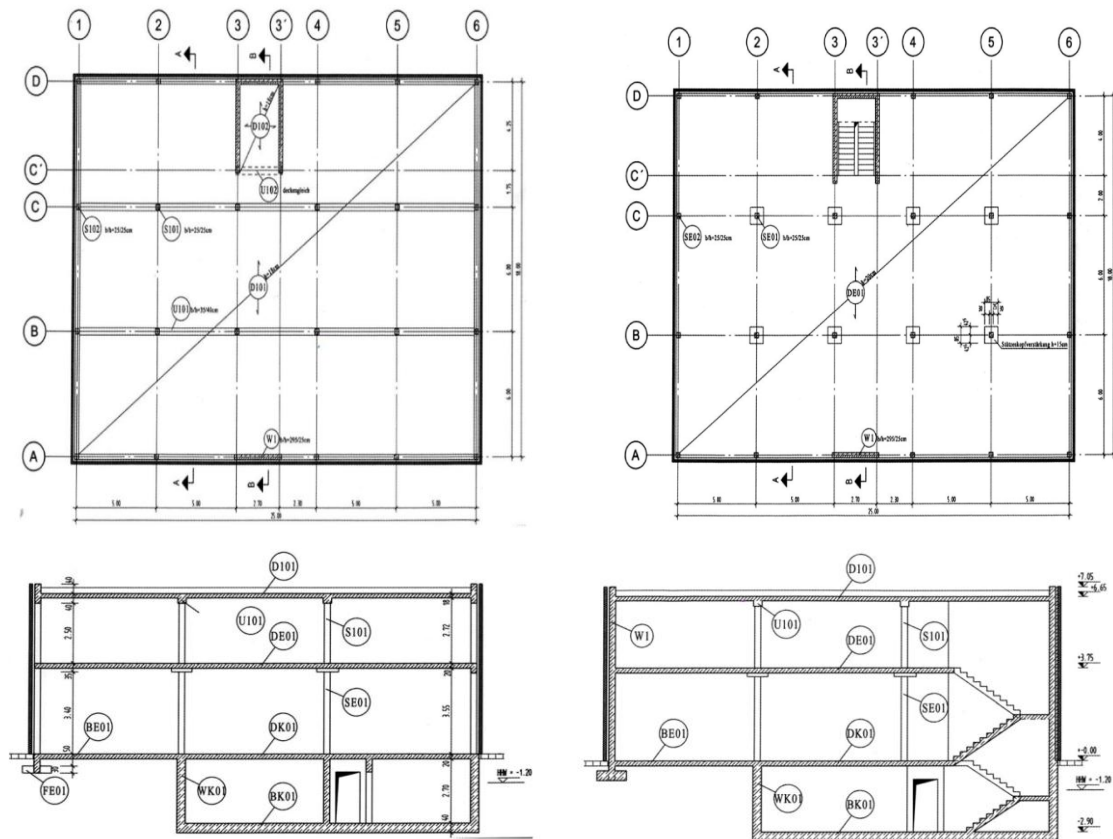


Abbildung 4-1: Positionspläne des Referenzgebäudes (links oben: Obergeschoss; rechts oben: Erdgeschoss; links unten: Schnitt A:A; rechts unten: Schnitt B:B) [Lohm04]

4.2 Tragwerksanalyse

Der fokussierte Anwendungsbereich für die vorgestellte Re-Use-Bauweise ist der Stahlbetonskelettbau. Üblicherweise sind bei dieser Bauweise Decken- und Wandelemente monolithisch mit Balken- bzw. Stützelementen verbunden. Zudem sind bei dieser Bauweise i.d.R. Stützen und Balken biegesteif miteinander verbunden. Um in einem neuen Bauwerk in Re-Use-Bauweise prinzipiell den gleichen Lastabtrag zu realisieren, müssen ebenfalls biegesteife Verbindungen, insbesondere für den Anschluss der linienförmigen Bauteile (Balken, Stützen), realisiert werden.

Grundsätzlich eignen sich insbesondere die Eckstöße zwischen Riegeln und Stützen zur Verbindung mit stahlbaulichen Anschlussdetails. Dadurch können die nach Trennen ausgebauten Rückbauteile als linienförmige Elemente platzsparend gelagert und transportiert werden. Ebenso wäre es möglich linienförmige Bauteile in der freien Länge zu stoßen, sofern dies aus baupraktischen Gründen erforderlich ist oder mögliche Transportlängen überschritten werden. Ebenfalls sinnvoll erscheint die Verbindung zwischen flächigen Bauteilen wie Decken und Wänden mit angrenzenden, linienförmigen Bauteilen. Beim Anschluss flächiger Bauteile (Deckenplatten und Wände) stellt sich die Frage, ob eine Scheibentragwirkung (z. B. zur Bauwerksaussteifung) aktiviert werden muss. Abhängig davon muss die Verbindung zwischen flächigem

Bauteil und angrenzenden, linienförmigen Bauteilen (Riegel bzw. Stützen) ausgelegt werden.

Für das vorgestellte Referenzbauwerk in Re-Use-Bauweise kann nicht auf das Gebäudeaussteifungssystem der konventionellen Bauweise zurückgegriffen werden, da hier die wiederverwendeten Bauteile als Einzelteile vorliegen. Entsprechend muss ein neues Aussteifungssystem konstruiert werden (siehe Abbildung 4-2). Dieses wird durch einen biegesteifen Anschluss zwischen den Stützen und den Riegeln realisiert, um ein Rahmensystem auszubilden. Grundlegend soll das Re-Use-Gebäude aus Rahmen in Längsrichtung (Achse A + D) und Querrichtung (Achse 1 + 6) bestehen. In Abbildung 4-2 stellen die blauen Würfel in den Ecken des Gebäudes die biegesteifen, stahlbaulichen Anschlüsse dar. Die rot dargestellten Bauteile sind die Riegel der Rahmensysteme, die, wie bei der konventionellen Bauweise, alle fünf bzw. sechs Meter durch Pendelstützen gestützt werden. Die grün markierten Bauteile sind die Unterzüge. Diese werden gelenkig in den Punkten C1, B1, C6 und B6 an die Stützen angeschlossen. In den Schnittpunkten mit den Achsen 2-5 sind jeweils Pendelstützen vorgesehen (analog zur konventionellen Bauweise). Auch die ausgeschnittenen Deckenplatten sollen wiederverwendet werden. Diese werden im Re-Use-Fall auf die Rahmenriegel bzw. die Unterzüge aufgelegt und spannen einachsrig (in Richtung der Achsen 1-6). Die aussteifenden Wände im Treppenhaus und weitere Aussteifungswände entfallen im Re-Use-Gebäude.

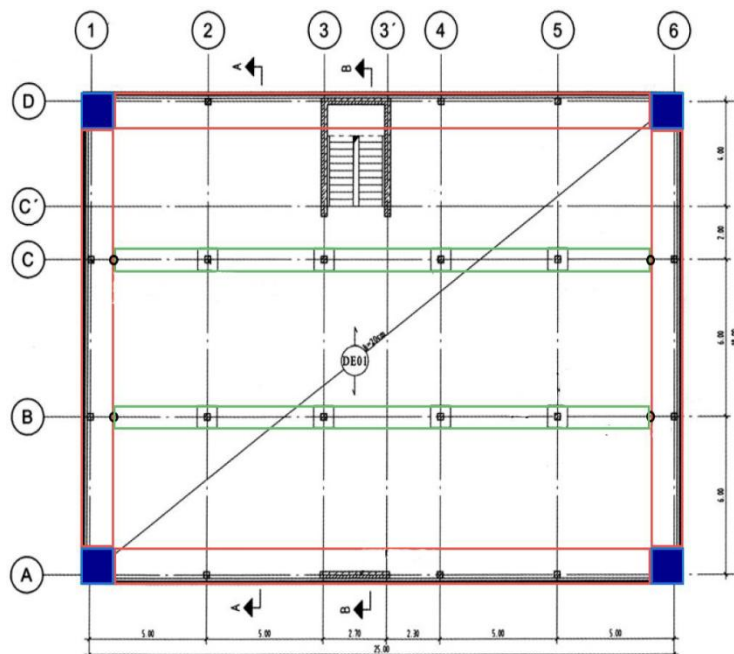


Abbildung 4-2: Skizze des Tragwerks im Re-Use-Gebäude

Neben der Ausführung von biegesteifen Rahmenecken wäre es für den Re-Use-Fall ebenfalls denkbar, Stützen und Riegel gelenkig zu verbinden und die Aussteifung des Gebäudes auf andere Art und Weise zu gewährleisten. Möglich wären beispielsweise zusätzlich eingebaute Aussteifungsverbände wie sie unter anderem Mahrenholz et al. [MLWT15] untersuchen (siehe Abbildung 4-3). Ebenfalls wäre es möglich, die vertikale

Aussteifung über ein Treppenhaus bzw. einen Aufzugschacht in Ortbetonbauweise zu realisieren. Eine dritte Option wäre, wiederverwendete Decken und Wände, wie oben beschrieben, so einzubauen, dass eine Scheibentragwirkung aktiviert werden kann.

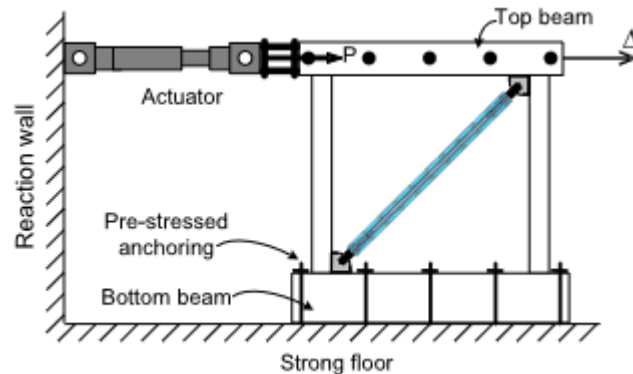


Abbildung 4-3: Mit Aussteifungsdiagonale versehener Stahlbeton-Probekörper [MLWT15]

4.3 Anforderungen an die stahlbaulichen Anschlussdetails

Die Anforderungen an die stahlbaulichen Anschlussdetails lassen sich in verschiedene Aspekte einteilen. Zunächst gilt es, die auftretenden mechanischen Beanspruchungen sicher abzutragen. Abhängig von der gewünschten Konstruktionsweise (gelenkig oder biegesteif) sind im Anschlussdetail entweder nur Normal- und Querkräfte abzutragen oder zusätzlich Biegemomente. Die Art und Höhe der Beanspruchungen definieren maßgeblich die Gestaltung bzw. Komplexität des Anschlusses.

Vor dem Hintergrund des Ziels einer kreislaufgerechten Re-Use-Bauweise wird als Kernanforderung die einfache und zerstörungsfreie Lösbarkeit der Bauteile gestellt. Als einfachste Lösung bietet sich hier das direkte Auflegen der Bauteile aufeinander an. Aufgrund der erforderlichen Lagesicherung, aber insbesondere, wenn zusätzliche abhebende Lasten auftreten oder Momente abgetragen werden müssen, sollte eine Schraubverbindung zum Einsatz kommen. Stahlbauseitig kann dies über das Durchstecken einer Gewindestange durch eine Bohrung und das Kontern der Gewindestange mit Unterlegscheibe und Mutter realisiert werden. Im Stahlbetonbauteil bietet die sogenannte Befestigungstechnik verschiedene Lösungen, die in Abbildung 4-4 visualisiert sind.

Die abgebildeten Lösungen weisen verschiedene Vorteile auf. Der Schwerlastanker (a) ist einfach zu montieren und nach der Montage direkt belastbar. Gleiches gilt für den Hinterschnittanker (b). Beide Anker realisieren die Verankerung über Spreizwirkung, indem ein Konus in eine Hülse hineingezogen wird. Aufgrund der auftretenden Spreizkräfte müssen große Abstände zum Bauteilrand eingehalten werden, um ein seitliches Ausbrechen des Betons zu verhindern. Insbesondere bei Bauteilen mit geringen Querschnittsabmessungen ist die Anwendung dieser Befestigungsmitteltypen somit limitiert. Chemische Dübel hingegen bewerkstelligen die Lastübertragung ohne

Spreizwirkung. Hier werden Anker mit Innengewinde (c), Gewindestangen oder Bewehrungsstäbe mit angeschweißtem Gewindestab (d, im Folgenden Bewehrungsanker) in ein Bohrloch eingemörtelt.

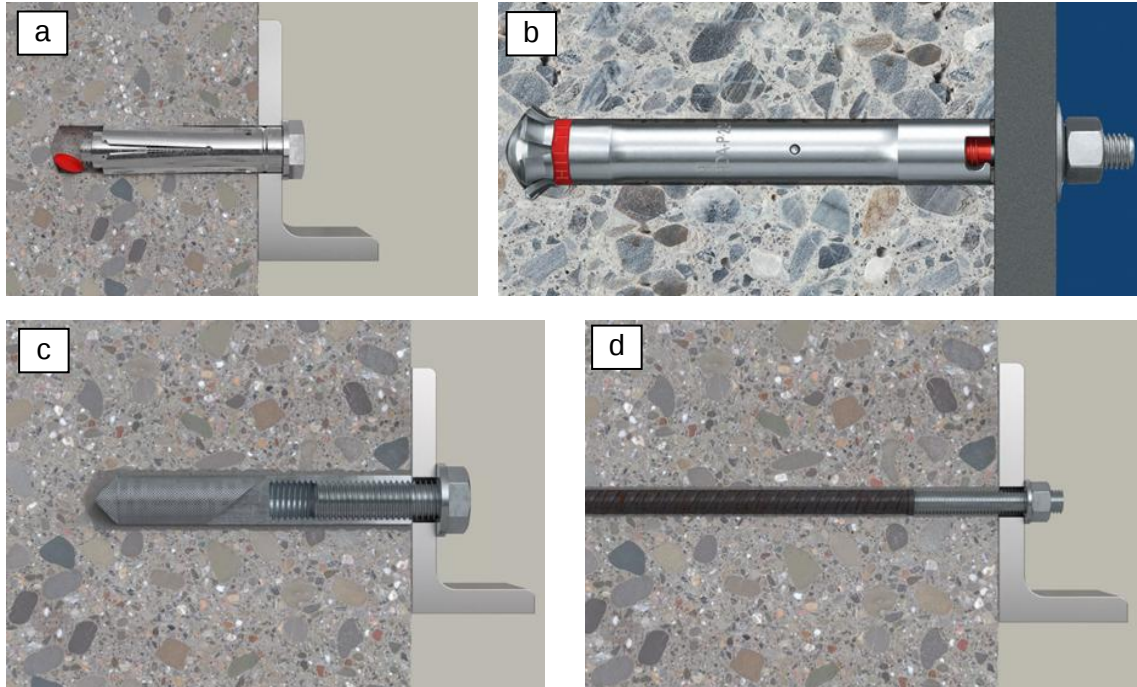


Abbildung 4-4: Ausgewählte, befestigungstechnische Lösungen (a) Schwerlastanker, b) Hinterschnittanker, c): eingemörtelter Anker mit Innengewinde, d) eingemörtelter Bewehrungsanker mit aufgeschweißtem Gewinde); Bild a), c), d) [Stah], Bild b) [Deut]

Die Konstruktionslösungen (a) bis (c) weisen die Eigenschaft auf, dass diese eine vergleichsweise geringe Einbindetiefe aufweisen. Dies führt insbesondere bei Anwendung in schlanken Bauteilen zu stark reduzierten Tragfähigkeiten, da frühzeitig ein Betonausbruch auftreten kann. Bei den eingemörtelten Bewehrungsankern können hingegen Einbindetiefen von mehr als einem Meter realisiert werden, wodurch gewährleistet werden kann, dass die Beanspruchungen tief im Stahlbetonquerschnitt in die dort vorliegende Bewehrung eingeleitet werden können und kein ungünstiges randnahes Betonversagen auftritt. Mit Bewehrungsankern können somit auch bei Anwendung in schlanken Bauteilen ausreichende Tragfähigkeiten erzielt werden. Sofern allerdings Biegemomente planmäßig über Bewehrungsanker übertragen werden sollen, muss gewährleistet werden, dass auftretende Querkkräfte auf andere Art abgetragen werden können. Somit können in Abhängigkeit des Anschlussdetails im Re-Use-Bauwerk verschiedene Befestigungsmitteltypen zum Einsatz kommen. Für alle vorgeschlagenen Befestigungsmittel existieren bauaufsichtliche Regelwerke, mit welchen sich die Verbindungen auch für den hier betrachteten Anwendungsfall sicher bemessen lassen.

Hinsichtlich der Montierbarkeit bieten alle vorgestellten Verbindungsarten den Vorteil, dass das Setzen bzw. Einmörteln der Befestigungsmittel bereits im Vorfeld erfolgen

kann. Vor Ort sind dann lediglich die Stahlbetonbauteile mit den stahlbaulichen Anschlussdetails zusammenzusetzen und über die Schraubverbindungen zu fügen.

Der Korrosionsschutz der Befestigungsmittel ist generell gewährleistet. Zumeist bestehen Befestigungsmittel aus nichtrostendem Stahl oder sind (galvanisch) verzinkt. Auch der Gewindeteil von Bewehrungsankern (d) besteht aus nichtrostendem Stahl. Der Bewehrungsstab hingegen ist ein klassischer Bewehrungsstahl, jedoch so tief im Bohrloch eingebunden, dass hier der Korrosionsschutz zum einen durch das alkalische Milieu des Stahlbetonbauteils und zum anderen durch die Versiegelung mit dem Injektionsmörtel gewährleistet ist. Der Korrosionsschutz der stahlbaulichen Anschlussdetails kann durch Feuerverzinken gewährleistet werden. Dies stellt eine einfache und kostengünstige Möglichkeit für den Korrosionsschutz von Stahlbauteilen dar.

Hinsichtlich des Brandschutzes bestehen Regelwerke für alle verwendeten Komponenten. Während für die rückgebauten Stahlbetonbauteile und die stahlbaulichen Anschlussdetails der Brandschutznachweis gemäß den gültigen Normen für den Stahl- und Stahlbetonbau zu führen ist, können die Tragfähigkeitswerte für die Befestigungsmittel Europäisch Technischen Bewertungen entnommen werden.

4.4 Konstruktion verschiedener Ausführungsdetails

Je nach Randbedingung (Position im Bauwerk, Abmessungen etc.) werden an das Verbindungsdetail unterschiedliche mechanische Anforderungen gestellt. Entsprechend kann auch der Komplexitätsgrad der Verbindung sehr unterschiedlich ausfallen. Dies gilt beispielsweise für flächige Bauteile wie Wände und Decken. Ist keine Aktivierung der Scheibentragwirkung erforderlich, genügt eine geringe Anzahl an Befestigungsmitteln zur Lagesicherung des Bauteils. Soll das Bauteil als aussteifende Scheibe dienen, sind die Befestigungsmittel entsprechend den rechnerischen Beanspruchungen zu dimensionieren. Prinzipiell können die nachfolgend vorgestellten Ausführungsoptionen über konventionelle Schraubverbindungen realisiert werden und ermöglichen den einfachen Zusammenbau der Stahlbetonbauteile auf der Baustelle. Des Weiteren weisen die vorgeschlagenen Verbindungen hohe Tragfähigkeiten auf und können mit bestehenden Regelwerken bemessen werden. Außerdem berücksichtigen die gewählten Anschlussdetails den Kreislaufgedanken, da Schraubverbindungen lösbar sind. Hierdurch können die Bauteile beliebig oft voneinander gelöst und wieder miteinander verbunden werden. Im Folgenden werden ausgewählte Ausführungsoptionen für die verschiedenen Positionen, an denen Bauteile miteinander verbunden werden sollen, vorgestellt.

Riegel-Stütze (gelenkig)

Für den gelenkigen Anschluss zwischen Riegel und Stütze kann der Riegel direkt auf die Stütze aufgelegt oder als Durchlaufträger über die Stütze geführt werden. Zur Lagesicherung können seitlich Bleche angebracht werden. Sollten quer zur

Durchlaufträgerrichtung ein- oder beidseitig zusätzliche Riegel angeschlossen werden, bietet sich die Konstruktion einer Konsole an (siehe Abbildung 4-5).

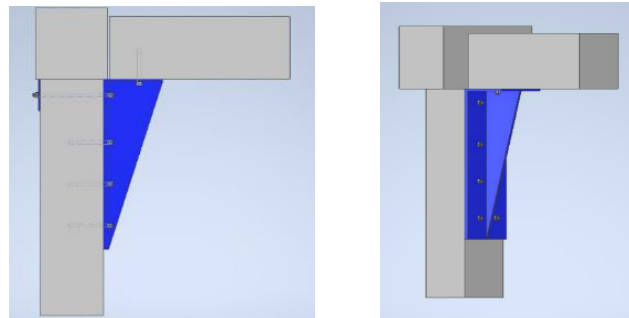


Abbildung 4-5: Anschluss von Riegel an Stütze mit aufliegendem Durchlaufträger durch Konsole
Riegel-Stütze (biegesteif)

Der biegesteife Anschluss zwischen Riegel und Stütze gestaltet sich weitaus schwieriger. Wie oben bereits beschrieben, können nur bei Verwendung eines Bewehrungsankers Biegemomente planmäßig abgetragen werden. Gleichzeitig muss der Lastabtrag von Querkräften anderweitig sichergestellt werden. Eine Konstruktion, welche diese Anforderungen erfüllt, ist in Abbildung 4-6 als Explosionsansicht dargestellt.

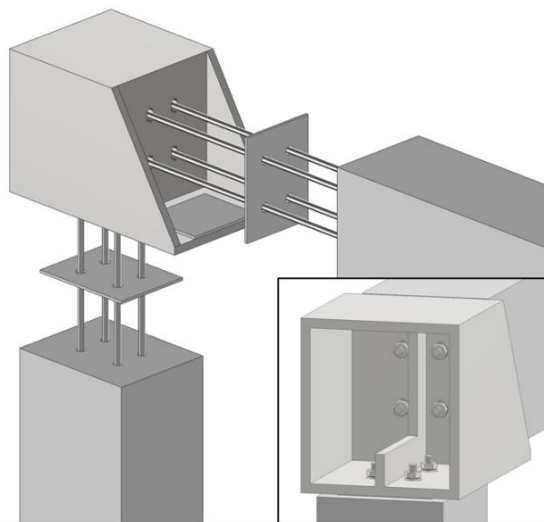


Abbildung 4-6: Biegesteife Konstruktionslösung für den Anschluss zwischen Riegel und Stütze, dargestellt als Explosionsansicht, und Rückansicht des Stahlbauteils

Es handelt sich um einen aus verschweißten Stahlblechen oder aus Stahlguss hergestellten Würfel, bei welchem eine Seitenfläche (hier die Rückseite) offenbleibt, um die Zugänglichkeit der Innenseiten zu ermöglichen. Dies ist erforderlich, um die im Stahlbetonbauteil eingebrachten Bewehrungsanker mit dem Stahlbauteil verschrauben zu können. Somit können Biegemomente in das Stahlbauteil eingeleitet werden. Der Querkraftabtrag der anschließenden Riegel wird über die Ausführung von Balkenschuhen gewährleistet. In der Darstellung ist lediglich ein Balkenschuh ausgeführt, denkbar sind aber Anschlüsse an drei der vier Seiten. Um sicherzustellen, dass die Bewehrungsanker keine Querkraftbeanspruchungen erfahren, werden im

Stahlbauteil Langlöcher eingebracht. Somit können auch Fertigungstoleranzen beim Einbringen der Bewehrungsanker ausgeglichen werden. Ebenfalls kann neben der dargestellten Stütze an der Unterseite auch auf der Oberseite eine Stütze angeschlossen werden. Die Distanzbleche an den Stirnseiten der Stahlbetonbauteile werden angeordnet, um Betonabplatzungen zu vermeiden. Aus demselben Grund wird ein Distanzblech in den Balkenschuh eingelegt. Zwar gestaltet sich die Konstruktion eines biegesteifen Anschlusses aufwendig, allerdings weist dieser Anschlusstyp neben dem Vorteil der Aussteifung (wie oben beschrieben) einen weiteren großen Vorteil auf: Durch die Einspannung der Riegel können die Feldmomente reduziert werden und somit größere Spannweiten realisiert oder schlankere Bauteile verwendet werden.

Decke-Riegel

Grundsätzlich stellt sich der Anschluss der Decke an die umliegenden Riegel relativ einfach dar. Die Deckenplatten können direkt auf die Riegel aufgelegt werden. Hierdurch können vertikale Lasten aus Eigengewicht, Ausbau und Nutzung direkt über den Kontakt abgetragen werden. Zur Lagesicherung können in größeren Abständen Befestigungsmittel im Auflagerbereich angeordnet werden. Bei großen Riegeldimensionen können die Befestigungsmittel direkt durch die Decke in die Riegeloberseite eingebracht werden. Sollte hier aufgrund von unklarer Position der Bewehrungslage das Risiko bestehen, die Bewehrung zu treffen, können Stahlwinkel eingesetzt werden, wodurch eine größere Flexibilität bei der Positionierung der Bohrlöcher ermöglicht wird. Soll die Decke als Aussteifungsverband in horizontaler Ebene wirken, sind Befestigungsmittellanzahl und -größe gemäß den vorliegenden Beanspruchungen anzuordnen.

Wand-Riegel, Wand-Stütze

Beim Anschluss von Wandelementen gilt grundsätzlich das gleiche Vorgehen wie für den Anschluss von Deckenelementen. Die Wand kann direkt auf den Riegel bzw. die Deckenplatte gestellt werden. Für Lagesicherung bzw. zur Aktivierung der Aussteifungswirkung bietet es sich in den meisten Fällen an, Stahlwinkel anzuordnen (siehe Abbildung 4-7).

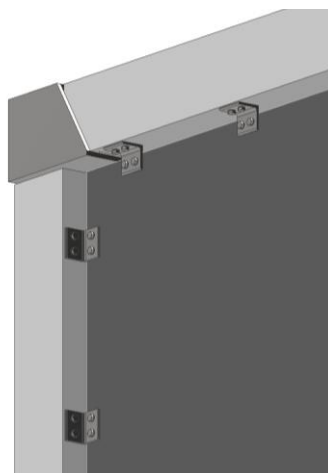


Abbildung 4-7: Anschlusslösung mit Stahlwinkeln für die Anschlussdetails Wand-Riegel und Wand-Stütze

Stütze-Stütze, Riegel-Riegel

Es ist auch möglich, Riegel- und Stützenstöße biegesteif auszuführen. Hierfür ist beispielsweise die in Abbildung 4-8 dargestellte Konstruktionslösung geeignet. Sie ähnelt in ihrer Konstruktionsweise dem biegesteifen Anschluss zwischen Stütze und Riegel. Lastabtrag und Lasteinleitung der Querkraft werden hier ebenfalls über einen Balkenschuh gewährleistet, der je nach Lastrichtung entweder oben oder unten angeordnet wird. Die Übertragung von Biegebeanspruchungen wird ebenfalls über Bewehrungsanker sichergestellt.

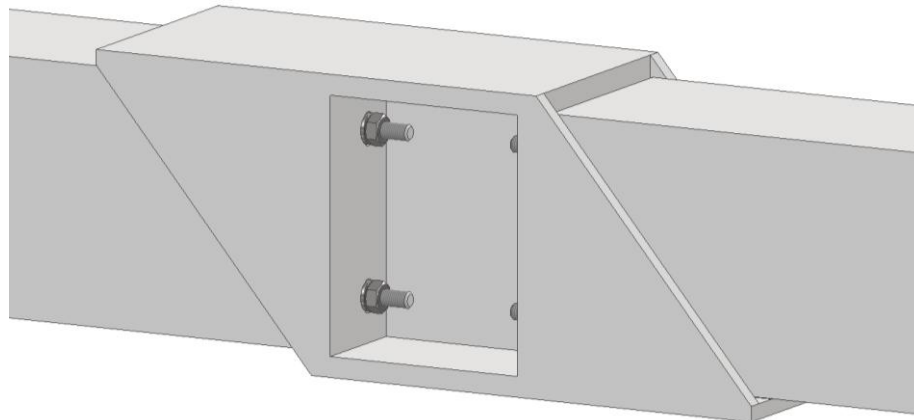


Abbildung 4-8: Biegesteife Konstruktionslösung für den Stoß Riegel-Riegel bzw. Stütze-Stütze
Decke-Decke, Wand-Wand

Ein planmäßig lastfreier Stoß von Decken (die in einem oder zwei Feldern nebeneinander liegen) oder Wänden (nebeneinanderstehend) lässt sich einfach realisieren. Hier können die Bauteile ggf. mit seitlich angeschraubten Laschen verbunden werden. Ein biegesteifer Anschluss wäre denkbar, jedoch mit großem Aufwand verbunden und wird deshalb hier nicht weiterverfolgt.

4.5 Bemessung des Referenzbauwerks in Re-Use-Bauweise

Alle vorgeschlagenen Konstruktionsdetails können mit bauaufsichtlichen Regelwerken bemessen werden. Dies erlaubt bei Einhaltung der in den Regelwerken vorgegebenen Anwendungsgrenzen eine direkte Anwendung. Im Rahmen der Bearbeitung des vorliegenden Projekts konnte gezeigt werden, dass sich das in Abschnitt 4.1 vorgestellte Referenzbauwerk in Re-Use-Bauweise sicher bemessen lässt. Da die Vorstellung der gesamten Statik den Rahmen des Abschlussberichts sprengen würde, wird hier nur das allgemeine Vorgehen der Bemessung vorgestellt.

Es besteht das grundsätzliche Ziel, möglichst die gleichen Querschnittsabmessungen für Riegel- und Stützenbauteile wie im Referenzgebäude in konventioneller Bauweise zu verwenden. An einzelnen Positionen lassen sich jedoch die erforderlichen Anschlusskonstruktionen mit den vorhandenen Querschnitten nicht realisieren, da die

Bauteile zu schlank sind und Mindestrandabstände nicht eingehalten werden können. Es wurde deshalb die Annahme getroffen, dass geeignete benötigte Bauteile aus anderen rückgebauten Bauwerken zur Verfügung stehen.

Für die Bemessung im Re-Use-Fall werden die gleichen Lastannahmen und Nutzungszwecke wie im Referenzgebäude in konventioneller Bauweise definiert. Es liegen somit identische Vertikallasten vor. In Bezug auf die Horizontallasten, welche für das neue Aussteifungssystem maßgebend sind, werden Lasten aus Wind und Imperfektion (Schiefstellungen) betrachtet. Nach Festlegung der statischen Systeme und der Lastannahmen erfolgt die Schnittgrößenermittlung. Anschließend kann die Bemessung durchgeführt werden. Tabelle 4-1 gibt eine Übersicht über die für die Bemessung relevanten Regelwerke. Für die Bemessung der Befestigungsmittel besteht außerdem die Möglichkeit auf Bemessungssoftware der Hersteller zurückzugreifen.

Tabelle 4-1: Regelwerke für die Bemessung des Re-Use-Gebäudes

Lastannahmen	DIN EN 1990
Bauteilnachweise der Stahlbetonbauteile	DIN EN 1992-1
Nachweise der Dübel für den Anschluss der gelenkigen Konsolen	DIN EN 1992-4
Nachweise der Bewehrungsanker	ETA-17/1056 bzw. DIN EN 1992-1-1
Nachweis der Querbewehrung in den Stoßbereichen, Betondrucknachweise	DIN EN 1992-1-1
Nachweis der Stahlbauteile	DIN EN 1993-1-8 (Zusätzlich numerische Simulation)

4.6 Diskussion von Konstruktions- und Ausführungsempfehlungen

Stahlbauliche Anschlussdetails für unterschiedliche Beanspruchungen und Bauteile wurden im Rahmen des Projektes konstruiert und dimensioniert und sind in Abschnitt 4.4 beschrieben. Wiederverwendete Bauteile weisen hinsichtlich der vorhandenen Randbedingungen, insbesondere bzgl. der Bewehrungsführung und der Bauteilgeometrie, eine große Varianz auf. Deshalb ist zum jetzigen Zeitpunkt die Ableitung eines allgemein gültigen Leitfadens zur Konstruktion und Ausführung der stahlbaubasierten Anschlüsse nur bedingt möglich. Es ist eine Bemessung und Konstruktion nach den o.g. bauaufsichtlich eingeführten Regelwerken für den einzelnen Stahlanschluss erforderlich. Dabei können nachfolgende Empfehlungen berücksichtigt werden. Grundsätzlich konnte im Rahmen der Untersuchungen gezeigt werden, dass die Ausführung der biegesteifen Anschlusskonstruktion bei gedrunenen Bauteilen, insbesondere bei unklarer Bewehrungslage begrenzt ist, da die Bewehrungsanker aufgrund vorhandener Biege- oder Anschlussbewehrung nicht an der gewünschten Stelle oder überhaupt nicht gesetzt werden können. Bei schwach bewehrten Bauteilen, welche im Anschlussbereich an den Bauteilenden nur geringe Bewehrungsgrade aufweisen, kann der biegesteife Anschluss nur für begrenzt hohe mechanische

Beanspruchungen ausgeführt werden. Ob hier eine biegesteife Ausführung zielführend ist, sollte in einem frühen Planungsstadium überprüft werden.

