
Das folgende Kapitel wurde auszugsweise vorveröffentlicht in: Hillebrandt/Riegler-Floors/Rosen/Seggewies, Atlas Recycling, Edition Detail, München 2018 und seitdem überarbeitet und ergänzt.

4. Bewertungsmethoden: Stand von Forschung und Technik

Mit der Entwicklung und Verbreitung von Zertifizierungssystemen, die die Nachhaltigkeit von Bauwerken messbar machen sollen, hat auch die Bewertung der Rückbau- und Recyclingfähigkeit von Baukonstruktionen einen festen Platz in der Nachhaltigkeitsbewertung gefunden. Daneben existieren Zertifikate, die Analysen zum Lebenszyklus auf Produktebene beinhalten.

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über derzeit angewandte Methoden zur Bewertung des kreislaufgerechten Bauens. Darüber hinaus wird der Stand der Forschung zu bestehenden und neuen Bewertungsmethoden untersucht.

Ziel ist es, hierauf (wenn möglich) aufzubauen, um einen Urban Mining Index als quantitative Methode zur Ermittlung und objektiven Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen zu entwickeln.

4.1.	Recycling in der Gebäudezertifizierung	60
4.2.	Recycling in der Produktzertifizierung	68
4.3.	Bewertungsmethoden anderer Wissenschaftler – Stand der Forschung	72
4.4.	Zwischenfazit	86

4.1. Recycling in der Gebäudezertifizierung

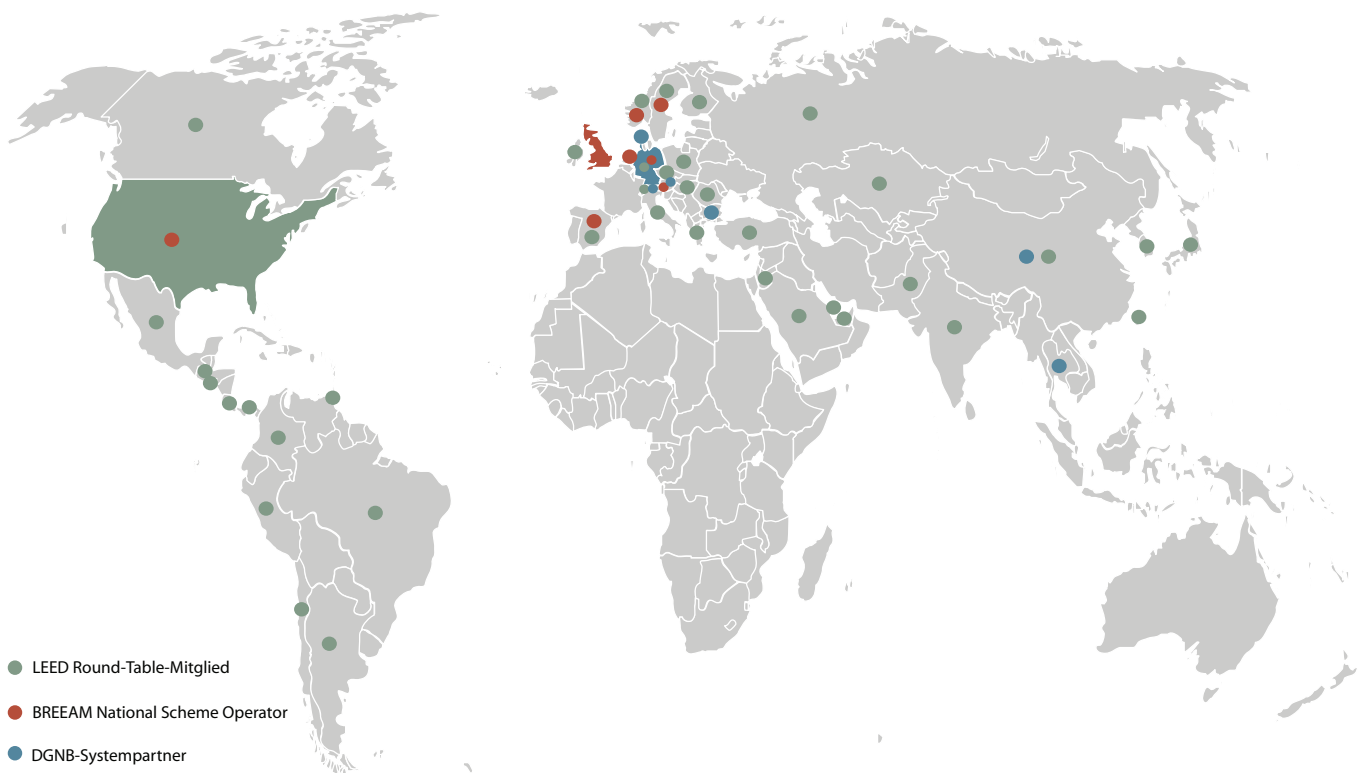
Nachhaltigkeitszertifikate für Gebäude haben sich in den letzten Jahren fest am Markt etabliert. Abb. A 4.2 zeigt die Ursprungsländer und die Verbreitung der weltweit am häufigsten angewendeten Zertifizierungssysteme.

Obwohl in der internationalen Norm ISO 15 392 seit 2008 die allgemeinen Prinzipien des nachhaltigen Bauens nach dem Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit (Ökonomie, Ökologie, Soziales) festgeschrieben sind, gibt es nach wie vor große Unterschiede in der Nachhaltigkeitsbewertung. Während sich die internationalen Systeme auf das ökologische Bauen – auch „Green Building“ genannt – konzentrieren, betrachten die deutschen Zertifizierungssysteme die Nachhaltigkeit eines Bauwerks ganzheitlich und bilden in der Bewertung alle drei Säulen der Nachhaltigkeit gleichwertig ab.

Wie das zirkuläre Bauen derzeit in den Systemen verankert ist, wird im Folgenden dargestellt. Abb. A 4.3 gibt einen Überblick über recyclingbezogene Kriterien in den relevantesten Zertifizierungssystemen.

A 4.2 weltweit angewendete Zertifizierungssysteme für Gebäude, 2017

A 4.3 recyclingbezogene Kriterien in den etablierten Zertifizierungssystemen



A 4.2

Phase	Zertifizierungssystem	BNB Büro und Verwaltung Neubau 2015	DGNB Gebäude Neubau 2018	BREAM International New Construction 2016	LEED v4 Building Design & Construction 2016
Planung und Herstellung	Flächenrecycling (Grund und Boden)	1.2.4 Flächeninanspruchnahme	ENV 2.3 Flächeninanspruchnahme	LE 01 Standortwahl	LT C3 Standortwahl SS C2 Standortentwicklung
	Berücksichtigung von Um- und Rückbaubarkeit sowie Recyclingfreundlichkeit in der Planung	5.1.3 Komplexität und Opti- mierung der Planung	TEC 1.6 Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit	-	-
	Offenlegung und Optimierung der Baustoffe hinsichtlich Umweltwirkung und Ressourcenschonung	1.1.1 - 1.1.5 + 1.2.1 Ökobilanz - Emissionen und Primärenergiebedarf 5.2.2 Qualitätssicherung der Bauausführung	ENV 1.1 Ökobilanz des Gebäudes	MAT 01 Umweltwirkungen im Lebenszyklus MAT 06 Materialeffizienz	MR C2 Transparenz und Opti- mierung der Baustoffe - Umweltproduktdeklaration
	Weiter-/Wiederverwendung Altsubstanz	nur indirekt über Ökobilanz	ENV 1.3 Verantwortungsbewusste Ressourcenverwendung ECO 1.1 Lebenszykluskosten (Circular Economy Bonus)	MAT 03 Verantwortungsbewusste Beschaffung von Bau- produkten	MR C1 Reduzierung der Ökobilanz
	Vermeidung und Verwertung von Bau- und Abbruchab- fällen (Baustellenabfälle)	5.2.1 Baustelle/Bauprozess	PRO 2.1 Baustelle/Bauprozess	MAN 03 Verantwortungsbewusste Baupraktiken WST 01 Baubabfallmanagement	MR PR 1 Planung Abfallmanagement für Bau- und Abbruchabfälle MR C5 Abfallmanagement für Bau- und Abbruchabfälle
	Sekundärrohstoff- verwendung	-	ENV 1.3 Verantwortungsbewusste Ressourcenverwendung	WST 02 Rezyklierte Zuschlagstoffe MAT 06 Materialeffizienz	MR C3 Transparenz und Opti- mierung der Baustoffe, Bezug von Rohstoffen
	Verwendung nachwachsen- der Rohstoffe (NaWaRo's)	nur indirekt über Ökobilanz und Zertifikate für nachhal- tige Materialgewinnung	nur indirekt über Ökobilanz und Zertifikate für nachhal- tige Materialgewinnung	-	-
	Schadstofffreiheit	1.1.6 Risiken für die lokale Umwelt	ENV 1.2 Risiken für die lokale Umwelt	HEA 02 Indoor Air Quality	MR C4 Transparenz & Optimierung der Baustoffe - inhaltsstoffe
	Wasserkreislauf	1.2.3 Trinkwasserbedarf und Abwasseraufkommen	ENV 2.2 Trinkwasserbedarf und Abwasseraufkommen	WAT 01 Wasserverbrauch	WE Wassereffizienz
	Nutzung	erneuerbare Energien	1.2.1 Primärenergiebedarf / Anteile erneuerbarer Primärenergie	ENV 1.1 Ökobilanz des Gebäudes / Anteile erneuerbarer Primär- energie TEC 1.4 Einsatz und Integration von Gebäudetechnik	ENE 01 Reduzierung des Energie- verbrauchs und der CO ₂ Emissionen ENE 04 Low carbon design
Leasing-Modelle für Bauteile (‘Product as a Service’)		-	ECO 1.1 Lebenszykluskosten (Circular Economy Bonus)	-	-
Umnutzungsfähigkeit		2.2.2 Anpassungsfähigkeit	ECO 2.1 Flexibilität und Umnutzungsfähigkeit	WST 05 / 06 Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel / Funktionale Anpassungsfähigkeit	-
Demontageaufwand, Sortenreinheit Recyclingfähigkeit		4.1.4 Rückbau, Trennung und Verwertung	TEC 1.6 Rückbau- und Recycling- freundlichkeit	-	-
End of Life	Ökobilanzierung des Recyclingpotenzials (Modul D)	ausgewiesen, aber nicht bewertet	ENV 1.1 Ökobilanz des Gebäudes	-	-
	Kosten und Erlöse für Rückbau, Verwertung und Entsorgung	-	-	-	-

Abkürzungen:

C Credit (Kriterium) EA Energy and Atmosphere (Energie und Atmosphäre) ECO Economics (Ökonomie) ENE Energy (Energie) ENV Environment (Umwelt) HEA Health and wellbeing (Gesundheit und Wohlbefinden) LE Land use and ecology (Bodennutzung und Ökologie) LT Location and Transportation (Standort und Transport) MAT Materials (Materialien) MAN Management (Management) MR Material and Resources (Material und Rohstoffe) PR Prerequisite (Grundanforderung) PRO Process Quality (Prozessqualität) SS Sustainable Site (nachhaltiger Standort) TEC Technical Quality (Technische Qualität) WAT Water (Wasser) WE Water Efficiency (Wassereffizienz) WST Waste (Abfall)

4.1.1. Recyclingaspekte im BNB-System

Das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) wurde 2007/2008 vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) in Kooperation mit der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB, s. Kapitel 4.1.2) entwickelt. In den sechs abgebildeten Themenfeldern Ökologie, Ökonomie, soziokulturelle und funktionale Aspekte, Technik, Prozesse und Standort werden je nach Systemversion rund 45 Nachhaltigkeitskriterien bewertet. Abhängig vom Erfüllungsgrad der Kriterien erhält ein Projekt im BNB-System eine Auszeichnung in Bronze, Silber oder Gold.