Grundsätzlich hat es sich als zielführend herausgestellt, auftretende Querkräfte über einen Balkenschuh oder einen Schubdorn abzutragen. Die Bemessung der Lasteinleitung in das Stahlbetonbauteil kann softwaregestützt mit den von den Dübelherstellern zur Verfügung gestellten Bemessungsprogrammen erfolgen. Die Positionierung der Befestigungsmittel kann unter Berücksichtigung der herstellerseitig festgelegten Grenzen (siehe jeweilige ETA/abZ) je nach Bedarf gewählt werden. Da die Verfahren zur Bemessung der Befestigungsmittel nicht für die im Rahmen des Projektes konzipierten Anschlussdetails mit geringen Randabständen hergeleitet wurden, führt die Bemessung nach Einschätzung der Autoren zu konservativen Ergebnissen. Folglich besteht ein erheblicher Forschungsbedarf in Bezug auf die Durchführung von experimentellen Untersuchungen und Auswertungen des Tragverhaltens der Befestigungsmittel für die vorgestellten Anschlussdetails. Basierend auf Versuchsergebnissen könnte die Leistungsfähigkeit und der Anwendungsbereich der Konstruktionslösung erheblich erweitert werden. Darüber hinaus sind den Autoren keine Anwendungsfälle oder Untersuchungen zur in Abbildung 4-8 dargestellten Bauweise/Verbindung bekannt. Die experimentelle Untersuchung dieser Bauweisen ist Aufgabe zukünftiger Forschungsarbeiten. Die Bemessung der Stahlbaudetails kann je nach Komplexität des Bauteils entweder rechnerisch nach DIN EN 1993 [Dine10] oder numerisch gestützt (nach pR1993-1-14) erfolgen. Bei Bedarf sind aussteifende Elemente an den Stirnplatten bzw. Seitenblechen vorzusehen. Beim Einbau der Befestigungsmittel sind zwingend die Vorgaben und Anwendungsgrenzen der Befestigungsmittelhersteller einzuhalten.

Hinsichtlich der Exposition bei Bewitterung bzw. korrosiver Umgebung sind die Bauteile entsprechend zu schützen. Für die Stahlbauteile ist je nach Umgebung über die Verzinkung hinaus ein organischer Korrosionsschutz denkbar (Duplex-Beschichtung). Die Befestigungsmittel bestehen üblicherweise aus nicht rostendem Stahl. Die Bewehrungsanker sind im Bereich der Bewehrung aus konventionellem Bewehrungsstahl, allerdings so tief im Bohrloch eingebettet, dass hier keine Korrosionsgefahr besteht. Prinzipiell sollte überprüft werden, ob die Befestigungstechnik für den angestrebten Einsatz unter Beachtung der Expositionsklasse aus Sicht des Korrosionsschutzes bzw. Werkstoffs zugelassen ist. Für die Herangehensweise bei den wiederverwendeten Stahlbetonbauteilen wird auf den zugehörigen Leitfaden verwiesen (siehe Anhang A1).

Um Betonabplatzungen im Kontaktbereich zwischen Stahlbauteil und Stahlbetonbauteil zu vermeiden, ist die Anordnung von Distanzblechen mit reduziertem Querschnitt zielführend.

5 Ökobilanzielle Bewertung (AP4)

Von großer Relevanz für die ganzheitliche Bewertung einer neuartigen Bauweise ist die ökobilanzielle Bewertung. Deshalb wird im Rahmen des Projekts eine Ökobilanz für die Errichtung des in Abschnitt 4.1 vorgestellten Referenzbauwerks in Re-Use-Bauweise erstellt. Um die ermittelten Werte einordnen zu können, wird darüber hinaus eine weitere Ökobilanz für die Errichtung des gleichen Bauwerks in konventioneller Stahlbetonskelettbauweise erstellt. Die Erstellung der Ökobilanzen erfolgt gemäß DIN EN ISO 14040 [Dine20a].

Die Ökobilanz beschreibt im Allgemeinen den Einfluss eines Produktes auf die Umwelt für dessen ganzen Lebenszyklus. Hier sollten, sofern möglich, alle Prozesse im Lebenszyklus des Produkts berücksichtigt werden. Es gilt für die Ökobilanz nicht nur die Umweltwirkungen des Produkts selbst zu betrachten, sondern auch die aller Vorprodukte. Dazu zählen auch Hilfs- oder Betriebsstoffe, wie beispielsweise Klebstoffe oder Kühlmittel. Auch die Prozesse der Energieerzeugung, der Förderung und Bereitstellung der benötigten Rohstoffe sowie sämtliche Transporte werden ganzheitlich berücksichtigt. Nach der Produktion und der Lebensdauer behandelt die Ökobilanz auch die Entsorgung beziehungsweise das Recycling des Produktes und seiner Bestandteile. Um eine komplette Ökobilanz zu erstellen, müssen zahlreiche Daten erhoben werden. Um die Vergleichbarkeit verschiedener Ökobilanzen zu garantieren, wird die Erstellung von Ökobilanzen in den Normen ISO 14040 [Dine20a] und ISO 14044 [Dine20b] geregelt. Diese Normen unterteilen die Datenerhebung in verschiedene Phasen. Wenn die Datenerhebung abgeschlossen ist, können die Daten in sogenannten EPDs (Environmental Product Declaration) zusammengefasst werden. Die EPD fasst die Treibhauspotentiale in verschiedenen Lebensabschnitten des Produkts zusammen. Gegliedert sind diese in den Modulen A-D. Abbildung 5-1 zeigt die Lebenszyklusphasen eines Produkts in einer EPD.

ANGABE DER SYSTEMGRENZEN (X = IN ÖKOBILANZ ENTHALTEN; ND = MODUL ODER INDIKATOR NICHT DEKLARIERT; MNR = MODUL NICHT RELEVANT)																
Produktionsstadium			Stadium der Errichtung des Bauwerks		Nutzungsstadium							Entsorgungsstadium				Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze
Rohstoffversorgung	Transport	Herstellung	Transport vom Hersteller zum Verwendungsort	Montage	Nutzung/Anwendung	Instandhaltung	Reparatur	Ersatz	Erneuerung	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	Rückbau/Abriß	Transport	Abfallbehandlung	Beseitigung	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder Recyclingpotenzial
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	X	X	X	MND	MNR	MNR	MNR	MND	MND	X	X	X	X	X

Abbildung 5-1: Lebenszyklusphasen eines Produkts gemäß DIN EN ISO 14040; Auszug aus [Umwea]

Um die beiden Ökobilanzen für die konventionelle Ortbetonbauweise und für die Re-Use-Bauweise vergleichen zu können, müssen zunächst einige Festlegungen und Annahmen getroffen werden. Da die betrachteten Konstruktionsweisen jeweils nur den Rohbau betreffen, berücksichtigen beide Ökobilanzen nur das Primärtragwerk.

Elemente wie Fassade, Fußbodenaufbauten, Innenausbau etc. werden nicht berücksichtigt. Ebenso wird konservativ die CO₂-Aufnahme durch die Karbonatisierung des Betons vernachlässigt.

Die ökobilanzielle Betrachtung beinhaltet nur die Module A1-A5. Das Nutzungsstadium wird nicht betrachtet. Es wird davon ausgegangen, dass dieses für beide Fälle (Ortbeton und Re-Use) identisch ist. Das Entsorgungsstadium C1-C4 und die Gutschriften D werden konservativ nicht betrachtet. Für das Re-Use-Gebäude wird in der vorliegenden Berechnung angenommen, dass die benötigten Stahlbetonbauteile aus vorhandenen Rückbaustellen gewonnen werden können. Somit kann für die Stahlbetonbauteile selbst im Re-Use-Fall angenommen werden, dass für deren Herstellung kein CO₂-Ausstoß angesetzt werden muss. Dieser wurde bereits im vorherigen Nutzungsszenario berücksichtigt.

5.1 Gebäude in Ortbetonbauweise

Für das Referenzgebäude in Ortbetonbauweise wird für die ökobilanzielle Bewertung zunächst das Volumen des Betons berechnet. Da es sich um bewehrten Beton handelt, muss die Bewehrung bei der Bilanzierung berücksichtigt werden. Die Bewehrungsgrade werden für die einzelnen Bauteile aus der Bestandsstatik [Lohm04] entnommen. Damit kann die ökobilanzielle Bewertung des Gebäudes in Ortbetonbauweise exakt durchgeführt werden. Für die beiden Materialien Beton C25/30 und Bewehrungsstahl existieren EPDs. Mit den ermittelten Beton- und Bewehrungsstahlvolumina kann die Ökobilanz ermittelt werden. Für den Beton C25/30 gilt die EPD-IZB-20230421-IBA1-DE [Umwelb]. Hier ist das Treibhauspotenzial für die Module A1-A3 zusammengefasst und kann mit dem berechneten Betonvolumen multipliziert werden. Für das Modul A4 wird eine Transportstrecke zur Baustelle von 17,6 km angenommen. Bei diesem Wert handelt es sich um einen Durchschnittswert, der basierend auf zahlreichen analysierten Bauprojekten ermittelt wurde. Für das Modul A5, den Einbau, wird lediglich der Energieaufwand in Form von elektrischer Energie berücksichtigt. Für die Bewehrung dient EPD-BSW-20210265-CBA1-DE [Umwec]. In dieser wird Bewehrungsstahl betrachtet, der hauptsächlich aus Schrott im Elektrolichtbogenofen hergestellt wird. Hier ist wie beim Beton das Potential der Module A1-A3 zusammengefasst und kann mit dem berechneten Volumen bzw. der Masse multipliziert werden. Die Module A4 und A5 sind nicht deklariert. Für das Transportmodul A4 werden Angaben in [Kuhl23] herangezogen. Dort wird ein Wert für den CO₂-Ausstoß eines LKWs angegeben, der eine Tonne Material über einen Kilometer transportiert ($0,0897 \frac{kg \cdot CO_2}{t \cdot km}$). Der Einfluss von Leerfahrten ist in diesem Wert bereits berücksichtigt. Mit diesem Kennwert kann mit dem Bewehrungsvolumen die Masse berechnet werden und mit einer Annahme von 75 km Distanz zum Bauort das Treibhauspotential für das Modul A4 bestimmt werden. Für das Modul A5 wird beim Bewehrungsstahl kein CO₂-Ausstoß angesetzt. Mit den vorgestellten Randbedingungen ergibt sich für das Referenzbauwerk in Ortbetonbauweise ein CO₂-Ausstoß von 57,44 t. Dabei verursacht der Beton 38,94 t CO₂ und der Bewehrungsstahl 18,50 t CO₂.

5.2 Gebäude in Re-Use-Bauweise

Bei der Ökobilanzierung des Gebäudes in Re-Use-Bauweise ist festzuhalten, dass die Stahlbetonbauteile nicht die klassischen Produktionsstadien, wie Gewinnung der Primärrohstoffe (A1), Transport der Primärrohstoffe (A2) und Herstellung des Produkts (A3) aufweisen. Stattdessen müssen die beim Rückbau und der Aufbereitung der Bauteile auftretenden CO₂-Emissionen den jeweiligen Modulen zugeordnet werden. Dies wird gemäß den IBU-Regularien für den Rückbau [Ibu] durchgeführt. Für das Modul A1, die Rohstoffversorgung, wird im Re-Use-Fall das Herausschneiden der Bauteile betrachtet. Das Herausschneiden der Bauteile erfolgt mit einer schienengeführten Betonsäge. Die Betonsäge hat eine Schneidgeschwindigkeit von 1000 cm²/min. Folglich ist für jedes Bauteil die Schnittfläche zu berechnen, die erforderlich ist, um das Bauteil aus dem Bestand herauszutrennen. Aus den Schnittflächen lässt sich die Schnittzeit berechnen. Die ermittelte Schnittzeit wird mit einem Faktor von 2 beaufschlagt, um Umbauarbeiten, Stützarbeiten etc. zu berücksichtigen. Diese Nutzungsdauer wird für den Kran und die Teleskopbühne angesetzt, welche zum Ausheben der Bauteile benötigt werden. Im Modul A1 entsteht die Umweltbelastung also durch den Mobilkran, die Säge und die Teleskopbühne. Es wird angenommen, dass die Baustelle über einen Netzanschluss versorgt wird und somit auf Dieselgeneratoren verzichtet werden kann. Die Betonsäge weist eine Leistung von 15 kW auf. Die Umweltbelastungen durch den Stromverbrauch, den Kran und die Teleskopbühne werden ebenfalls aus dem Stahlbau-Kalender 2023 [Kuhl23] entnommen. Dieser tabelliert die Umweltbelastung durch Stromverbrauch (Strommix) und diverse Baumaschinen auf Basis der ÖKOBAUDAT [Ökob].

Im Modul A2, dem Transport im Produktionsstadium, wird die Strecke vom Rückbauort zur Aufbereitungsstätte betrachtet. Da für das Einmörteln der Bewehrungsanker sehr tiefe und gerade Löcher gebohrt werden müssen und die Betonoberfläche vorher behandelt werden muss, wird konservativ davon ausgegangen, dass nur eine beschränkte Anzahl von Unternehmen diese Arbeiten durchführen kann. Entsprechend wird die Distanz zwischen Rückbaustelle und Aufbereitungsort erhöht und zu 150 km gewählt. Die entstehende Umweltbelastung durch den Transport wird analog zum obigen Vorgehen berechnet.

Für das Modul A3, die Herstellung, werden die Umweltbelastungen durch die Fertigung der stahlbaulichen Anschlüsse betrachtet. Die Stahlvolumina für den gelenkigen Konsolenanschluss und das Anschlussdetail für den biegesteifen Anschluss werden berechnet. Beim Stahl wird zwischen Stahl aus der typischen Hochofenroute und aus der schrottbasierten Elektrostahlroute unterschieden. Um Kleinteile wie Dübel, Schrauben und Muttern zu berücksichtigen, wird die Umweltbelastung der Stahlbauteile konservativ mit einem Faktor von 1,10 beaufschlagt. Darüber hinaus werden die Volumina der Bewehrungsanker, die im biegesteifen Anschluss einzumörteln sind, separat betrachtet. Für diese wird die EPD der klassischen Bewehrung verwendet. Ebenfalls zu berücksichtigen ist bei den eingemörtelten Bewehrungsstäben der Injektionsmörtel FIS EM Plus [Epoxy]. Neben den Materialien selbst wird auch deren

Transport von den Herstellungsorten zur Aufbereitungsstätte berücksichtigt. Hierfür wird wie zuvor eine Strecke von 150 km angenommen.

Für das Modul A4, dem Transport zum Bauort, wird eine Transportstrecke von 100 km angenommen und der CO₂-Ausstoß analog zu A2 berechnet.

Für das Modul A5, die Montage, wird ähnlich wie in Modul A1 die Umweltbelastung durch die benötigten Baumaschinen betrachtet. Für den Aufbau des Gebäudes sind ein Mobilkran und eine Teleskopbühne erforderlich, deren Emissionen bestimmt werden.

Unter Berücksichtigung der genannten Randbedingungen kann der CO₂-Ausstoß im Re-Use-Fall bestimmt werden. Für das Referenzbauwerk werden bei Errichtung in Re-Use-Bauweise 19,88 t CO₂ erzeugt.

5.3 Gegenüberstellung der Bauweisen

Abbildung 5-2 stellt die Ökobilanzen der beiden Errichtungsweisen gegenüber.

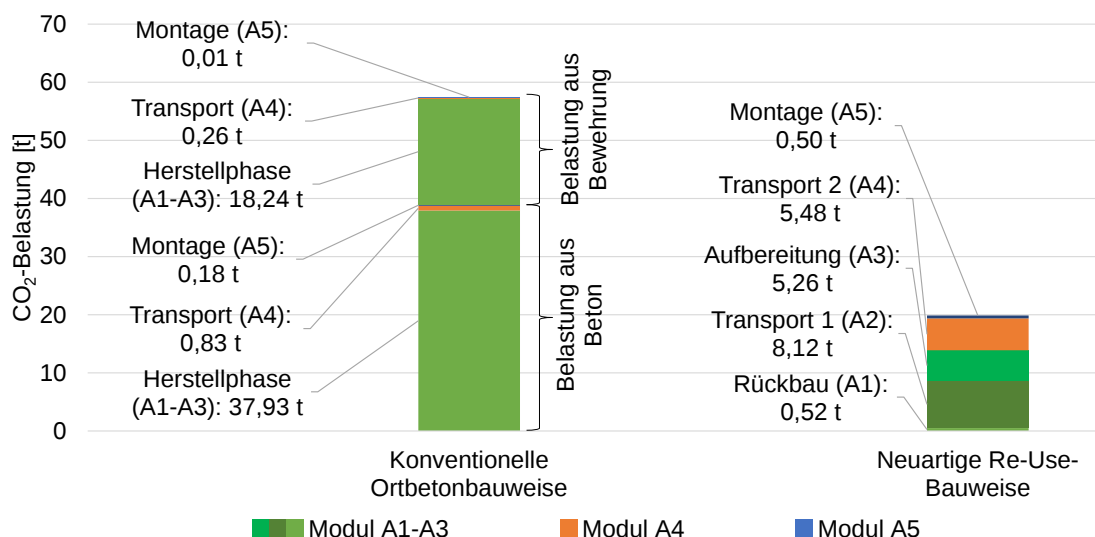


Abbildung 5-2: Gegenüberstellung der Ökobilanzen: Konventionelle Ortbetonbauweise und Wiederverwendung

Es wird ersichtlich, dass im Re-Use-Szenario im Vergleich zur klassischen Bauweise ein erhebliches Potential zur CO₂-Einsparung liegt. Das Re-Use-Gebäude erzeugt lediglich $\frac{19,88}{57,44} = 0,35 = 35\%$ der Emission eines identischen Gebäudes in Ortbetonbauweise. Es zeigt sich, dass der Aufwand des Herausschneidens und des Transportes der Bestandsbauteile in Bezug auf die CO₂-Bilanz durchaus in Kauf genommen werden kann. Darüber hinaus zeigt sich bei näherer Betrachtung, dass von den insgesamt verursachten 19,88 t CO₂ mit 13,6 t mehr als zwei Drittel aus dem Transport der Bauteile entstehen. Sofern die Distanzen zwischen Aufbereitungsstätten und Abbauort reduziert werden können, vergrößert sich das Einsparpotential zusätzlich.

Als Kenngröße wird häufig der CO₂-Ausstoß pro Netto-Raumfläche (im folgenden NRF; nach DIN 277) angegeben. Entsprechend soll auch hier der Wert jeweils auf die NRF

umgerechnet werden. Da im Rahmen des Projektes nur EG und OG betrachtet wurden, wird auch hier auf eine Betrachtung des Kellers verzichtet. Die NRF errechnet sich somit folgendermaßen:

$$A_{EG} = 25 \text{ m} * 18 \text{ m} - (2,70 \text{ m} * 4 \text{ m} + 0,25 \text{ m} * 0,25 \text{ m} * 8) = 438,7 \text{ m}^2$$

$$= \text{Grundfläche} - \text{Fläche unter Treppe} - \text{Mittelstützenfläche}$$

$$A_{OG} = 25 \text{ m} * 18 \text{ m} - (0,25 \text{ m} * 0,25 \text{ m} * 8 - 0,25 \text{ m} * 4,25 \text{ m} * 2) = 447,38 \text{ m}^2$$

$$= \text{Grundfläche} - \text{Mittelstützen} - \text{Treppenhauswand}$$

$$\text{NRF} = 0,85 * (438,7 + 447,38) \text{ m}^2 = 753,17 \text{ m}^2$$

Die NRF wird für beide Bauweisen als gleich groß angenommen. Die Abweichungen, welche durch geringfügig größere Stützen-Geometrien bei der Re-Use-Bauweise entstehen, sind vernachlässigbar klein. Als CO₂-Ausstoß pro Quadratmeter NRF ergibt sich somit für die beiden Bauweisen:

$$\text{Emission}_{\text{NRF Ort beton}} = \frac{57,44 \text{ t CO}_2\text{-äq.}}{753,17 \text{ m}^2} = 0,07272 \frac{\text{t CO}_2\text{-äq.}}{\text{m}^2} = 72,72 \frac{\text{kg CO}_2\text{-äq.}}{\text{m}^2}$$

$$\text{Emission}_{\text{NRF Re-Use}} = \frac{19,88 \text{ t CO}_2\text{-äq.}}{753,17 \text{ m}^2} = 0,02635 \frac{\text{t CO}_2\text{-äq.}}{\text{m}^2} = 26,35 \frac{\text{kg CO}_2\text{-äq.}}{\text{m}^2}$$

Somit beträgt die CO₂-Einsparung für das betrachtete Beispiel bei der Re-Use-Bauweise im Vergleich zur konventionellen Ort betonbauweise $46,37 \frac{\text{kg CO}_2\text{-äq.}}{\text{m}^2}$.

Bewertung der Kreislauffähigkeit

Die Bewertung der Kreislauffähigkeit der entwickelten Re-Use-Bauweise basiert hauptsächlich auf der Lösbarkeit der Verbindungen. Bei den vorgestellten Konstruktionsdetails sind alle verwendeten Bauteile lösbar miteinander verbunden. Die Zugänglichkeit zu den Verbindungen ist gewährleistet, und damit ein einfacher Rückbau ermöglicht. Nach ihrer Nutzungsphase im betrachteten Bauwerk in Re-Use-Bauweise können alle Bauteile in einem neuen Bauwerk erneut eingesetzt werden. Bei starker korrosiver Beanspruchung ist ggf. die Beschichtung der Stahlbauteile zu erneuern. Das Vorgehen für die Stahlbetonbauteile wird im Leitfaden erläutert (siehe Anhang A1).

6 Anwendung des Leitfadens und modularen Baukastensystems (AP5)

Zur Validierung und Erprobung des in Kapitel 3 beschriebenen Leitfadens sowie des Baukastensystems (Kapitel 2 und 4) werden diese exemplarisch angewendet. Hierzu stand ein reales Rückbauvorhaben zur Verfügung. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte des Leitfadens mit besonderem Fokus auf Aspekten zum Baukastensystem erläutert und die praktische Umsetzung beschrieben.

6.1 Zieldefinitionen für den Wiederverwendungsprozess (Schritt 1)

Bei dem Planungsvorhaben handelt es sich um ein Rückbauprojekt mit angegliedertem Neubauprojekt. Hierbei sollten linienförmige und flächige Stahlbetonbauteile eines Bestandsgebäudes gezielt selektiv rückgebaut werden, um einen Anbau zu realisieren. Im Rahmen dieses Vorhabens musste die Dekonstruktion in den laufenden Baubetrieb integriert werden. Daher gab es in diesem Rückbauvorhaben konkrete Anforderungen und Vorgaben an z. B. den Bauablauf oder die Baustellenlogistik. Aus dem individuellen Ziel, der Anwendung des modularen Baukastensystems, ergaben sich ebenfalls konkrete Anforderungen und Vorgaben. Beispielsweise sind die folgenden wichtigsten Zielsetzungen zu nennen:

- Integration der rückgebauten Bauteile in das modulare Baukastensystem;
- Stahlbaubasierte Verbindungen (siehe z. B. Abbildung 4-5);
- Anwendung des lösbaren Verbindungsprinzips nach Kapitel 4.3;
- Neubauvorhaben eines Rahmentragwerks als Teil der angestrebten Skelettbauweise (siehe Abbildung 2-5).

6.2 Rückbauvorhaben

Im Rahmen dieses Anwendungsfalls wurden die Integritätserfassung und -bewertung der rückzubauenden Bauteile (Schritt 2), die Integrations- und Eignungsprüfung ins Baukastensystem (Schritt 3) sowie die Dekonstruktion (Schritt 4) begleitet. Die wichtigsten Aspekte werden im Folgenden zusammengefasst.

6.2.1 Integritätserfassung und Erstklassifizierung der Bestandsgebäudestruktur (Schritt 2)

Sowohl für die Vorplanung als auch für die digitalen Zwillinge lagen umfangreiche Bewehrungspläne für das Tragwerk und für die einzelnen Bauteile vor. Die zur

Dekonstruktion vorgesehenen Bauteile umfassen mehrere Balken, Stützen und Sandwichwände aus Stahlbeton. Dabei standen drei balkenartige Bauteile (Pos. 1: Querschnitt $200 \times 250 \text{ mm}^2$) mit einer Länge von vier und fünf Metern, drei Stützen (Pos. 2: Querschnitt $400 \times 300 \text{ mm}^2$) mit einer Länge von ca. drei Metern sowie drei selbsttragende Sandwichwände (Pos. 3) zur Integration in die Bauteildatenbank zur Verfügung. Bei den Bauteilen handelt es sich um Stahlbetonfertigteile aus dem Jahr 2001, die monolithisch durch Verguss mit dem Fundament verbunden wurden. Die Balken wurden ebenfalls durch Verguss an den Stützen gefügt. Die Entkernung der Tragwerksstruktur erfolgte bereits vor der Bauwerksbegehung. In Abbildung 6-1 ist das Rückbauvorhaben dargestellt, wobei die Sandwichwände (Pos. 3) bereits rückgebaut wurden.



Abbildung 6-1: Übersicht zum Rückbauvorhaben während der Bauwerksbegehung

Auf Basis der gut dokumentierten Planungsunterlagen wurde eine Prüfungsanweisung für die Bestandserfassung erstellt. Diese beinhaltete auszugsweise die folgenden Untersuchungen:

- Last- und umweltbedingte Schädigungen
 - Phenolphthalein-Test nach DIN EN 12390-10 [Dine18] (zerstörend)
 - Sichtprüfungen zur Identifikation von Oberflächenschäden (Korrosion, chemische Angriffe, Kiesnester etc.), Ästhetik und Rissen
 - Rissbreitenvermessung sowie Vermessung von Schäden
- Konformität
 - Gefügeprüfung durch Kernbohrungen (zerstörend)
 - Sichtprüfungen und Bauteilvermessungen
 - Bewehrungsdetektion (induktives Messverfahren) zur Überprüfung der Position und Geometrie der Bewehrung
- Kontamination
 - Prüfung der Planungsunterlagen und Projekttrandbedingungen
 - Sichtprüfungen
- Materialeigenschaften
 - Zerstörungsfreie Prüfungen (Rückprallhammer nach [Dine21a])
 - Zerstörende externe Prüfungen an Kernbohrproben (Druckfestigkeit nach [Dine19])

Auf der Grundlage der Analyse der Pläne, Baujahr, Nutzungshistorie sowie den Sichtprüfungen zur Expositionsbeurteilung wurden keine weiteren Kontaminationsprüfungen durchgeführt und Belastungen wie Asbest ausgeschlossen. Alle Abmessungen wurden manuell überprüft und stimmen mit den Planunterlagen überein. Die einzige Planabweichung konnte in Form einer kreisrunden Öffnung mit einem Durchmesser von ca. 50 mm an einer Stütze festgestellt werden. Außerdem konnte keine Rissbildung oder Schädigungen beobachtet werden. Aufgrund von Verfestigungseffekten liegt die durch zerstörende Festbetonprüfungen ermittelte Druckfestigkeit deutlich über dem normativen Wert der historischen Betonfestigkeitsklasse *B 45* nach DIN 1045-1:2001 [Dine01]. In Abbildung 6-2 sind verschiedene Auszüge aus der Bestandserfassung exemplarisch dargestellt.

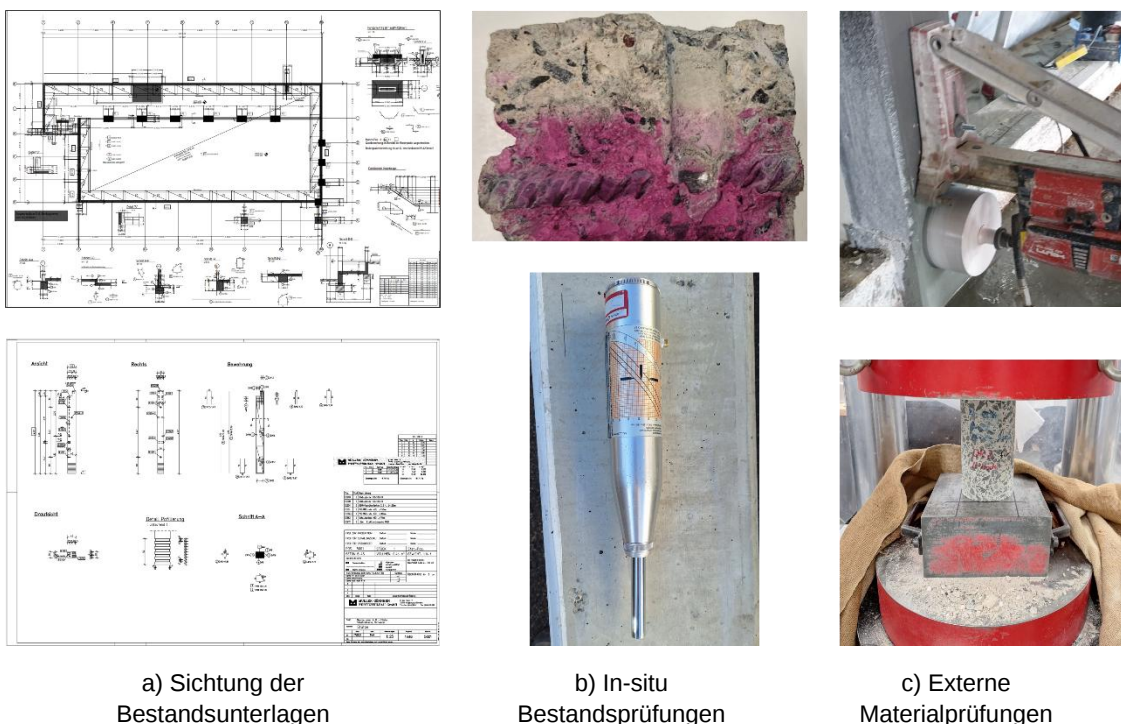


Abbildung 6-2: Exemplarische Auszüge aus der Bestandserfassung

Gemäß aktueller Normung kann den Bauteilen die äquivalente Betonfestigkeitsklasse C35/45 zugeordnet werden. Für die weitere Planung und Bemessung wurde diese Festigkeitsklasse herangezogen. Auf Grundlage der durchgeführten Festbetonprüfungen (zerstörend und zerstörungsfrei) liegen mit dieser Annahme noch deutliche Festigkeitsreserven vor. Aufgrund der Tragwerksanalyse können zeitabhängige Effekte vernachlässigt werden. Zudem lässt sich die bestehende Bewehrungskonstruktion auf heutige Standards übertragen. Zu beachten ist jedoch, dass die Duktilität und damit die Bruchdehnung des historischen Stabstahls *BSt 500 S* geringer sind als nach aktueller Normung. Basierend auf dieser Analyse (Bewertungsstufe 1) können alle linienförmigen Bauteile der ersten Klassifizierungsstufe (Klassifizierungsstufe E1: potenziell wiederverwendbar als tragendes Bauteil (siehe Anhang A1)) zugeordnet werden. Die Sandwichelemente wurden als Sonderbauteile klassifiziert und ihre Wiederverwendbarkeit im Rahmen dieses initialen Vorhabens als

nicht wirtschaftlich bewertet (Klassifizierungsstufe E3: konventionelle Verwertung). Zur Prozessdigitalisierung wurden für die weitere Planung digitale Zwillinge erstellt, in denen alle gesammelten Daten und Bewertungen hinterlegt wurden.

6.2.2 Modulares Baukastensystem für zirkuläre Wiederverwendungen rückgebauter Stahlbetonbauteile (Schritt 3)

Die Bauteile lassen sich optimal in das Baukastensystem eingliedern. Sie sind symmetrisch bewehrt und somit für eine potenziell multifunktionale Nutzung geeignet. Zudem lassen sie sich in die Maßsystematik des Baukastens integrieren. Da alle Anforderungen des angestrebten Baukastens erfüllt werden, ist eine Integration in das modulare System möglich (Bewertungsstufe 2). Detaillierte Informationen dazu finden sich im Kapitel 2.2 sowie im Anhang A1. Um in anderen Nutzungsphasen weitere Segmentierungen zu ermöglichen, wurde die maximale Modullänge (ohne Segmentierung) gewählt.

6.2.3 Dekonstruktionsstrategie zur Modularisierung des Rückbauvorhabens (Schritt 4)

Die Demontage aller Bauteile erfolgte gemäß der Dekonstruktionsanweisung und den erstellten Schnittplänen. Dabei wurde die systematische Entnahme dem statischen Kraftfluss angepasst. Zunächst wurden die selbsttragenden Wände zurückgebaut und anschließend die Balken entnommen. Zuletzt wurden die verbleibenden auskragenden Stützen demontiert. Statische Berechnungen waren im Rahmen der Dekonstruktion nicht erforderlich. Lediglich für die Entnahme der Balkentragwerke wurde eine temporäre Stützkonstruktion angeordnet. Die folgende Abbildung 6-3 zeigt den Entnahmeprozess.



a) Kernbohren



b) Sägen



c) Beispielhafte Entnahme

Abbildung 6-3: Eingesetzte Entnahmetechniken sowie beispielhafte Entnahme einer Stütze

Bei der Wahl der Entnahmetechnik wurde auf die technische Umsetzbarkeit geachtet. Der bevorzugte Einsatz einer Säge für die linienförmigen Bauteile konnte nicht realisiert werden, da der erforderliche Platz zur Montage der Führungsschiene nicht vorhanden

war. Stattdessen kamen Kernbohrungen mit diamantbesetzten Bohrkronen ($\varnothing$ 250 mm) zum Einsatz. Ein Teil der Bohrkern wurden gezielt im Rahmen der Dekonstruktionsplanung als Probenmaterial für weiterführende Festbetonprüfungen genutzt. Alle Bauteile ließen sich sicher zurückbauen (Bewertungsstufe 3).

Eine sorgfältige und schadenspräventive Logistikplanung ist im Bauablauf essenziell, um prozessbedingte Schädigungen zu vermeiden. Die Umsetzung der Logistik umfasste geeignete Sicherungsmaßnahmen sowie eine angepasste Hebe- und Abladetechnik. Zur Aufnahme und zum Transport wurde ein Radlader mit Gabelzinken verwendet. Für die Stützen konnte ein vorhandenes Montageloch genutzt werden und für die Balken wurden neue Transportanker angeordnet. Die rückgebauten Bauteile wurden gemäß der Logistikplanung an der ausgewiesenen Zwischenlagerungsstätte platziert (siehe Abbildung 6-4). Die Schnittflächen wurden nach der Entnahme antikorrosiv behandelt, um eine fortschreitende Korrosion der freiliegenden Bewehrung zu verhindern.



a) Ausgewiesene Zwischenlagerung



b) Transport zur Aufbereitung

Abbildung 6-4: Schadenspräventive Logistikplanung bei der Dekonstruktion

6.3 Bauteilumwandlung

Das Neubauvorhaben sieht die Errichtung eines Rahmentragwerks in Skelettbauweise vor. Hierzu muss die konkrete Wiederverwendung der einzelnen entnommenen Stahlbetonmodule individuell geplant und die erforderlichen Aufbereitungsmaßnahmen festgelegt werden.

6.3.1 Wiederverwendungsprozessoptimierung am einzelnen Stahlbetonmodul (Schritt 5)

Im ersten Schritt der konkreten Wiederverwendungsplanung wurden am individuellen Bauteil weitere Prüfungen auf Bauteil- und Schnittstellenebene durchgeführt. Um die Tragfähigkeitsprognose zu präzisieren, wurden zunächst weitere zerstörende externe Prüfungen an Bohrkernproben vorgenommen, darunter die Ermittlung des E-Moduls in Anlehnung an [Dine21b] sowie die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit in Anlehnung an [Dine23]. Analog zu den Druckfestigkeitsprüfungen nach Kapitel 6.2.1 lagen auch hier die ermittelten Werte deutlich über den zugehörigen Werten aus der Norm. Darüber

hinaus wurden Sichtprüfungen zur Erfassung von Prozessschäden (z. B. durch Transport) sowie die exakte Geometrie nach der Entnahme erhoben. Dabei konnten bei einem der Stützenbauteile Risse und Abplatzungen aufgrund von Schädigungen im Transportprozess festgestellt werden. Bei den Balkentragwerken war insbesondere eine genaue Identifizierung der Bügelbewehrung (mithilfe induktiver Messverfahren) an den Bauteilrändern relevant, um Querkzugspannungen und mögliche Risse aufnehmen zu können, die aus der Krafteinleitung im Nutzungsfall resultieren. Insbesondere für die Anwendung des lösbaren Verbindungsprinzips müssen die Kontaktflächen genauer untersucht werden. Dabei ist die exakte Lage aller Bewehrungsseisen zu erfassen (z. B. zur Bohrlochplanung) sowie die Oberflächenbeschaffenheit zu bewerten. Schnittkanten oder prozessbedingte Schädigungen verschlechtern die Kontaktbedingungen und die Kraftübertragung. Abbildung 6-5 fasst die Grundlagenermittlung zur Integritätsbewertung am einzelnen rückgebauten Modul zusammen.



Abbildung 6-5: Grundlagenermittlung zur Integritätsbewertung am einzelnen rückgebauten Modul

Auf Grundlage der Transportschädigungen wurde für die Stütze eine Nutzungsänderung in Form einer Umwandlung zu einem Fundament angeordnet (Bewertungsstufe 4). Zur Errichtung des Rahmens sowie zur Maximierung des Wiederverwendungsgrades im Neubau wurde die Umnutzung für eine weitere Stütze analog angeordnet. Das längste der wiedergewonnenen Balkenbauteile wurde als Riegel herangezogen, während die beiden kürzeren Balken als Stützen umgenutzt wurden. Lösbare Verbindungen sind sowohl zwischen Stütze und Fundament als auch zwischen Stütze und Riegel angeordnet worden, sodass sich ein biegesteifer Rahmen als Tragwerk ergibt. Abbildung 6-6 zeigt die Integration der wiedergewonnenen Bauteile in die Datenbank und die Planung durch die digitalen Zwillinge.

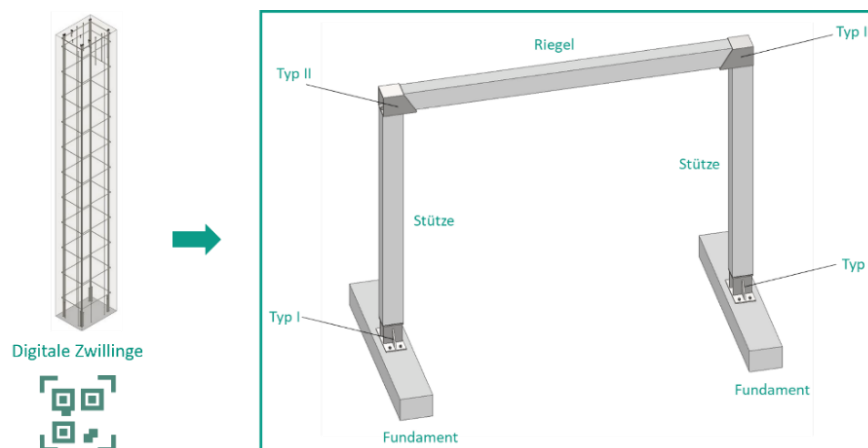


Abbildung 6-6: Planung des Wiederverwendungsprozesses anhand der digitalen Zwillinge

Die Bemessung und Konstruktion der Anschlüsse erfolgten analog zum Abschnitt 4.4 vorgestellten Vorgehen. Nach Ermittlung der jeweils vorhandenen Beanspruchungen erfolgt zunächst die Bemessung der Befestigungstechnik. Anschließend werden die Stahlbauteile konstruiert. Der Nachweis der Schweißnähte und die Querschnittsnachweise werden nach EC3 [Dine10] geführt. Zusätzlich wird das Rahmeneck-Detail einer numerischen Simulation unterzogen, da hier komplexe Spannungszustände vorliegen. Hierbei zeigt sich, dass das dimensionierte Bauteil für die vorliegenden Beanspruchungen tragfähig ist und die konstruierten Aussteifungen des Bauteils ausreichend sind. Um flexibel weitere unterschiedliche Nutzungszyklen mit anderen Anforderungen realisieren zu können, wurden in der Bemessung verschiedene Lastszenarien untersucht und nachgewiesen.

Auf Grundlage der Erstklassifizierung nach Kapitel 6.2.1 und der Integritätsbewertung am einzelnen rückgebauten Modul wurden alle Balkenbauteile sowie die beiden unbeschädigten Stützen die Klassifizierungsstufe K1-a (Mehrere funktionale Nutzungen) zugeordnet. Dem geschädigten Bauteil wurde die Klassifizierungsstufe K1-c (Weiterverwendung und Umnutzung als Bauteil mit geringeren Anforderungen) zugeordnet. Die Wandelemente wurden bereits im zweiten Schritt (siehe Kapitel 6.2.1) in die Klassifizierungsstufe K3-b (stoffliche Verwertung) eingestuft und anschließend verwertet.

6.3.2 Aufbereitungsstrategie und Datenbankintegration (Schritt 6)

Auf Basis der Bemessungen und des Baukastensystems gemäß Kapitel 2.2 wurden Aufbereitungsanweisungen abgeleitet. Die Fertigung der Stahlbauteile erfolgte in einem zertifizierten Schweißbetrieb. Zum Korrosionsschutz der Stahlbauteile wurde eine Verzinkung gemäß geltender Norm durchgeführt. Die Regelschnittstellen wurden gemäß dem lösbaren Verbindungsprinzip ausgebildet. Dabei waren insbesondere die Vorgaben der Befestigungstechnik (hier: *FRA 12/900 M12-60 R* der Firma *Fischer*) zu berücksichtigen. Der vierstufige Herstellungsprozess ist in der Abbildung 6-7 dargestellt.



a) Zuschneiden



b) Vergießen



c) Bohren



d) Verpressen

Abbildung 6-7: Aufbereitung der Stahlbetonbalken durch manuelle Fertigung (on-site Aufbereitung)

Aufgrund der Entnahme durch Kernbohrungen musste im ersten Schritt ein Zuschnitt auf die exakte Länge mithilfe einer Diamantsäge erfolgen. Wegen fertigungsbedingter Oberflächenunregelmäßigkeiten (z. B. Schnittspuren) wurde ein Ausgleichsverguss angeordnet. Für die eingeklebten Bewehrungselemente waren Bohrungen von bis zu 800 mm erforderlich, um eine ausreichende Übergreifung zu gewährleisten. Im letzten Schritt wurden die Bewehrungsstäbe zentrisch eingelegt und der Injektionsmörtel eingebracht. Diese Regelschnittstelle wurde bei allen balkenartigen Bauteilen ausgebildet. Für die Verbindung zwischen dem Fundament und dem Stahlbauteil Typ I (siehe Abbildung 6-6) wurden konventionelle Bolzenanker *FAZ II Plus 16/25 gvz* der Firma *Fischer* verwendet. Um eine kraftflüssige Verbindung zu ermöglichen und die Leistungsfähigkeit der Konstruktion zu gewährleisten, wurde die Qualität aller Fertigungsschritte prozessbegleitend überwacht. Dies ist die Grundvoraussetzung für eine Zulassung als Bauprodukt und zur Aufnahme in eine Bauteildatenbank.

6.4 Zirkuläre Nutzungsphasen in Neubauvorhaben (Schritt 7)

Nach ausreichender Aushärtezeit wurden die aufbereiteten Module montiert und der Rahmen errichtet. In Abbildung 6-8 ist der Demonstrator mit den Anschlussdetails dargestellt. Die Montage und Demontage des Rahmentragwerks ermöglicht weitere potenzielle Nutzungszyklen. Im Rahmen der Planung wurden alle Schnittstellen der Stützen- und Riegelmodule nach dem gleichen Vorgehen (siehe Abbildung 6-7) ausgebildet, sodass Umnutzungen (z. B. Riegel als Stützen) in weiteren Nutzungsszenarien möglich wären.

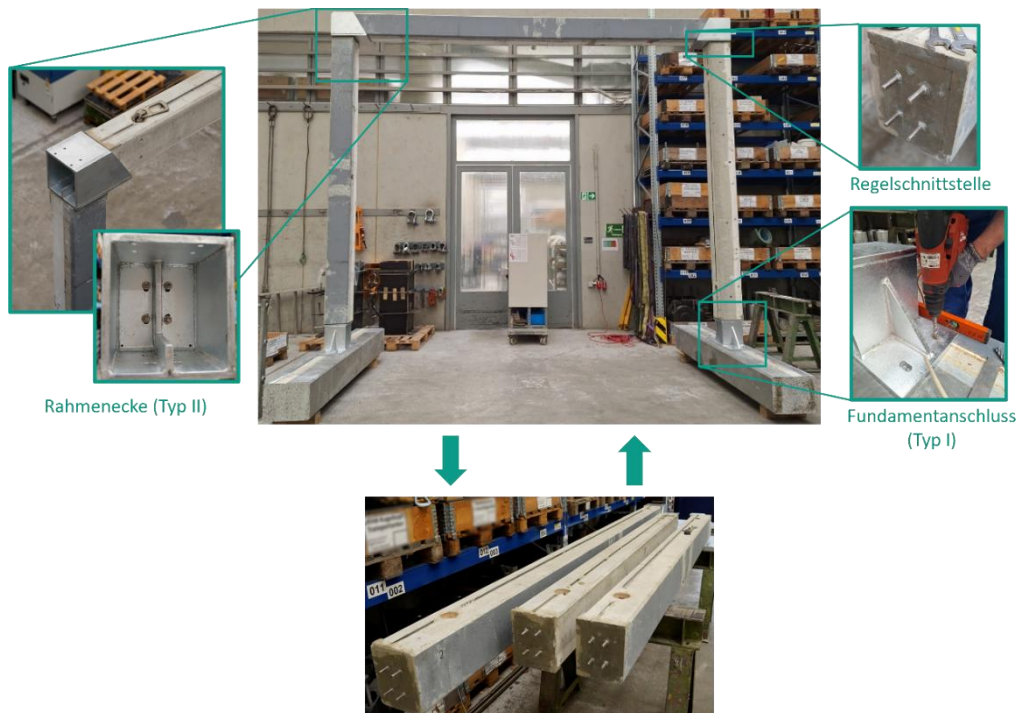


Abbildung 6-8: Montage und Demontage des Demonstrators

7 Fazit

7.1 Zusammenfassung

In Arbeitspaket 1 wurde zunächst ein Überblick über die Grundlagen und Strategien der Modularisierung gegeben. Auf Basis dieser theoretischen Grundlagen wurde ein Baukasten für die Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen entwickelt. Hierfür wurde die Modulbaukastenstrategie genutzt, um ein modulares System auf Basis wiedergewonnener Bauteile wie Stützen, Riegel, Decken und Wände zu entwerfen. Die Bauteile werden in funktional gebundene Module überführt, die durch standardisierte Schnittstellen (Knotenpunkte in Stahlbauweise) miteinander kombiniert werden können. Das Baukastensystem orientiert sich an einer schlanken Skelettbauweise mit tragenden Rahmenmodulen und ausfachenden Platten- und Wandelementen. Durch eine Maßsystematik und eine Segmentierung der Module können Bauteile mit unterschiedlichen Abmessungen integriert werden. Die Wiederverwendbarkeit wird zusätzlich durch die Möglichkeit zur multifunktionalen Nutzung der Module erhöht. Als Herausforderungen für die Anwendung in der Praxis wurden vor allem die Integration von Sonderbauteilen und die Notwendigkeit großer Bauteildatenbanken identifiziert.

In Arbeitspaket 2 wurde zunächst eine Übersicht zur Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen erstellt. Anschließend wurden vorhandene Methodiken zur Eigenschaftserfassung zusammengetragen und diskutiert, um eine geeignete Vorgehensweise zu ermitteln. Auf dieser Grundlage wurde ein neuer initialer Leitfaden entworfen, der spezifische Anforderungen (basierend auf AP1 und AP2) berücksichtigt, wie beispielsweise Besonderheiten bei der Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen mit lösbaren Verbindungen. Der entwickelte Wiederverwendungsprozess folgt einem iterativen, mehrstufigen Ablauf, bei dem alle Schritte eng miteinander verknüpft sind und sich an einer übergeordneten Prozesskette orientieren. Im Leitfaden sind sieben Hauptschritte vorgesehen. Diese bestehen aus verschiedenen Einzelschritten, die den Anwender chronologisch durch den gesamten Wiederverwendungsprozess führen. Je nach Anwendungsfall sind nicht alle Schritte gleichermaßen relevant, sodass der Leitfaden modular angewendet werden kann.

In Arbeitspaket 3 erfolgte die Entwicklung und Konstruktion von stahlbaulichen Anschlussdetails. Am Beispiel eines Referenzgebäudes konnte gezeigt werden, dass sich unter Verwendung der entwickelten Konstruktionsdetails mit der vorgestellten Re-Use-Bauweise ein leistungsfähiges Tragwerk mit lösbaren Stahlbauanschlüssen konstruieren lässt. Prinzipiell zeigt sich, dass der Anschluss grundsätzlich nach einer einheitlichen Methodik entwickelt, jedoch aufgrund der variierenden Bauteilgeometrien und Bewehrungsanordnungen auf die jeweils vorhandenen, rückgebauten Stahlbetonbauteile angepasst werden muss. Die rechnerische Auslegung ist jedoch niederschwellig, da die entwickelten Anschlüsse mit gängigen Regelwerken bemessen werden können. Somit steht einer zeitnahen Praxisanwendung der Anschlüsse nichts im

Wege. Die betrachteten Anschlussdetails sind generell lösbar gestaltet, wodurch ein einfacher Rückbau und eine wiederholte Wiederverwendung gewährleistet sind.

Die ökologische Bewertung der vorgestellten Re-Use-Bauweise erfolgte in Arbeitspaket 4. Am Beispiel des in AP3 betrachteten Referenzgebäudes erfolgte eine Ökobilanzierung sowohl für die Re-Use-Bauweise als auch für das gleiche Gebäude in konventioneller Ortbetonbauweise. Dies ermöglichte den direkten Vergleich der beiden Bauweisen. Für das betrachtete Beispiel konnte gezeigt werden, dass die Re-Use-Bauweise im Vergleich zur konventionellen Bauweise nur ein Drittel des CO₂-Ausstoßes aufweist. Pro Quadratmeter Netto-Raumfläche können, in diesem Fall 6,37 kg CO₂-äq., eingespart werden. Die Kreislauffähigkeit der eingesetzten Bauteile ist gewährleistet, da die Verbindungen lösbar und wiederverwendbar gestaltet sind.

Im Rahmen eines Rückbauvorhabens wurde der entwickelte Leitfaden sowie das modulare Baukastensystem an einem realen Bauprojekt erprobt. Dabei mussten Stahlbetonbauteile (Balken, Stützen und Sandwichwände) aus einem Bestandsgebäude selektiv rückgebaut werden. Diese wurden hinsichtlich ihrer Wiederverwendbarkeit bewertet. Anschließend wurden die geeigneten Bauteile in digitale Zwillinge überführt und in das Baukastensystem integriert. Die Rückbauarbeiten erfolgten unter Berücksichtigung technischer und logistischer Anforderungen. Zur Realisierung eines neuen Rahmentragwerks (Arbeitspaket 5) im Sinne des Baukastensystems wurden die rückgebauten Bauteile entsprechend aufbereitet und die lösbaren Verbindungen ausgebildet. Die Montage und anschließende Demontage des neuen Tragwerks mit den wiedergewonnenen Modulen demonstrierten die erfolgreiche Umsetzbarkeit des angestrebten zirkulären Wiederverwendungskonzepts.

7.2 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Mit der vorgestellten Re-Use-Bauweise lassen sich wiederverwendete Stahlbetonbauteile leistungsfähig und lösbar miteinander verbinden. Hierdurch lassen sich Gebäude in Stahlbetonskelettbauweise bestehend aus wiederverwendeten Stahlbetonbauteilen realisieren. Die Bemessung der Anschlüsse kann bei Einhaltung der Anwendungsgrenzen auf Basis der gängigen Regelwerke geführt werden. Jedoch sind die Bemessung der Anschlüsse ebenso wie die Anwendungsgrenzen aus Sicht der Autoren sehr konservativ. Hier könnten tiefergehende, experimentelle und numerische Untersuchungen einen Beitrag zur effizienteren Verbindungsgestaltung und Erweiterung des Anwendungsbereichs führen.

Außerdem sind geeignete Konzepte zur Verstärkung der geschnittenen Kontaktzone zu untersuchen. Eine Alternative zu additiven Verstärkungen wären subtraktive Verfahren (z. B. Fräsen), die die Kontaktbedingungen und geschnittenen Oberflächen homogenisieren können. Hierzu würde sich eine robotergestützte Nachbearbeitung anbieten. Im Vergleich zu manueller Fertigung könnte eine deutlich höhere Arbeitsqualität erreicht werden sowie die Wirtschaftlichkeit der Prozesskette verbessert werden. Da der Transportweg den CO₂-Ausstoß im Wiederverwendungsfall entscheidend beeinflusst, sind ganzheitliche Lebenszyklusberechnungen erforderlich,

um optimale Abläufe zu definieren und zu vermeiden, dass zu lange Transportwege zur dezentralen Fertigungsstätte die angestrebten Emissionseinsparungen zunichtemachen. Aufbauend auf den neuen Erkenntnissen ist der entwickelte initiale Leitfaden zu erweitern und zu konkretisieren.

8 Literaturverzeichnis

- [BeBr23] BERTOLA, NUMA J.; BRÜHWILER, EUGEN: Risk-based methodology to assess bridge condition based on visual inspection. In: *Structure and Infrastructure Engineering* Bd. 19, Taylor & Francis (2023), Nr. 4, S. 575–588
- [BeGe21] BENDER, B.; GERICKE, K. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021 — ISBN 978-3-662-57302-0
- [Blee11] BLEES, CHRISTOPH: *Eine Methode zur Entwicklung modularer Produktfamilien*, Technische Universität Hamburg-Harburg, Dissertation, 2011
- [DeBF22] DEVÈNES, JULIE; BASTIEN-MASSE, MALÉNA ; FIVET, CORENTIN: *Bestandsanalyse für die Wiederverwendung von tragenden Stahlbetonbauteilen*, Bericht, Friburg und Basel, 2022
- [Deut] Deutschland Hilti: *Hinterschnittanker HDA-P - Mechanische Dübel - Hilti Deutschland*. URL <https://www.hilti.de>. - abgerufen am 2025-05-28
- [Dine01] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN 1045-1: 2001-07, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Bemessung und Konstruktion*, 2001
- [Dine10] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN 1993-1-1/NA:2010-12 (Eurocode 3): Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten*, 2010
- [Dine13] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04 (Eurocode 2): Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*, 2013
- [Dine18] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN 12390-10:2019-08, Prüfung von Festbeton - Teil 10: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton bei atmosphärischer Konzentration von Kohlenstoffdioxid*, 2018
- [Dine19] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN 13791:2020-02, Bewertung der Druckfestigkeit von Beton in Bauwerken und in Bauwerksteilen*, 2019
- [Dine20a] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN ISO 14040:2021-02, Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020)*; 2020

- [Dine20b] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN ISO 14044:2021-02, Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020)*, 2020
- [Dine21a] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN 12504-2:2021-10, Prüfung von Beton in Bauwerken - Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung - Bestimmung der Rückprallzahl*, 2021
- [Dine21b] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN 12390-13:2021-09, Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul)*, 2021
- [Dine23] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN 12390-6:2024-05, Prüfung von Festbeton - Teil 6: Spaltzugfestigkeit von Probekörpern*, 2023
- [Epox] Epoxidharzmörtel Fischer: *Epoxidharzmörtel FIS EM Plus*. URL <https://www.fischer.de/de-de/produkte/schwerlast-befestigungen-chemie/injektionsmoertel/epoxidharzmoertel-fis-em-plus>. - abgerufen am 2025-05-28
- [FeGr13] FELDHOUSEN, J.; GROTE, K.-H. (Hrsg.): *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013 — ISBN 978-3-642-29568-3
- [GeHe24] GENGNAGEL, CHRISTOPH; HENSCHER, CHRISTOPH: *Abbau Aufbau Entwicklung eines Cradle-to-Cradle Prozesses für Ortbetonelemente*, Bericht, Berlin, 2024
- [Ibu] Ibu Institut Bauen und Umwelt e.V.: *Kreislaufwirtschaft wird durch neue Ökobilanzregeln für Re-Use-Produkte greifbar gemacht*. URL <https://ibu-epd.com/kreislaufwirtschaft-wird-durch-neue-oekobilanzregeln-fuer-re-use-produkte-greifbar-gemacht/>. - abgerufen am 2025-05-28
- [JBSW04] JESKE, U.; BUCHGEISTER, J.; SCHEBEK, L.; WEIL, M.: Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung - eine Ökobilanz. In: *Nachrichten - Forschungszentrum Karlsruhe* Bd. 36 (2004), S. 219–24
- [KBLE24] KLOFT, HARALD; BAGHDADI, ABTIN; LEDDEROSE, LUKAS; ESCHENBACH, MAX BENJAMIN; TESSMANN, OLIVER; KUHN, CHRISTOPH; WAGNER, ANNE-KRISTIN: TOWARDS A HYBRID MODULAR CONSTRUCTION SYSTEM REUSING PRECAST CONCRETE COMPONENTS. In: *Fabricate 2024: Creating Resourceful Futures*: UCL Press, (2024) — ISBN 978-1-80008-634-0

- [KrGe18] KRAUSE, DIETER ; GEBHARDT, NICOLAS: *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018 — ISBN 978-3-662-53039-9
- [KüFi24] KÜPFER, CÉLIA ; FIVET, CORENTIN: Structural component reuse of precast and cast-in-place reinforced concrete in architecture since the late 1960s in Europe. In: *Construction Matters: Proceedings of the 8th International Congress on Construction History*: vdf Hochschulverlag AG, (2024) — ISBN 978-3-7281-4166-8, S. 1073–1084
- [Kuhl23] KUHLMANN, U. (Hrsg.): *2023 Stahlbau Kalender: Werkstoffe Verbindungen*. 1. Aufl. Berlin: Wiley, 2023 — ISBN 978-3-433-03387-6
- [Leon96] LEONHARDT, RAINER W: Aspekte der Zweitverwendung von Baumaterialien - Zur Arbeit der im Verband »Historische Baustoffe e.V.« vereinigten Unternehmen, 1996
- [Lind16] LINDEMANN, UDO: *Handbuch Produktentwicklung*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016 — ISBN 978-3-446-44518-5
- [Lohm04] LOHMEYER, G. C. O. (Hrsg.): *Stahlbetonbau*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2004 — ISBN 978-3-322-96817-3
- [MeMe15] METTKE, ANGELIKA ; MEETZ, MICHAEL: Brandenburger Leitfaden für den Rückbau von Gebäuden. In: *MÜLL und ABFALL* (2015), Nr. 10
- [Mett95] METTKE, ANGELIKA: *Wiederverwendung von Bauelementen des Fertigteilbaus*. Taunusstein: Blottner, 1995 — ISBN 3-89367-054-8
- [MHAI08] METTKE, ANGELIKA ; HEYN, SÖREN ; ASMUS, STEFAN ; IVANOV, EVGENY: *Wiederverwendung von Plattenbauteilen in Osteuropa Endbericht – Bearbeitungsphase I*, Bericht, Cottbus, 2008
- [MLWT15] MAHRENHOLTZ, CHRISTOPH ; LIN, PAO-CHUN ; WU, AN-CHIEN ; TSAI, KEH-CHYUAN ; HWANG, SHYH-JIANN ; LIN, RUEI-YAN ; BHAYUSUKMA, MUHAMMAD Y.: Retrofit of reinforced concrete frames with buckling-restrained braces. In: *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* Bd. 44 (2015), Nr. 1, S. 59–78

- [Ökob] Ökobaudat: *ÖKOBAUDAT*. URL <https://www.oekobaudat.de/>. - abgerufen am 2025-05-28
- [Rieg12] RIEG, FRANK: *Handbuch Konstruktion*: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2012 — ISBN 978-3-446-43000-6
- [Stah] Stahlanker Fischer: *Stahlanker für Schwerlasten*. URL <https://www.fischer.de/de-de/produkte/stahlanker>. - abgerufen am 2025-05-28
- [StSt24] STÖHR, BEN; STARK, ALEXANDER: Influence of surface characteristics on the connection of reused concrete members with detachable dry joints. In: *Proceedings of the 15th fib International PhD Symposium in Civil Engineering Budapest, Hungary*. Ed.: G. Balázs, (2024) — 978-2-940643-24-0, S. 1293-1300
- [StWS12] STAUDER, FLORIAN ; WOLBRING, MICHAEL ; SCHNELL, JÜRGEN: Bewehrungs- und Konstruktionsregeln des Stahlbetonbaus im Wandel der Zeit. In: *Bautechnik* Bd. 89 (2012), Nr. 1, S. 3–14
- [Umwea] Umwelt-Produktdeklaration bauforumstahl e.V.: *Grobblech aus schrottbasiertem Elektro Stahl*. Deklarationsnummer EPD-SAL-20230562-IBD1-DE20, 2024
- [Umweb] Umwelt-Produktdeklaration bauforumstahl e.V.: *Beton der Druckfestigkeitsklasse C25/30*. Deklarationsnummer EPD-SAL-EPDIZB20230421IBA1DE, 2023
- [Umwec] Umwelt-Produktdeklaration bauforumstahl e.V.: *Betonstahl in Ringen und Betonstabstahl*. Deklarationsnummer EPD-BSW-20210265-CBA1-DE, 2017
- [Umwed] Umwelt-Produktdeklaration bauforumstahl e.V.: *Offene Walzprofile und Grobbleche*. Deklarationsnummer EPDBFS-20180116IBG2DE, 2014
- [Vull24] VULLINGS ET AL.: *Best practice guidelines and recommodations für reuse-optimised deconstruction*. The ReCreate project, 2024

Maßnahmen zur Verbreitung der Projektergebnisse

Die wesentlichen Projektergebnisse sollen in einem Zeitschriftenartikel veröffentlicht werden.

Anhang

Anhang A1 Initialer Leitfaden

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB)

Abteilung Massivbau

Initialer Leitfaden zur Modularisierung von Bestandsbauwer- ken und Wiedergewinnung der rückge- bauten Stahlbetonbauteile als modulare lösbare Fertigteile

Inhaltsverzeichnis des initialen Leitfadens

1	Einleitung	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Zielsetzung und Aufbau des Leitfadens	1
1.3	Anwendungsbereiche und -grenzen	3
1.4	Glossar zu den wichtigen Begrifflichkeiten	5
2	Schritt 1: Zieldefinitionen für den Wiederverwendungsprozess	8
2.1	Generalistische Zielsetzungen des Leitfadens	8
2.2	Individuelle Zielsetzungen.....	9
2.3	Anwendungsprüfung	10
3	Schritt 2: Integritätsfassung und Erstklassifizierung der Bestandsgebäudestruktur	11
3.1	Grundlagenermittlung für die Bestandserfassung.....	11
3.1.1	Entkernung des Bestandsgebäudes.....	12
3.1.2	Sichtung verfügbarer Planungsunterlagen	13
3.1.3	Tragwerksvermessung	14
3.1.4	Gruppierung der Bestandsgebäudestruktur.....	14
3.1.5	Bauteilspezifische Prüfungsanweisungen	15
3.2	In-situ Bestandserfassung	20
3.2.1	Bauwerksbegehung und Einzelsichtprüfung.....	20
3.2.2	Externe Prüfungen.....	21
3.3	Analyse zur monolithischen Tragstruktur	22
3.3.1	Eingesetzte Materialien und Konstruktionsweisen	22
3.3.2	Statische Systemanalyse.....	23
3.4	Integritätsbewertung	24
3.4.1	Vorselektionskriterien	24
3.4.2	Erstklassifizierung.....	24
3.4.3	Digitalisierung	25
4	Schritt 3: Modulares Baukastensystem für zirkuläre Wiederverwendungen rückgebauter Stahlbetonbauteile	26
4.1	Integration in ein vorhandenes Baukastensystem	26
4.1.1	Integrationsprüfung.....	26
4.1.2	Anforderungskatalog für Rückbauvorhaben	27
4.2	Weiter- oder Neuentwicklung von Baukastensystemen.....	28
4.2.1	Allgemeine Anforderungen	28
4.2.2	Modulares Tragwerkskonzept durch Methoden zur Modularisierung	28
4.2.3	Maßsystematik.....	30
4.2.4	Standardisierte lösbare Verbindungstechniken	31
4.2.5	Baukastenspezifische Bewertungsmethoden	32

5 Schritt 4: Dekonstruktionsstrategie zur Modularisierung des Rückbauvorhabens	33
5.1 Planung der Dekonstruktionsstrategie	33
5.1.1 Rückbau- und Schnittpläne	33
5.1.2 Statische Berechnung der Rückbauzustände	35
5.1.3 Entnahmetechniken	35
5.1.4 Ablauf- und Logistikplanung	37
5.1.5 Digitale Dekonstruktionsanweisungen	40
5.2 Ausführung	40
5.2.1 Qualitätskontrolle und Baustellenüberwachung	40
5.2.2 Planungsabweichungen	41
6 Schritt 5: Wiederverwendungsprozessoptimierung für die rückgebauten Stahlbetonmodule	42
6.1 Erweiterte Eigenschaftserfassung	42
6.1.1 Baukastenspezifisches Prüfprogramm	42
6.1.2 Bauteilbeschaffenheit	43
6.1.3 Schnittstellenbeschaffenheit	43
6.2 Bemessung für die Nutzung im Baukastensystem	44
6.2.1 Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit	44
6.2.2 Aufbereitungsmaßnahmen	44
6.2.3 Schnittstellenausbildung	45
6.3 Optimierung der Wiederverwendung	45
6.3.1 Integrierte Lebenszyklusanalysen	45
6.3.2 Klassifizierung ins Kaskadensystem	45
7 Schritt 6: Aufbereitungsstrategie und Datenbankintegration	47
7.1 Aufbereitungsanweisungen	47
7.1.1 Geschnittene Bauteilmodule	47
7.1.2 Schnittstellen	48
7.2 Nachweis der Aufbereitungsqualität	48
7.2.1 Qualitätskontrolle und Nachbearbeitung	48
7.2.2 Zertifizierung	48
7.3 Integration in die Datenbank	49
7.3.1 Digitale Bauteildatenbank	49
7.3.2 Physische Bauteildatenbank	49
8 Schritt 7: Zirkuläre Nutzungsphasen in Neubauvorhaben	50
8.1 Entwurfsvarianten	50
8.1.1 Tragwerksstrukturanordnung	50
8.1.2 Realisierungsbewertung	51
8.2 Planung und Ausführung des festgelegten Entwurfes	51
8.2.1 Anpassung der digitalen Bauteildatenbanken	51
8.2.2 Planung und Genehmigung des Bauvorhabens	52
8.3 Planung der zirkulären Nutzung	52
8.3.1 De- und Montageanordnungen	52

8.3.2 Fortlaufende Re:Identifikation	52
9 Literaturverzeichnis	53
10 Anhang zum Leitfaden	56

1 Einleitung

1.1 Motivation

Häufige Ursachen für den Abriss eines Bauwerks sind nicht Tragfähigkeitseinschränkungen einzelner Bauelemente, sondern beispielsweise geänderte Nutzungsanforderungen. Anhang A1 1-1 stellt exemplarisch Beispiele für einen konventionellen Rückbau von Gebäuden aus Stahlbeton dar. Die Tragfähigkeiten einzelner Bauteile können noch Reserven für weitere Nutzungen aufweisen. Daher kann die Wiederverwendung solcher tragender Stahlbetonteile ein vielversprechender Ansatz sein, um Probleme wie den hohen Emissionsausstoß bei der Zementherstellung zu überwinden. Für eine tatsächliche Anwendung in der Praxis muss eine effiziente und kostengünstige Prozesskette geschaffen werden, die eine Konkurrenz zu den herkömmlichen Herstellungstechniken ermöglicht.