Ökobilanz

Beide deutschen Systeme – das BNB- und DGNB-System – verfolgen den Grundsatz, keine bestimmten Maßnahmen zu fördern, sondern die Gebäudeperformance, d. h. die Leistungsfähigkeit eines Gebäudes über die Abbildung der Wirkungen im Lebenszyklus, zu verbessern.

Demnach sind die wesentlichen Umweltwirkungen wie Emissionen und Primärenergiebedarf eines zu zertifizierenden Gebäudes in einer Ökobilanz nach DIN EN 15 978 abzubilden (siehe Kapitel 2.3.3).

Während das Modul D, das die Recyclingeffekte außerhalb des Lebenszyklus des Gebäudes abbildet, im DGNB-System mitbewertet wird, ist es im BNB-System derzeit ausgesetzt – es wird zwar berechnet und informativ ausgewiesen, geht aber nicht in die Bewertung ein. Als Grund hierfür wird die mangelnde Datengrundlage zum Modul D in den Umweltproduktdeklarationen der Hersteller genannt (siehe Kapitel 4.2.1 „Typ III“ Seite 69). Die Referenzwerte der Ökobilanz im BNB-System wurden entsprechend angepasst.

Abfälle im Bauprozess

Das BNB-System stellt im Kriterium „Baustelle/Bauprozess“ unter dem Indikator „Wertstoffoptimierte Baustelle“ Anforderungen an die Einhaltung der gesetzlichen Mindestvorschriften des Kreislaufwirtschaftsgesetzes sowie an die sortenreine Trennung der Abfälle bei der Bauausführung.

Rückbau, Trennung und Verwertung

Im Kriterium 4.1.4 des BNB-Systems wird eine recyclingfreundliche Neubauplanung mithilfe der drei Indikatoren Rückbau, Trennung (Sortenreinheit) und Verwertung bewertet. Ein tabellarischer Bauteilkatalog

BNB_4.1.4		Gründung, Außenwände, Dächer, Innenwände, Decken	
Rückbau	1. Bewertung Schichtaufbau		Punkte
Sortenreinheit			
Verwertung	-- sehr ungünstig		0
	- ungünstig		2,5
	∅ durchschnittlich		6
	+ günstig		7,5
	++ sehr günstig		10
	2. Ermittlung Recyclingfaktor R		
	R= 0,3 * Punkte Rückbau		
	+ 0,3 * Punkte Sortenreinheit		
	+ 0,4 * Punkte Verwertung		
	3. Gewichtung nach Masse [kg]		

A 4.4 Bewertung der Indikatoren Rückbau, Sortenreinheit und Verwertung im Kriterium 4.1.4 des BNB-Systems

erfasst dabei die Bauelemente mit ihren wesentlichen Schichten und bewertet sie in Bezug auf die drei Indikatoren mit fünf verschiedenen Abstufungen von „sehr ungünstig“ bis „sehr günstig“ (Abb. A 4.4). Diese Abstufungen sind nicht näher definiert; bei ihrer Einschätzung kann der Nutzer sich an vorbewerteten Beispielkonstruktionen orientieren, für die aber auch keine wissenschaftlichen Grundlagen bestehen. Für jedes Bauelement wird zur Ermittlung der Bewertungspunkte aus den Punkten für Rückbau, Sortenreinheit und Verwertung im Verhältnis 3:3:4 der bauteilbezogene Recyclingfaktor R errechnet. Das Produkt aus R und dem prozentualen Masseanteil des Bauelements am gesamten Gebäude bildet die Punktzahl für das jeweilige Bauelement. Die Summe der Punktzahlen aller Bauelemente ergibt die Bewertungspunkte für das Kriterium 4.1.4, das mit 4,5% in das Gesamtergebnis des Gebäudes eingeht. Da die Voraussetzungen zur Kreislauffähigkeit bereits in der Planung geschaffen werden müssen, fließt die Erstellung eines Umbaubarkeits-, Rückbau- und Recyclingkonzepts in die Prozessqualität ein [89].

4.1.2. Recyclingaspekte im DGNB-System

Die DGNB hat ihr Zertifizierungssystem in den letzten Jahren für eine Vielzahl von Gebäudetypologien und Anwendungsbereiche weiterentwickelt und fördert seit der Systemversion 2018 explizit das zirkuläre Bauen mit Circular-Economy-Boni. Zehn der insgesamt 37 Kriterien beinhalten im weiteren Sinn Aspekte des Recyclings (Abb. A 4.3). Die Auszeichnung reicht von Bronze (nur für Bestandsgebäude) über Silber und Gold bis Platin.

2018 wurde der Blick auf die Ressourcenverwendung im DGNB-System wesentlich erweitert. Eine Wiederverwendung von Bauteilen oder der Einsatz von Sekundärrohstoffen wird im Kriterium „Verantwortungsbewusste Ressourcenverwendung“ als Alternative zu nachweislich verantwortungsbewusst gewonnenen Primärrohstoffen gewertet. Damit punktet beispielsweise eine Dämmung aus Altpapier-Zellulose prinzipiell genauso wie eine Holzfaserdämmung mit Primärmaterial aus zertifiziert nachhaltiger Forstwirtschaft (z. B. mit FSC oder PEFC-Label).

Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit am Ende des Lebenszyklus

Mit einer Gewichtung von 3 bis 3,5% an der Gesamtbewertung (je nach Nutzungsart) berücksichtigt die DGNB die Recyclingfähigkeit der Kompo-

	DGNB_TEC 1.6	Primärkonstruktion/ Tragwerk	Hüllfläche	Innenausbau	Punkte max.
	Gewichtung	einfach	doppelt	fünffach	
	Bauteilgruppe	Tragwerk Gründung	Außenwände Dächer	Innenwände Decken	
A 4.5	Bewertung der Rückbau- und Recycling-freundlichkeit im Kriterium TEC 1.6 der DGNB	recycling-freundliche Baustoffauswahl	CE 2 Vermeidung (z.B. durch Verzicht auf Bekleidungen) CE 1 Wiederverwendung/werkstoffliche Verwertung zu vergleichb. Produkt		10 20
A 4.6	Kriterien mit Bezug zum Recycling von Baumaterialien im BREEAM-System International New Construction, 2016 Hinweis: Das Kriterium „Abfall“ enthält Bewertungskriterien, mit denen die Auswirkungen langer Lebensdauern durch Anpassungsfähigkeit unterstützt werden soll.	rückbaufreundliche Baukonstruktion	QS 2 stoffliche Verwertung QS 1 Verfüllung/energetische Verwertung QS 0 Entsorgung (als gefährlicher Abfall)/Deponierung		45
A 4.7	BREEAM-System International New Construction, 2016: Kriteriengruppen und deren Gewichtung für Nichtwohngebäude [92]	Planungsprozess	Rückbau, Umbau und Recyclingfreundlichkeit in frühen Planungsphasen Rückbau, Umbau und Recyclingfreundlichkeit in der Ausführungsplanung		5 5
		CE (Circular Economy Bonus), QS (Qualitätsstufe)			

A 4.5

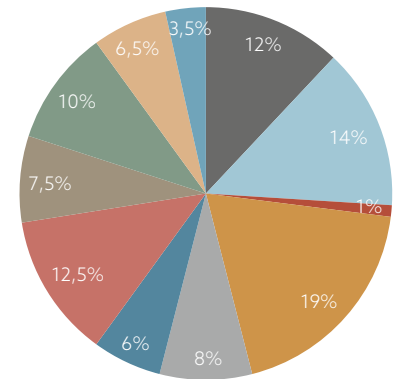
nenten eines Gebäudes zum Ende der Nutzungsdauer. In den beiden Indikatoren „Recyclingfreundliche Baustoffauswahl“ und „Rückbaufreundliche Baukonstruktion“ erfolgt eine systematische Betrachtung der Regelbauteile des Bauwerks bis in die dritte Ebene der Kostengruppe 300 nach DIN 276 [90] sowohl aus stofflicher als auch aus konstruktiver Sicht. Die verwendeten Baustoffe werden Verwertungswegen zugeordnet, die sich an die Hierarchie der Abfallrahmenrichtlinie anlehnen (siehe Kapitel 3, Seite 40). Diesen Verwertungswegen wiederum entsprechen Qualitätsstufen mit bestimmten Punktbewertungen (Abb. A 4.5).

Eine Vermeidung (z. B. durch Verzicht auf Bekleidungen) oder Wiederverwendung von Bauteilen oder eine werkstoffliche Verwertbarkeit zu einem gleichwertigen Produkt werden über Circular-Economy-Boni belohnt. Die Rückbaufreundlichkeit der Konstruktion wird positiv eingestuft, wenn die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Entnahme der Bauteile oder eine sortenreine Trennbarkeit der Bauteilschichten gegeben ist. Für die Bewertung stellt die DGNB ein Exceltool mit einem vorbewerteten Bauelementekatalog zur Verfügung, an dem die Promovendin und die Betreuerin dieser Arbeit maßgeblich mitgewirkt haben. Entsprechend ihrer Austauschhäufigkeit und ihrer Flächenrelevanz werden die Bauteilgruppen bei der Bewertung unterschiedlich gewichtet. Über einen „Innovationsraum“, mit dem die DGNB generell seit 2018 zukunftsweisende und/oder projektspezifische Lösungen fördert, lassen sich Bauteile außerhalb des Betrachtungsrahmens (z. B. Gebäudetechnik) zusätzlich abbilden. In einem dritten Indikator wird die Berücksichtigung der Rückbaubarkeit, Umbaubarkeit und Recyclingfähigkeit in der Planung positiv bewertet.

Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus

Um der ökonomischen Relevanz des zirkulären Bauens Rechnung zu tragen, wird die Wiederverwendung von Bauteilen oder der Einsatz von Systemen, die der Idee der Circular Economy entsprechen, von der DGNB mit Bonuspunkten im Kriterium „Lebenszykluskosten“ belohnt. Damit sollen Geschäftsmodelle gefördert werden, die eine Kreislauffähigkeit sicherstellen oder maßgeblich unterstützen, wie z. B. ein Performance Contracting (produktbegleitende Dienstleistungen/Leasingmodelle) mit Verwertungs- oder Wiederverwendungsstrategie [91].