Anhang A1 1-1: Konventioneller Rückbau von Gebäuden aus Stahlbeton [Fotos IMB-MB]

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Konzept für die Wiederverwendung von Stahlbetonteilen mit stahlbaubasierten Anschlüssen (RECON)“ am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB) - Abteilung Massivbau des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) wurde daher eine Prozesskette erarbeitet, die eine Modularisierung von Bestandsbauwerken und Wiedergewinnung der entnommenen Stahlbetonbauteile als modulare lösbare Fertigteile anstrebt.

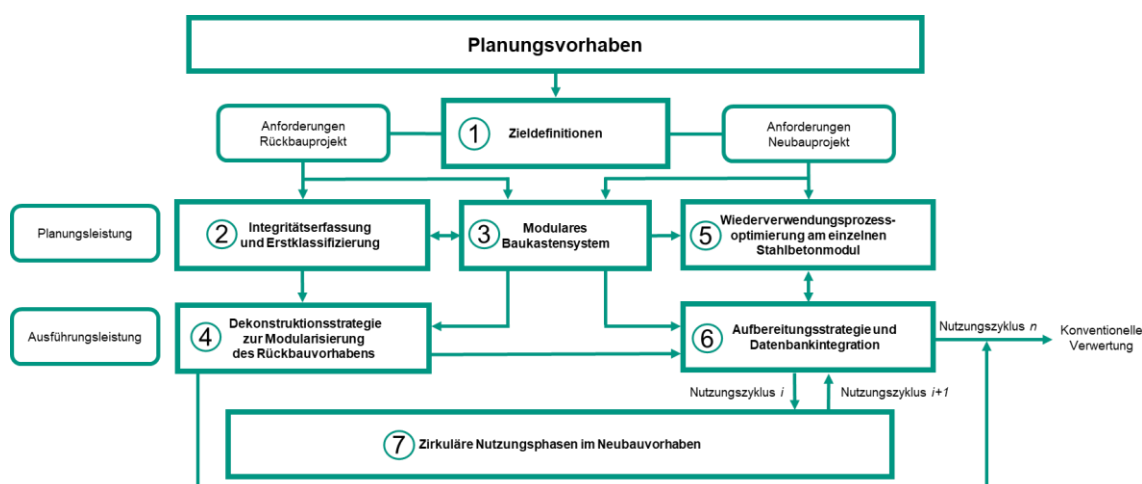
1.2 Zielsetzung und Aufbau des Leitfadens

Das Hauptziel des initialen Leitfadens ist es, einen ganzheitlichen Prozessablauf für die Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen bereitzustellen. Dabei sollen identifizierte Hürden bei der Wiederverwendung von tragenden Stahlbetonbauteilen überwunden werden. Dies soll durch eine Prozesskette und Wiederverwendungsstrategie in Form der

Wiedergewinnung als modulare lösbare Fertigteile realisiert werden, die mehrere Nutzungszyklen zulässt. Aufgrund der hohen Individualität bestehender Bauwerke und den daraus resultierenden notwendigen Individualmaßnahmen soll eine hohe systematische Prozessstandardisierung erreicht werden sowie die Praxistauglichkeit durch eine anwendungsorientierte Vorgehensweise mit konkreten Anforderungen und Handlungsempfehlungen sichergestellt werden. Hierdurch sollen ökologische sowie ökonomische Aspekte berücksichtigt und ein schneller Einzug in die Praxis gewährleistet werden. Die Grundlage für den Leitfaden bildet eine systematische Literaturrecherche in den Bereichen „Modularisierung“, „Bauen im Bestand“, sowie „Wiederverwendung von Stahlbetonteilen“. Eine Zusammenfassung relevanter Literatur sowie Regelwerke findet sich zu Beginn des Leitfadens. Es wurden Methoden aus der Literatur integriert sowie eigene Methoden und Weiterentwicklungen eingebaut, die speziell auf die Anforderungen der Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen als lösbare Fertigteile zugeschnitten sind.

Zur Erprobung und Validierung des entwickelten Prozesses wurden zwei reale selektive Rückbauvorhaben herangezogen. Darüber hinaus erfolgte eine fiktive integrale Rückbauplanung zweier realer Gebäude auf Basis vorhandener Bestandsunterlagen. Informationen zu den Gebäuden finden sich im Anhang zum Leitfaden. Ergänzt wurde dieser Prozess durch Rücksprachen mit Abbruch- und Rückbauunternehmen, um die Praxistauglichkeit der Vorgehensweise sicherzustellen. Diese erste Version des Leitfadens ist als initial zu bewerten und soll in weiteren Arbeiten kontinuierlich weiterentwickelt werden.

Der entwickelte Wiederverwendungsprozess für Stahlbetonbauteile folgt einem iterativen, mehrstufigen Ablauf, in dem alle Schritte eng miteinander verzahnt sind und sich an der übergeordneten Prozesskette orientieren. Anhang A1 1-2 stellt den iterativen Prozessablauf zur Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen als modulare, lösbare Fertigteile sowie die Abhängigkeit einzelner Prozessschritte in schematischer Form dar.



Anhang A1 1-2: Übersicht zur standardisierten Prozesskette des Leitfadens

Der zugehörige initiale Leitfaden gliedert sich in sieben Hauptschritte, die vier übergeordneten Prozessabschnitten (Zieldefinition, Bestandsbauwerk, Bauteilumwandlung und Nutzungszyklen) zugeordnet sind. Diese wiederum bestehen aus verschiedenen Einzel-

schritten, die den Anwender chronologisch durch den gesamten Wiederverwendungsprozess führen. Das Konzept sieht über alle Schritte eine umfangreiche Digitalisierung vor. Je nach Anwendungsfall sind nicht alle Schritte gleichermaßen relevant. Der Leitfaden ist modular aufgebaut und erlaubt eine selektive Anwendung einzelner Schritte.

Der Prozessablauf beginnt mit einer Anwendbarkeitsprüfung, bei der projektspezifische Ziele und Anforderungen sowie leitfadenspezifische Ziele gegenübergestellt werden (vgl. Kapitel 2). Im Anschluss erfolgt im Falle eines Rückbauprojektes eine ausführliche Bestandsaufnahme zur Integritätserfassung und Erstklassifizierung des Bestandsgebäudes (vgl. Kapitel 3). Auf dieser Grundlage werden mögliche Strategien zum Aufbau modularer Tragwerke aus Bestandsbauteilen betrachtet (vgl. Kapitel 4). Dies bildet wiederum die Grundlage zur Dekonstruktion des Bestandsgebäudes (vgl. Kapitel 5). In Abhängigkeit des angestrebten modularen Tragwerks werden die wiedergewonnenen Module für die neuen Nutzungen bemessen (vgl. Kapitel 6) und notwendige Aufbereitungsmaßnahmen abgeleitet (vgl. Kapitel 7). Der Prozess endet damit, dass die aufbereiteten Module als neues Bauprodukt in das angestrebte Neubauvorhaben überführt werden.

1.3 Anwendungsbereiche und -grenzen

Der vorliegende initiale Leitfaden bezieht sich ausschließlich auf die Tragstruktur von Gebäuden als Ausgangspunkt für die Überführung einzelner Bauteile in eine Kreislaufwirtschaft. Im Fokus steht die Wiederverwendung von tragenden Stahlbetonbauteilen (monolithische Tragwerke, Halbfertigteile sowie Betonfertigteile). Dabei werden Tragstrukturen aus dem klassischen Hochbau (Geschosswohnungsbau, Lagerräume, Verkaufs-, Verwaltungs-, Versammlungs- und Bürogebäude sowie Bildungseinrichtungen) betrachtet. Grundsätzlich ist der Leitfaden jedoch auch auf Ingenieurbauwerke, beispielsweise den Rückbau von Brückenbauwerken, übertragbar. Der Fokus liegt auf Wiederverwendungsstrategien für Regelbauteile wie Balken, Stützen, Wände und Deckenplatten. Für die Wiederverwendung von Sonderbauteilen, wie beispielsweise die Umnutzung von Bohrpfehlen als Stützen, sind im Einzelfall notwendige Spezialmaßnahmen, wie z. B. zerstörungsfreie Entnahmetechniken für Bohrpfehle, zu entwickeln. Allgemein formulierte Anforderungen und Vorgehensweisen aus diesem Leitfaden lassen sich übertragen.

Im Gegensatz zu anderen Forschungsvorhaben (z. B. [Vull24], [GeHe24] oder [MHA108]) liegt der Fokus dieses Leitfadens auf einem standardisierten Prozess mit modularen Elementen und lösbaren Verbindungstechniken unter Berücksichtigung von material- und konstruktionsspezifischen Besonderheiten. Es werden explizit keine monolithischen Verbindungstechniken wie Vergusslösungen oder Klebetechniken angestrebt. Dabei soll die angewendete Modularisierungsstrategie bereits im Rückbau berücksichtigt werden. Der Leitfaden in seiner initialen Fassung dient als praxisnahe Arbeitshilfe für alle an Planung und Ausführung beteiligten Gewerke. Die Anwendung des Leitfadens setzt die Kenntnis entsprechender Normen und Regelwerke voraus. Im Rahmen nachfolgender Forschungsprojekte soll diese Fassung (Stand: Mai 2025) kontinuierlich weiterentwickelt

und ergänzt werden. Im Folgenden ist eine Auswahl wichtiger Forschungsarbeiten, Normen und Richtlinien aus den Bereichen „Bauen im Bestand“, „Modulares Bauen“ und „Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen“ aufgelistet. Diese werden im Rahmen der Anwendung des Leitfadens als weiterführende Literatur empfohlen.

Verzeichnis – Forschungsprojekte (Auswahl)

- Abbau-Aufbau: Entwicklung eines Cradle-to-Cradle Prozesses für Ortbetonelemente (siehe [GeHe24])
- Bauen im Bestand – Bewertung der Anwendbarkeit aktueller Bewehrungs- und Konstruktionsregeln im Stahlbetonbau (siehe [SLSW12])
- Bestandsanalyse für die Wiederverwendung von tragenden Stahlbetonbauteilen (siehe [DeBF22])
- Brandenburger Leitfaden für den Rückbau von Gebäuden (siehe [MeMe15])
- Fertigteile 2.0 (siehe z. B. [KBLE24])
- Historische technische Regelwerke für den Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau: Bemessung und Ausführung (siehe [Fing09])
- ReCreate (siehe z. B. [Vull24])
- Wiederverwendung von Plattenbauteilen aus Osteuropa (siehe [MHA108] sowie [Mett95])

Verzeichnis - Normen und Richtlinien (Auswahl)

- Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken (DIN EN 1992) [Dine13] sowie nationale Anhänge
- Broschüre „Arbeitsschutz bei Abbrucharbeiten“ der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin [StHG10]
- DAfStb-Hefte (z. B. DafStb-H619)
- Merkblätter des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins (DBV): Reihe Bauen im Bestand
- Regelwerke des Abfallrechts:
 - Kreislaufwirtschaftsgesetz [Bund]
 - Abfallverzeichnisverordnung [Abfa]
 - Gewerbeabfallverordnung [Gewa]
 - Weitere Verordnungen auf jeweiliger Länder- und kommunaler Ebene
- VDI-Richtlinien im VDI-Handbuch Abbruch und Sanierung (z. B. [Vdie13])
- Zuständige Landesbauordnung des jeweiligen Bundeslands

1.4 Glossar zu den wichtigen Begrifflichkeiten

Im Folgenden werden die wichtigsten Begrifflichkeiten im Kontext des Leitfadens definiert.

Abbruchtechniken

Die verschiedenen Abbruchtechniken sind in der DIN 18007 [Dine22] in mechanische Verfahren, Abtragen, Bohren, Spalten, Sprengen, thermische Trennverfahren und hydrodynamische Verfahren unterteilt.

Aufbereitungsstrategie

Die Aufbereitungsstrategie umfasst die gezielte Reinigung, Instandsetzung, Prüfung und Anpassung rückgebauter Bauteile, um diese wieder- oder weiterverwenden zu können. Das Ziel besteht darin, die technische Funktionalität, Qualität und normgerechte Verwendbarkeit sicherzustellen. Sie wird in Abhängigkeit der Ergebnisse der Wiederverwendungsprozessoptimierung für jedes rückgebaute Modul durchgeführt. Die Aufbereitung kann vor Ort (on-site) oder dezentral (z. B. im Werk) erfolgen.

Dekonstruktionsstrategie

Die Dekonstruktionsstrategie bezeichnet ein planerisch und technisch abgestimmtes Vorgehen zum Rückbau von Bauwerken oder einzelnen Bauteilen, mit dem Ziel, deren Wiederverwendung, Weiterverwendung oder stoffliche Verwertung zu ermöglichen. Im Unterschied zum konventionellen Abriss liegt der Fokus der Dekonstruktionsstrategie nicht auf dem möglichst schnellen Rückbau, sondern auf einer ressourcenschonenden und zerstörungsarmen Demontage. Die Grundlage für die Dekonstruktionsstrategie bildet die Identifikation potenziell wiederverwendbarer Bauteile sowie das gewählte Baukastensystem.

Demontage

Bei der Demontage werden bauliche und technische Anlagen durch das Lösen von Verbindungen und das Entfernen von Bauteilen zerlegt. Dabei werden Form und Stabilität der demontierten Elemente weitgehend erhalten, um eine Wiederverwendung oder gezielte Entsorgung zu ermöglichen. In der Regel sind dafür das Lösen kraftschlüssiger Verbindungen von bestehenden Anlagen oder Bauteilen sowie der Einsatz von Hebe- mitteln zum Abheben der Elemente erforderlich. [Dine22]

Erstklassifizierung

Die Erstklassifizierung bezeichnet die erste systematische Einordnung und Bewertung eines Bauteils im Hinblick auf eine potenzielle Weiter- oder Wiederverwendung. Sie erfolgt vor der Demontage und stellt eine vorläufige Einschätzung dar, in welchem Umfang das Bauteil für eine erneute Nutzung geeignet ist. Die Erstklassifizierung dient als Grundlage für die Entscheidung, ob ein Bauteil in den weiteren Wiederverwendungsprozess überführt wird.

Integrales Rückbauvorhaben

Ein integrales Rückbauvorhaben bezeichnet eine Dekonstruktion, bei der die komplette Tragwerksstruktur oder ein Großteil davon entnommen werden muss.

Integritätserfassung

Integritätserfassung bezeichnet die systematische Aufnahme, Dokumentation und Bewertung des baulichen, materiellen und konstruktiven Zustands eines vorhandenen Bauteils oder Bauteilsegments innerhalb eines Bestandsbauwerks. Sie bildet somit die Entscheidungsgrundlage für eine Weiter- oder Wiederverwendung.

Konventioneller Abbruch

Beim konventionellen Abbruch wird das Gebäude in der Regel mechanisch und unter Zerstörung der Tragwerksstruktur zurückgebaut. Dadurch kommt es zwangsläufig zu einer Vermischung der Abbruchmaterialien. Diese müssen anschließend entweder manuell oder maschinell getrennt oder als Baumischabfall entsorgt werden.

Modulares Baukastensystem

Das modulare Baukastensystem bezeichnet ein konstruktives und planerisches Prinzip, indem eine bauliche Struktur aus standardisierten und kombinierbaren Modulen zusammengesetzt wird. Ziel eines modularen Baukastensystems ist es, hohe Wiederholbarkeit, Austauschbarkeit und Anpassungsfähigkeit der Bauteile zu ermöglichen. Dies erleichtert nicht nur die industrielle Vorfertigung und Montage, sondern auch den Rückbau, die erneute Wiederverwendung und die Umnutzung einzelner Module im Sinne einer zirkulären Bauweise. Modulare Baukastensysteme ermöglichen im Kontext der Wiederverwendung, dass die rückgebauten Bauteile standardisierten Formaten und Anschlussprinzipien folgen. Dadurch können sie mehrfach und in verschiedenen Nutzungskontexten wiederverwendet werden.

Modularisierung

Die Modularisierung beschreibt den Prozessabschnitt, in dem ein Bestandsgebäude auf Grundlage des gewählten Baukastensystems und dessen Maßsystematik in einzelne Module zerlegt wird.

Module

Module folgen festgelegten geometrischen, funktionalen und konstruktiven Eigenschaften und können flexibel, systematisch und vielfach kombinierbar sein. Im Kontext der Wiedergewinnung bestehen die Module aus systematisch rückgebauten und aufbereiteten Stahlbetonbauteilen eines Bestandsgebäudes, die in weitere Segmente (Komponenten) gegliedert werden können.

Selektiver Rückbau

Beim selektiven Rückbau wird zunächst eine Beräumung durchgeführt, bei der spezifische Anforderungen an die sortenreine Erfassung und Entsorgung des Abbruchmaterials berücksichtigt werden. Durch die gezielte Trennung der Materialien vor, während oder nach dem Abbruch ist eine nachhaltige Verwertung der Abbruchabfälle möglich.

Wiederverwendbare Materialien können so effizient recycelt und umweltgerecht entsorgt werden. [HRRS21]

Bei einem selektiven Rückbauvorhaben werden dagegen nur einzelne Bauteile eines Bestandsgebäudes rückgebaut, während der Rest der Tragstruktur erhalten bleibt.

Wiederverwendung, Weiterverwendung und Recycling

Die Wiederverwendung (engl. „reuse“) bezeichnet die mehrfache Nutzung eines Bauteils für denselben oder einen anderen Zweck ohne wesentliche stoffliche Veränderung. Dies steht im Gegensatz zum Recycling, bei dem Materialien in ihre Ausgangsstoffe zerlegt und verarbeitet werden. Bei der Wiederverwendung bleibt die ursprüngliche Form, Funktion oder Struktur hingegen erhalten. Eine besondere Form der Wiederverwendung ist die Weiterverwendung, bei der das Bauteil in einem neuen, vom ursprünglichen Verwendungszweck abweichenden Zusammenhang eingesetzt wird (Umnutzung). Bei der Wiederverwendung erfolgt eine Nutzung in gleichen oder ähnlichen Anwendungen.

Wiederverwendungsprozess

Der Wiederverwendungsprozess beschreibt den systematischen Ablauf aller erforderlichen Schritte, um Bauteile (aus z. B. Stahlbeton) aus einem bestehenden Tragwerk zurückzubauen und in einem neuen Bauwerk zu nutzen.

Wiederverwendungsprozessoptimierung

Die Optimierung des Wiederverwendungsprozesses ist ein iterativer Vorgang. Mithilfe von Bemessungsmethoden werden dabei verschiedene Belastungsszenarien für unterschiedliche Nutzungen im modularen Baukastensystem berechnet. Falls erforderlich, werden daraus geeignete Verstärkungsmaßnahmen abgeleitet. Auf dieser Grundlage lassen sich verschiedene Aufbereitungsmaßnahmen in Verbindung mit den jeweiligen Nutzungsszenarien bestimmen. Durch Lebenszyklusanalysen (LCA) und Lebenszykluskostenanalysen (LCC) werden anhand definierter Zielsetzungen die finalen Nutzungsszenarien des rückgebauten Bauteils im Baukastensystem festgelegt.

2 Schritt 1: Zieldefinitionen für den Wiederverwendungsprozess

Im ersten Schritt ist die Art des spezifischen Planungsvorhabens zu differenzieren. Hierbei können drei grundsätzliche Vorhabenarten unterschieden werden:

1. Rückbauprojekt/e
 - 1.a Rückbauprojekt/e mit angegliedertem Neubauprojekt (Prozessschritte 1 bis 7)
 - 1.b Reine/s Rückbauprojekt/e (Prozessschritte 1 bis 6)
2. Neubauprojekt/e (Prozessschritte 1, 3, sowie 5 bis 7)

In Abhängigkeit der Art des Wiederverwendungsprozesses ergeben sich unterschiedliche Anforderungen und Ziele, die den Prozessablauf beeinflussen. Die Prozessschritte zwei und vier (siehe Anhang A1 1-2) befassen sich dabei mit dem Bestandsgebäude im Falle eines Rückbauvorhabens. Die Schritte fünf und sechs befassen sich mit der Umwandlung für die Weiter- oder Wiederverwendung des einzelnen rückgebauten Moduls in Abhängigkeit eines konkreten oder potenziellen Neubauvorhabens. Schritt drei stellt die Verknüpfung zwischen der Dekonstruktion des Rückbauvorhabens und der Weiter- oder Wiederverwendung im Neubauvorhaben dar. Schritt sieben umfasst die Umsetzung und den Einsatz der aufbereiteten Module in einem Neubauprojekt. In diesem ersten Prozessabschnitt stehen die folgenden Fragestellungen im Vordergrund:

- Welche Anforderungen und Ziele bestehen beim Vorhaben?
- Ist im Falle eines Rückbauvorhabens das Bestandsgebäude für die Wiederverwendung im Sinne dieses Leitfadens geeignet?
- Ist die Anwendung des Leitfadens für das angestrebte Neubauvorhaben möglich?

Als Ergebnis des ersten Prozessschritts wird eine Anwendbarkeitsprüfung in Abhängigkeit der allgemeinen Zielsetzungen der Wiederverwendungsstrategie in diesem Leitfaden sowie der spezifischen Anforderungen und Ziele des Planungsvorhabens abgeschlossen. Dabei kann der gesamte Prozess oder auch nur einzelne Prozessschritte als Module Anwendung finden.

2.1 Generalistische Zielsetzungen des Leitfadens

Die in diesem Leitfaden verfolgte Wiederverwendungsstrategie muss mit den spezifischen Anforderungen und Zielsetzungen eines Neubau- als auch eines Rückbauvorhabens kompatibel sein.

Zielsetzungen bei Rückbauvorhaben

Dekonstruktion gemäß Modularisierungsstrategie: Die Dekonstruktion soll analog zur gewählten Modularisierungsstrategie erfolgen, damit sich die rückgebauten Bauteile

optimal in einem Baukasten verwenden lassen. Dabei müssen multifunktionale Nutzungen von Bauteilen bereits bei der Dekonstruktion erkannt und eingeplant werden.

Maximierung der Wiederverwendungsquote: Im Rahmen der Rückbauplanung sollen möglichst viele Bauteile einer Wieder- oder Weiterverwendung zugeführt werden. Hierzu sollen auch individuelle Aufbereitungs- und Verstärkungsmaßnahmen in Betracht gezogen werden. Dabei müssen die ökologischen Vorteile mit den ökonomischen Zielen des Vorhabens gegenübergestellt werden.

Effiziente und digitale Prozesskette: Die gesamte Prozesskette soll durch eine durchgehende Digitalisierung und größtmögliche Automatisierung effizient gestaltet werden. Ein standardisiertes Vorgehen trägt zusätzlich dazu bei, den Planungs- und Ausführungsaufwand zu reduzieren. Die Digitalisierung bildet, insbesondere zwischen dem Rückbau im Bestandsgebäude und der anschließenden Nutzung, eine wichtige Schnittstelle zwischen den einzelnen Schritten und Gewerken.

Zielsetzungen bei Neubauvorhaben

Modulare Tragstrukturen: Für die Wiederverwendung wird ein modulares Baukastensystem angestrebt, da dieses bei entsprechender Gestaltung die Erzeugung vieler individueller Tragwerksvarianten durch die Kombination weniger Module ermöglicht. Dabei wird eine offene Gestaltung bevorzugt, um eine Erweiterung durch neue Bauteilgeometrien oder andere Materialien zu ermöglichen. Die Implementierung der modularen Eigenschaften soll entlang der Prozesskette in allen Schritten berücksichtigt werden, um Skaleneffekte zu nutzen und gleichzeitig die hohen individuellen Anforderungen der Bestandsgebäude zu erfüllen.

Zirkuläres Nutzungskonzept: Mit einem zirkulären Nutzungskonzept soll die Mehrfachnutzung der einzelnen Bauteile ermöglicht werden. Dazu sind lösbare Verbindungstechniken und Umnutzungsmöglichkeiten von Bauteilen im modularen Baukastensystem notwendig. Damit die wiedergewonnenen Bauteile für mehrere Nutzungszyklen verwendet werden können, muss bei der Planung bereits die zyklische Demontage und Montage berücksichtigt werden.

2.2 Individuelle Zielsetzungen

Im Rahmen der individuellen Zielsetzung sind allgemeine Aspekte wie Ökologie, Wirtschaftlichkeit, Technik und Gestaltung sowie projektspezifische Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Im Folgenden sind weitere projektspezifische Anforderungen und Zieldefinitionen für Rückbau- und Neubauvorhaben aufgeführt, die im Kontext des Leitfadens wichtig sind.

Standort: Standortabhängige Randbedingungen sollten kontinuierlich in den Planungsprozess einfließen, um sowohl die technische Umsetzbarkeit als auch eine effiziente Prozesskette zu gewährleisten.

Individuelle Architektur: Die technische Umsetzbarkeit mit den vorhandenen Bauteilen aus der Datenbank sollte in Abhängigkeit des individuellen Gebäudeentwurfs geprüft

werden. Gegebenenfalls müssen diese um einzelne Sonderbauteile ergänzt oder entsprechende Aufbereitungs- und Verstärkungsmaßnahmen angeordnet werden. Mögliche gestalterische Einschränkungen des Entwurfs sind mit den Vorhabenzielen abzustimmen.

Nutzung und Umnutzung: Aus dem geplanten Neubauprojekt ergeben sich Anforderungen an die Architektur und die Statik des Tragwerks. Die Auswahl an Bauteilen aus der Datenbank sollte den spezifischen Anforderungen (Spannweite, Geschosshöhe etc.) nachkommen können. Idealerweise sollten Umnutzungen in der zweiten Wiederverwendungsphase direkt im Entwurf berücksichtigt werden.

Einsparung von Emissionen und natürlichen Ressourcen: Bei der Umsetzung eines Neubaus aus wiedergewonnenen Bauteilen sollte die Einsparung von CO₂-Emissionen und natürlichen Ressourcen für das spezielle Projekt stetig evaluiert und bei Bedarf optimiert werden. Das Ziel ist eine deutliche Einsparung im Vergleich zur konventionellen Bauweise.

2.3 Anwendungsprüfung

Im Rahmen der Anwendungsprüfung ist zu evaluieren, inwieweit sich die im Leitfaden entwickelte Wiederverwendungsstrategie auf das konkrete Planungsvorhaben übertragen lässt. Basierend auf den im Leitfaden definierten Prinzipien (siehe Kapitel 2.1) sowie den individuell ermittelten Anforderungen und den projektspezifischen Rahmenbedingungen (nach Kapitel 2.2) ist durch die Bauherrschaft gemeinsam mit der zuständigen Fachplanung in einer Vorbewertung zu entscheiden, ob und in welchem Umfang die dargestellte Prozesskette Anwendung findet. Je nach Projektkontext kann die Umsetzung von einer vollständigen Integration der Prozessschritte bis hin zur selektiven Anwendung einzelner Schritte variieren. Die Entscheidung über den Anwendungsgrad bildet die Grundlage für die nachfolgenden Schritte. Ziel der Anwendungsprüfung ist es somit, die Leitfadeneinhalte und die Wiederverwendungsstrategie projektgerecht anzuwenden.

3 Schritt 2: Integritätserfassung und Erstklassifizierung der Bestandsgebäudestruktur

In diesem zweiten Prozessschritt wird eine systematische und digitalisierte Bestandsaufnahme zur Vorbewertung durchgeführt, um die Grundlage für die Modularisierung des Rückbauvorhabens zu bilden. Bei einem integralen Rückbau eines ganzen Gebäudes gibt es im Vergleich zu einem selektiven Rückbau einzelner Bauteile deutliche Unterschiede in den Projektanforderungen und Zieldefinitionen. Daher haben die Rückbauart und die Verfügbarkeit von Prüfungsunterlagen einen erheblichen Einfluss auf den Planungsumfang. In diesem Prozessabschnitt stehen die folgenden Fragestellungen im Vordergrund:

- Welche Informationen und Dokumente sind erforderlich, um eine fundierte Erfassung des Bestandsgebäudes zu ermöglichen?
- Welche Methoden und Verfahren sind anzuwenden, um in-situ alle relevanten Daten systematisch zu erfassen?
- Welche Integrität besitzen die einzelnen Bauteile?
- Wie ist die Tragstruktur des Gebäudes aufgebaut und welche Erkenntnisse lassen sich hinsichtlich ihrer Eignung für die Wiederverwendung von Bauteilen in modularen Baukästen gewinnen?
- Welche Bauteile eignen sich grundsätzlich für eine Weiter- oder Wiederverwendung, um den weiteren Prozess effizient zu gestalten?

Insbesondere die Grundlagenermittlung und die praktische Bestandserfassung vor Ort sind eng miteinander verknüpft. Je nach Projektanforderungen kann dies iterativ in mehreren Abschnitten erfolgen und einen hohen Detaillierungsgrad erfordern. Als Ergebnis dieses Prozessabschnitts wird hinsichtlich der individuellen Integrität der Bestandsgebäudestruktur die Grundlage für einen wirtschaftlichen und ökologischen Wiedergewinnungsprozess geschaffen. Dies wird erreicht, indem frühzeitig eine Selektion ungeeigneter Bauteile erfolgt (z. B. durch Vermeidung kostenintensiver Demontagen und nicht erforderlicher Transportwege).

3.1 Grundlagenermittlung für die Bestandserfassung

Für die Vorbereitung und Grundlagenermittlung der Bestandserfassung sind die folgenden Schritte durchzuführen:

- Entkernung und Identifikation von Schadstoffbelastungen
- Sichtung verfügbarer Planungsunterlagen
- Auswahl von Erfassungsmethoden zur Vermessung
- Gruppierung der Bestandsgebäudestruktur
- Bauteilspezifische Prüfungsanweisungen zur in-situ-Bestandserfassung

Anhang A1 3-1 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Untersuchungspunkte bei der Bestandserfassung.

Eigenschaften zur Prüfung	
Betonqualität	• Druckfestigkeit • Kontamination • Karbonatisierungstiefe
Bewehrungszustand	• Schädigungen • Korrosionsgrad • Festigkeit • Geometrie
Bauphysik	• Wärmeleitfähigkeit • Wärmedurchlasswiderstand • Schalldurchgang • Feuerwiderstand
Geometrie	• Maßhaltigkeit • Abplatzungen • Verformungen • Innere & äußere Geometrie
Ästhetik	• Farbe • Gestalt • Oberflächen

Anhang A1 3-1: Wichtige Untersuchungspunkte in Anlehnung an [Mett95]

3.1.1 Entkernung des Bestandsgebäudes

Zu Beginn muss die zu untersuchende Tragstruktur durch eine Entkernung für die weiteren Prüfungen vorbereitet sowie Schadstoffbelastungen identifiziert werden. In Anlehnung an [Mett95] kann bereits in diesem Schritt eine erste Bauwerksbegehung und Vorbewertung vorgenommen werden. Hierbei sind folgende Aspekte zu beachten:

- Schadstoffuntersuchung und gegebenenfalls -sanierung: Als Planungshilfe wird auf [Vdie13] verwiesen.
- Entkernung des Bestandsgebäudes: Im Vorfeld muss zwischen tragenden und nichttragenden Bauelementen unterschieden werden [Dine22]. Entfernt werden hier beispielsweise Bodenbeläge aber auch nichttragende Wände. Während der Entkernung sind ebenfalls geltende Vorschriften des Arbeitsschutzes zu beachten (siehe [StHG10]).
- Abfallentsorgung: Um auf der Baustelle genügend Platz für Untersuchungen, Rückbauarbeiten und die Lagerung der wiedergewonnenen Bauteile zu haben, sollte der bei der Entkernung anfallende Abfall umgehend entsorgt werden. Hierbei sind vor allem die Regelungen des Abfallrechts von Bedeutung, welche in Deutschland auf verschiedenen Ebenen festgesetzt sind [HRRS21]. Anhang A1 3-2 zeigt für das Bauwesen relevante Gesetze und Vorschriften in ihrer Hierarchieordnung auf.