BREEAM INC 2016	Kriterium	Punkte max.
Materialien	Mat 01 Umweltwirkungen im Lebenszyklus (Ökobilanz)	6
	Mat 03 verantwortungsbewusste Beschaffung von Bauprodukten	4
	Mat 06 Materialeffizienz	1
Abfall	Wst 01 Bauabfallmanagement	4
	Wst 02 rezyklierte Zuschlagstoffe	1
	Wst 05 Anpassungsfähigkeit an den Klimawandel (zwecks Weiternutzung)	1
	Wst 06 funktionale Anpassungsfähigkeit (zwecks Weiternutzung)	1



A 4.6

A 4.7

4.1.3. Recyclingaspekte im BREEAM-System

Das Zertifizierungssystem Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) ist das weltweit erste Bewertungssystem für umweltschonendes Bauen. Es wurde 1990 vom britischen Building Research Establishment (BRE) [92] entwickelt und wird vom UK Green Building Council betrieben. BREEAM International New Construction ist der BREEAM-Standard für die Nachhaltigkeitsbeurteilung neuer Wohn- und Nichtwohngebäude in Ländern auf der ganzen Welt mit Ausnahme Großbritanniens und anderer Länder mit einem adaptierten nationalen BREEAM-System. Die Auszeichnungen reichen von classified über good, very good und excellent bis hin zu outstanding. Je nach erreichter Qualitätsstufe werden Neubauten und Modernisierungsprojekte mit 1 bis 5 Sternen ausgezeichnet.

Das internationale BREEAM-System für Neubauten, dessen elf Kategorien Abb. A 4.7 zeigt, ist stark auf den Planungsprozess ausgerichtet. Das zeigt sich zum einen darin, dass das Zertifikat in zwei Entwicklungsstadien vergeben wird: in der Design Stage (Planung) und Post-Construction Stage (nach Fertigstellung). Zum anderen werden in mehreren Kategorien keine konkreten Ergebnisse, sondern die Umsetzung von Konzepten und Managementsystemen bewertet.

Recyclingaspekte in Bezug auf Baumaterialien sind in den Kategorien „Materialien“ und „Abfall“ enthalten (Abb. A 4.6).

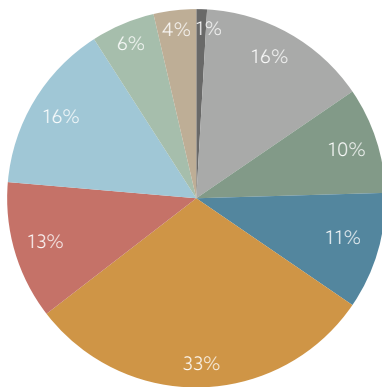
Eine Ökobilanz ist ansatzweise in die Kategorie „Materialien“ integriert. Die Berechnung der Umweltwirkungen der Baukonstruktion im gesamten Lebenszyklus (Module A – C nach DIN EN 15 978) wird hier positiv bewertet, jedoch ohne die Ergebnisse an Referenzwerte zu knüpfen. Die Datenerhebung soll vielmehr dazu beitragen, internationale Benchmarks (Referenzwerte) zu entwickeln.

Im Kriterium „verantwortungsbewusste Beschaffung von Bauprodukten“ werden neben Bauprodukten, die mit BREEAM-anerkannten Zertifizierungssystemen wie z. B. BES 6001, FSC, EMAS ausgezeichnet sind, auch direkt wiederverwendete Bauprodukte positiv bewertet.

Maßnahmen zur Steigerung der Materialeffizienz, beispielsweise durch den Einsatz von Recyclingmaterialien oder Strategien zur Materialeinsparung, sind im Kriterium „Materialeffizienz“ abgebildet, während Verfahren

- Planung ²⁾
 - Gesundheit und Komfort ²⁾
 - Gefahren
 - Energie ²⁾
 - Transport
 - Wasser ²⁾
 - Materialien ¹⁾
 - Abfall ¹⁾
 - Standortökologie ²⁾
 - Umweltverschmutzung
 - Oberflächenentwässerung
- +10 % für Innovationen

- 1) mit Recyclingaspekten (im engeren Sinn)
- 2) mit Kreislaufaspekten (im weiteren Sinn)



- Integrale Planung ²⁾
- Lage und Verkehr ²⁾
- nachhaltiger Standort ²⁾
- Wassereffizienz ²⁾
- Energie und Atmosphäre ²⁾
- Materialien und Rohstoffe ¹⁾
- Innenraumqualität und Komfort
- Innovation
- regionale Prioritäten

- 1) mit Recyclingaspekten (im engeren Sinn)
- 2) mit Kreislaufaspekten (im weiteren Sinn)

A 4.8

LEED v4 BD+C	Materialien und Rohstoffe	Punkte max.
Mindestanforderungen	Lagerung und Sammlung von Wertstoffen	erforderlich
	Planung Abfallmanagement für Bau- und Abbruchabfälle	erforderlich
Credits	1 Reduzierung der Ökobilanz: Gebäude	5
	2 Transparenz und Optimierung der Baustoffe – Umweltproduktdeklaration	2
	3 Transparenz und Optimierung der Baustoffe – Bezug von Rohstoffen	2
	4 Transparenz und Optimierung der Baustoffe – Inhaltsstoffe	2
	5 Abfallmanagement für Bau- und Abbruchabfälle	2

A 4.9

zur Vermeidung oder hochwertigen On-Site-Verwertung von Abbruchabfällen sowie die Verwendung von Sekundärzuschlagstoffen in der Kategorie „Abfall“ bewertet werden.

4.1.4. Recyclingaspekte im LEED-System

Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) ist ein Zertifizierungssystem, das 1998 vom U.S. Green Building Council [93] entwickelt wurde. Am bekanntesten ist die Systemversion Building Design and Construction (BD+C), die sowohl bei Neubauten als auch bei umfangreichen Sanierungen Anwendung findet.

Je nach Anzahl der erreichten Nachhaltigkeitspunkte erhält ein Projekt eines von vier LEED-Rating-Levels: Certified, Silver, Gold oder Platinum. Die Kriterien und deren Gewichtung sind in Abb. A 4.8 dargestellt.

Ein Schwerpunkt im LEED-System ist seit der Systemversion v4 (2016) die Transparenz und Optimierung der Baustoffe. Innerhalb der Kategorie „Materialien und Rohstoffe“ (Abb. A 4.9) wird die Offenlegung der Umweltwirkungen durch Verwendung von Bauprodukten mit Umweltproduktdeklaration positiv bewertet. In Bezug auf eine nachhaltige Beschaffung ist die Wiederverwendung und der Einsatz von Recyclingmaterialien der Verwendung von Produkten mit Zertifikaten oder mit herstellereitigen Nachhaltigkeitsberichten gleichgesetzt. Das Sammeln weiterer Pluspunkte ist mit einer von Dritten geprüften Deklaration der Materialinhaltsstoffe möglich.

Die Ökobilanz kann entweder qualitativ oder quantitativ bewertet werden (Credit 1). Eine qualitative Bewertung ist möglich bei der Sanierung eines denkmalgeschützten oder mit Schadstoffen belasteten Bauwerks oder bei Wiederverwendung von Baumaterialien. Alternativ ist eine quantitative Ökobilanzierung der Baustoffe unter Optimierung der Umweltwirkungen (Module A bis C nach DIN EN 15 978) möglich.

A 4.8 LEED-System Building Design and Construction (BD+C) v4: Kriteriengruppen und deren Gewichtung

A 4.9 Kriterien der Gruppe „Materialien & Rohstoffe“ im LEED-System Building Design and Construction (BD+C) v4 [93]

A 4.10 etablierte Umweltzeichen Typ I für Bauprodukte [97]

4.1.5. Anwendbarkeit der Zertifizierungssysteme zur Bewertung des kreislaufgerechten Bauens

In allen Gebäudezertifizierungssystemen werden Recyclingaspekte bisher weitgehend qualitativ bewertet. In den beiden internationalen Systemen BREEAM und LEED wird – im Gegensatz zu den beiden deutschen Systemen – die End-of-Life-Phase bisher gar nicht berücksichtigt, wie die Übersicht in Abb. A 4.3 gezeigt hat.

Eine quantitative Ermittlung der Kreislaufpotenziale erfolgt in der Nachhaltigkeitszertifizierung somit aktuell nicht. Sie ist jedoch für eine objektive Bewertung unerlässlich.

Die Ökobilanzierung ist zwar eine quantitative Methode, die die Effekte des Recyclings von der Systematik her abbilden kann, in der praktischen Anwendung können die Recyclingpotenziale auf Gebäudeebene jedoch nur unzureichend abgebildet werden.

Dies liegt zum einen an der mangelnden Datengrundlage für das Modul D, das die Vorteile und eventuelle Belastungen durch Recycling für den nächsten Lebenszyklus abbildet. Trotz der lückenhaften Daten (und damit verbundener Ungenauigkeiten) hält die DGNB – im Gegensatz zum BNB-System – an der Bewertung des Moduls D fest, um damit einen Anreiz zu setzen, die Industrie zu einer vollständigen Deklaration der Daten zu bewegen.

Noch förderlicher für die Kreislaufwirtschaft wäre es, wenn zukünftig alle Module der Ökobilanz in einer Umweltproduktdeklaration verpflichtend deklariert werden müssten. Hierfür liegt ein Normenentwurf bereits vor (s. Punkt 4.2.1, Seite 69).

Die unzureichende Abbildung der Recyclingeffekte in der Ökobilanz liegt aber auch daran, dass sich die Datenbasis auf die Produktebene und nicht auf die Gebäudeebene bezieht. So wird die Trennbarkeit von Materialverbänden bisher in der Ökobilanzierung nicht berücksichtigt.

Erst mit einer quantitativen Ermittlung der Kreislaufpotenziale, wie sie in dieser Arbeit entwickelt wird, und einer vollständigen Deklaration der Ökobilanz können die Umweltwirkungen (Einsparungen) durch Recycling berechnet werden (s. Kapitel 10.3.1).

Insgesamt bildet das DGNB-System von allen Zertifizierungssystemen die Aspekte des zirkulären Bauens derzeit am besten ab. Die Verfasserin und die Betreuerin dieser Arbeit haben an der Entwicklung des DGNB-Kriteriums „Rückbau- und Recyclingfreundlichkeit“ mitgewirkt. Dabei wurde deutlich, dass für eine objektive Bewertung der zirkulären Eigenschaften eines Bauwerks eine quantitative Methodik erforderlich ist, die nur im Rahmen einer wissenschaftlichen Forschung erarbeitet werden kann. Die rein qualitative Bewertung in den Zertifizierungssystemen durch eine quantitative Bewertungsmethodik zu ersetzen, war deshalb zusätzliche Motivation für die Entstehung dieser Arbeit.



A 4.10

4.2. Recycling in der Produktzertifizierung

Während Bewertungssysteme auf Bauwerksebene die Gebäudequalität umfassend betrachten, konzentrieren sich die Produktbewertungen auf ökologische und soziale Kriterien des Herstellungsprozesses, der Nutzung und der End-of-Life-Phase des einzelnen Bauprodukts.

4.2.1. Umweltkennzeichnungen und -deklarationen

Die internationale Normenreihe ISO 14 020 [94] gibt Herstellern und Zertifizierern eine Anleitung, produktbezogene Umweltinformationen auf freiwilliger Basis zu nutzen und bereitzustellen. Dabei werden verschiedene Deklarationstypen unterschieden.

Typ I und II

Umweltbezogene Anbietererklärungen nach ISO 14 021 (Umweltkennzeichnungen Typ II) [95] liegen als freiwillige Selbsterklärung in alleiniger Verantwortung des Herstellers und können z. B. Angaben über Rezyklatgehalte eines Produkts enthalten. Dagegen erfordern Umweltkennzeichnungen nach ISO 14 024 (Typ I) [96] eine Drittzertifizierung. Sie haben einen bewertenden Charakter und weisen die besondere Umweltqualität eines Produkts (im Branchenvergleich) aus, womit es sich von anderen Produkten mit gleichem Anwendungszweck abhebt.

Das bekannteste Umweltzeichen Typ I für Produkte und Dienstleistungen aller Art ist der „Blaue Engel“ (Abb. A 3.10 oben links). Schutzziele des auch RAL UZ genannten Labels sind Umwelt und Gesundheit, Klima, Wasser und Ressourcen. Allerdings konzentrieren sich die Vergabegründungen in der Produktkategorie Bauen vorwiegend auf die Minimierung von Schadstoffen und Innenraumemissionen [98].

Das baubranchenspezifische Natureplus-Zertifikat stellt unter anderem Anforderungen an den Ressourcenschutz. So hat der Anteil nachwachsender und mineralischer Rohstoffe der mit diesem Siegel ausgezeichneten Produkte in der Regel mindestens einen Massenanteil von 85%. Kunststoffe dürfen zwar als Zusatzstoffe zum Einsatz kommen, aber nicht Basis des Produkts sein. Beschränkt verfügbare bzw. nur aufwendig zu gewinnende Rohstoffe sind nach Verfügbarkeit durch umweltverträgliche Sekundärrohstoffe zu ersetzen.

Die Grundregeln eines recyclinggerechten Materialdesigns stellen leider nur eine Soll-Vorschrift dar: Die geforderte Eignung der Baustoffe für eine Aufbereitung zu gleichwertigen Recyclingprodukten wird durch die Mindestanforderung der thermischen Verwertbarkeit oder gefahrlosen Deponierung wieder geschwächt [99]. Auffällig ist, dass keine Bauprodukte aus metallischen Rohstoffen Natureplus-zertifiziert sind, obwohl sich diese praktisch endlos im Kreislauf halten lassen.

Die Natureplus-Zertifikate enthalten zwar keine direkten Angaben über die Inhaltsstoffe (z.B. den Gehalt an nachwachsenden Rohstoffen), doch die Online-Datenbank des Natureplus e.V. www.natureplus.org nennt in den dort einsehbaren produktgruppenspezifischen Vergaberichtlinien immerhin z.B. den Mindestgehalt an nachwachsenden Rohstoffen und gibt Auskunft zur Einhaltung von Grenzwerten für gesundheits- und umweltgefährdende Stoffe. Die Daten können als Informationsquelle für

die Bewertung des Einsatzes erneuerbarer Rohstoffe bei der Bemessung der Kreislaufpotenziale dienen (siehe Kapitel 5.1.3).

Weitere relevante Umweltzeichen Typ I sind die Label des in Kanada gegründeten FSC¹⁹ und des aus Europa stammenden PEFC²⁰, die Holzprodukte aus nachhaltiger Forstwirtschaft auszeichnen. Hölzer mit dieser Auszeichnung erfüllen den forstwirtschaftlichen Nachhaltigkeitsgrundsatz von Hans Carl von Carlowitz [2], wonach dem Wald nicht mehr Holz entnommen werden darf, als nachwachsen kann, um den Wald nachhaltig zu erhalten. So wird mit der Verwendung zertifiziert nachhaltiger Hölzer und Holzprodukte sichergestellt, dass der natürliche Kreislauf geschlossen wird. Der Anteil zertifizierter Hölzer kann damit eine Größe zur Bemessung der Kreislaufpotenziale sein.

Der FSC führt drei Kennzeichen-Kategorien [100]:

1. „FSC Recycling“ für Produkte, die ausschließlich Recyclingmaterial beinhalten, das mindestens 85% Post-Consumer-Material sein muss.
2. „FSC Mix“ mit mindestens 70% FSC-zertifiziertem oder Post-Consumer-Recyclingmaterial
3. „FSC 100%“ für Produkte, die zu 100% Material aus FSC-zertifizierten Wäldern enthalten.

Das PEFC-Label darf nur dann in Verbindung mit einem Produkt verwendet werden, wenn der Zertifizierungsprozentsatz 70% überschreitet [101].

Typ III

Umweltdeklarationen Typ III nach ISO 14 025 (Environmental Product Declaration – EPD) [102] liefern komplexe quantitative und verifizierte Informationen, die auf einer Ökobilanz beruhen und z. B. den Beitrag eines Produkts zum Klimawandel beziffern. Die produktspezifischen Daten bieten neben generischen Daten die Grundlage für Ökobilanzen von Gebäuden und ermöglichen somit eine vergleichende Bewertung anhand von Referenzwerten.

Die Grundregeln von Umweltproduktdeklarationen für die Produktkategorie Bauprodukte werden in der DIN EN 15804 [103] geregelt. Die Norm unterscheidet drei Arten von EPDs:

- von der Wiege bis zum Werkstor (nur Herstellungsphase)
- Wiege bis Werkstor mit Optionen (ausgewählte Lebenszyklusphasen)
- von der Wiege bis zu Bahre (Lebenszyklus wie in Abb. A 2.9 gezeigt)

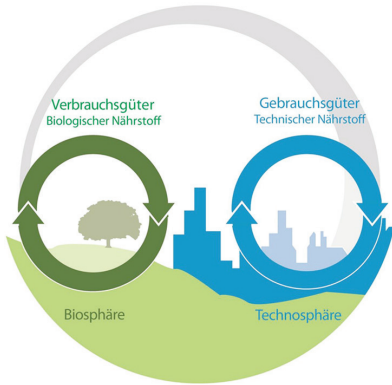
In den beiden letztgenannten Arten können die Vorteile und ggf. Belastungen außerhalb der Systemgrenze (Modul D) optional abgebildet werden.²¹

In der Regel enthalten EPDs auch Angaben zu verwendeten Rohstoffen und Rezyklatgehalten sowie zur Verwertung oder Entsorgung. Sie können damit als Informationsquelle für die Bewertung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen bei der Bemessung der Kreislaufpotenziale dienen (siehe Kapitel 5.1.3).

19 Forest Stewardship Council (deutsch: Rat für verantwortungsvolle Forstwirtschaft).

20 Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes (deutsch: Programm zur Anerkennung von Forstzertifizierungssystemen).

21 Die Norm befindet sich derzeit in Überarbeitung. Der Entwurf zur DIN EN 15804/A2 vom April 2018 sieht eine verpflichtende Ausweisung der Module C und D bereits vor.



A 4.11

C2C-Kriterium: Materialrecycling		Basic	Bronze	Silber	Gold	Platin
Für das Produkt wurde der geeignete (technische/biologische) Kreislauf definiert, ein Plan für die Rückgewinnung und Verwertung wurde entwickelt.		•	•	•	•	•
entworfen und hergestellt für den technischen oder biologischen Kreislauf	Recycling \geq 35%		•	•	•	•
	Recycling \geq 35%			•	•	•
	Recycling \geq 65%				•	•
Stoffstrom-Management-Strategie zur Entwicklung der Logistik- und Verwertungssysteme vorhanden (inkl. Umfang, Zeitplan und Budget)					•	•
entworfen und hergestellt für den technischen oder biologischen Kreislauf	Recycling 100 %					•
Das Produkt wird aktiv im technischen oder biologischen Kreislauf gehalten						•

A 4.12

4.2.2. Der Kreislaufgedanke im Cradle-to-Cradle-System

Die Cradle-to-Cradle-Zertifizierung begleitet eine Produktionsweise „von der Wiege zur Wiege“ (Cradle to Cradle – C2C), die im Gegensatz zu dem Modell „von der Wiege zur Bahre“ (Cradle to Grave) steht. Das 2005 von dem deutschen Chemiker Michael Braungart und dem US-amerikanischen Architekten und Designer William McDonough entwickelte Zertifizierungsprogramm ist für jegliche Art von Produkten anwendbar, die nach den Prinzipien des Cradle-to-Cradle-Designkonzepts gestaltet sind. Bisher wurden insgesamt rund 500 Produkte weltweit mit dem C2C-Zertifikat ausgezeichnet, wovon mehr als 350 den Gruppen Bauprodukte und Ausstattung zuzuordnen sind [104].

„Die Natur kennt keinen Abfall. Alles ist Nahrung für andere Organismen oder Systeme.“²² Nach diesem – dem Grundsatz der Ökoeffektivität folgenden Prinzip – werden alle Materialien eines Produkts als Nährstoffe definiert und entweder dem biologischen oder dem technischen Kreislauf zugeordnet (Abb. A 4.11).

Bewertungsmethode und -prozess

Die Produktbewertung der Cradle-to-Cradle-Zertifizierung erfolgt anhand von fünf Kategorien: Bronze, Silber, Gold und Platin; deren Erfüllungsgrad wird in einer sogenannten Scorecard festgehalten. In Abb. A 4.12 sind die Anforderungen des Cradle to Cradle Certified Product Standard (V 3.1) [106] für das Kriterium „Materialrecycling“ den fünf möglichen Kategorien zugeordnet.

In gleicher Weise werden die vier weiteren Kriterien bewertet: „Gesunde Inhaltsstoffe“, „Erneuerbare Energien und CO₂-Management“, „Wassermanagement“ und „soziale Gerechtigkeit“.

Inhaltsstoffe und Materialrecycling

Grundlage des C2C-Zertifizierungsprozesses ist die Ermittlung und Definition der Inhaltsstoffe des zu zertifizierenden Produkts. Giftige Substanzen, die auf der „Cradle to Cradle Banned List of Chemicals“ (Liste verbotener Chemikalien) stehen, sind ausgeschlossen, um die Gesundheit der Nutzer zu schützen und eine Anreicherung von Schadstoffen in der Biosphäre beim Recycling zu verhindern.

Das Materialrecycling ist eine Schlüsselkomponente im C2C-System.