Anhang A1 3-2: Hierarchie des Abfallrechts [HRRS21]

3.1.2 Sichtung verfügbarer Planungsunterlagen

In diesem Schritt sollen die Planungsunterlagen nach Möglichkeit beschafft, eingesehen und die enthaltenen Informationen zusammengetragen werden. Die vorhandenen Informationen sollten in Form eines digitalen Zwillings des Bestandsgebäudes bzw. der rückzubauenden Teilstruktur digitalisiert werden. Dieser Schritt kann und muss teilweise schon parallel zur Entkernung erfolgen. Fehlende Informationen werden ebenfalls dokumentiert, was die Grundlage für den Umfang der nächsten Schritte bildet. Umfangreiche Bestandspläne erleichtern die Bestandserfassung erheblich, da die enthaltenen Informationen nur noch validiert werden müssen und nicht mehr vollständig erhoben werden. Die folgenden wichtigen Informationen sollten den Unterlagen entnommen oder durch eine erste Begehung und Recherche beschafft werden (siehe [GeHe24]).

Planunterlagen	Informationen
• Lagepläne • Ansichtszeichnungen • Grundrisszeichnungen • Schnittzeichnungen • Detailzeichnungen der Bauteile • Bewehrungspläne • Schalpläne • Pläne zu Umbauarbeiten • Statiken	• Standort • Alter • Normungssituation • Geometrien • Materialien inklusive Kennwerte • Statisches System
Dokumentation ermittelter & fehlender Informationen sowie erste Bewertung	

Anhang A1 3-3: Übersicht zu notwendigen Informationen für die Integritätsbewertung nach [GeHe24]

3.1.3 Tragwerksvermessung

Die Geometrie des gesamten Tragwerks und der einzelnen Bauteile muss überprüft oder bei fehlenden Planunterlagen gänzlich erfasst werden. Folgende geometrische Informationen sollten zur Verfügung stehen:

- Abmessungen des gesamten Tragwerks
- Bauteilabmessungen (Querschnitt und Länge)
- Geometrische Relationen zwischen den Bauteilen

Die in den Plänen angegebenen Geometrien müssen überprüft werden. Falls keine Pläne verfügbar sind, müssen umfangreiche Erhebungen durchgeführt werden. Mit der Vermessungsmethode sollten die folgenden Informationen ermittelt werden:

- Abweichungen zu den Bestandsplänen
- Erfassung oder Überprüfung der Geometrie
- Identifikation von Materialeigenschaften, z. B. Orte größerer Fehlstellen
- Festlegung von optimalen Orten für zerstörungsfreie und zerstörende Bauteil- und Materialprüfungen (siehe [DeBF22])

Im Folgenden wird eine Auswahl von Erfassungsmethoden gelistet. Der Vorteil von 3D-Scanverfahren und Photogrammetrie liegt in der direkten Erstellung von digitalen Modellen (siehe [GeHe24]). Diese Methoden können manuell oder automatisiert (z. B. mit Drohnen, siehe Anhang A1 3-4) eingesetzt werden.

- Optische 3D-Scanverfahren
- Photogrammetrie
- Impakt-Echo-Verfahren zur Dickenmessung einseitig zugänglicher Bauteile
- Konventionelle Vermessungsmethoden, wie händische Vermessungen



Anhang A1 3-4: Beispielhafte Anwendung von Drohnentechnik zur Geometrieerfassung [IMB-MB]

3.1.4 Gruppierung der Bestandsgebäudestruktur

Für die weitere Planung der in-situ-Bestandserfassung sowie für die Modularisierung ist eine ausführliche Analyse der Bauweise, des globalen statischen Systems und der Tragfunktion der einzelnen Bauteile erforderlich. Dabei ist die Anzahl, die Position und die Art

der Bauteile relevant. Diese Informationen sollen den Planungsunterlagen oder ggf. einer ersten Begehung (siehe Kapitel 3.1.1) entnommen werden. Dabei ist die Zugänglichkeit sicherzustellen. Im nächsten Schritt kann eine Klassifizierung der einzelnen Bauteile in Form von Gruppen und Untergruppen erfolgen, um das vorhandene Bauteilinventar zu erfassen. Für die weiteren Prüfungen können sinnvolle Bauteilgruppen abgeleitet werden. Im Folgenden sind die wichtigsten Aspekte hierzu aufgelistet:

- Gebäudeart und Bauweise
 - Ingenieurbau (Plattenbalkenbrücke, ...)
 - Hochbau (Skelettbau, ...)
- Lastabtrag der Bauteile
 - Vertikal (z. B. Druckglieder wie Stützen oder Wände)
 - Horizontal zur Aussteifung (z. B. Decken- und Wandscheiben, Windverbände, Kerne)
- Position der Bauteile (Innenbauteile, Außenbauteile etc.)
- Sonderbauteile (nicht zuordnbare Bauteile)
- Lagerungsbedingungen (Gelenkig, eingespannt oder verschieblich)
- Knotenpunkte

3.1.5 Bauteilspezifische Prüfungsanweisungen

Ziel der Untersuchungen ist die Festlegung der Materialeigenschaften und des Zustands der Bauteile sowie die Abschätzung von Alterungseffekten (wie z. B. Verfestigungen, Schädigungen, Korrosion, mechanischem Abrieb, Witterungseinflüssen). Für die einzelnen Bauteile bzw. ggf. Bauteilgruppen gemäß Kapitel 3.1.4 sind unter Berücksichtigung der jeweiligen Expositionen alle Materialeigenschaften, wie die Betondruckfestigkeit und der Zustand der Bewehrung, zu bestimmen. Anhang A1 3-5 zeigt beispielhaft verschiedene Messmethoden zur Bestimmung der Druckfestigkeit von Beton.

Geprüfter Bereich	Prüfung	Norm	Grenzabweichung des Festigkeits-schätzwertes	Prüf-geschwin-digkeit	Einfache Umset-zung der Prüfung	Wirt-schaft-lichkeit der Prüfung	Ausblei-ben von Schäden am Tragwerk
In der Tiefe	Bohrkern-prüfung	EN 12504-1	****	**	**	*	*
	Prüfung der Ultraschall-geschwindigkeit	EN 12504-4	***	***	***	***	***
Nahe der Oberfläche	Ausziehprüfung	EN 12504-3	**b	**	**	**	*
Unmittelbar an der Oberfläche	Prüfung der Rückprallzahl	EN 12504-2	***	****	****	****	***
ANMERKUNG Je höher die Anzahl an Sternchen, desto besser das Leistungsverhalten.							
^a Nur, wenn am betreffenden zu untersuchenden Beton kalibriert. ^b Ausziehprüfungen werden häufiger zur Bestimmung der Festigkeit von jungem Beton angewendet, und bei dieser Anwendung ist die Grenzabweichung des Festigkeitsschätzwertes höher als in dieser Tabelle angegeben. Für die in Abschnitt 8 behandelten Anwendungen ist eine geringere Grenzabweichung angegeben, weil die Carbonatisierung und beginnende Delamination die Präzision beeinträchtigen können.							

Anhang A1 3-5: Gegenüberstellung von Prüfungsmethoden für die Betondruckfestigkeit [Mett95]

Es sind bauteilspezifische Prüfungsanweisungen zur In-situ-Ermittlung grundlegender mechanischer Materialeigenschaften sowie von Schädigungen und möglichen Kontaminationsbelastungen zu erstellen. Die Prüfungsanweisungen umfassen die Anordnung der Prüfungen im Rahmen der Bauwerksbegehung und der Einzelsichtprüfung. Gegebenenfalls müssen auch bauphysikalische Eigenschaften erfasst werden. Der Umfang der Prüfungen richtet sich nach dem Vorhandensein von Planungsunterlagen (siehe Ka-

pitel 3.1.2). Bei vollständiger Dokumentation durch Planungsunterlagen können die Prüfungen selektiv zur stichprobenartigen Kontrolle erfolgen (siehe auch [DeBF22]). Die Prüfungsanweisung enthält:

- Bauteilabhängig zerstörungsfreie Prüfungen
- Vermessungsmethoden
- Anordnungen zur Probenentnahme für externe Prüfungen (zerstörend) (Vorbereitung, Art, Umfang und Ort)
- (digitale) Protokollvorlagen

Um Details wie die Bewehrungslage oder die Verbindungspunkte zu ermitteln, können Bohrungen und Freilegungen erforderlich sein [DeBF22]. Zwar liefern zerstörende Tests präzise Materialkennwerte, sollten aber insbesondere bei selektiven Rückbauvorhaben nur ergänzend zu zerstörungsfreien Verfahren eingesetzt werden, um zusätzliche Schädigungen bei potenziell wiederverwendbaren Bauteilen zu vermeiden. Die Auswahl der Prüfmethoden kann anhand von Empfehlungen aus der Literatur erfolgen (siehe [DeBF22, Mett95]). Die konkrete Auswahl ist dabei vom jeweiligen Anwendungsfall abhängig. Entsprechend sind interne (in-situ) und externe Prüfungen (Laboruntersuchungen) festzulegen. Im Folgenden wird nach [Mett95] eine Übersicht und Auswahlhilfe dargestellt (siehe Anhang A1 3-6 bis 3-9).

A 2/1

Prüfkriterium	Prüfziel	zu bewertende/gemessene Eigenschaft	Prüfverfahren/-methode	Prüfgeräte und Hilfsmittel	Einschätzung der		BD/LBD ⁶	Literaturhinweise
					Einsetzbarkeit des Verfahrens auf der Baustelle ⁷	Prüfsicherheit ⁸		
1	2	3	4	5	6	7	8	
Betonqualität	Druckfestigkeit	Vergleich mit der Druckfestigkeit der Bauelemente aus bautechnischem Projekt; bei negativen Abweichungen Ermittlung der Grenzstände der Trag- und Nutzungsfähigkeit	Rückprallprüfung	Rückprallhammer nach Schmidt	+++	++	BD	²
		Eindruck der Kugel	Kugelschlagprüfung	Kugelschlagprüfgerät	+++	+	BD	³
		Ultraschallgeschwindigkeit Ultraschallbildgebung	Ultraschallprüfung (in Kombination)	Ultraschallmessgerät (z.B. USME-D/UPP 10)	+++	+	BD	⁴
		Entnahme von Bohrkernen (für komplexe Prüfungen)	Bohrkernentnahme	Bohrkernentnahmegest mit Zusatzgesten	++	+++	LBD	⁵

² TGL 33 437/01 Zerstörungsfreie Prüfung von Bauwerken und Bauteilen aus Beton, Bestimmung der Druckfestigkeit durch Rückprall- oder Kugelschlagprüfung, 1979; DIN 1048 Prüfverfahren für Beton, Teil 2 - Festbeton in Bauwerken und Bauteilen, 1991; Zerstörungsfreie Prüf- und Meßmethoden im Bauwesen, 1988; MUSEWALD/MIXTACKI, Stahlbeton prüfen und dauerhaft erhalten - untersuchen - planen - ausschreiben - ausführen, 1991.

³ TGL 33 437/01 Zerstörungsfreie Prüfung von Bauwerken und Bauteilen aus Beton, Bestimmung der Druckfestigkeit durch Rückprall- oder Kugelschlagprüfung, 1979; DIN 1048 Prüfverfahren für Beton, Teil 2 - Festbeton in Bauwerken und Bauteilen, 1991.

⁴ TGL 33 437/02 Zerstörungsfreie Prüfung von Bauwerken und Bauteilen aus Beton, Bestimmung der Druckfestigkeit durch Ultraschallprüfung, 1983; DIN 54 120 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung, Kontrollkörper 1 und seine Verwendung zur Justierung und Kontrolle von Ultraschall-Impulsscho-Geräten, 1983; DIN 54 124 Zerstörungsfreie Prüfung, Teil 1 - Kontrolle der Eigenschaften von Ultraschall-Prüfsystemen, 1983; Zerstörungsfreie Prüf- und Meßmethoden im Bauwesen, 1988.

⁵ TGL 33 444/01 Bohrkernprüfung, Beton, 1980; DIN 1048 Prüfverfahren für Beton, Teil 2 - Festbeton in Bauwerken und Bauteilen, 1991.

A 2/2

Prüfkriterium	Prüfziel	zu bewertende/gemessene Eigenschaft	Prüfverfahren/-methode	Prüfgeräte und Hilfsmittel	Einschätzung der		BD/LBD ⁶	Literaturhinweise
					Einsetzbarkeit des Verfahrens auf der Baustelle ⁷	Prüfsicherheit ⁸		
1	2	3	4	5	6	7	8	
Betonqualität	Druckfestigkeit	Herausziehen von mit Epoxidharz vergossenen Bolzen aus dem Bauelement	Ausziehverfahren (in Kombination)	Stahlstifte mit einseitigem Gewinde, Epoxidharz, Bohrständer	++	+++	BD	⁶
		Tiefe der Abnutzung	Stahlprüfverfahren	Strahlprüfgerät mit festgelegter Körnung	++	+	BD	⁷
Betonqualität / Bewehrungszustand	Porosität / Dichtigkeit	Überprüfung der Aufrechterhaltung einer für die Passivität ausreichenden Alkalität	Diffusionsverfahren	Apparatur zur Messung der Gasdiffusion (Gasanalysator, Manometer,...)	+	++	LBD	⁸
		Erfassung größerer Kapillarporen und durchgehender Makroporen in Betondeckschichten	Durchströmungsverfahren	Melgerät für Permeabilitätsmessungen mit Luft	+	++	LBD	⁹
		Kennzahl der durchströmbareren Porosität		Mikroskop	+++	+	BD	
		Porengröße der Grobporen rechnerische Beziehung zwischen Rein- und Rohdichte		Pyknometer, Analyseswaage	+	+++	LBD	¹⁰

⁶ LUDWIG, Auswahl zerstörungsarmer Prüfverfahren zur Baumzustandsuntersuchung genutzter Stahlbetonkonstruktionen, 1988, S. 27.

⁷ Ebenda, S. 25.

⁸ Ebenda, S. 56.

⁹ Ebenda, S. 55.

¹⁰ TGL 33 433/02 Prüfung des erhärteten Betons, Bestimmung der Reindichte, Rohdichte, Porosität, 1987.

Anhang A1 3-6: Übersicht 1- Zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren nach [Mett95]

Schritt 2: Integritätsfassung und Erstklassifizierung der Bestandsgebäudestruktur

A 2/3

Prüfkriterium	Prüfziel	zu bewertende/gemessene Eigenschaft	Prüfverfahren/-methode	Prüfgeräte und Hilfsmittel	Einschätzung der		BD/LBD ¹⁶	Literaturhinweise
					Einsetzbarkeit des Verfahrens auf der Bauteile ¹⁷	Prüfsicherheit ¹⁸		
1	2	3	4	5	6	7	8	
Betonqualität/ Bewehrungs- zustand	Porosität/ Dichtigkeit	Saugfähigkeit	Wasseraufnahme	Saugthermochom	+++	++	BD	¹¹
		Erfassung der Grobporen	Lichtmikroskopie	Geräte der Lichtoptischen Untersuchung	+	++	LBD	¹²
		Volumenanteil durchströmbarer Poren	Penetrationsverfahren	Quecksilber-Druck-Porenmeter (F. Carlo/Erbe-Inalim)	+	++	LBD	¹³
		Erfassung von Submikroporen	Septionsverfahren		+	+	LBD	¹⁴
		Intensität der Strahlung, Porengehalt, Dichtigkeit u. a.	Durchstrahlungsverfahren mit Gammastrahlen	Strahlungsquellen- (Co-60, Cs-137) detektor	++	++	BD/LBD	¹⁵
Betonqualität/ Bewehrungs- zustand	Feuchte	Überprüfung der Wirksamkeit des Korrosionsschutzes durch Bestimmung des Feuchtigkeitsgehaltes (indirekte Kennzeichnung der Porenstruktur)	Inaugenscheinnahme		+++	++	BD	

- ¹¹ JUNGWIRTH/BEYER/GRÜBL, Dauerhafte Betonbauwerke: Substanzerhaltung und Schadensvermeidung in Forschung und Praxis, 1986, S. 36; DARTSCH, Konservieren, Sanieren, Restaurieren - Techniken zur Instandsetzung von und mit Beton, 1976, S. 91; MUSEWALD/MIXTACKI, Stahlbeton prüfen und dauerhaft erhalten - untersuchen - planen - ausschreiben - ausführen, 1991, S. 48.
¹² LUDWIG, Auswahl zerstörungsarmer Prüfverfahren zur Bauzustandsuntersuchung genutzter Stahlbetonkonstruktionen, 1988, S. 77.
¹³ Ebenda, S. 56.
¹⁴ Ebenda, S. 57; AUTORENKOLLEKTIV, Korrosionsprüfmethoden für Betondeckschichten, 1973, S. 14.
¹⁵ s. Fußnote 12, S. 63ff.

A 2/4

Prüfkriterium	Prüfziel	zu bewertende/gemessene Eigenschaft	Prüfverfahren/-methode	Prüfgeräte und Hilfsmittel	Einschätzung der		BD/LBD ¹⁶	Literaturhinweise
					Einsetzbarkeit des Verfahrens auf der Bauteile ¹⁷	Prüfsicherheit ¹⁸		
1	2	3	4	5	6	7	8	
Betonqualität/ Bewehrungs- zustand	Feuchte	elektrische Leitfähigkeit	elektrische Widerstandsmessung	Gipflockelektroden	+	+++	LBD	¹⁶
		Farbumschlag	Karl-Fischer-Methode	Methanol, Karl-Fischer-Lösung	+	++	LBD	¹⁷
			Calciumcarbid-Methode	Calciumcarbid, Manometer	+++	++	BD	¹⁸
		pro Zeiteinheit absorbierte Zahl thermischer Neutronen	Durchstrahlungsverfahren mit Neutronen	Neutronenquelle, Detektor	+++	+++	BD	¹⁹
			Oberflächenmeßverfahren mit Neutronen	Neutronenquelle, Detektor	+++	+++	BD	²⁰
		Feuchtigkeitsbestimmung	Verfahren mit Mikrowellen	Generator, Anzeigergerät, Sender- und Empfangsantenne	+	++	LBD	²¹
		Analysen- und Saugfeuchteermittlung; Bestimmung des Feuchtequotienten			++	++	LBD	²²

- ¹⁶ LIERE, Aufbau einer mobilen Meßeinheit für Bauwerksdiagnostik, 1987, S. 49f.
¹⁷ LUDWIG, Auswahl zerstörungsarmer Prüfverfahren zur Bauzustandsuntersuchung genutzter Stahlbetonkonstruktionen, 1988, S. 60.
¹⁸ Ebenda, S. 60; MUSEWALD/MIXTACKI, Stahlbeton prüfen und dauerhaft erhalten - untersuchen - planen - ausschreiben - ausführen, 1991, S. 59.
¹⁹ s. Fußnote 17, S. 71f.
²⁰ Ebenda, S. 72f.
²¹ Ebenda, S. 54.
²² HAKTMANN/STADELMANN, Zementgehalt und Beständigkeit von Stahlbeton, 1988, S. 76ff.

A 2/5

Prüfkriterium	Prüfziel	zu bewertende/gemessene Eigenschaft	Prüfverfahren/-methode	Prüfgeräte und Hilfsmittel	Einschätzung der		BD/LBD ¹⁶	Literaturhinweise
					Einsetzbarkeit des Verfahrens auf der Bauteile ¹⁷	Prüfsicherheit ¹⁸		
1	2	3	4	5	6	7	8	
		Feuchtemessung und Bestimmung Feuchtigkeitsgehalt	Trocknung bis zur Gewichtskonstanz		+	+++		
Betonqualität / Bewehrungs- zustand	Rißverlauf und -tiefe Fehlstellen	Einordnung in Zustandstufen 1-4						²³
		Rißfeststellung	Inaugenscheinnahme	Wasser	+++	++	BD	²⁴
		Rißverlauf, -breite	optische Vergrößerungsgeräte	Rißlupe, Rißlehre	+++	+++	BD	²⁵
		Rißfeststellung, -verlauf, -breite, -tiefe	Ultraschallprüfung	Ultraschallmeßgerät	+++	++	BD	²⁶
		Rißverlauf	Radioaktive Tracer	radioaktive Isotope z.B. Na-24	++	+++	LBD	²⁷
		Spektrum eines leuchtenden Körpers	MultiSpektraltechnik	Aufnahmesystem UMK 18/1318, MultiSpektralprojektor MSP-4C (VEB Carl Zeiss Jena)	++	+++	BD	²⁸

- ²³ TGL 33 451/02 Betonbau, Analyse des Zustandes von Bauwerken und Bauteilen, Korrosiver Zustand, 1985; DIN 1045 Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, 1988; WOLF, Analyse und Bewertung des Bauzustandes ausgewählter Objekte im EKO und Erarbeitung von Vorschlägen für Bauherhaltungs- und Rekonstruktionsmaßnahmen, 1989; Merkblatt Begrenzung der Rißbildung im Stahlbeton- und Spannbetonbau, 1991.
²⁴ MUSEWALD/MIXTACKI, Stahlbeton prüfen und dauerhaft erhalten - untersuchen - planen - ausschreiben - ausführen, 1991, S. 48f.
²⁵ Ebenda.
²⁶ TGL 33 437/02 Zerstörungsfreie Prüfung von Bauwerken und Bauteilen aus Beton, Bestimmung der Druckfestigkeit durch Ultraschallprüfung, 1983.
²⁷ LUDWIG, Auswahl zerstörungsarmer Prüfverfahren zur Bauzustandsuntersuchung genutzter Stahlbetonkonstruktionen, 1988, S. 75.
²⁸ Ebenda, S. 80f.

Anhang A1 3-7: Übersicht 2- Zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren nach [Mett95]

Schritt 2: Integritätsfassung und Erstklassifizierung der Bestandsgebäudestruktur

A 2/6

Prüfkriterium	Prüfziel	zu bewertende/gemessene Eigenschaft	Prüfverfahren/-methode	Prüferäte und Hilfsmittel	Einschätzung der		BD/LBD ³⁹	Literaturhinweise
					Einsetzbarkeit des Verfahrens auf der Baustelle ⁴⁰	Prüfsicherheit ⁴¹		
1	2	3	4	5	6	7	8	
		Nachweis von Rissen	Gammagraphie	radioaktive Präparate, Spezialfilm	++	+++	BD/LBD	³⁹
Betonqualität/ Bewehrungs- zustand	Betonum- wandlung	Messung der Betonumwandungstiefe (Alkalitätsgrenzwert), pH-Wert						³⁸
		Sprühtest, pH-Umschlagsintervall Phenolphth. 8,2-10 Thymolphth. 9,2-10,5	Indikatormethode	Indikator z.B. Phenolphthalein Thymolphthalein	+++ +++	++ +++	BD/LBD	³¹
		Messung Elektrotennisübergang	elektrometrische pH-Wertbestimmung	pH-Meßgerät	+	+++	LBD	³²

³⁹ Ebenda, S. 67.

³⁸ TGL 28 105/01 Zemente, Nachweis des Einflusses auf das Passivitätsverhalten von Betonstählen, 1989; TGL 33 408/02 Betonbau, Korrosion und Korrosionsschutz, Aktive Schutzmaßnahmen für Beton und Leichtbeton, 1980; TGL 33 433/13 Prüfung des erhärteten Betons, Bestimmung des pH-Wertes, 1980.

³¹ s. Fußnote 27, S. 58f.

³² Ebenda.

A 2/7

Prüfkriterium	Prüfziel	zu bewertende/gemessene Eigenschaft	Prüfverfahren/-methode	Prüferäte und Hilfsmittel	Einschätzung der		BD/LBD ³⁹	Literaturhinweise
					Einsetzbarkeit des Verfahrens auf der Baustelle ⁴⁰	Prüfsicherheit ⁴¹		
1	2	3	4	5	6	7	8	
Betonqualität/ Bewehrungs- zustand	Betondeckung	Dicke der Betondeckung zur Gewährleistung der korrosionssicheren Einbettung						³³
		abzeichnende Rostbahnen	visuelle Bewertung		+++	++	BD	³⁴
		Messung der Dicke der Betondeckung	Magnetische Verfahren	Betondeckungsmessgerät BDM 10, Profometer	+++	+++	BD	³⁵
		Messung der Dicke der Betondeckung	Thermographie	Infrarot-Videoanlage	+++	+++	BD	³⁶
Betonqualität/ Bewehrungs- zustand	Schadstoffgehalt des Betons	Nachweis löslicher Salze	Auslaugen	destilliertes Wasser, Glasflasche	+	++	LBD	³⁷
		Nachweis aggressiver Bestandteile schichtenweise	Extraktionsverfahren	Lösungsmittel, Siedekolben	+	+++	LBD	³⁸

³³ TGL 33 405/01 Betonbau, Nachweis der Trag- und Nutzungsfähigkeit, Konstruktionen aus Beton und Stahlbeton, 1980; TGL 33 405/02 Betonbau, Nachweis der Trag- und Nutzungsfähigkeit, Konstruktionen aus Spannbeton, 1980; TGL 33 408/02 Betonbau, Korrosion und Korrosionsschutz, Aktive Schutzmaßnahmen für Beton und Leichtbeton, 1980; Vorschritt 215/88 der Staatlichen Bauaufsicht: Erhöhung der Lebensdauer von Betonbauwerken, 1989; DIN 1045 Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, 1988; MUSEWALD/MIXTACKI, Stahlbeton prüfen und dauerhaft erhalten - untersuchen - planen - ausschreiben - ausführen, 1991, S. 53.

³⁴ TGL 33 451 Analyse des baulichen Zustandes von Betonbauwerken und -bauteilen, 1982.

³⁵ RÖTHIG/EMMICH, Betondeckungsmessgerät BDM 10 - ein neues komfortables Gerät zur Kontrolle der Bewehrungsanlage, 1987, S. 171f.; Analyse des Langzeitverhaltens von Bauwerken der Industrie: Anlage 4; MUSEWALD/MIXTACKI, Stahlbeton prüfen und dauerhaft erhalten - untersuchen - planen - ausschreiben - ausführen, 1991, S. 53.

³⁶ LUDWIG, Auswahl zerstörungsarmer Prüfverfahren zur Bauzustandsuntersuchung genutzter Stahlbetonkonstruktionen, 1988, S. 82f.

³⁷ TGL 33 433/09 Prüfung des erhärteten Betons, Durchführung der Betonanalyse, 1983.

³⁸ s. Fußnote 36, S. 59f.

A 2/8

Prüfkriterium	Prüfziel	zu bewertende/gemessene Eigenschaft	Prüfverfahren/-methode	Prüferäte und Hilfsmittel	Einschätzung der		BD/LBD ³⁹	Literaturhinweise
					Einsetzbarkeit des Verfahrens auf der Baustelle ⁴⁰	Prüfsicherheit ⁴¹		
1	2	3	4	5	6	7	8	
Betonqualität/ Bewehrungs- zustand	Schadstoffgehalt des Betons	Feststellung von Bereichen mit höherem Salzgehalt	Multispektralanalyse	Aufnahmesystem, Multispektralprojektor (Carl Zeiss Jena)	++	++	BD	³⁹
		Feststellung von Neubildungen im Beton	Lichtmikroskopie	lichtoptische Untersuchungsgeräte	+	+	LBD	⁴⁰
Bewehrungs- zustand	Lage, Durchmesser der Bewehrung	Ermittlung der Grenzzustände der Tragfähigkeit	Magnetische Verfahren	Betondeckungsmessgerät BDM 10, Profometer	+++	+++	BD	⁴¹
			Röntgen- bzw. Gammagraphie	radioaktives Präparat, radioaktive Aufnahme	++	+++	BD	⁴²
			Thermographie	Infrarot-Video-Anlage	+++	+++	BD	⁴³

³⁹ Ebenda, S. 80f.

⁴⁰ Ebenda, S. 77.

⁴¹ s. Fußnote 35.

⁴² LUDWIG, Auswahl zerstörungsarmer Prüfverfahren zur Bauzustandsuntersuchung genutzter Stahlbetonkonstruktionen, 1988, S. 67ff.; LOEFFEL/BERGER/SCHULTZ, Zerstörungsfreie Prüf- und Meßmethoden im Bauwesen: Beiträge (4): Gammagraphie für Bewehrungsermittlung, 1988.

⁴³ TGL 33 451/02 Betonbau, Analyse des Zustandes von Bauwerken und Bauteilen, Korrosiver Zustand, 1985; LUDWIG, Auswahl zerstörungsarmer Prüfverfahren zur Bauzustandsuntersuchung genutzter Stahlbetonkonstruktionen, 1988, S. 82f.; WOLF, Analyse und Bewertung des Bauzustandes ausgewählter Objekte im EKO und Erarbeitung von Vorschlägen für Dauerhaltungs- und Rekonstruktionsmaßnahmen, 1989.

Anhang A1 3-8: Übersicht 3- Zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren nach [Mett95]

Schritt 2: Integritätsfassung und Erstklassifizierung der Bestandsgebäudestruktur

A 2/9

Prüfkriterium	Prüfziel	zu bewertende/gemessene Eigenschaft	Prüfverfahren/-methode	Prüfgeräte und Hilfsmittel	Einschätzung der		BD/LBD ³⁾	Literaturhinweise
					Einsetzbarkeit des Verfahrens auf der Baustelle ¹⁾	Prüfsicherheit ²⁾		
1	2	3	4	5	6		7	8
Bewehrungszustand	Korrosionsgrad	Messung der Durchmesser bzw. Restquerschnitte Bewehrungsstäbe zur Ermittlung der Grenzzustände der Tragfähigkeit	Inaugenscheinnahme	Schiebelehre	+++	++	BD	
			Frequenz-Differenz-Ferromagnetische Methode	Richtgenerator mit fester Frequenz, Maßgenerator (ISKA 73 - UMSSR)	++	++	BD	⁴⁴⁾
			Gammagraphie	radioaktive Präparate, Spezialfilm	++	+++	BD	⁴⁵⁾
		Ortung korrodierter Bewehrungsstäbe	Potentialdifferenzmessung	Elektrode, mV-Meter (US-amerikanische Norm 876-80)	++	++	BD	⁴⁶⁾
Ästhetik/Betonqualität/Bewehrungszustand	Farbe, Aussehen	Optischer Eindruck der Betonsoberfläche: • Gestaltung, Anstrichsystem • Kienester • Stauh, Absatzungen • Rostfahnen, Abplatzungen • Auswülbungen, Risse • Kantenabbrüche • Ebenförmigkeit	Inaugenscheinnahme	Beseitigung von Gerüst, Steiger oder Fertiges	+++	++		

⁴⁴⁾ LUDWIG, Auswahl zerstörungsarmer Prüfverfahren zur Bauzustandsuntersuchung genutzter Stahlbetonkonstruktionen, 1988, S. 53f.

⁴⁵⁾ s. Fußnote 42.

⁴⁶⁾ TRITTHART/GEYMAYER, Zerstörungsfreies Auffinden von Korrosionszonen der Bewehrung: Anwendung der Potentialdifferenzmessung, 1981.

A 2/10

Prüfkriterium	Prüfziel	zu bewertende/gemessene Eigenschaft	Prüfverfahren/-methode	Prüfgeräte und Hilfsmittel	Einschätzung der		BD/LBD ³⁾	Literaturhinweise
					Einsetzbarkeit des Verfahrens auf der Baustelle ¹⁾	Prüfsicherheit ²⁾		
1	2	3	4	5	6		7	8
Geometrie	Verformung	Ermittlung möglicher Abweichungen vom Sollzustand standardisierter Elemente unter Beachtung der zulässigen Toleranzen	Inaugenscheinnahme	Meßband, Maßlatze, Rülmschab, Niveaumess	+++	+++	BD	
Geometrie / Ästhetik	Oberflächenbeschaffenheit	Tiefe der Abstratzung	Stahlprüfverfahren	Trahprüfgerät mit festgelegter Körnung	++	++	BD	⁴⁷⁾
		Maßhaltigkeit, Winkligkeit, Körperkantenbeschaffenheit	optische Verschiebungsmessung	Meßband, Stahllinial, Stahlwinkel, Universalwinkelmeßer, Theodolit, Wasserwaage	+++	+++	BD	⁴⁸⁾
		Rauigkeit		Okular, Stahllinial, Lichtschnitt-verfahren	+++	+++	BD	⁴⁹⁾
		Rauigkeit	Rasterelektronenmikroskop	Strahlungsquelle, Detektor	++	++	BD	⁵⁰⁾

⁴⁷⁾ LUDWIG, Auswahl zerstörungsarmer Prüfverfahren zur Bauzustandsuntersuchung genutzter Stahlbetonkonstruktionen, 1988, S. 25.