A 4.11 Cradle-to-Cradle-System: Materialkreisläufe der Bio- und Technosphäre, EPEA GmbH
 A 4.12 Bewertung des Materialrecyclings im Cradle-to-Cradle System [106]

22 Originalzitat Braungart/McDonough: „In nature, there is no concept of waste. Everything is effectively food for another organism or system.“ [105]

Neben strategischen Aspekten zur Umsetzung des Stoffstrommanagements zählt bei der Bewertung vorwiegend die Recyclingrate des Produkts. Diese wird anhand des Anteils rezyklier- oder kompostierbarer Materialien und des Anteils bereits rezykliert oder schnell nachwachsender Rohstoffe im Verhältnis 2:1 wie folgt ermittelt:

$$\frac{2 \times \text{\% -Anteil rezyklier- oder kompostierbare Rohstoffe} + \text{\% -Anteil rezyklierter oder schnell nachwachsender Rohstoffe}}{3} \times 100$$

Das C2C-Zertifikat kann somit Hinweise für die Messbarkeit des Kreislaufpotenzials auf Produktebene liefern. Da die genauen Anteile im Kreislauf zu führender Rohstoffe jedoch nicht im jedermann zugänglichen Zertifikat ausgewiesen werden, müssen sie weitergehenden Produktinformationen der Herstellern entnommen werden.

4.3. Bewertungsmethoden anderer Wissenschaftler – Stand der Forschung

Der Schutz natürlicher Ressourcen ist ein drängendes Thema unserer Zeit. Die Kreislaufwirtschaft stellt hierfür einen wichtigen Lösungsansatz dar. Daher existieren bereits zahlreiche nationale und internationale Forschungsarbeiten zur Rezyklierbarkeit von Baukonstruktionen. Neben produktgruppenspezifischen Arbeiten (industrielle Forschung) gibt es auch übergeordnete Bewertungen der Rückbau- und Recyclingfähigkeit von Baukonstruktionen. Im Folgenden wird zwischen empirisch-experimenteller und angewandter Forschung unterschieden.²³ Ziel ist es, zu untersuchen, auf welchen Forschungsergebnissen aufgebaut werden kann und zu welchen Arbeiten anderer Wissenschaftler eine eindeutige Abgrenzung herzustellen ist.

4.3.1. Empirisch-experimentelle Forschung zum Rückbauaufwand

Forschung von Schultmann et al.

Schultmann hat sich bereits 1998 in seiner Dissertation [107] mit der Kreislaufführung von Baustoffen beschäftigt. Seine Forschung zielte auf die Entwicklung von Methoden zur operativen Demontage- und Recyclingplanung damaliger Rückbauvorhaben. Auch in späteren Forschungsprojekten stand die jeweils aktuelle Rückbauplanung im Fokus. 2016 haben Schultmann et al. [108] für ein Forschungsprojekt zum Thema „Immissionsschutz beim Abbruch“ volumenbezogene Dauerkennwerte für verschiedene Abbruchverfahren nach (Rohbau-)Materialarten tabellarisch zusammengestellt (siehe Abb. A 4.13). Die Tabelle zeigt den Zeitaufwand für Verfahren mit Maschineneinsatz und für den Abbruch mit Handwerkzeug, wobei immer zwei Arbeitskräfte zugrunde gelegt werden. Wie zu erwarten, dauert der Abbruch mit Handwerkzeug bei allen Bauweisen bzw. Materialarten wesentlich länger. Dies liegt ohne Zweifel an der unterschiedlichen Kraft von Maschine und Mensch. Im modernen Rückbau ersetzt die Maschinenkraft die Arbeitskraft des Menschen, da Letztere für den Rückbau heutiger Bauweisen nicht mehr ausreicht bzw. nur mit unverhältnismäßigem Zeitaufwand zu bewerkstelligen wäre. Zur Aktivierung der Kraft benötigt die Maschine jedoch einen entsprechend hohen Energieeinsatz. Anders formuliert: Der Energieeinsatz für einen 40-Tonnen-Bagger (der den Dauerkennwerten für den maschinellen Abbruch in Abb. A 4.13 zugrunde liegt) unterscheidet sich erheblich vom Energieeinsatz eines Menschen.

Die Faktoren Zeit und Energie sind also zwei entscheidende Kennwerte, die für die Bestimmung des Rückbauaufwands miteinander verknüpft werden müssen. Dies wird in Kapitel 5, Punkt 5.3.1 verfolgt.

Anwendbarkeit

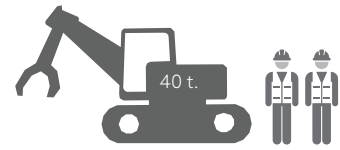
Die Forschung von Schultmann bezieht sich zwar auf heutige Rückbauvorhaben, Teilergebnisse sind aber durchaus auf zukünftige Rückbauvorhaben übertragbar und können zumindest für eine Abschätzung des Rückbauaufwands heutiger Neubauvorhaben dienen.

²³ Begrifflichkeiten in Anlehnung an das Frascati Handbuch der OECD [109].

A 4.13 Volumenbezogene, materialabhängige Dauerkennwerte von Abbruchtechniken in h/m³ für einen 40-Tonnen-Bagger und zwei Arbeitskräfte [108]

Abbruchverfahren	Dauerkennwerte [h/m ²]									
	Mauerwerk					Beton			Sonstiges	
	Naturstein	Ziegel	Kalksandstein	Porenbeton	Betonstein	unbewehrt	Ortbeton	Fertigteil	Holz	Stahl 7,6 t/m ³
Abgreifen	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	x	x	0,03	x
Einschlagen	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,07	0,07	x	x
Eindrücken	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04	x	x	0,08	0,07	x
Einziehen	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	x	x	0,07	0,07	0,94
Reißen	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,08	0,08	0,08	x	x
Stemmen	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06	x	x
Pressschneiden	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,06	x	x
Scherschneiden	x	x	x	x	x	x	x	x	0,08	1,56
Abbruch mit Handwerkzeug	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	1,60	2,00	2,00	1,15	19,5
Zerkleinern	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,05	0,05	0,08	0,98
Sortieren	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,07	0,07	0,04	0,98

x: nicht/schlecht geeignet oder nicht relevant für das Material
Quelle: Experteneinschätzungen, ergänzt durch Weimann et al. (2013); ABW (2012); DA (2015); Seemann (2003); Rentz et al. (2002); Schultmann (1998); Rentz (1993); Willkomm (1990)



A 4.13

Die Kennwerte von Schultmann et al. aus der Tabelle in Abb. A 4.13 werden unter Berücksichtigung der Eignung der Abbruchverfahren (s. Kapitel 3.3, Abb. A 3.14) für eine Bewertung des Rückbauaufwands von tragenden Bauteilen herangezogen. Für den Rückbau von Bekleidungen (Fassade/Dach/Innenausbau) fehlen solche Kennwerte und müssen ermittelt werden (siehe Kapitel 6.2).

Forschung von Graubner et al.

Graubner und Ritter [110] haben 2010 in einer Versuchsreihe die Verbindungen von Materialschichten in Verbundbauteilen im Innenbereich untersucht. Die Untersuchungen umfassten sieben Innenwandkonstruktionen mit vier verschiedenen Bekleidungen und vier Fußbodenaufbauten mit vier verschiedenen Belägen, so wie sie typischerweise in Büro- und Wohngebäuden vorkommen.

2012 ergänzten Graubner und Clanget-Hulin [111] die Untersuchungen und Dokumentationen um Verbundbauteile im Außenbereich. Analysiert wurden neun verschiedene Wärmedämmverbundsysteme auf vier unterschiedlichen tragenden Wänden (wobei nicht alle Kombinationen untersucht wurden) und 14 Flachdachbeläge auf Stahlbeton- oder Trapezblechdecken.

In beiden Versuchsreihen wurden keine besonders rückbaufreundlichen Konstruktionen mit recyclingfähigen Baustoffen untersucht, sondern hybride Bauteile, die der damaligen (und heute noch aktuellen) Baupraxis entsprachen.

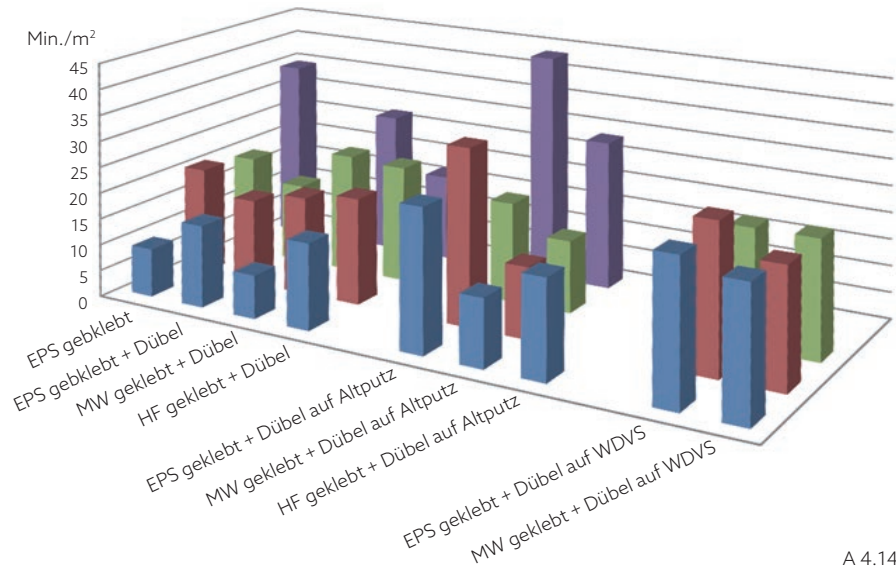
Ziel der Forschung war es, die Umweltwirkungen von Instandsetzungs- und Modernisierungsmaßnahmen im Hinblick auf den Energie- und Materialverbrauch zu analysieren und eine Methode zur Bewertung der Trennbarkeit unterschiedlicher Materialien bei hybriden Bauteilen zu entwickeln.

Systematik

Nach dem Aufbau der Bauteile in Versuchsständen wurden die material-spezifischen Schichten selektiv bis auf die tragende Konstruktion zurückgebaut, wobei der Zeitaufwand (in h/m²) und der Energieverbrauch (in Wh/m²) sowie die Materialverluste (mit Verunreinigungen) dokumentiert wurden. Abb. A 4.14 zeigt beispielhaft die Ergebnisse der Untersuchungen zum Rückbauaufwand.

In der Auswertung wurden die Umweltwirkungen mithilfe einer Ökobi-

- Stahlbeton
- KS-Wand
- Poro-ton-Wand
- Porenbeton-Wand



A 4.14

Wert aus der Untersuchung	Definition	Bewertungspunkte	Bewertung	Gesamtbewertung
Minimalwert	Zielwert	10	sehr gut	200 - 260
		7,5*	gut	150 - 200
Median	Referenzwert	5,0	mittel	100 - 150
		2,5*	schlecht	50 - 100
Maximalwert	Grenzwert	0	sehr schlecht	0 - 50

* Zwischenwerte ergeben sich durch Interpolation

A 4.15

lanz für die Sanierungsphase ermittelt. Dabei wurden die Belastungen und Gutschriften für die Stoffströme sowie die Energieaufwendungen für den Rückbau und durchschnittliche Transporte einbezogen (Module B2-5 und C1-4, siehe Kapitel 2, Abb. A 2.9).

Während der Rückbauaufwand in der ersten Studie für die Innenbauteile (2010) noch anhand einer numerischen Skala eingestuft wurde, wurden die ökonomischen Auswirkungen der Rückbaueigenschaften der Außenbauteile (2011/12) durch eine Berechnung der Rückbau- und Entsorgungskosten analysiert. Hierfür wurde der in den Versuchsständen ermittelte Arbeitsaufwand mithilfe eines durchschnittlichen Stundenlohns monetär bewertet und als Rückbaukosten ausgewiesen. Zusätzlich wurden die Entsorgungskosten anhand von recherchierten Kostenkennwerten berechnet. Beide Kostenarten wurden in Euro/m² Fläche für jedes Musterbauteil umgerechnet.

Die gemeinsame Bewertung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen orientiert sich an den beiden deutschen Bewertungssystemen für Nachhaltiges Bauen DGNB und BNB. Da sowohl die Ökobilanz als auch die Lebenszykluskosten mit der gleichen (inzwischen leicht veränderten) Gewichtung in die Nachhaltigkeitsbewertung eingehen, werden in den beiden Forschungsprojekten von Graubner et al. die Umweltwirkungen und der Rückbauaufwand ebenfalls gleich gewichtet bewertet. In der neueren Studie wurden für die beiden Kriterien analog zur Bewertung nach DGNB und BNB die Minimalwerte aus der Versuchsreihe als Zielwerte, die Mediane als Referenzwerte und die Maximalwerte als

A 4.14 Vergleich der Arbeitsaufwände zum Rückbau von WDVS an unterschiedlichen Untergründen [111]

A 4.15 Bewertung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Rückbaueigenschaften nach Graubner und Clanget-Hulin in Anlehnung an DGNB und BNB

Grenzwerte definiert. Daraus wurden die Punktbewertungen nach Abb. A 4.15 abgeleitet.

Anwendbarkeit

Die Analysemethoden von Graubner et al. zielen auf die Bemessung der ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Rückbau- und Entsorgungseigenschaften von Baukonstruktionen. Dieser Ansatz ist im Prinzip hilfreich für die Planung nachhaltiger Bauwerke, insbesondere vor dem Hintergrund einer DGNB- oder BNB-Zertifizierung.

In der Planungspraxis sowie in den zuvor beschriebenen Zertifizierungssystemen haben die Auswertungen von Graubner et al. jedoch kaum Beachtung gefunden. Dies mag daran liegen, dass nur ausgewählte Konstruktionen untersucht wurden, aber auch daran, dass die Ergebnisse nur begrenzt hilfreich sind, da nicht der gesamte Lebenszyklus betrachtet wurde. Die Herstellung (Pre-Use-Phase) wurde gar nicht einbezogen. Außerdem wurden die Rückbaukosten nur eingeschränkt berücksichtigt. So wurden zwar Arbeitszeitkosten, nicht aber Maschinenkosten berechnet.

Weiterhin sind die Auswertungen wenig anschaulich und nicht praxisgerecht aufbereitet worden. Ein Planungstool wurde nicht entwickelt.

Für eine kreislaufgerechte Planung lassen sich die Ergebnisse nicht verwenden, da die untersuchten Konstruktionen nicht auf eine stoffliche Verwertbarkeit oder gar Wiederverwendbarkeit ausgerichtet sind.

Obwohl z. B. Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) mit verklebtem Polystyrol (EPS) oder verklebten und verdübelten Holzfaserplatten in der Regel eher schwer lösbar und nicht recyclingfähig sind, werden sie in der Studie von 2012 insgesamt mit „gut“ bewertet und schneiden im Vergleich am besten ab, wobei keines der untersuchten WDVS ökologische und ökonomische Anforderungen gleichermaßen erfüllt. Dies liegt daran, dass keine kreislaufgerechten Konstruktionen, so wie wir sie heute verstehen, untersucht wurden.

Die Daten, auf denen die Ergebnisse beruhen, sind inzwischen veraltet. Die Datensätze der verwendeten Datenbank Ökobaudat wurden 2013 an die neue DIN EN 15978 angepasst. Darüber hinaus dürfen nach BNB die Gutschriften für energetische Verwertung (abgebildet im Modul D der Ökobilanz) heute nicht mehr verrechnet werden.

Insgesamt kann die Ökobilanzierung, wie bereits mehrfach erwähnt, die Effekte des Recyclings nur eingeschränkt abbilden, da die Datengrundlage für die End-of-Life-Phase, insbesondere im Hinblick auf stoffliche Verwertung, nicht ausreichend ist.

Die Zwischenergebnisse der Versuchsreihe lassen sich dennoch gut für andere Bewertungsmethoden verwenden. **Die Messungen Graubners zum Rückbauaufwand von Verbundbauteilen in Form von Arbeitszeit und Energie sind dokumentiert, unterliegen keinen großen Veränderungen und können in einen Bauteilkatalog für den Urban Mining Index überführt werden** (s. Kapitel 6.4.2). **Sie müssen jedoch um weitere Konstruktionen, insbesondere rückbau- und recyclingfähige Bauteilaufbauten, ergänzt werden, um eine breitere Spanne abzubilden.**

ENTSORGUNGSWEG	1	2	3	4	5
RECYCLING	Wiederverwendung bzw. -verwertung zu technisch gleichwertigem Sekundärprodukt oder -rohstoff	Recyclingmaterial wird mit geringem Aufwand sortenrein gewonnen und kann hochwertig verwertet werden.	Recyclingmaterial ist verunreinigt, kann mit höherem Aufwand rückgebaut und nach Aufbereitung verwertet werden	Downcycling	Kein Recycling möglich
VERBRENNUNG	Hoher Heizwert (> 2.000 MJ/m ³ ; natürliche Metall- und Halogengehalte im ppm-Bereich, sortenreines Material	Wie 1, jedoch nicht sortenrein; Anteil an nicht-organischen Fremdstoffen beträgt < 3 M-%	Wie 1 oder 2, jedoch mittlerer Heizwert (500- 2.000 MJ/m ³) oder geringfügige Metall- o. Halogengehalte (< 3 M-%)	Hoher Stickstoffgehalt, hoher Anteil mineralischer Bestandteile oder erhöhter Metall- oder Halogengehalt (3-10 M-%)	Hoher Metall- oder Halogengehalt
DEPONIERUNG	Zur Ablagerung auf Inertabfalldeponie geeignete Abfälle	Zur Ablagerung auf Baurestmassen geeignete Abfälle ohne Verunreinigungen	Materialien mit geringem Anteil nichtmineralischer Bestandteile, z.B. mineralische Baurestmassen mit organischen Verunreinigungen	Gipshaltige, faserförmige oder mineralisierte organische Materialien sowie Materialien mit erhöhtem Anteil nichtmineralischer Verunreinigungen.	Organisch-mineralischer Verbund; Metalle als Verunreinigungen von Baurestmassen

A 4.16

4.3.2. Angewandte Forschung

Der Entsorgungsindikator des IBO

Zur Darstellung von Entsorgungseigenschaften hat das Österreichische Institut für Bauen und Ökologie (IBO) unter Leitung von Figl (ehemals Mötzl) „eine semiquantitative Bewertungsmethode entwickelt, die sich aus einer Einstufung der Entsorgungseigenschaften der Baustoffe und der daraus zusammengesetzten Baukonstruktionen eines Gebäudes (unter Berücksichtigung der Verbindungen der Baustoffschichten und Bauteilkonstruktionen untereinander) zusammensetzt“. Die Methode wurde im Jahr 2003 erstpubliziert [112] und unter Beteiligung des Österreichischen Ökologie Instituts (OOI) [113] weiterentwickelt. 2012 wurde der Entsorgungsindikator V1.0 [114] vom IBO eingeführt und 2018 von der aktuellen, ergänzten Version, dem Entsorgungsindikator EI10 [115], abgelöst. Der Indikator ist unter anderem Bestandteil des Bewertungssystems Total Quality Building (TQB), des Gütesiegels der Österreichischen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (ÖGNB).

Systematik

Beurteilt werden im EI 10

1. der aktuelle Entsorgungsweg der Baustoffe, der zum jetzigen Zeitpunkt überwiegend (d. h. zumindest zu 80%) beschriftet wird, und
2. das Verwertungspotenzial, das „bei Verbesserung der Rahmenbedingungen bis zum angenommenen Zeitpunkt der Entsorgung des Bauprodukts aus wirtschaftlicher und technischer Sicht möglich wäre“ [116].

Abb. A 4.16 zeigt die Einstufung der Baustoffe in den drei definierten Entsorgungswegen Recycling, Verbrennung und Deponierung auf einer fünfstufigen Skala.

Die Quantifizierung im EI10 erfolgt nach Volumen.

Die Entsorgungseinstufung eines Materials ist der Faktor, mit dem das Volumen multipliziert wird, d. h., für einen Baustoff mit der Entsorgungseinstufung 3 wird das dreifache Abfallvolumen berechnet.

Im zweiten Schritt wird das Verwertungspotenzial der Baustoffe betrachtet: Es reduziert (oder erhöht) die zu beseitigende Abfallmenge auf einer fünfstufigen Skala gemäß der Zuordnung in Abb. A 4.17.

Die Tabelle muss wie folgt interpretiert werden: Von einem Baustoff mit

dem Verwertungspotenzial 1 fallen nur 25% als Abfall an, während 75% recycelt werden.

Die Nutzungsdauern werden berücksichtigt, indem für jedes im Bauteil eingesetzte Material das zur Entsorgung anfallende Volumen inkl. Austausch und Erneuerung im Betrachtungszeitraum (je nach Bewertungssystem) berechnet wird. Wenn funktionsrelevante Bauteilschichten (z. B. Abdichtungen) unter Bauteilschichten mit längerer technischer Nutzungsdauer liegen, so wird ein Austausch aller tangierten und nicht zerstörungsfrei aus- und wiedereinbaubaren Schichten einkalkuliert.

Das Ergebnis des Entsorgungsindikators einer Bauteilschicht ist also das Produkt aus dem Volumen des Materials pro m², der Entsorgungseinstufung und dem Prozentsatz der Abfallreduktion/-erhöhung:

$$V/m^2 \times \text{Entsorgungsfaktor} \times \text{Abfallreduktion/-erhöhung} = EI/m^2$$

Der Berechnungsleitfaden des IBO [115] enthält eine Aufstellung beispielhafter Baustoffe mit jeweiliger Zuordnung der Entsorgungseinstufung und des Verwertungspotenzials (Abb. A 4.18).

Demnach ergibt sich für eine 20 cm starke Betonplatte (ohne Austauschbedarf), die mit einer Bitumenabdichtung verunreinigt wird, eine Entsorgungskennzahl bzw. ein bewertetes Volumen von:

$$0,2 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times 2 \times 75\% = 0,3 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

Würde die Betonplatte nicht verunreinigt, ergäbe sich ein bewertetes Volumen von 0,2 m³/m² (0,2 x 2 x 50% = 0,2).