⁴⁸⁾ Ebenda, S. 76f.

⁴⁹⁾ Ebenda, S. 76.

⁵⁰⁾ Ebenda, S. 79.

A 2/11

Prüfkriterium	Prüfziel	zu bewertende/gemessene Eigenschaft	Prüfverfahren/-methode	Prüfgeräte und Hilfsmittel	Einschätzung der		BD/LBD ³⁾	Literaturhinweise
					Einsetzbarkeit des Verfahrens auf der Baustelle ¹⁾	Prüfsicherheit ²⁾		
1	2	3	4	5	6		7	8
Thermisches Verhalten	Wärmedämmwert	Bestimmung des Wärmedämmwertes an Außenwänden; Berechnung des Wärmedämmvermögens als Grundlage zum Vergleich mit den Anforderungen der Sekundärnutzung	Wärmedämmwert	Wärmedämmwertmeßsystem DWMS	+++	+++	BD	⁵¹⁾
Akustisches Verhalten	Schalldurchgang	Bestimmung des Schalldurchganges der Umhüllungskonstruktion als Grundlage zum Vergleich mit den Anforderungen der Sekundärnutzung	Schallmessung	Schallpegelmeßgerät	+++	+++	BD	⁵²⁾

Legende

1) Einschätzung der Einsetzbarkeit des Verfahrens auf der Baustelle
+ nicht geeignet
++ bedingt geeignet
+++ gut geeignet

2) Einschätzung der Prüfsicherheit
+ gering
++ mittel
+++ gut

3) Bauteildiagnose (BD) / Labordiagnose (LBD)

⁵¹⁾ TGL 35 424/01 Bautechnischer Wärmeschutz, Allgemeine Forderungen, Grundsätze, Außenklima, Wetterschutz, 1981; DIN 4108 Wärmeschutz im Hochbau, Teil 4 - Wärme- und feuchteschutztechnische Kennwerte, 1991; DIN 4108 Wärmeschutz im Hochbau, Teil 5 - Berechnungsverfahren, 1981; Arbeitshilfen zur neuen WSV, 1994; Analyse des Langzeitverhaltens von Bauwerken der Industrie: Anlage 4.

⁵²⁾ TGL 10 687/05 Schallschutz, Vorbereitung von Investitionen, 1978; DIN EN 20 140 Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen. Teil 2, Angabe von Censaugkeitsanforderungen, 1993; DIN EN 20 140 Messung der Luftschalldämmung von Bauteilen in Prüfständen. Teil 3, 1992; DIN EN 20 140 Messung der Luftschalldämmung kleiner Bauteile in Prüfständen. Teil 10, 1992; DIN 4109 Schallschutz im Hochbau, Anforderungen und Nachweise, 1989; DIN 45 637 Schallpegelmeßer, Zusatzanforderungen für besondere Meßaufgaben, 1992.

Anhang A1 3-9: Übersicht 4- Zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren nach [Mett95]

3.2 In-situ Bestandserfassung

Eine ausführliche Bestandserfassung und -untersuchung bildet die Grundlage für die qualitative Vorselektion und Dekonstruktionsplanung. Dabei müssen Geometrien, Material- und Bauteileigenschaften sowie Schäden erfasst und digitalisiert werden.

3.2.1 Bauwerksbegehung und Einzelsichtprüfung

Grundlage hierfür ist die Sichtung der Planungsunterlagen (siehe Kapitel 3.1.2) sowie die Vermessung der Tragstruktur (siehe Kapitel 3.1.3) unter Anwendung der gewählten Erfassungsmethoden. Die Vermessung muss ggf. bereits vor der (Haupt-)Begehung durchgeführt werden, sofern keine Planungsunterlagen vorliegen. Während der Bauwerksbegehung werden die vorgesehenen Prüfungen vor Ort gemäß den Prüfungsanweisungen der Bauteile durchgeführt und Proben für externe Prüfungen entnommen. Im Rahmen der individuellen Einzelsichtprüfung werden vorhandene oberflächliche Schäden sowie besondere Beobachtungen erfasst. Auch die Ästhetik der Oberflächen sowie mögliche Verunreinigungen sind aufzunehmen, um den erforderlichen Aufbereitungsaufwand abschätzen zu können. Die Nutzungsart und Nutzungserscheinungen (z. B. aus Abgasbelastungen) sowie die Expositionen jedes Bauteils sind individuell zu dokumentieren. Lastabhängige Schädigungen (z. B. Anprallschäden) oder umweltbedingte Schädigungen (z. B. Wasserschäden und Bauteilfeuchte) sind zu differenzieren und gut zu dokumentieren. Dabei ist insbesondere auf folgende Schadensbilder zu achten:

- Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)
- Karbonatisierung
- Kalklösende Kohlensäure
- Säureangriff
- Sulfatangriff

Anhang A1 3-10 stellt exemplarisch Auszüge einer Schadensdokumentation dar.



a) Oberflächenrisse

b) Kiesnester

c) Öffnungen

d) Porosität

e) Korrosion

Anhang A1 3-10: Exemplarische Auszüge einer Schadensdokumentation [Fotos Stöhr]

Zur Erfassung und Auswertung von Schäden können beispielsweise die Schadensklassen gemäß [DeBF22] Anwendung finden (siehe Anhang A1 3-11).

Schadensklasse	Ausmass / Häufigkeit					Schadensklasse (Zustand)	Beschreibung des Schadens			Konsequenzen
	keine	lokal / einmalig	begrenzt	lokal / häufig	grossflächig		Ausmass	Schweregrad	Häufigkeit	
A gut						A (Gut)	Keine	-	-	-
B annehmbar						B (Annehmbar)	Lokal	Leicht	Einmalig	Dauerhaftigkeit
C mässig						C (Mässig)	Lokal	Schwer	Einmalig	Gebrauchstauglichkeit
D schlecht						D (Schlecht)	Begrenzt	Mittel	Häufig	Gebrauchstauglichkeit oder Sicherheit
E Versagen						E (Versagen)	Grossflächig	Schwer	Häufig	Sicherheit

Schweregrad: ● leicht ● mittel ● schwer

Anhang A1 3-11: Einteilung in Schadensklassen nach [DeBF22]

Die Dokumentation der Erfassung ist entscheidend und sollte direkt digital erfolgen. Zudem ist eine Kennzeichnung der Bauteile zur späteren Zuordnung erforderlich (sichere und feste Anbringung ist notwendig).

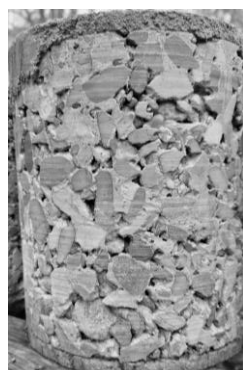
3.2.2 Externe Prüfungen

Die externen Prüfungen umfassen Material-, Schädigungs- und Schadstoffanalysen. In der Grundlagenermittlung (siehe Kapitel 3.1.1) sollten grundlegende Schadstoffanalysen zu Asbest, künstlichen Mineralfasern (KMF), polychlorierten Biphenylen (PCB), polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und Schimmelpilzen durchgeführt worden sein. Gegebenenfalls sind auf Grundlage der Begehung weitere Laboruntersuchungen notwendig.

Die Prüfungen sind gemäß der Prüfungsanweisung und den entsprechenden Normen durchzuführen. Ein Beispiel für eine solche Untersuchung (Festbetonprüfungen an Bohrkernen) ist in Anhang A1 3-12 zu finden.



a) Prüfung des Gefüges



c) Druckfestigkeitsprüfung

Anhang A1 3-12: Beispiele einer Laboruntersuchung an Bohrkernen [Fotos Stöhr]

3.3 Analyse zur monolithischen Tragstruktur

Die Grundlage für diesen Schritt bilden die Ergebnisse aus dem Kapitel 3.1.2 (vorhandene Planunterlagen) und der Bestandserfassung. Dieser Schritt kann nach Sichtung der Planunterlagen und parallel zu den weiteren Schritten erfolgen. Dabei sind die eingesetzten Materialien sowie das statische Tragsystem hinsichtlich der Wiederverwertbarkeit einzelner Bauteile zu bewerten.

3.3.1 Eingesetzte Materialien und Konstruktionsweisen

Bei der Rekonstruktion der Bewehrungsführung sind die anzusetzenden Betoneigenschaften sowie die historische Normungssituation zu berücksichtigen. Da sich die eingesetzten Materialien und Konstruktionsweisen im Laufe der Zeit entwickelt haben, ergeben sich in Abhängigkeit des Bauwerksalters deutliche Unterschiede (siehe hierzu [Fing09, SLSW12]). Beispiele hierfür sind die Verankerung der Längsbewehrung, Betondeckungen, Biegerollendurchmesser, Konstruktionsregeln und die eingesetzten Werkstoffe. Anhang A1 3-13 vergleicht beispielhaft unterschiedliche Bewehrungsstahlarten.



Anhang A1 3-13: Unterschiedliche Stahlarten im Vergleich [Foto Stöhr]

Eine Übersicht zur Entwicklung der Normen kann dem Anhang A1 3-14 entnommen werden. Dabei sind Übergangsfristen bis zur tatsächlichen Zulassung zu beachten [StWS12].

Regelwerk	Veröffentlichung	zugehöriger Kommentar
Vorläufige Leitsätze für die Vorbereitung, Ausführung und Prüfung von Eisenbetonbauten [4]	1904	(Beispiele enthalten)
Bestimmungen des Kgl. Preussischen Ministeriums der öffentl. Arbeiten für die Ausführung von Konstruktionen aus Eisenbeton bei Hochbauten [9]	1907	(Beispiele enthalten)
Bestimmungen für – Ausführung von Bauwerken aus Beton [5] – Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton [6]	1916	GEHLER, W.: Erläuterungen zu den Eisenbeton-Bestimmungen 1916 mit Beispielen [10]
DIN 1045 – Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton [11]	1925	GEHLER, W.: Erläuterungen zu den Eisenbeton-Bestimmungen 1925 mit Beispielen [12]
DIN 1045 – A. Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton [13]	1932	GEHLER, W.: Erläuterungen zu den Eisenbeton-Bestimmungen 1932 mit Beispielen [15]
DIN 1045 – A. Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Eisenbeton [14]	1937	GEHLER, W.: Erläuterungen zu den Eisenbeton-Bestimmungen 1937 mit Beispielen [15]
DIN 1045 – A. Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Stahlbeton [16]	1943	GEHLER, W., PALEN, C.: Erläuterungen zu den Stahlbetonbestimmungen 1943 mit Beispielen [18]
DIN 1045 – A. Bestimmungen für Ausführung von Bauwerken aus Stahlbeton [17]	1959	GEHLER, W., PALEN, C.: Erläuterungen zu den Stahlbetonbestimmungen 1943 mit Beispielen [18]
DIN 1045 – Beton- und Stahlbetonbau – Bemessung und Ausführung [19]	1972	BONZEL, J.: Erläuterungen zu den Stahlbetonbestimmungen [20]
DIN 1045 – Beton- und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung [21]	1978	BERTRAM, D. et al.: Hinweise zu DIN 1045, Ausgabe 12/78. DAfStb-Heft 300 [22]
DIN 1045 – Beton- und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung [23]	1988	BERTRAM, D. et al.: Erläuterungen zu DIN 1045, Beton und Stahlbeton, Ausgabe 07/88. DAfStb-Heft 400 [24]
DIN 1045-1 – Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion [25]	2001	Erläuterungen zu DIN 1045-1. DAfStb-Heft 525 [26]
DIN 1045-1 – Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 1: Bemessung und Konstruktion [27]	2008	Erläuterungen zu DIN 1045-1. DAfStb-Heft 525 2. überarbeitete Auflage [28]
Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1 [3]	2011	HEGGER et al.: Erläuterungen zu EC 2-1-1. DAfStb-Heft 600 (in Erstellung) [29]

Anhang A1 3-14: Entwicklung der Regelwerke in Deutschland [StWS12]

In diesem Schritt stehen die folgenden Fragestellungen und Anforderungen im Fokus:

- Sichtung geeigneter Regelwerke
 - Normungssituation für das Bauen im Bestand (projektspezifisch)
 - Zeitliche Entwicklung der eingesetzten Materialien (Beton und Bewehrung) in Abhängigkeit des Standorts (Nation) und des Bauwerksalters
- Auswertung der Prüfmethoden zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften der Bauteile und Bauteilgruppen
- Bauteile und Bauteilgruppen
 - Statisches Tragsystem (gibt Aufschluss über die Bewehrungsführung)
 - Konstruktion der Bewehrungsführung auf Grundlage von Planungsunterlagen, Bauteilprüfungen und der geltenden Normung
 - Bewehrungskonstruktion nach historischer Normung
 - Endverankerungsbereiche und Knotenpunkte
 - Symmetrische Anordnungen
 - Individuelle Eigenschaften
 - Verwendete Bewehrungsart (z. B. Glattstahl)
 - Materialeigenschaften (z. B. Fließgrenze)
 - Durchmesser und Lage

3.3.2 Statische Systemanalyse

Im Rahmen der statischen Systemanalyse des Bestandsbauwerks wird aufbauend auf den Ergebnissen aus Kapitel 3.1.4 (Bestimmung des Gebäudetyps und der Bauteilarten) vorgegangen. Dabei sind für die Bauteile und Bauteilgruppen die folgenden Aspekte zu betrachten:

- Gewichtsbestimmung der Bauteile und Bauteilgruppen
- Statische Analyse mit Rekonstruktion der charakteristischen Bauteil- und Lasthistorie zur Identifikation potenzieller Ermüdungsschäden, beispielsweise bei Ingenieurbauwerken relevant (Berücksichtigung von Schadenssichtungen gemäß Kapitel 3.2)
- Statische Analyse unter Berücksichtigung der aktuellen Normung
 - Vertikale und horizontale Lastableitung des Gebäudes
 - Tragwirkung der Bauteilgruppen, z. B. Durchlaufwirkung bei Deckenplatten oder anzusetzende Spannweiten und Spannrichtungen (flächige Bauteile)
 - Nichtlineares Materialverhalten für Druckglieder (Alterungseffekte)
 - Beim Rückbau von Druckgliedern (Stützen, Wände oder vorgespannte Systeme) können entlastungsbedingte Umlagerungseffekte aus dem zeitabhängigen Materialverhalten von Beton (Druckkriechen) zu Schäden bei der Entnahme führen
 - Dies bildet eine Grundlage für die Dekonstruktionsplanung

3.4 Integritätsbewertung

3.4.1 Vorselektionskriterien

Der erste Schritt der Integritätsbewertung zur Vorselektion potenziell wiederverwendbarer Bauteile ist die Zusammenfassung der Bestandserfassung sowie aller erhobenen Daten (Kapitel 3.1 bis 3.3) und Auswertungen der Prüfergebnisse (z. B. Materialeigenschaften oder Gutachten zur Schadensanalyse, Exposition und Schadstoffanalyse). Die wesentlichen Vorselektionskriterien sind im Folgenden aufgelistet.

- Last- und umweltbedingte Schädigungen
 - Lastbedingte Schädigungen
 - Schädigung durch Umlagerungsverhalten infolge von Druckkriechen (nichtlineares Materialverhalten)
 - Schädigung durch äußere Lasten oder Zwang
 - Umweltbedingte Schädigungen (Alterungseffekte), die zur Degradation der Materialeigenschaften führen
- Kontamination
 - Bewertung des Schadstoffgutachtens für das Gebäude
 - Bewertung der Schadstoffgutachten für einzelne Bauteile
- Konformität
 - Geometrie
 - Zugänglichkeit für die Dekonstruktion (Vorbewertung)
- Sonstiges, z. B. ästhetische Aspekte

Für jedes Bauteil muss als Ergebnis identifiziert werden, ob die Kriterien unkritisch, reversibel oder irreversibel (technisch oder wirtschaftlich) sind. Für eine konkrete Bewertung sind die jeweiligen Gutachten und Normen sowie entwickelte Bewertungsmethoden aus der Literatur heranzuziehen (siehe z. B. [DeBF22] und [Mett95, MHA108]).

3.4.2 Erstklassifizierung

Das gesamte Bewertungsverfahren besteht aus vier Stufen und soll eine effiziente Identifikation potenziell wiederverwendbarer Bauteile entlang der Prozesskette ermöglichen. Die einzelnen Schritte sind im Folgenden aufgelistet:

Klassifizierung im Rückbauvorhaben

- Stufe 1: Klassifizierung auf Grundlage des Tragsystems und der Bauteilintegrität
- Stufe 2: Klassifizierung auf Grundlage des modularen Baukastensystems
- Stufe 3: Klassifizierung auf Grundlage der Dekonstruktion

Klassifizierung im Neubauvorhaben

- Stufe 4: Klassifizierung für die Bauteildatenbank

Die Erstklassifizierung (Stufe 1) erfolgt anhand der initialen Einschätzung zur Rückbaubarkeit im Tragwerk und der Bauteilintegrität gemäß Kapitel 3.4.1. Eine detaillierte Vorgehensweise zur Integritätsbewertung kann [DeBF22] und [Mett95, MHA108] entnommen werden. Für den weiteren Prozessablauf ist eine Vorbewertung und Einteilung der Bauteile in die folgenden drei Stufen erforderlich:

- E1: Potenziell wiederverwendbar als tragendes Bauteil (neuwertig)
- E2: Ggf. wieder- oder weiterverwendbar als tragendes Bauteil (reversibel)
- E3: Konventionelle Verwertung (irreversibel)

Bei den in Stufe E3 klassifizierten Bauteilen, bei denen keine Verstärkungen und keine Schadstoffsanierung sinnvoll möglich sind (z. B. Asbestkontamination) oder deren geometrische Ausprägung oder Zugänglichkeit unzureichend ist, kann direkt eine finale Klassifizierung vorgenommen und eine konventionelle Verwertung wie folgt festgelegt werden:

- Umnutzung als nichttragendes Bauteil
- Stoffliche Verwertung
- Beseitigung, z. B. bei Asbestkontamination

3.4.3 Digitalisierung

Zum Abschluss des Vorhabens wird in einer geeigneten Softwareumgebung ein digitaler Zwilling der vorhandenen Tragwerksstruktur erstellt. Das 3D-Modell kann bereits parallel zur Bestandsaufnahme angelegt und mithilfe der neu gewonnenen Erkenntnisse kontinuierlich erweitert werden. Im digitalen Zwilling sollten alle gesammelten Informationen gebündelt werden. Dadurch wird die Basis für die angestrebte digitale Prozesskette geschaffen. Geometrische Informationen sind über die 3D-Modellierung enthalten. Weitere Informationen können je nach Funktionalität der Software direkt den digitalen Bauteilen als Bauteilpass hinterlegt werden. Auch die Ergebnisse der Vorselektion sollten am digitalen Zwilling dokumentiert werden. Die Genauigkeit ist abhängig vom jeweiligen Projekt. Anhang A1 3-15 gibt einen Überblick über wichtige Inhalte eines Bauteilpasses im digitalen Zwilling.

Schritt	Informationen, die in dem Bericht enthalten sein sollten
Sichtung der vorhandenen Daten	Die verfügbaren Dokumente sind in dem Bericht aufgelistet. Alle relevanten Informationen, die in den vorhandenen Dokumenten gefunden wurden, sind in dem Bericht zusammengefasst.
Kategorisierung der Bauteile	Eine Abbildung, die die Lage der Bauteiltypen zeigt. Alle Kategorien, Typen und Untertypen von Bauteilen werden beschrieben und in einer zusammenfassenden Tabelle dargestellt (Abschnitt 4.3).
Begehungen vor Ort und visuelle Untersuchung	Das Datum/die Daten der Begehung und der Name der anwesenden Person(en) werden in dem Bericht erwähnt. Eine kurze Beschreibung der wichtigsten Beobachtungen und der durchgeführten Arbeiten ist ebenfalls enthalten.
Beurteilung der Schäden	Die an den verschiedenen Bauteilen beobachteten Schäden werden mit Fotos dokumentiert. Der Zustand der ausgewählten Bauteile wird in der Übersichtstabelle und in den Datenblättern dargestellt.
Untersuchungen zur Geometrie	Die Messungen werden auf einem Grundriss des untersuchten Gebäudes verortet. Alle Messergebnisse werden in dem Bericht aufgeführt.
Zerstörende Untersuchungen der Materialien	Die Proben werden auf einem Grundriss des untersuchten Gebäudes verortet. Alle Testergebnisse sind in dem Bericht aufgeführt.
Zerstörungsfreie Untersuchungen der Materialien	Die Untersuchungszonen werden auf einem Grundriss des untersuchten Gebäudes verortet. Alle Testergebnisse sind in dem Bericht aufgeführt.
Beurteilung der Ästhetik	Die Farbe und die Oberflächenstruktur werden auf dem Datenblatt des Bauteiltyps mit der nächstgelegenen Nummer der RAL-Farbkarte beschrieben.
Beurteilung der Zugänglichkeit	Der Grad der Zugänglichkeit wird im Datenblatt des Bauteiltyps festgehalten.
Querschnittswiderstand	Die Werte für jeden Bauteiluntyp sollten im Datenblatt angegeben werden.
Volumenmäßige Signifikanz	Die Signifikanzwerte für die einzelnen Bauteiluntypen werden in der Übersichtstabelle und im Datenblatt angegeben.
Umweltauswirkungen	Die zur Berechnung der Umweltauswirkungen getroffenen Annahmen werden ebenso angegeben wie die Verweise auf die KBOB-Datenbank [31]. Das Ergebnis für jeden Bauteiluntyp sollte im Datenblatt enthalten sein.

Anhang A1 3-15: Inhalte zur Dokumentation einer Bestandsanalyse nach [DeBF22]

4 Schritt 3: Modulares Baukastensystem für zirkuläre Wiederverwendungen rückgebauter Stahlbetonbauteile

Der dritte Prozessschritt bildet sowohl für Rückbau- als auch für Neubauvorhaben die Grundlage für die angestrebte Wiederverwendung der rückgebauten Bauteile als modulare, lösbare Fertigteile. In diesem Prozessabschnitt stehen vor allem die folgenden Fragestellungen im Vordergrund:

- Welche allgemeinen Anforderungen liegen beim Bestandsbauwerk vor?
- Sind Neu- oder Weiterentwicklungen durch Adaption von Methoden zur Baukastenentwicklung für das Rückbau- sowie Neubauvorhaben erforderlich?
- Welche Bauteile sind hinsichtlich des spezifischen Baukastensystems für die Wiederverwendung geeignet und können integriert werden?
- Welches Aussteifungskonzept, welche lösbare Schnittstellenausbildung und Maßsystematik werden für den Wiederverwendungsprozess vorgesehen?

Als Ergebnis dieses Prozessabschnitts steht ein modulares Baukastensystem zur Verfügung, das eine Dekonstruktion gemäß der spezifischen Maßsystematik sowie eine Integration der potenziell wiederverwendbaren Bauteile in das Baukastensystem erlaubt. Im Fall eines reinen Rückbauprojektes ohne unmittelbare Wiederverwendung ist vorzugsweise eine Integration in ein vorhandenes Baukastensystem anzustreben, das vielfältige Wiederverwendungsmöglichkeiten erlaubt und keine zu konkreten Aufbereitungsmaßnahmen beinhaltet. Bei einem angegliederten Neubauprojekt können auch spezifische Anforderungen in die Entwicklung des Baukastens einfließen und Individuallösungen umgesetzt werden.

4.1 Integration in ein vorhandenes Baukastensystem

4.1.1 Integrationsprüfung

Die Integrationsprüfung erfolgt auf den drei Ebenen: Tragwerksebene, Bauteilebene und Materialebene. Jede dieser Ebenen stellt unterschiedliche Anforderungen an die zu prüfenden Elemente. Für jedes potenzielle Bauteil muss eine eigenständige Integrationsprüfung durchgeführt werden. Dabei werden ungeeignete Bauteile identifiziert und ausgeschlossen (Stufe 2: Klassifizierung auf Grundlage des Baukastensystems). So wird sichergestellt, dass nur geeignete Bauteile in die weitere Planung und Umsetzung übernommen werden. Sollte der Anteil nicht integrierbarer Bauteile zu groß sein, muss das Baukastensystem neu oder weiterentwickelt werden. Zur strukturierten Durchführung der Prüfung kann der folgende allgemeine Anforderungskatalog als Hilfestellung herangezogen werden.

4.1.2 Anforderungskatalog für Rückbauvorhaben

Vor der Dekonstruktion muss geprüft werden, ob die Bestandsbauteile für das vorgesehene Baukastensystem geeignet sind. Die wichtigsten allgemeinen Anforderungen sind im Folgenden aufgeführt:

Tragwerksebene

- Die Art des Tragsystems
- Bauweisen und Verbindungsprinzipien (z. B. monolithisch)
- Menge und Verteilung der Bauteile, insbesondere Sonderbauteile
- Bauteilarten z. B. zur Bestimmung der Verwendung im Baukastensystem
- Historische Konstruktionsweisen

Bauteilebene

- Geometrie des Bauteils
 - Legitimation der Bauteilgeometrie und des Bauteilgewichts durch den Transportprozess sowie durch Restriktionen im Demontageprozess (z. B. Mindestabstände der Entnahmetechnik).
 - Grundsätzliche Anwendbarkeit der Maßsystematik des Baukastens (z. B. Grad der notwendigen Segmentierung)
 - Querschnittseigenschaften
- Tragfunktion
 - Tragfunktionen im Baukasten anwendbar
 - Standardisierte Aufbereitung der Schnittstellen möglich
- Bewehrungskonstruktion
 - Ausreichende Bewehrungsmengen und -konstruktion für die angedachten Funktionen im Baukasten
 - Spannrichtung und Bewehrungsführung (Richtung, Durchmesser etc.)
 - Bewehrungsführungen für multifunktionale Nutzungen (z. B. Symmetrie)
 - Erhalt der Endverankerungskonstruktion oder gezieltes Abtrennen, abhängig vom Einsatzort und der Verbindungskonstruktion
 - Historische Bewehrungsführung (nach Kapitel 3.3)
- Integrität (nach Kapitel 3.4)
 - Zustand des Bauteils
 - Klassifizierung nach Stufe 1

Materialebene

- Kombinationen von Festigkeits- und Steifigkeitsunterschieden müssen berücksichtigt werden
- Historische Materialeigenschaften (nach Kapitel 3.3)
- Für die Integration anderer Materialien (nicht Beton und Stahlbeton) sind in der Regel Erweiterungen notwendig

4.2 Weiter- oder Neuentwicklung von Baukastensystemen

Für eine sinnvolle Modularisierung von Gebäuden und insbesondere für die Wiederverwendung von Bauteilen bietet sich ein Baukastensystem an. Mit diesem können durch die Kombination von unterschiedlichen Modulen relativ einfach und schnell verschiedenste Produktvarianten erzeugt werden (siehe [KrGe18]). Im Hinblick auf die Weiter- und Wiederverwendung von Stahlbetonbauteilen bedeutet dies, dass sich aus standardisierten Bauteilen wie Stützen, Trägern und Decken verschiedene Tragwerksstrukturen konfigurieren lassen. Die Entwicklung eines solchen Baukastensystems umfasst die Definition verschiedener Eigenschaften.

4.2.1 Allgemeine Anforderungen

- Bei der Modularisierung muss die gesamte Prozesskette betrachtet werden, um Vorteile in allen Produktlebensphasen zu erzielen
- Integration möglichst vieler Bestandsbauteile durch die gewählte Modularisierungsstrategie
- Trotz hoher Individualität soll ein hoher Standardisierungsgrad vorherrschen
- Entwicklung von offenen Systemen zur nachträglichen Eingliederung unterschiedlicher Bauteilausprägungen sind zu bevorzugen
- Mehrere Nutzungszyklen sollen ermöglicht werden
- Die Bauteile sollen multifunktional eingesetzt werden können
- Neu entwickelte Baukästen sollen eine hybride Bauweise und eine kommunale Verwendung ermöglichen und mit den bereits bestehenden Systemen kompatibel sein
- Fertigung und Montage (z. B. Passgenauigkeitsanforderungen in Abhängigkeit der Fertigungstechnik und -ort)
- Historische Bauteil- und Materialeigenschaften

4.2.2 Modulares Tragwerkskonzept durch Methoden zur Modularisierung

Die geltenden normativen Vorgaben müssen für das Tragwerk eingehalten werden und sollten daher bereits in der Entwicklungsphase berücksichtigt werden. Der konzeptionelle Ansatz des Tragsystems muss daher die folgenden Anforderungen berücksichtigen:

- Anforderungen an die Bauphysik (z. B. Wärmeschutz, Schallschutz etc.)
- Anforderungen an den Brandschutz (z. B. Brandschutzkonzepte)
- Anforderungen an die Dauerhaftigkeit für definierte Nutzungszeiträume
- Aussteifung und Gesamtstabilität

Um spätere Anpassungen zu vermeiden, sollte die Aussteifung des modularen Tragwerks frühzeitig in der Baukastenentwicklung berücksichtigt werden. Der Baukasten muss eindeutig erkennbare Möglichkeiten zur Aussteifung bieten, beispielsweise durch integrierte Aussteifungselemente. Bewährte Systeme wie Kern-, Rahmen- oder Scheibenaussteifungen sind zu berücksichtigen. Das Aussteifungssystem gibt bestimmte Eigenschaften des Neubauvorhabens vor, beispielsweise die maximale Gebäudehöhe. Auch Aspekte der Wiederverwendung wie verfügbare Bauteile, lösbare Anschlüsse und die potenzielle Weiternutzung bestehender Aussteifungselemente sollten einbezogen werden.

Bei der (Weiter-)Entwicklung von Baukästen sollte darauf geachtet werden, dass die folgenden Eigenschaften (siehe z. B. [RZWH24]) modularer Systeme sinnvoll ausgeprägt sind:

- Entkopplung: Die Verbindungen innerhalb eines Moduls sind deutlich stärker ausgeprägt als die Verbindungen zu anderen Modulen
- Kommunalität: Die Module können in verschiedenen Produkten über das gesamte Produktprogramm verwendet werden
- Kombinierbarkeit: Durch die Kombination der unterschiedlichen Module können verschiedene Produktvarianten erzeugt werden.
- Funktionsbindung: Jedem Modul werden Funktionen zugeteilt, welche es eigenständig erfüllen kann
- Schnittstellenstandardisierung: Die Verbindungen zwischen den Modulen sind standardisiert und ermöglichen eine einfache Kombination

Im Folgenden sind verschiedene Methoden zur Modularisierung aufgelistet, die zur Baukastenentwicklung angewendet werden können:

a) Top-down-Modularisierung: Die Top-down-Modularisierung zerlegt ein Gesamtsystem schrittweise in immer kleinere, grob beschriebene Module bis ein ausreichendes Systemverständnis erreicht ist. Sie eignet sich besonders zur frühzeitigen Identifikation sinnvoller Module in Tragwerken (siehe [KHTO13]).

b) Bottom-up-Modularisierung: Die Bottom-up-Modularisierung beginnt mit detailliert beschriebenen Einzelteilen oder Modulen, die schrittweise zu einer Gesamtstruktur zusammengesetzt werden (siehe [Kuds13]).

c) Kombination Top-down und Bottom-up: Der Top-down-Ansatz dient dazu, einen Überblick über das Gesamtsystem zu gewinnen und Bereiche zu erkennen, die in Module überführt werden können. Darauf aufbauend wird die Bottom-up-Methode verwendet, um die identifizierten Bauteile im Detail zu analysieren und konkrete technische Lösungen zu entwickeln.

d) Modularisierungsebene: Die Modularisierung kann auf unterschiedlichen Ebenen hinsichtlich des Modulumfangs erfolgen (siehe [ThNU20]). Für eine Weiter- und Wiederverwendung ist die Segmentierung auf Bauteilebene besonders gut geeignet, da Bauteilsegmente in ausreichender Anzahl verfügbar sind. Zudem sind sie hinsichtlich Größe und Gewicht optimal für Demontage, Transport, Umschlag, Lagerung, Aufbereitung und Wiedermontage geeignet.