Verwertungspotenzial	Abfallreduktion oder -erhöhung
1	25 %
2	50 %
3	75 %
4	100 %
5	125 % *

* Für die Beseitigung eines Baustoffs mit Verwertungspotenzial 5 wird zusätzliches Material zur Aufbereitung benötigt, daher wird die Abfallmenge um 25 % erhöht (125 %)

A 4.17

Baustoff	Entsorgungseinstufung	Verwertungspotenzial
Stahlbeton und Normalbeton	2	2
• in Kombination mit bituminöser Abdichtung	2	3
• in Kombination mit zementgeb. EPS-Schüttung	2	3
Estrichbeton	3	4
• in Kombination mit Bodenbelag schwimmend verlegt	2	3
Armierungsstahl	2	1
Holz (Brettschichtholz, Schnittholz)	1	1
Glas-, Stein-, und Mineralwolle		
• als Fassadendämmplatte	4	3
• als Trittschalldämmplatte	4	3
• zwischen Holzkonstruktionen oder Gipsständerwand	3	3
Schaumglasplatte	3	3
• mit Bitumen vergossen	3	4
EPS-Dämmung (Standard)	5	4
EPS-Dämmung (HBCD-frei)	4	3
Wärme- oder Sonnenschutzverglasung	2	2
Fensterrahmen		
• Holz-Alu	2	2
• PVC	4	3
• Alu (wärmegeklämmt*)	3	2
• Holz *	3	3

* keine weitere Angaben (zum Dämmstoff oder zur Beschichtung)

- A 4.16 Entsorgungseinstufung der Baustoffe im Entsorgungsindikator EI10 des IBO [117]
- A 4.17 Einstufung des Verwertungspotenzials mit Zuordnung der (fiktiven) Reduktion/Erhöhung der betrachteten Abfallmengen im Entsorgungsindikator EI10 des IBO [118]
- A 4.18 Beispielhafte Baustoffe/Bauteilschichten mit Zuordnung der Entsorgungseinstufung und des Verwertungspotenzials im Entsorgungsindikator EI 10 des IBO [119]

A 4.18

Das Ergebnis des Entsorgungsindikators einer Konstruktion (EI KON) ist die Summe der gewichteten Volumen der Bauteilschichten. Aus den EI KON aller Konstruktionen wird durch flächengewichtete Mittelung der Entsorgungsindikator des Gebäudes errechnet. Seit 2018 werden die Ergebnisse auf Gebäudeebene um den Faktor 10 erhöht, woraus sich auch der neue Name EI10 ableitet. Auf einer Skala von 10 bis 45 werden Gebäude wie folgt bewertet:

- Mindestanforderung: EI10 \leq 45,0
- Bestbewertung: EI10 \leq 20,0

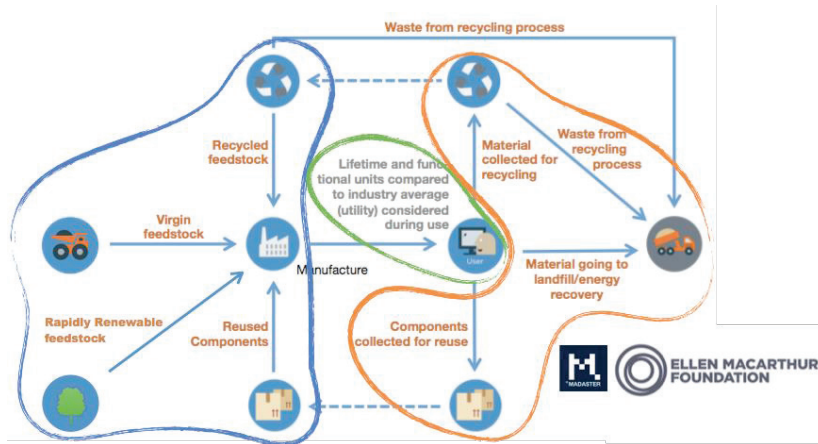
Anwendbarkeit

Mit Blick auf die beschriebene Systematik stellen sich folgende Fragen: Was bedeuten diese Zahlen nun? Im Grunde ist das Ergebnis ein bewertetes Volumen, aber was kann der Anwender mit dem bewerteten Volumen anfangen? In welche Beziehung kann er es setzen, außer auf der vorgenannten Skala einzuordnen? Das Ergebnis scheint insgesamt wenig aussagekräftig.

Außerdem bleiben Fragen zur Bewertung der Baustoffe/Konstruktionen offen: Warum wird z. B. Stahlbeton, auch wenn er nicht verunreinigt ist, als „hochwertiges Recycling“ eingestuft, obwohl es sich um ein Downcycling handelt? Warum kann mit Deponierung und Verbrennung überhaupt eine positive Bewertung erzielt werden, obwohl die Materialien dabei verloren gehen und diese Entsorgungswege nach Abfallrahmenrichtlinie (s. Kapitel 3.1.2, Abb. A 3.3) am unteren Ende der Hierarchie stehen? Auf welche Erkenntnisse stützt sich die Einordnung der Verwertungspotenziale?

Diese Fragen bleiben nach der Analyse der Bewertungsmethodik des IBO offen. Im Rahmen eines Forschungsprojekts [113] hat das IBO zwar über eine Literaturrecherche und Befragung von Herstellern sowie von Entsorgungsunternehmen und -verbänden Daten zur Entsorgung der Baumaterialien erhoben, aber die Rückbauprozesse wurden nach Recherche der Verfasserin dieser Arbeit vernachlässigt. Es fanden weder empirische Untersuchungen zum Rückbau statt, noch waren Experten aus der Abbruchbranche involviert. Infolgedessen wird der Aufwand für den Rückbau bei der Bewertung nicht berücksichtigt. Weiterhin wird der ökonomische Wert der Materialien nicht berücksichtigt, obwohl dies ein wichtiger Faktor bei der Rückgewinnung von Wertstoffen ist, wie der Name schon sagt.

Insgesamt ist das Bewertungssystem des IBO zu sehr auf die herkömmliche Entsorgung ausgerichtet. Das Kreislaufpotenzial der Konstruktionen wird nicht abgebildet. Die Verwendung von Sekundärrohstoffen schon bei der Herstellung der Baustoffe geht nicht in die Bewertung ein. Das Schließen von Kreisläufen in der Pre-Use-Phase wird somit ebenfalls nicht abgebildet.



A 4.19 Systemgrenzen der Messmethodik im Madaster Circularity Indicator: Bauphase (blau) Nutzungsphase (grün) End-of-Life Phase (orange) [124]

Madaster Circularity Indicator

Madaster ist ein webbasiertes Kataster (Register), in dem Identität und Einsatzort von Materialien in Gebäuden mithilfe eines Materialpasses registriert werden können. Es wurde 2017 von der Betriebswirtin Sabine Oberhuber und dem Architekten Thomas Rau [123] in den Niederlanden initiiert und von der Madaster Foundation entwickelt. Rau betrachtet Abfall als „Material ohne Identität“, das aufgrund seiner Anonymität keinen Wert besitzt. Deshalb soll jedes Material registriert werden und mit einem „Pass“ eine Identität (Zusammensetzung, Menge, Herkunft etc.) erhalten.

Der Madaster-Zirkularitätsindikator (Circularity Indicator – CI) wurde von der Madaster Services B.V. [124] parallel zu der hier vorliegenden Arbeit entwickelt und im April 2018 veröffentlicht. Er soll nach Oberhuber und Rau andeuten, „in welchem Maß der Entwurf und die Verarbeitung der Materialien ihre Wiederverwertbarkeit garantieren“. Ziel ist es, die zirkulär orientierte Gebäudeplanung zu verbessern und den zirkulären Wert von Gebäuden zu erhöhen. Dieses Ziel deckt sich insofern mit der hier vorliegenden Arbeit. Um den Unterschied der Bewertungsmethoden herauszuarbeiten, wird die Systematik des Madaster CI im Folgenden detailliert beschrieben.

Systematik

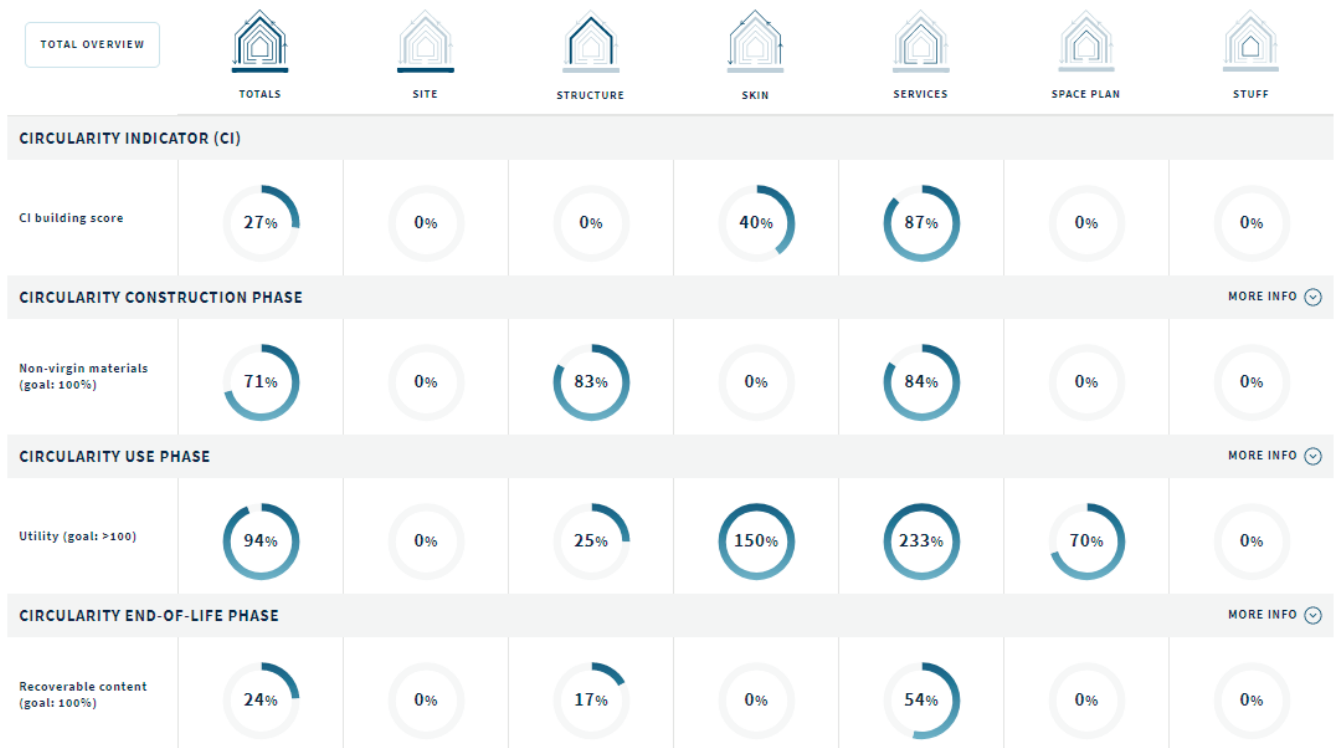
Der Madaster CI basiert auf dem von der Ellen MacArthur Foundation entwickelten „Material Circularity Indicator“ [125]. Er wird für das Gesamtgebäude auf einer Skala von 0 bis 100% abgebildet und bezieht sich auf die im „Materialpassport“ bzw. in der Madaster-Datenbank erfassten Daten. Dem Madaster CI geht eine Masterarbeit von Verbene [128] voraus, in welcher der Absolvent der TU Eindhoven 2016 einen Ansatz zum Messen der Zirkularität eines Gebäudes entwickelt hat.²⁴

In die Berechnung des Madaster CI gehen die in Abb. A 4.19 dargestellten Lebenszyklusphasen Bau, Nutzung und End of Life ein.