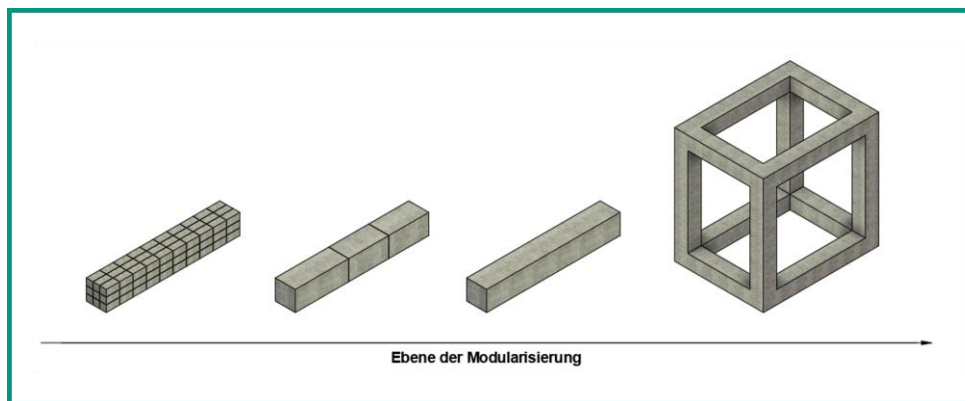
e) Computergestützte Methoden und Softwarewerkzeuge, z. B.:

- Model Based Systems Engineering (MBSE) (siehe [Burs16])
- Product Variant Master (PVM) und Konfigurationssysteme (siehe [KHTO13])
- BIM-/CAD-Software und Bauteilbibliotheken (siehe z. B. [KBLE24])
- Optimierungsalgorithmen (siehe z. B. [RFSM24])

4.2.3 Maßsystematik

Für ein Baukastensystem ist die Entwicklung einer einheitlichen Maßsystematik abhängig vom Modultyp erforderlich. Dies bildet die Grundlage für eine effiziente Dekonstruktion, indem eine möglichst breite Wiederverwendbarkeit der Bestandsbauteile erreicht wird und aufwendige zusätzliche Bearbeitungen vermieden werden. Im Regelfall können so z. B. großflächiges Nachschneiden oder additive Ergänzungen vermieden werden.

Eine Maßsystematik führt zu einer Segmentierung der Tragstruktur. Dabei kann eine Segmentierung auf Tragwerks-, Bauteilmodul- und Komponentenebene geschehen (siehe Anhang A1 4-1).



Anhang A1 4-1: Segmentierungsebenen eines Tragwerkes

Bei der Entwicklung der Maßsystematik sind die folgenden Anforderungen zu berücksichtigen:

- Es soll ein hoher Standardisierungsgrad (geringe interne Vielfalt) bei gleichzeitig vielen Tragwerksausprägungen (hohe externe Vielfalt) ermöglicht werden
- Sinnvolle Geschosshöhen sollten realisierbar sein (Raumhöhen sind unterschiedlich definiert und finden sich in der jeweiligen Landesbauordnung)
- Es sind Limitationen durch Abmessungen und Gewicht infolge des Entnahme-, Transport-, Aufbereitungs- und Lagerungsprozesses zu berücksichtigen
- Es sind aus Tragfähigkeits-, Korrosions- und Brandschutzaspekten sinnvolle, dem Kraftfluss angepasste Fugenpositionen zu bestimmen
- Berücksichtigung der angedachten Verbindungstechniken
- Es ist eine multifunktionale Verwendung der Bauteile zu gewährleisten
- Es sollte eine kommunale Verwendung der Bauteile durch Kompatibilität mit den bereits bestehenden Baukästen möglich sein

Beispiel einer Maßsystematik

Das Ziel war, mit möglichst wenigen unterschiedlichen Maßen einen hohen Standardisierungsgrad zu erreichen. Ein kleines Grundraster wurde dabei bevorzugt, um Dekonstruktion, Planung und Transport zu erleichtern. Dabei wurden bekannte Limitationen aus dem Fertigteilbau (z. B. maximales Transportgewicht) berücksichtigt. Zur Einhaltung der Mindestanforderungen für Raumhöhen (z. B. 2,3 m in Baden-Württemberg [Land]) wurde eine maximale Modullänge von 3,0 m gewählt. Hiermit können Verluste der effektiven Raumhöhe, beispielsweise durch Boden- und Deckenaufbau, kompensiert werden. Die gewählte Maßsegmentierung für alle Modullängen beträgt 0,75 m, 1,5 m und 3,0 m. Diese erlaubt flexible Fugenanordnungen und vermeidet Biegefugen in Rahmenkonstruktionen. Die einheitliche Maßsystematik ermöglicht eine modulübergreifende Nutzung der Bauteile. Für die Dekonstruktionsplanung sollten die Maße etwas vergrößert werden (Toleranzen), um Bearbeitungsspielraum zu schaffen. Eine projektspezifische Prüfung auf Maximalmaße und Gewicht ist erforderlich.

4.2.4 Standardisierte lösbare Verbindungstechniken

Für alle Bauteile sollten im Sinne der Kreislaufwirtschaft lösbare Verbindungen eingeplant werden, die eine erneute einfache Dekonstruktion und mehrere potenzielle Nutzungszyklen ermöglichen. Zudem sollten die Verbindungen weitgehend standardisiert werden. Grundsätzlich sind die folgenden Verbindungsprinzipien anwendbar:

- Quasi-lösbare monolithische Verbindungen (monolithische Verbindung mit vorgeplanter Schnittstelle für eine Dekonstruktion)
- Klemmtechniken
- Stahlbaubasierte Kraftübertragungsprinzipien, z. B. Stahlanschlüsse mit Schraubverbindungen (siehe [StSt24] und [KBLE24])
- Verbundlose Vorspanntechniken (siehe [StSt24])
- Hybride Verbindungen (siehe [StSt24])

Es lassen sich zwei verschiedene Arten von Schnittstellen unterscheiden. Einerseits gibt es die gestoßenen, wiedergewonnenen Bauteilmodule (Bauteilstöße) und andererseits den Stoß zwischen Bauteil- und den Knotenmodulen (Endbereich). Darüber hinaus ist die Ausbildung und Konstruktion der Knotenmodule selbst notwendig. Bei der Gestaltung dieser Knoten und Schnittstellen sind die folgenden Anforderungen zu beachten, insbesondere unter Berücksichtigung der Gestaltung zur Wiederverwendung.

- Standardisierung
 - Bemessungs- und Konstruktionsweise
 - Flexible Anpassungsfähigkeit bei gleichzeitiger hoher Standardisierung z. B. geometrische Anforderungen verschiedener rückgebauter Bauteile
 - Skalierbarkeit für unterschiedliche Größenabstufungen
 - Berücksichtigung von Maßstabeffekten

- Krafteinleitungsbereich
 - Belastungsinteraktionen in den Schnittstellen und Tragfähigkeit
 - Endverankerung der Bewehrung (ggf. geschnitten)
 - Position im Bauteil
 - Schnittstellenaufbereitung
- Anforderungen für eine zirkuläre De- und Montage
 - Lösbare Verbindungstechnik
 - Einfache, schnelle und schadensfreie Montage und Demontage
 - Ablaufplanung
 - Rückbauzustände mit minimalen Stützkonstruktionen
 - Maximalabmessungen und -gewicht der Module
 - Zugänglichkeit im Baukastensystem
 - Einbautoleranzen
- Fertigungsanforderungen, z. B. Fertigungszeit
- Bauphysik, Brandschutz und Dauerhaftigkeit
- Emissions- und Ressourcenverbrauch

4.2.5 Baukastenspezifische Bewertungsmethoden

Mithilfe baukastenspezifischer Bewertungsmethoden soll die Bewertung der Integration weiter- oder wiederverwendbarer Bauteile sowie konkrete Planungs- und Ausführungsleistungen ermöglicht werden. Baukastenspezifische Bewertungsmethoden sollten die folgenden Elemente beinhalten:

- Anforderungsdefinitionen für eine Integrationsprüfung
- Spezielle Prüfmethoden (optional)
- Bemessungsmethoden (Bemessungstabellen, Konstruktionsanweisungen etc.)
- Aufbereitungsmethoden
- Qualitätskontrolle (z. B. Toleranzen)
- Zirkuläre De- und Montagekonzepte
- Überwachungsmethoden in der Nutzung (optional)

5 Schritt 4: Dekonstruktionsstrategie zur Modularisierung des Rückbauvorhabens

Die Ergebnisse der Erstklassifizierung in Abhängigkeit der Bauteilbeschaffenheit (Kapitel 3) sowie die Anforderungen des gewählten Baukastensystems (Kapitel 4) werden in diesem Prozessabschnitt verknüpft und in eine Dekonstruktionsstrategie überführt, die eine Modularisierung des Bestandsgebäudes oder einer definierten Teilstruktur ermöglicht. In diesem Prozessabschnitt stehen vor allem die folgenden Fragestellungen im Vordergrund:

- Welche statischen Rückbauzustände sind zu berücksichtigen, um eine sichere Entnahme zu gewährleisten?
- Welche Entnahmetechniken sind unter Berücksichtigung des Bauteilzustands und der Gegebenheiten auf der Baustelle anzuwenden?
- Welche technischen, logistischen und sicherheitsrelevanten Anforderungen ergeben sich an die Lagerung, Direktmaßnahmen an Bauteilen und die Qualitätssicherung während der Ausführung?

Das Ergebnis dieses Schritts ist die praktische Umsetzung der digitalen Dekonstruktionsanweisungen. Hierdurch stehen die rückgebauten Bauteile für die individuellen Aufbereitungsmaßnahmen bereit.

5.1 Planung der Dekonstruktionsstrategie

Die Planung der Dekonstruktionsstrategie umfasst die folgenden Punkte, die voneinander abhängig sind und teilweise gleichzeitig geplant werden müssen.

- Erstellung von Rückbau- und Schnittplänen am lokalen digitalen Zwilling
- Statische Berechnung der systematischen Entnahme im Rückbauzustand
- Auswahl geeigneter Entnahmetechniken
- Schadenspräventive Ablauf- und Logistikplanung für die Dekonstruktion
- Digitale Dekonstruktionsanweisungen

5.1.1 Rückbau- und Schnittpläne

Die Erstellung der Rückbau- und Schnittpläne am lokalen digitalen Zwilling des Gebäudes erfolgt auf Basis der Ergebnisse der Klassifizierungen aus der Bestandsanalyse (Stufe 1) sowie der Modularisierung (Stufe 2). Die damit verbundene Aussortierung ungeeigneter Bauteile ist in der Rückbauplanung entsprechend zu berücksichtigen. Gegebenenfalls lassen sich auch ausgesonderte Bauteile mithilfe konventioneller Methoden gesammelt zurückbauen, um Zeit und Kosten zu sparen. Der erstellte digitale Zwilling des Tragwerks kann systematisch zerlegt und die Bauteile in eine digitale Bibliothek

aufgenommen werden. Das hat den Vorteil, dass die zur Wiederverwendung bestimmten Bauteile direkt digital vorliegen und Informationen aus dem Rückbau enthalten. Hierbei sind die folgenden Punkte zu beachten:

- Erstellung von 3D-Modellen mit äußeren Abmessungen und Bewehrungsinformationen
- Die Bibliothek sollte modular analog zur Baukastenstruktur aufgebaut sein
- Nutzung von Informationen aus den Bauteilpässen nach Kapitel 3.4
- Einpflegen weiterer Informationen

Es sind auch Aspekte der Dekonstruktionsplanung selbst zu beachten, wie die Anforderungen an die Abbruchstatik, die Entnahmetechnik und die Logistik. Eine Abstimmung mit dem ausführenden Abbruchunternehmen sollte parallel erfolgen. Bei der Auswahl der Position für eine Demontagetechnik (z. B. einen Schnitt durch Sägen) sind folgende Anforderungen relevant:

- Technische Machbarkeit
 - Standsicherheit angrenzender Bauteile und des gesamten Gebäudes
 - Zugänglichkeit und Platz für entsprechende Entnahmetechnik
 - Toleranzen für Nachbearbeitungen und Verschnitt
- Wiederverwendbarkeit
 - Vorselektion unzureichender Bauteile (Stufe 1)
 - Anforderungen aus der Integration in das Baukastensystem und der Maßsystematik (Stufe 2)
- Bauteilart und -anschluss sowie Bewehrungskonstruktion
 - Für den Rückbau von Fertigteilen siehe [Vull24]
 - Für den Rückbau von monolithischen Anschlüssen siehe Kapitel 4.1.2
- Zeitliche und ökonomische Aspekte
 - Stark bewehrte Stellen
 - Montageaufwand der Maschine
 - Aufwand für Lagesicherung und Hebeteknik

In Abhängigkeit der konkreten Rückbauplanung sind, sofern die Aspekte der Dekonstruktion (siehe oben) dies erfordern, ggf. weitere Selektionen (Stufe 3: Klassifizierung auf Grundlage der Dekonstruktion) vorzunehmen.

Des Weiteren ist die Planung eines externen Prüfprogramms in Abhängigkeit vom gewählten Baukastensystem und dem Planungsvorhaben zu berücksichtigen. Die zusätzlichen Prüfungen bauen auf den bereits in Kapitel 3 durchgeführten Untersuchungen auf. Dabei sind z. B. ganze Bauteilprüfungen in die Dekonstruktionsplanung einzubeziehen. Prüfungen können beispielsweise gezielt auf Sonderbauteile ausgerichtet werden, deren Wiederverwendung angestrebt wird. Je nach Art des Rückbauvorhabens (selektiv oder integral) kann ein umfassendes Prüfprogramm erforderlich sein. Dabei sind Menge, Art und Umfang der Prüfungen an das Vorhaben anzupassen. So kann bei einer großen Auswahl an verfügbaren Bauteilen gezielt eine Auswahl getroffen werden, um geeignete Prüfstellen und Bauteile für die Prüfungen zu bestimmen. Stellen zur Probenentnahme

sind gezielt zu separieren. Dabei sind insbesondere Betonierabschnitte zu berücksichtigen, um Materialunterschiede zu erfassen und übertragbare Daten für vergleichbare Bauteile sicherzustellen. Gegebenenfalls können auch bereits ausselektierte Bauteile herangezogen werden die konventionell verwertet werden sollen. Die Rückbaupläne sollten die folgenden Inhalte umfassen:

- Ausgewählte Entnahmetechnik
- Positionen für die Entnahmetechnik
- Schnitttiefe und -länge sowie ggf. Bohrtiefe und -durchmesser
- Ablauf
- Detailzeichnungen
- Relevante Zusatzinformationen
- Orte und Abfolge zur Errichtung temporärer Stützkonstruktionen
- Ort und Art von Anschlagpunkten für Transportanker
- Ausführliche Schnittpläne zum gesamten Vorhaben

5.1.2 Statische Berechnung der Rückbauzustände

Die Gesamtstandsicherheit des Tragwerks und die Stabilität einzelner Tragwerksbereiche muss in allen Rückbauzuständen gewährleistet sein. Deshalb wird bei der Dekonstruktionsplanung die Erstellung einer Abbruchstatik durch konkrete Tragwerksplanung empfohlen, insbesondere bei integralen Rückbauvorhaben. Bei der selektiven Entnahme einzelner Bauteile kann ggf. auf eine Abbruchstatik verzichtet werden. Weiterführende Informationen können [Deut17], [Vdie21] oder [Vull24] entnommen werden. Die Abbruchstatiken sollen mithilfe der digitalen Zwillinge und der Ergebnisse der Tragstrukturanalyse (Kapitel 3.3) durchgeführt werden. Die Grundlage für die Berechnungen sind die erstellten Schnittpläne und Rückbauabläufe. Im Rahmen der statischen Entnahmeplanung sollten folgende Anforderungen beachtet werden:

- Veränderungen von statischen Systemen und Lagerungsbedingungen während des Dekonstruktionsprozesses
- Unter Last stehende Bauteile (z. B. durch Eigengewicht, Zwang etc.)
- Berücksichtigung der Tragwerksaussteifung in den Rückbauzuständen
- Anordnung von temporären Stützkonstruktionen (sollte nach Möglichkeit auf ein Minimum begrenzt werden)
- Beachtung von Lastumlagerungen und Krieeffekten auf Grundlage von Kapitel 3.3

5.1.3 Entnahmetechniken

Zur Gewinnung von Bauteilen für eine Wiederverwendung müssen diese durch Lösen der monolithischen Verbindungen mit anschließender Entnahme demontiert werden. Durch die Auswahl einer geeigneten Entnahmetechnik sollen prozessbedingte Schädigungen möglichst verhindert werden. Typischer Weise kommen nach [Dine22] (i. d. R. handgeführt) Techniken, wie Kernbohrung, Stemmarbeiten, Boden- und Wandsägen

oder Seilsägen aber auch Abbruchroboter (siehe [Vull24]) zum Einsatz. Die verschiedenen Abbruchtechniken sind in der DIN 18007 [Dine22] in Verfahren unterteilt die in Anhang A1 5-1 dargestellt sind.

Verfahren	Technik	Erklärung	Nutzungsbeispiel
Mechanische Verfahren	Einschlagen	Manuelle Ausführung mit Vorschlaghammer oder seilgeführter Kugel	Lösen und Zerkleinern von Beton und Mauerwerk
	Reißen	Zerreißen von Bauteilen mit Tieföffelbagger	Aufbruch und Zerkleinern von Fundamenten
	Stemmen	Manuelle oder maschinelle Führung des Stemmhammers möglich	Erstellen von Öffnungen und Durchbrüchen
	Abgreifen	Abgreifen von Bauteilen mit Greifgeräten	Lösen, Trennen und Sortieren von Mauerwerk oder Holz
Abtragen	Fräßen	Entfernung von Schichten durch Fräsmeißel	Abtragen horizontaler Flächen aus Beton
Bohren	Kernbohren	Nass oder trocken ausgeführte Hohlbohrungen	Herstellen von Öffnungen
Sägen	Seilsägen	lageunabhängiges Trennen von Beton, Mauerwerk und Stahl mit einer Seilsäge	Abtrennen von Bauteilen mit großem Volumen
	Wandsägen	schienen- oder baggergeführtes Diamantschneideblatt	Herstellen von Öffnungen mit hoher Genauigkeit
Spalten	Spaltung durch Pressen	Einleitung von Druckkräften durch hydraulisch oder mechanisch angetriebene Presse	Zerlegung von Bauteilen aus schwach bewehrtem Beton ohne große Erschütterung
Sprengen	Niederbringen durch Sprengen	Sprengung ausgewählter Bauteile für gezielten Einsturz des Gebäudes	Niederbringung von Bauwerken, bei welchen Zwischenzustände nicht sicher sind
Thermische Trennverfahren	Brennschneiden	Auftrennung von Bauteilen durch manuell oder maschinell geführten Schneidbrenner	Zerlegung von Stahlbauteilen
Hydrodynamische Verfahren	Hochdruckwasserschneiden	Zerlegung von Bauteilen mit einem Hochdruckwasserstrahl	Zerlegung Stahl und Stahlbetonkonstruktionen ohne große Erschütterungen

Anhang A1 5-1: Abbruchverfahren und -techniken in Anlehnung an DIN18007 [Dine22]

Die Auswahl kann nur bedingt vorgeplant werden und muss im individuellen Fall auf Grundlage der gegebenen Rahmenbedingungen getroffen werden. Im Folgenden sind verschiedene Rahmenbedingungen aufgelistet, die berücksichtigt werden sollten:

- Wasserzufuhr zur Kühlung
- Zugänglichkeit
- Notwendige Präzision und Anforderungen an die Schnittkante und -flächen
- Zeit und Kosten
- Notwendige Schnitt- oder Bohrtiefen
- Prozessparameter für die Entnahmetechnik

Bei der Wiedergewinnung von Stahlbetonbauteilen als Fertigteile sollten möglichst ebene Schnittflächen realisiert werden. Dabei sind die folgenden Aspekte zu beachten:

- Reduzierung von Inhomogenitäten und Schädigungen in der Schnittoberfläche, um kostenintensive Aufbereitungsmaßnahmen zu vermeiden
- Minimierung von Schäden in der Verbundzone des Endverankerungsbereichs
- Bewahrung der optischen Beschaffenheit
- Minimierung von Schiefstellungen

Aus diesen Gründen werden vor allem Sägen (Seilsägen und Wandsägen) zur Dekonstruktion empfohlen. Eine Optimierung der jeweiligen Prozessparameter (z. B. Vorschub) kann zu einem schadensfreieren und wirtschaftlicheren Entnahmeprozess führen. Anhang A1 5-2 zeigt ausgewählte Entnahmetechniken. Einen umfassenden Überblick und Einschätzung zu verschiedenen Entnahmetechniken kann [Mett95] entnommen werden.



a) Sägen



b) Kernbohren



c) Stemmen

Anhang A1 5-2: Ausgewählte Entnahmetechniken für monolithische Verbindungen [Fotos Stöhr]

5.1.4 Ablauf- und Logistikplanung

Das Ziel der Dekonstruktion ist eine schadenspräventive Ablauf- und Logistikplanung, bei der prozessbedingte Schädigungen vermieden werden sollen. Dabei sind neben dem Lösen auch das Sichern, Anheben, Transportieren und Lagern der Bauteile umfassend zu berücksichtigen. Für das sichere Anheben sollten Transporthaken möglichst vor der Entnahme vorgesehen und bereits vorhandene (z. B. bei Fertigteilen) genutzt werden. Transportanker sind so anzuordnen, dass eine schonende Entnahme und ein sicheres Abladen gewährleistet sind, ohne die Tragfähigkeit oder Ästhetik der Bauteile zu beeinträchtigen. Die Transportanker sollten idealerweise so platziert werden, dass sie auch zur Befestigung der Entnahmetechnik genutzt werden können. Die Stützenkonstruktionen sind entsprechend der geplanten Abläufe anzuordnen (siehe Anhang A-1 5-3).



a) Temporäre Stützkonstruktion



b) Nutzung vorhandener Transportanker



c) Nachträgliche Anbringung von Transportankern

Anhang A1 5-3: Sichern und Heben bei der Entnahme [Fotos Stöhr]

Das Heben, Transportieren und Ablegen schwerer Bauteile ist grundsätzlich für jede relevante Bauteilart im Rahmen der Dekonstruktion gesondert zu planen. Für das Heben kommen baustellenspezifisch Maschinen wie Kräne, Radlader, Gabelstapler oder ähnliche Geräte zum Einsatz. Die Auswahl der Sicherungs- und Hebetechnik ist auf Grundlage gebäude- und bauteilspezifischer Kriterien zu erfolgen, darunter:

- Logistik- und Ablaufplanung
- Arbeitssicherheitskonzept
- Größe des Tragwerks
- Platzbedarf und Zugänglichkeit
- Maximalgewicht der Bauteile
- Abbruchstatik
- Kosten

In Anhang A1 5-4 sind beispielhafte Entnahmen dargestellt.



a) Bei guter Zugänglichkeit



b) Bei schlechter Zugänglichkeit

Anhang A1 5-4: Beispielhafte Entnahmen [Fotos Stöhr]

Die freien Transportwege sowie die Ladesicherungen für die Be- und Entladung müssen im Voraus geplant werden. Dabei ist auch die Verfügbarkeit geeigneter Lagerkapazitäten zu prüfen. Das selektive Heraussuchen wiederverwendbarer Bauteile aus unsortierten

Materialhaufen sollte vermieden werden. Daher ist eine Zwischenlagerung (siehe Anhang A1 5-5) der entnommenen Bauteile bis zur Weiterverarbeitung auf der Baustelle auszuweisen. Der Zwischenlagerungsort ist von Bauschutt (z. B. Verschnitt) sowie von Bauteilen, die konventionell entsorgt werden müssen, zu trennen. Die konventionelle Entsorgung ist entsprechend mit einzuplanen (z. B. Schuttcontainer).



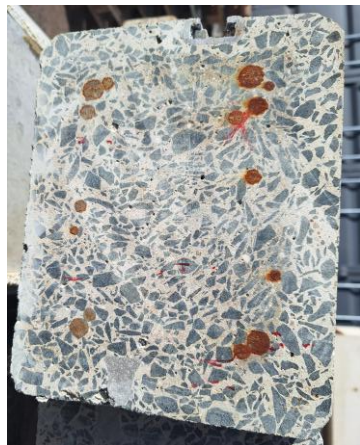
a) Zwischenlagerung



b) Abschnittweiser Transport

Anhang A1 5-5: Logistik im Rückbauprozess [Fotos Stöhr]

Die entnommenen Bauteile sind eindeutig zu kennzeichnen, um ihre Rückverfolgbarkeit sicherzustellen. Zudem sind nach der Entnahme geeignete Schutzmaßnahmen durchzuführen. Dazu gehört insbesondere die direkte Nachbehandlung der Schnittstellen. Ein sofortiger Korrosionsschutz der freigelegten Bewehrung ist beispielsweise durch Hydrophobierungen zu erreichen. In Anhang A1 5-6 ist der Vergleich zwischen Schnittflächen mit und ohne Korrosionsschutz dargestellt.



a) Ohne Korrosionsschutz



b) Mit Korrosionsschutz

Anhang A1 5-6: Vergleich zwischen Schnittflächen mit und ohne Korrosionsschutz [Fotos Stöhr]

Für die gesamte Dekonstruktion sind Ablaufpläne (beispielsweise in Form von Netzplänen) sowie detaillierte Logistikanweisungen zu erstellen. Die Arbeitssicherheit ist gemäß den geltenden Vorschriften für Abbrucharbeiten zu gewährleisten. Zudem ist die Baustelleneinrichtung, beispielsweise Abspernungen, entsprechend zu planen. Der Schutz der

Bauteile während des laufenden Betriebs ist sicherzustellen, insbesondere bei einer Aufbereitung der Bauteile zur Wiederverwendung vor Ort (on site-Fertigung). Daher ist die Wahl der Fertigungsstätte (vor Ort oder in einem Werk) und die Rückbauplanung in Abhängigkeit von den Vorgaben des Baukastensystems zusammen zu planen.

5.1.5 Digitale Dekonstruktionsanweisungen

Als Abschluss der Dekonstruktionsplanung werden die aufgestellten Maßnahmen in digitalen Anweisungen zusammengeführt. Beim Zusammenführen der einzelnen Fachplanungen können durch die ganzheitliche Betrachtung abschließend Unstimmigkeiten identifiziert und Verbesserungen vorgenommen werden (siehe auch [Vull24]). Die digitalen Dekonstruktionsanweisungen sollten folgendes enthalten:

- 1) Schnittpläne mit Entnahmetechniken
 - Schnittpläne für die wiederzugewinnenden Bauteile
 - Schnittpläne für Prüfkörper
 - Abschnittspläne für konventionellen Abbruch und Entsorgungspläne
 - Anordnungen von Transportankern
 - Prozessparameter für die Entnahmetechniken
- 2) Direktmaßnahmen nach der Entnahme
- 3) Dekonstruktionsplanung (vgl. Kapitel 5.1.4)
 - Ablaufplan der Dekonstruktion
 - Transportanweisungen
 - Lagerungsanweisungen
 - Baustelleneinrichtung
 - (digitale) Protokolle

5.2 Ausführung

Die Ausführung des Dekonstruktionsprozesses erfolgt durch ein spezialisiertes Abbruchunternehmen unter Berücksichtigung eines strukturierten Baustellen- und Rückbaumanagements. Eine kontinuierliche Qualitätskontrolle, Baustellenüberwachung sowie die digitale Erfassung von Planungsabweichungen sind hierfür essenziell.

5.2.1 Qualitätskontrolle und Baustellenüberwachung

Die Qualitätskontrolle und Baustellenüberwachung sollte in Abstimmung mit der Sicherheits- und Gesundheitsschutzkoordination geführt werden. Dabei sind die Bauteile gemäß der Dekonstruktionsanweisung schonend herauszuheben, fachgerecht abzulegen und sachgemäß zwischenzulagern, bis diese abtransportiert oder weiterverarbeitet werden. Die Ausführungsqualität ist in allen Schritten kontinuierlich zu überwachen.

5.2.2 Planungsabweichungen

Reale Gegebenheiten weichen in der Praxis häufig von der ursprünglichen Planung ab. Solche Änderungen sollten frühzeitig erkannt und direkt digital erfasst sowie in die weitere Planung integriert werden. Die erfassten Planungsabweichungen z. B. Schädigungen bei der Entnahme sind in den digitalen Zwilling zu überführen und auszuwerten. Die Evaluation dieser Ergebnisse ermöglicht Lerneffekte für zukünftige Projekte. Dabei ist zu prüfen, ob die Abweichungen auf Fehler in der Planung oder Ausführung zurückzuführen sind und wie solche künftig vermieden werden können.

6 Schritt 5: Wiederverwendungsprozess-optimierung für die rückgebauten Stahlbetonmodule

In Prozessschritt fünf wird durch eine systematische und iterative Bemessung sowie eine ökologische und ökonomische Bewertung eine optimierte Weiter- oder Wiederverwendung für jedes aus einem Bestandsgebäude rückgebaute oder rückgeführte (lösbare Verbindung) Bauteil angestrebt. In einem reinen Rückbauprojekt ohne konkrete Optimierungsanforderungen sind notwendige Aufbereitungsoptionen so zu wählen, dass eine hohe Flexibilität gewährleistet ist. Dabei sind die folgenden Fragestellungen relevant:

- Welcher Bauteilzustand (Modul und Schnittstellen) liegt nach der Entnahme vor?
- Welche Tragfähigkeiten (Modul und Schnittstellen) können in unterschiedlichen Nutzungen unter Berücksichtigung von Verstärkungsmaßnahmen erreicht werden?
- Welche Klassifizierung wird dem Bauteil zugeordnet unter Berücksichtigung der gewählten Nutzungsszenarien?

Als Ergebnis der Optimierung des Wiederverwendungsprozesses liegen für das einzelne entnommene Modul verschiedene Aufbereitungsstrategien vor. In Abhängigkeit der Zielgrößen (z. B. Kosten) führt dies zu einer Klassifizierung in ein Kaskadensystem, wodurch die konkreten Wiederverwendungsmöglichkeiten (Nutzungen im Baukasten) und Aufbereitungsmaßnahmen sowie Verstärkungen, festgelegt werden.

6.1 Erweiterte Eigenschaftserfassung

Die erweiterte Eigenschaftserfassung für die wiedergewonnenen, geschnittenen Stahlbetonmodule kann entweder direkt auf der Baustelle erfolgen, ergänzt durch gegebenenfalls notwendige externe Prüfungen, oder alternativ nach dem Transport in einer speziellen Fertigungsstätte durchgeführt werden. Die Erfassung umfasst dabei:

- Baukastenspezifisches Prüfprogramm und Bauteilprüfungen
- Beschaffenheit der Bauteile nach der Entnahme sowie ggf. dem Transport
- Beschaffenheit der Schnittstellen

6.1.1 Baukastenspezifisches Prüfprogramm

In diesem Prozessschritt werden die Material- und konstruktiven Bauteilprüfungen gemäß dem baukastenspezifischen Prüfprogramm durchgeführt, das für die Bemessung und Integration der Bauteile erforderlich ist. Abhängig vom Rückbauvorhaben können darüber hinaus weitere spezifische Prüfungen wie etwa umfassende Bauteilprüfungen notwendig werden (vgl. Kapitel 5.1.1). Auch diese können in diesem Schritt durchgeführt werden.

6.1.2 Bauteilbeschaffenheit

In diesem Schritt werden potenzielle Prozessschädigungen, die beispielsweise während des Transports oder der Lagerung entstanden sind, erfasst und in den Bauteilpass der Datenbank übertragen. Diese Informationen bilden die Grundlage für die weitere Aufbereitungsstrategie. Die Erfassung soll für alle Bauteile individuell am Einzelbauteil erfolgen. Die Prüftiefe richtet sich nach dem Umfang der in Kapitel 3 bereits durchgeführten Prüfungen. Fehlende Untersuchungen sind zu ergänzen.

Zur Erfassung der Prozessschädigungen sind, analog zu Kapitel 3.1.5, geeignete Methoden wie Sichtprüfungen oder optische Oberflächenscans auszuwählen. Dabei sind Transportschäden, prozessbedingte Schädigungen aus der Entnahme, Rissbildungen sowie relevante Planungsabweichungen (z. B. unvorhergesehene Einbauteile und Öffnungen) gezielt zu dokumentieren. Die ästhetische Bewertung der Oberfläche ist erneut durchzuführen. Ebenso sind aufgrund von Zuschnittfehlern erneute geometrische Prüfungen (z. B. Modulnängen) erforderlich. Des Weiteren können die Daten im Bauteilpass, wie die Druckfestigkeit, mit zerstörungsfreien Methoden überprüft werden.

Anhang A1 6-1 zeigt beispielsweise ein entnommenes Bauteil in der Sichtprüfung.



Anhang A1 6-1: Entnommenes Bauteil in der Sichtprüfung [Foto Stöhr]

6.1.3 Schnittstellenbeschaffenheit

In gleicher Weise sind die Schnittstellen zu überprüfen. Ihre Beschaffenheit ist wichtig für die lösbaren Anschlüsse sowie für die Kraftübertragung und die Aufbereitung der Kontaktfläche. Bei den Schnittflächen sollten die folgenden Aspekte überprüft werden:

- Schädigungen, z. B. Ausbrüche
- Einschlüsse, z. B. Einbauteile
- Oberflächenbeschaffenheit, z. B. Oberflächenrauheit
- Schiefe des Zuschnitts
- Rissbildung
- Bewehrung
 - Art: Bügel, Längseisen etc.
 - Anzahl, Durchmesser und Position

Die freigelegte Schnittstelle ermöglicht Aussagen über den lokalen Gefügezustand des Bauteils und gibt Rückschlüsse auf die Bewehrungskonstruktion. Dabei hängt der Zustand der Schnittstelle maßgeblich von der gewählten Entnahmemethode ab. Anhang A1 6-2 stellt die Schnittstellenbeschaffenheit in Abhängigkeit zweier Entnahmetechniken dar.



a) Schnittstelle durch Kernbohren



b) Schnittstelle durch Sägen

Anhang A1 6-2: Schnittstellen in Abhängigkeit zweier Entnahmetechniken [Fotos Stöhr]

6.2 Bemessung für die Nutzung im Baukastensystem

Die Tragfähigkeitsprognose und Bemessung für die Nutzung im Baukastensystem können parallel zur Dekonstruktion durchgeführt werden.

6.2.1 Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Durchzuführen sind Nachweise der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit. Dazu zählt insbesondere die rechnerische Ermittlung der (Rest-)Tragfähigkeit unter Berücksichtigung von Alterungseffekten sowie den ermittelten mechanischen Eigenschaften. Im Fall eines reinen Rückbauvorhabens sind lediglich vereinfachte, grundsätzliche Nachweise erforderlich, da keine spezifischen Nachnutzungsanforderungen herangezogen werden können.

Bei einem Neubauvorhaben hingegen sind verschiedene Nachweisvarianten in Abhängigkeit von möglichen Nutzungen im Baukastensystem (verschiedene Regionen, Nutzungskategorie etc.) sowie von der Bauteilbeschaffenheit zu berechnen. Die Nachweise sind nur für alle Bauteile mit einer positiven Bewertung (Stufe E1 oder E2) in den Bewertungsstufen 1 bis 3 durchzuführen.

6.2.2 Aufbereitungsmaßnahmen

Für die rückgebauten Bauteile sollen mögliche Verstärkungs-, Aufbereitungsmaßnahmen oder erforderliche Schadstoffsanierungen abgeleitet werden. Diese Ableitungen erfolgen für die verschiedenen Nutzungsszenarien gemäß Kapitel 6.2.1. Das Ziel besteht

darin, den Bauteilen eine möglichst vielseitige Wieder- und Weiterverwendung im modularen Baukastensystem zu ermöglichen. Dabei können unterschiedliche Verstärkungsmaßnahmen wie Vorspannung, additive Verstärkungen oder zusätzliche Segmentierungen in Betracht gezogen werden.

In der Regel können konventionelle Verstärkungsmaßnahmen, beispielsweise für die Biegezugzone, angeordnet und in gleicher Weise bemessen werden. Konkrete mögliche Maßnahmen sowie die Bemessung und konstruktive Ausbildung können beispielsweise [Finc24] entnommen werden. Dieser Schritt ist besonders relevant für Bauteile, die in der Vorbewertung der Stufe E2 (siehe Kapitel 3.4.2) zugeordnet wurden. Für jedes rückzubauende Bauteil sind unterschiedliche Verstärkungsvarianten mit den entsprechenden Nutzungsmöglichkeiten im Baukastensystem (siehe Kapitel 6.2.) zu ermitteln. Bei einem Rückbau ohne konkrete Nutzungsanforderungen ist dieser Schritt vorerst nicht durchzuführen.

6.2.3 Schnittstellenausbildung

Die Schnittstellenausbildung erfolgt standardisiert gemäß den Vorgaben des modularen Baukastensystems. Dabei ist die individuelle Beschaffenheit der Bauteile sowie deren spezifische Materialeigenschaften zu berücksichtigen.

6.3 Optimierung der Wiederverwendung

Die Optimierung der Wiederverwendung soll mithilfe ganzheitlicher Systembewertungen erfolgen.

- Lebenszyklusanalysen (LCA)
- Lebenszykluskostenanalysen (LCC)
- Ergebnisse der Bemessung nach Kapitel 6.1

6.3.1 Integrierte Lebenszyklusanalysen

Mithilfe von systematischen Lebenszykluskostenanalysen (LCC) und Lebenszyklusanalysen (LCA) sollen die in Kapitel 6.2 bestimmten Bemessungs- und Verstärkungsfälle hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Aspekte untersucht werden. Dabei soll die gesamte Prozesskette einschließlich weiterer Wiederverwendungsprozesse berücksichtigt werden. Hierdurch soll eine Bewertung der möglichen Aufbereitungs- und Verstärkungsmaßnahmen hinsichtlich der Nutzung im Baukastensystem sowie den zugehörigen Kosten und Emissionen (z. B. neuer Betoneinsatz) erfolgen.

6.3.2 Klassifizierung ins Kaskadensystem

Mithilfe der systematischen Bemessung sowie der ökologischen und ökonomischen Bewertung der Nutzungsszenarien mit zugehörigen Verstärkungsmaßnahmen soll eine optimierte Wiederverwendung identifiziert werden. Hierzu erfolgt ein Abgleich mit den in

Kapitel 2 definierten Projektzielen (z. B. Kosten oder CO₂-Emissionsgrenzen). Auf Grundlage dieses Vergleichs ist eine geeignete Ausführungsvariante auszuwählen. Dadurch wird dem rückgebauten Modul eine definierte Nutzung im Baukastensystem zugewiesen (Funktionsbindung). Dieser Prozess ist für jedes rückgebaute Modul aus einem Bestandsgebäude sowie zukünftig auch für rückgeführte (demontierte) Bauteile vorzusehen. Darauf aufbauend erfolgt unter Berücksichtigung der Integritätsbewertung, den Anforderungen des Baukastensystems sowie den definierten Verstärkungs- und Aufbereitungsmaßnahmen die Klassifizierung für den nächsten Lebenszyklus (Stufe 4: Klassifizierung für die Bauteildatenbank) in das nachfolgende Kaskadensystem.

- Erste Kaskade K1: (Mehrfach-)Weiter- oder Wiederverwendung als tragendes Bauteil im modularen Baukastensystem
 - K1-a: Mehrere funktionale Eigenschaften
 - K1-b: Eine funktionale Eigenschaft
 - K1-c: Weiterverwendung durch Umnutzung als Bauteil mit geringeren Anforderungen (eine funktionale Eigenschaft)
- Zweite Kaskade K2: Weiter- oder Wiederverwendung als tragendes Bauteil außerhalb des modularen Baukastensystems
 - K2: Beispielsweise durch monolithische Verbindungen
- Dritte Kaskade K3: Weiterverwendung durch Verwertungsprozesse oder Beseitigung
 - K3-a: Umnutzung als nichttragendes Bauteil
 - K3-b: Stoffliche Verwertung
 - K3-c: Beseitigung auf Deponie

In dieser Klassifizierung kann auch eine Verwertung als Ergebnis für rückgebaute Bauteile anfallen, wenn die notwendigen Verstärkungsmaßnahmen zur Instandsetzung nicht mit den Zielen des Vorhabens vereinbar sind.

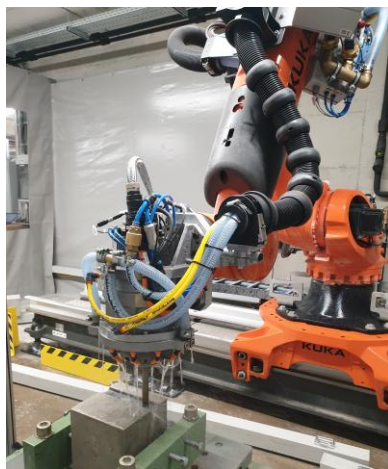
7 Schritt 6: Aufbereitungsstrategie und Datenbankintegration

Im sechsten Schritt werden für die einzelnen rückgebauten Module standardisierte Aufbereitungsstrategien gemäß dem Baukastensystem sowie der Optimierung nach Kapitel 6 abgeleitet und auf Bauteil- und Schnittstellenebene durchgeführt. Dabei stehen die folgenden Fragen im Vordergrund:

- Welche Aufbereitungsstrategien sind für die wiedergewonnenen Bauteilsegmente notwendig?
- Ist die Ausführungsqualität für eine Zulassung und Datenbankintegration ausreichend?

Als Ergebnis stehen aufbereitete Bauteilmodule für ein konkretes Neubauprojekt oder für zukünftige Nutzungen (ggf. sind weitere Aufbereitungen erforderlich) in einer physischen und digitalen Bauteildatenbank zur Verfügung.

In der Fertigungsart können die beiden Fälle dezentrale Aufbereitung (ggf. durch roboterbasierte Fertigung) und Aufbereitung vor Ort (on-site-Aufbereitung), die in der Regel manuell erfolgt, unterschieden werden (siehe Anhang A1 7-1).



a) Roboterbasierte Fertigung



b) Manuelle Fertigung

Anhang A1 7-1: Aufbereitungstechniken in Abhängigkeit des Produktionsstandortes [Fotos Stöhr]

7.1 Aufbereitungsanweisungen

In den Aufbereitungsanweisungen sind für das geschnittene Bauteilmodul sowie für die Schnittstellen Maßnahmen gemäß Kapitel 6.3 festzulegen.

7.1.1 Geschnittene Bauteilmodule

Um geschnittene Bauteile im modularen Baukastensystem wiederverwenden zu können, sind gezielte Aufbereitungs- und Instandsetzungsmaßnahmen erforderlich. Zunächst

müssen geeignete Fertigungstechniken sowie Prozessparameter definiert werden, die sowohl die Passgenauigkeitsanforderungen in Abhängigkeit der Anforderungen des Baukastens als auch die identifizierten Schädigungen berücksichtigen. Dabei sind hinsichtlich Kosten, Emissionen und Fertigungsqualität eine industrielle Fertigung mit Automatisierungsmöglichkeit oder eine manuelle Fertigung (i. d. R. vor Ort) auszuwählen. Hierbei müssen die folgenden Aspekte beachtet werden.

- Modulgeometrie
- Endverankerungsbereich
- Sonstige Verstärkungsmaßnahmen nach Kapitel 6.3 (z. B. Biegezugzone).
- Transportsicherungen
- Dauerhaftigkeit (Korrosionsschutz)
- Reinigung
- Oberflächenausbildung und -gestaltung

7.1.2 Schnittstellen

Für die Schnittstellenausbildung sind hohe Oberflächenqualitäten mit minimalen Schiefstellungen erforderlich. Schnittstellen sind standardisiert gemäß den Vorgaben des Baukastensystems zur sicheren Kraftübertragung auszubilden sowie ergänzend geeignete Verstärkungsmaßnahmen in Abhängigkeit der Oberflächenbeschaffenheit vorzusehen (vgl. [StSt24]). Dabei ist die Exposition aller Nutzungsfälle zu berücksichtigen und Maßnahmen zur Aufbereitung der freiliegenden Bewehrung anzuordnen.

7.2 Nachweis der Aufbereitungsqualität

7.2.1 Qualitätskontrolle und Nachbearbeitung

Das Ziel der Aufbereitung ist die Sicherstellung einer hohen Produktqualität. Die Beschaffenheit des gefertigten Bauteilmoduls muss den Anforderungen in Bezug auf Konformität, Passgenauigkeit und Oberflächeneigenschaften entsprechen. Diese Eigenschaften sind anhand vorgegebener Toleranzvorgaben zu überprüfen. Zur Qualitätskontrolle können geeignete Methoden wie Sichtprüfungen oder optische Scans eingesetzt werden. Bei Abweichungen sind Nachbearbeitungen anzuordnen.

7.2.2 Zertifizierung

Durch die Sicherstellung der Produktqualität kann eine Zertifizierung des rückgebauten Bauteils erfolgen. Dadurch wird eine Gewährleistung für die definierten Nutzungsbereiche im modularen Baukastensystem ermöglicht. Dieser Prozessschritt bildet die Grundlage für eine mögliche Zulassung sowie die reale Wiederverwendung des individuellen Bauteilmoduls.

7.3 Integration in die Datenbank

Die Bauteildatenbank besteht aus zwei zentralen Komponenten, einer physischen und einer digitalen Ebene. Alle Bauteile sind nach erfolgter Aufbereitung digital zu erfassen und vollständig in die Datenbank zu integrieren.

7.3.1 Digitale Bauteildatenbank

Die Digitalisierung erfolgt durch die Aktualisierung des digitalen Zwillings und dessen Speicherung in einer zentralen Bauteilbibliothek. Dabei werden sämtliche durchgeführte Maßnahmen sowie alle relevanten Informationen vollständig erfasst und dokumentiert. Dazu zählen unter anderem die Historie des Bauteils, Prüf- und Aufbereitungsschritte sowie die potenziellen Nutzungsmöglichkeiten im modularen Baukastensystem. Diese digitale Erfassung ermöglicht die strukturierte und katalogisierte Bereitstellung der Bauteildaten in einer zentralen Bauteildatenbank. Planern steht somit eine zugängliche Plattform für den Entwurf mit wiedergewonnenen Bauteilen zur Verfügung.

7.3.2 Physische Bauteildatenbank

Die physische Ebene bezieht sich auf den tatsächlichen Zustand und den Aufenthaltsort der rückgebauten Bauteile. Dabei ist zu beachten, dass Lagerstätten räumlich auf unterschiedliche Standorte verteilt sein können. Um Transportwege zu minimieren, empfiehlt sich nach Möglichkeit eine direkte Lagerung am Fertigungsort oder in dessen unmittelbarer Nähe. Im Sinne einer schadenspräventiven Logistikplanung, analog zu Kapitel 5.1.4, sind insbesondere folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Lagerungsbedingungen in der Inaktivphase: Diese sind nur erforderlich, wenn Bauteile nicht unmittelbar aufbereitet und wieder eingesetzt werden. Die Anforderungen dazu sind ebenfalls in Kapitel 5.1.4 zu finden.
- Transportvorbereitung und -sicherung: Diese sind auch im Rahmen der Inaktivphase oder bei einem Standortwechsel zu gewährleisten.

Zusätzlich sollte jedes Bauteil durch eine dauerhafte Prägung oder physische Kennzeichnung eindeutig identifizierbar sein. Diese Markierung muss alle wesentlichen Informationen beinhalten und dauerhaft erhalten bleiben, um die Nachverfolgbarkeit und Zuordnung zum digitalen Zwilling sicherzustellen. Ein Beispiel zur Lagerung in der Inaktivphase findet sich in Anhang A1 7-2.



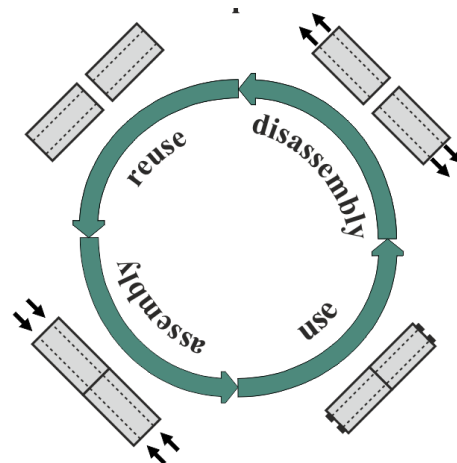
Anhang A1 7-2: Lagerung in der Inaktivphase [Fotos Stöhr]

8 Schritt 7: Zirkuläre Nutzungsphasen in Neubauvorhaben

Im siebten Schritt werden mithilfe der Bauteildatenbank und des Baukastensystems Entwurfsvarianten für das Neubauvorhaben geplant. Diese werden in Abhängigkeit der in Kapitel 2 definierten Ziele sowie der Realisierbarkeit in eine Planungs- und Ausführungsphase überführt. Dabei werden die folgenden Aspekte berücksichtigt:

- Welche Entwurfsvarianten sind unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit der Bauteile realisierbar und welcher Neubauteileinsatz wäre notwendig?
- Wie sieht die konkrete Ausführungsplanung aus?
- Wie kann der Prozess der zirkulären Weiternutzung im Falle der zukünftigen Dekonstruktion vorbereitet werden?

Nach dem Ende der Nutzungs- und Lebensdauer müssen die demontierten Bauteile für jede neue Nutzungsphase die Prozessschritte fünf bis sieben unter Berücksichtigung von Schritt eins und drei wiederholen, um neu eingesetzt zu werden. Anhang A1 8-1 zeigt schematisch die angestrebte Nutzung der wiedergewonnenen Bauteile.



Anhang A1 8-1: Nutzungskreislauf für wiedergewonnene modulare Fertigteile nach [StSt24]

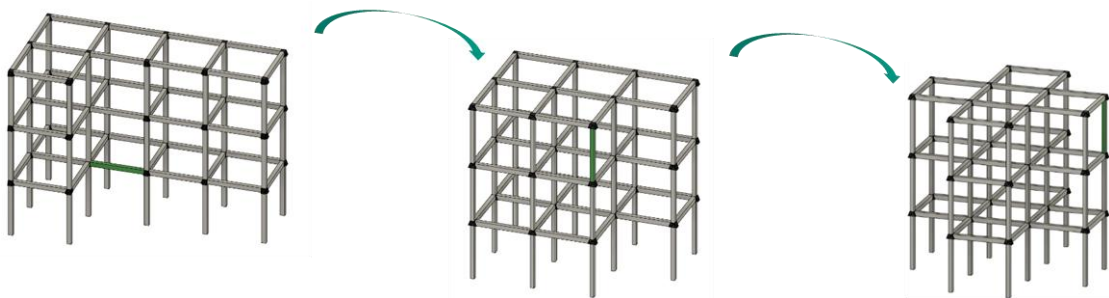
8.1 Entwurfsvarianten

Die Entwicklung architektonischer Entwurfsvarianten für das Planungsvorhaben erfolgt unter Anwendung des modularen Baukastensystems.

8.1.1 Tragwerksstrukturanordnung

Das modulare Baukastensystem bietet durch die externe Variabilität in der Anordnung der Module eine hohe gestalterische Freiheit. Dadurch lassen sich vielfältige Tragwerksstrukturanordnungen realisieren, die im Planungsprozess analysiert und bewertet werden müssen.

Es müssen Entwurfsstatiken durchgeführt werden, die die Zustände während des Auf- und Abbaus sowie die Konstruktion gemäß dem standardisierten Baukastensystem umfassen. Dabei ist zu prüfen, ob spezielle Knotenpunkte erforderlich sind und wie diese konstruktiv umgesetzt werden können. Bei Verfügbarkeitsengpässen in der Bauteildatenbank und der Notwendigkeit Neubauteile in das Tragsystem zu integrieren, ist besonders auf die Volumensignifikanz der Bauteilgruppen zu achten. Es sollten bevorzugt flächige, wiedergewonnene Bauteile in das Baukastensystem eingebunden werden. Für jeden Entwurf sind eine Lebenszyklusanalyse (LCA) und eine Lebenszykluskostenanalyse (LCC) durchzuführen. Diese bilden die Grundlage für eine weitere Bewertung. Anhang A1 8-2 visualisiert beispielhafte Entwurfsvarianten mit einem modularen Baukastensystem.



Anhang A1 8-2: Beispiele für Entwurfsvarianten mit einem modularen Baukastensystem

8.1.2 Realisierungsbewertung

Für das Planungsvorhaben ist eine Realisierungsbewertung mit den erarbeiteten Entwurfsvarianten durchzuführen. Dabei sind alle relevanten Akteure, wie die Tragwerksplanung, Architektur und weitere Fachplanung, einzubinden. Im Rahmen eines Soll-Ist-Vergleichs sind die Entwürfe hinsichtlich der Anforderungen und Zielsetzungen des Neubauvorhabens, beispielsweise in Bezug auf Gestaltung oder Wirtschaftlichkeit, zu bewerten. Das Ziel besteht darin, die Entwurfsvariante zu ermitteln, die die höchste Kompatibilität mit den definierten Zielvorgaben aufweist, und zu klären, ob diese Variante realisiert werden soll.

8.2 Planung und Ausführung des festgelegten Entwurfes

8.2.1 Anpassung der digitalen Bauteildatenbanken

Die Bauteildatenbank ist entsprechend dem final gewählten Entwurf anzupassen. Dies umfasst mögliche Änderungen sowie die Aufbereitung einzelner Module und die Erfassung aller relevanten Informationen zum konkreten Einsatz im Neubauvorhaben. Zudem ist die Verfügbarkeit der verwendeten Bauteile innerhalb der Datenbank entsprechend zu aktualisieren und anzupassen.

8.2.2 Planung und Genehmigung des Bauvorhabens

Entsprechend sind für die konkrete Planung und Genehmigung des Bauvorhabens alle Leistungsphasen durchzuführen. Weiterführende Informationen finden sich in [GeHe24]. Dies umfasst beispielsweise:

- Erdarbeiten und Erschließung
- Genehmigungsplanung
- Genehmigungsstatik
- Brandschutzkonzept gemäß Baukastensystem
- Bauphysik und Energiekonzept gemäß Baukastensystem
- Bauantrag
- Planung und Ausschreibung
- Ausführungsplanung
- Ausschreibung
- Vergabe

8.3 Planung der zirkulären Nutzung

8.3.1 De- und Montageanordnungen

Die konkrete Logistik sowie die De- und Montageanordnungen für das jeweilige Planungsvorhaben sollten bereits in der Errichtungsphase berücksichtigt und geplant werden. Dabei sind die Abläufe zum sukzessiven Lösen der Verbindungen so auszuarbeiten, dass die Stabilität der Gesamtkonstruktion während des Rückbaus jederzeit gewährleistet bleibt (vgl. Kapitel 5.1.1). Die logistischen Anforderungen sind gemäß den Vorgaben in Kapitel 5.1.4 einzuhalten. Zudem sind geeignete Maßnahmen für die Zeit nach der Demontage vorzusehen, um einen reibungslosen Übergang in die Aufbereitung oder Lagerung der Bauteile zu gewährleisten.

8.3.2 Fortlaufende Re:Identifikation

Für jeden neuen Nutzungszyklus müssen alle Bauteilmodule die folgenden Schritte des Leitfadens wiederholen:

- Integritätsprüfung und Aufbereitung
- Klassifizierung
- Zertifizierung
- Prägung
- Digitalisierung (digitaler Zwilling)

9 Literaturverzeichnis

- [Abfa] Abfallverzeichnisverordnung AVV: *Abfallverzeichnisverordnung*. URL <https://www.gesetze-im-internet.de/avv/>. - abgerufen am 2025-05-28
- [Bund] Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit: *Kreislaufwirtschaftsgesetz*. URL <https://www.bmuv.de/GE164>. - abgerufen am 2025-05-28
- [Burs16] BURSAC, NIKOLA: *Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung*, Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation, 2016
- [DeBF22] DEVÈNES, JULIE; BASTIEN-MASSE, MALÉNA ; FIVET, CORENTIN: *Bestandsanalyse für die Wiederverwendung von tragenden Stahlbetonbauteilen*, Bericht, Friburg und Basel, 2022
- [Deut17] Deutscher Abbruchverband e.V. (DA): *Hilfestellung „Abbruchstatik“ des Deutschen Abbruchverbandes*, 2017
- [Dine22] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN 18007:2022-09: Abbrucharbeiten – Begriffe, Verfahren, Anwendungsbereiche*, 2022
- [Dine13] Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04 (Eurocode 2): Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken*, 2013
- [Finc24] FINCKH, WOLFGANG: *Verstärken von Betonbauteilen: Tragwerksplanung im Bestand, erfolgreich studieren*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2024 — ISBN 978-3-658-45856-0
- [Fing09] FINGERLOOS, FRANK: *Historische technische Regelwerke für den Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau*. Berlin: Ernst, 2009 — ISBN 978-3-433-02925-1
- [GeHe24] GENGNAGEL, CHRISTOPH; HENSCHEL, CHRISTOPH: *Abbau Aufbau Entwicklung eines Cradle-to-Cradle Prozesses für Ortbetonelemente*, Bericht, Berlin, 2024
- [Gewa] GewAbfV - Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: *Verordnung über die Bewirtschaftung von gewerblichen Siedlungsabfällen und von bestimmten Bau- und Abbruchabfällen*. URL https://www.gesetze-im-internet.de/gewabfv_2017/BJNR089600017.html. - abgerufen am 2025-05-28

- [HRRS21] HILLEBRANDT, ANNETTE; RIEGLER-FLOORS, PETRA; ROSEN, ANJA; SEGGEWIES, JOHANNA: *Atlas Recycling: Gebäude als Materialressource*. München: DETAIL, 2021 — ISBN 978-3-95553-416-5
- [KBLE24] KLOFT, HARALD; BAGHDADI, ABTIN; LEDDEROSE, LUKAS; ESCHENBACH, MAX BENJAMIN; TESSMANN, OLIVER; KUHN, CHRISTOPH; WAGNER, ANNE-KRISTIN: TOWARDS A HYBRID MODULAR CONSTRUCTION SYSTEM REUSING PRECAST CONCRETE COMPONENTS. In: *Fabricate 2024: Creating Resourceful Futures*: UCL Press, (2024) — ISBN 978-1-80008-634-0
- [KHTO13] KUDSK, ANDERS; HVAM, LARS; THUESEN, CHRISTIAN; O'BRIEN GRONVOLD, MARTIN; HOLO OLSEN, MAGNUS: Modularization in the Construction Industry Using a Top-Down Approach. In: *The Open Construction and Building Technology Journal* Bd. 7 (2013), Nr. 1, S. 88–98
- [KrGe18] KRAUSE, DIETER; GEBHARDT, NICOLAS: *Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien: Hohe Produktvielfalt beherrschbar entwickeln*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018 — ISBN 978-3-662-53039-9
- [Kuds13] KUDSK, ANDERS: Stepwise Modularization in the Construction Industry Using a Bottom-Up Approach. In: *The Open Construction and Building Technology Journal* Bd. 7 (2013), Nr. 1, S. 99–107
- [Land] Baden-Württemberg Landesrecht BW: *Landesbauordnung für Baden-Württemberg § 34 Aufenthaltsräume*. URL <https://www.landesrecht-bw.de/bsbw/document/jlr-BauOBW2010pP34>. - abgerufen am 2025-05-28
- [Lohm04] LOHMEYER, G. C. O. (Hrsg.): *Stahlbetonbau*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2004 — ISBN 978-3-322-96817-3
- [MeMe15] METTKE, ANGELIKA; MEETZ, MICHAEL: Brandenburger Leitfaden für den Rückbau von Gebäuden. In: *MÜLL und ABFALL* (2015), Nr. 10
- [Mett95] METTKE, ANGELIKA: *Wiederverwendung von Bauelementen des Fertigteilbaus*. Taunusstein: Blottner, 1995 — ISBN 3-89367-054-8
- [MHAI08] METTKE, ANGELIKA ; HEYN, SÖREN ; ASMUS, STEFAN ; IVANOV, EVGENY: *Wiederverwendung von Plattenbauteilen in Osteuropa Endbericht – Bearbeitungsphase I*, Bericht, Cottbus, 2008
- [RFSM24] ROSE, JANNIS ; FORMAN, PATRICK ; STIELER, DAVID ; MENGES, ACHIM ; MARK, PETER: Combinatorial optimization approach for the efficient reuse of RC components. In: *Structural Concrete* (2025), S. suco.70126
- [RZWH24] RETTINGER, MARTIN; ZERNSDORF, KAI ; WILHELM, KAI ; HÜCKLER, ALEX ; SCHLAICH, MIKE: Eine modulare Segmentbrücke mit thermisch umgeformter Carbonbewehrung: Modularisierungsansatz und Betonfertigteilherstellung. In: *Beton- und Stahlbetonbau* (2024), S. best.202400051

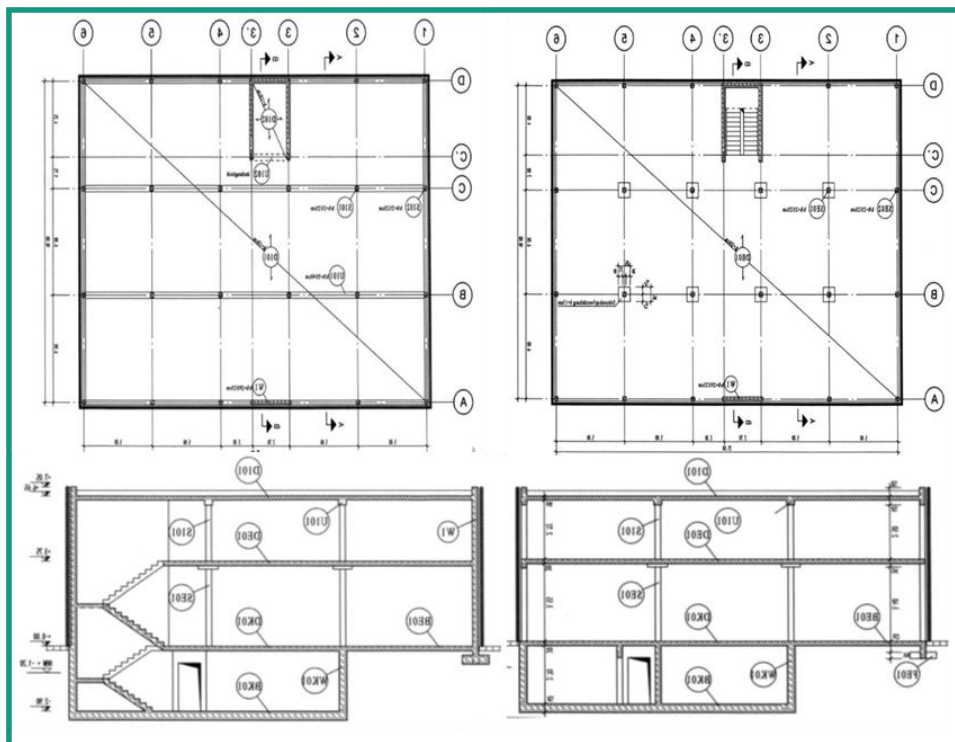
- [SLSW12] SCHNELL, J.; LOCH, M.; STAUDER, F.; WOLBRING, M. (Hrsg.): *Bauen im Bestand - Bewertung der Anwendbarkeit aktueller Bewehrungs- und Konstruktionsregeln im Stahlbetonbau: Abschlussbericht, Bericht*, Stuttgart, 2012
- [StHG10] STEINBORN, VOLKER; HOFERT, REGINE; GABRIEL, STEFAN: *Arbeitsschutz bei Abbruchmaßnahmen*, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2010
- [StSt24] STÖHR, BEN; STARK, ALEXANDER: Influence of surface characteristics on the connection of reused concrete members with detachable dry joints. In: *Proceedings of the 15th fib International PhD Symposium in Civil Engineering Budapest, Hungary*. Ed.: G. Balázs, (2024) — 978-2-940643-24-0, S. 1293-1300
- [StWS12] STAUDER, FLORIAN; WOLBRING, MICHAEL; SCHNELL, JÜRGEN: Bewehrungs- und Konstruktionsregeln des Stahlbetonbaus im Wandel der Zeit. In: *Bautechnik* Bd. 89 (2012), Nr. 1, S. 3–14
- [ThNU20] THAI, HUU-TAI ; NGO, TUAN ; UY, BRIAN: A review on modular construction for high-rise buildings. In: *Structures* Bd. 28 (2020), S. 1265–1290
- [Vdie13] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: *VDI-GVSS 6202 Blatt 1: Schadstoffbelastete bauliche und technische Anlagen - Abbruch-, Sanierungs- und Instandhaltungsarbeiten*, Bauen und Gebäudetechnik, 2013
- [Vdie21] Verein Deutscher Ingenieure e. V.: *VDI 6210-Blatt 9: Abbruch baulicher und technischer Anlagen - Abbruchstatik*, Bauen und Gebäudetechnik, 2021
- [Vull24] VULLINGS ET AL.: *Best practice guidelines and recommodations für reuse-optimised deconstruction*. The ReCreate project, 2024

10 Anhang zum Leitfaden

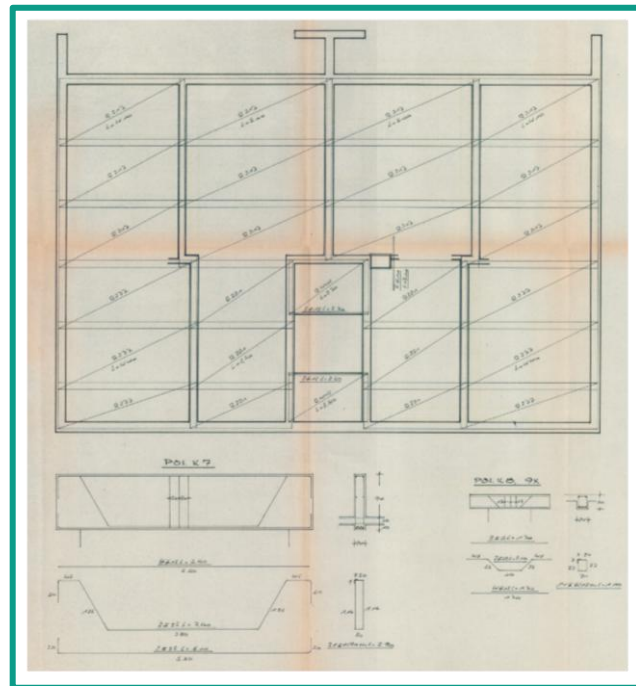


- Pos. ① Balkenartige
Tragwerke
- Pos. ② Stützenartige
Tragwerke
- Pos. ③ Selbsttragende
Sandwichwände

Anhang A1 10-1: Anwendungsbeispiel 1 – Positionsplan für einen selektiven Rückbau
(real durchgeführt)



Anhang A1 10-2: Anwendungsbeispiel 2 – Gebäudepläne (Auszug) nach [Lohm04]
(fiktiver integraler Rückbau)



Anhang A1 10-3: Anwendungsbeispiel 3 – Gebäudepläne (Auszug)
(fiktiver integraler Rückbau)