Grundprinzipien hierbei sind:

1. Verwendung von so vielen recycelten und/oder wiederverwendeten und/oder schnell erneuerbaren Materialien wie möglich

²⁴ Verbene ist für Copper8 tätig, eine niederländische Unternehmensberatung, die an der Entwicklung des Madaster CI mitgewirkt hat. Auf die Masterarbeit von Verbene wird hier nicht weiter eingegangen, da die darin vorgestellte Systematik (Building Circularity Indicator) dem Madaster CI sehr ähnlich ist und offensichtlich weiterentwickelt wurde.



A 4.20

2. Verlängerung der Nutzungsdauer durch Verwendung von Produkten mit überdurchschnittlicher Nutzungsdauer (im Branchenvergleich)
3. Sammeln von so vielen Materialien und Produkten zum Recycling und zur Wiederverwendung wie möglich

Der Madaster CI Score wird nach der Gebäudelaye-Theorie von Brand [126] getrennt für die sechs Elemente Grundstück, Tragwerk, Gebäudehülle, Technische Ausrüstung, Innenausbau und Ausstattung ermittelt. Der nach Massen gewichtete Durchschnittswert wird in einer Gesamtbewertung des Gebäudes dargestellt (s. Abb. A 4.20).

Die relevanten Gebäudedaten können mithilfe einer IFC- (BIM) oder Excel-Datei auf die Madaster Plattform hochgeladen werden. Die Elemente müssen nach dem NL-SfB-Standard²⁵ [127], einer niederländischen Klassifizierung von Bauelementen, basierend auf der schwedischen SfB-Codierung, strukturiert sein. Die Codes setzen sich aus Inhalten von fünf umfangreichen Tabellen zusammen, womit unter anderem Konstruktionsmethoden und (Bau-)Materialien nach Art und Eigenschaften verschlüsselt werden (s. Beispiel in Abb. A 4.21).

Da in den NL-SfB-Tabellen keine Zirkularitätsdaten verschlüsselt sind, werden die hochgeladenen Gebäudedaten mit Daten aus der vorhandenen Madaster-Datenbank²⁶ automatisch verknüpft. Vom Anwender (z. B. Architekten) können aber auch Zirkularitätsdaten manuell eingegeben werden. Anschließend werden die im Folgenden dargestellten Komponenten auf Material- und Produktebene errechnet [124]²⁷.

A 4.20 Darstellung der Komponenten des Madaster Circularity Indicators auf der Madaster-Plattform [131]

A 4.21 Beispiel für eine Codierung von Gebäudedaten nach den Tabellen des NL-SfB-Standard [127]

A 4.22 Beurteilung der Demontagefähigkeit von Bauprodukten und -materialien im Madaster Circularity Indicator [124]

25 NL/SfB wird z. B. verwendet, um Layer und Objekte in BIM- und CAD-Systemen zu kodieren und Informationen von Anbietern von Bauprodukten zu organisieren.

26 Es ist nicht transparent, woher die in der Datenbank hinterlegten Zirkularitätsdaten kommen (siehe „Anwendbarkeit“ auf Seite 84)

27 Die Formeln sind der Beschreibung zum Madaster Circularity Indicator entnommen;

1. Bauphase (Konstruktion)

$$CI_{Konstruktion} = F_R + F_{RR} + F_U$$

- F_R Anteil (Fraction) an Recyclingmaterial (in % der Produktmasse)
- F_{RR} Anteil an schnell nachwachsenden Rohstoffen (rapidly renewable materials, in % der Produktmasse)
- F_U Anteil wiederverwendeter Produkte und/oder Komponenten (Re-Use, in % der Produktmasse)

2. Nutzungsphase

Um den Zirkularitätsindikator der Nutzungsphase zu ermitteln, wird die potenzielle Nutzungsdauer mit der branchenüblichen Nutzungsdauer nach der Buildinglayer-Theorie von Brand ins Verhältnis gesetzt.

$$CI_{Nutzung} = L / L_{av}$$

- L Mögliche Nutzungsdauer eines Produkts in Jahren
- L_{av} Branchenübliche Nutzungsdauer eines Gebäudelayers (Element nach Brand) in Jahren

3. End-of-Life-Phase

Um den Zirkularitätsindikator für die End-of-Life-Phase zu generieren, muss der Anwender das potenzielle Nachnutzungsszenario für jedes Material und/oder Produkt angeben. Recycling und Wiederverwendung gehen in den CI ein, während Verbrennung und Deponierung als nicht-zirkuläre Szenarien außen vor bleiben.

$$CI_{End-of-Life} = C_R \cdot E_C + C_U$$

- C_R Anteil von Materialien, die am Ende ihrer Nutzungsdauer potenziell recycelt werden können (in % der Produktmasse)
- E_C Effizienz²⁸ des Recyclingprozesses in der End-of-Life-Phase (%)
- C_U Anteil von Komponenten und/oder Produkten, die am Ende ihrer Nutzungsdauer potenziell wiederverwendet werden können (in % der Produktmasse)

Um die Demontierbarkeit in die Bewertung einzubeziehen, müssen die zu erfassenden Produkte die in Abb. A 4.22 dargestellten Bedingungen hinsichtlich der Demontagefähigkeit erfüllen. Eine genauere, quantitative Bewertung des Rückbauaufwands erfolgt offensichtlich nicht.

Auf Gebäudeebene wird der Zirkularitätsindikator genau andersherum berechnet, nämlich unter Berücksichtigung des linearen (nicht zirkulären) Teils der Materialflüsse (Linear Flow Index – LFI) und des Nutzungsfaktors:

$$CI = 1 - LFI \cdot F(X)$$

Der LFI ist der Quotient aus der Summe der für die Herstellung verwendeten nicht erneuerbaren Primärrohstoffe zuzüglich der Summe aller

NL/SfB	32	(22)	R o1	(G5/6)
Tabelle 0 Gebäude/Raum: Büro				
Tabelle 1 Bauelement: Innenwand				
Tabelle 2 Konstruktion: R starre Platten				
Tabelle 3 Material: o1 transparentes Glas				
Tabelle 4 Eigenschaften G5 Farbe = grün G6 Transparenz = 50%				

A 4.21

Beurteilung der Demontagefähigkeit von Produkten

Die Montagepunkte sind leicht zugänglich und das Produkt kann leicht entfernt werden, ohne dass andere Gebäudeteile beschädigt werden Ja / Nein

Das Produkt kann mit Standardwerkzeugen leicht abgenommen und demontiert werden, ohne das Produkt oder die Produkte, an denen es befestigt ist, zu beschädigen Ja / Nein

Das Produkt wird mit vorgefertigten Klammern und Klemmen mit standardisierten Montagemethoden installiert Ja / Nein

A 4.22

die Erläuterungen dazu sind hier ins Deutsche übersetzt worden.

28 Der Effizienzfaktor bestimmt den Anteil an Materialien, der wieder in den Kreislauf zurückgeführt wird. So können beispielsweise die Feinanteile (< 2 mm) beim Betonrecycling derzeit noch nicht verwertet werden und landen in der Regel auf der Deponie.

Abfälle, die nach der Nutzungsdauer der Produkte auf einer Deponie oder in einer Verbrennungsanlage landen, und der doppelten Masse aller eingesetzten Baumaterialien zuzüglich der Abfälle, die durch die Recyclingprozesse erzeugt werden. Die Formel für den LFI lautet wie folgt:

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F - W_C}{2}}$$

Sie besteht aus folgenden Unterformeln:

$$V = M(1 - F_R - F_{RR} - F_U)$$

V Masse der bei der Produktherstellung verwendeten Primärrohstoffe (kg)

M Produktmasse (kg)

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2}$$

W Abfallmasse (kg)

W_0 Abfallmasse (kg), die nach der Nutzungsdauer eines Produkts (direkt) auf einer Deponie oder in einer Verbrennungsanlage landet

W_F Abfallmasse (kg), die durch den Recyclingprozess erzeugt wird, der die zur Herstellung eines Produkts verwendeten Materialien liefert (d. h. der Anteil, der nicht verwertet werden konnte)

W_C Abfallmasse (kg), die durch den Recyclingprozess nach der Nutzungsdauer des Produkts entsteht (d. h. der Anteil, der nicht verwertet werden kann)

$$W_0 = M(1 - C_R - C_U)$$

C_R Anteil von Materialien mit einem Abfall-Recycling-Szenario (in % der Produktmasse)

C_U Anteil von Materialien mit einem Szenario zur Wiederverwendung von Abfällen (in % der Produktmasse)

$$W_F = M \frac{(1 - E_F) F_R}{E_F}$$

E Effizienz des Recyclingprozesses, der die Materialien liefert, um ein Produkt herzustellen (%). Es wird ein Standardwert von 75% angesetzt (der manuell geändert werden kann), solange die erforderlichen Daten nicht verfügbar sind.

$$W_C = M(1 - E_C) * C_R$$

E_C Effizienz des Recyclingprozesses (%) für ein Produkt mit einem Abfall-recycling-Szenario. Es wird ein Standardwert von 75% angesetzt (der manuell geändert werden kann), solange die erforderlichen Daten nicht verfügbar sind.

Der Nutzungsfaktor $F(X)$ berechnet den Einfluss der Nutzungsdauer eines Produkts. Die Formel lautet:

$$F(X) = \frac{0,9}{X} \quad \text{mit } X = \frac{L}{L_{av}}$$

0,9	Gebrauchskonstante
L	Potenzielle Nutzungsdauer des Produkts (in Jahren)
L_{av}	Branchenübliche Nutzungsdauer des Produkts (in Jahren)

Die Gebrauchskonstante stellt sicher, dass vollständig lineare Produkte mit einer potenziellen Nutzungsdauer, die der durchschnittlichen Nutzungsdauer der Branche entspricht, eine Bewertung von 0,1 erhalten. Ein Gebäude, das also zu 100% aus nicht-zirkulären Materialien besteht, die aber zumindest der durchschnittlichen Lebensdauer entsprechen, hat demnach einen Zirkularitätsindikator von 10%.

Dagegen hätte ein Bauwerk, das zu 100% aus Sekundärmaterialien oder nachwachsenden Rohstoffen besteht, die nach der Nutzungsdauer vollständig (zu 100%) recycelt oder wiederverwendet werden können, ohne dass durch diese Prozesse weitere Abfälle entstehen, hätte einen Zirkularitätsindikator von 100%, und zwar unabhängig von der potenziellen Nutzungsdauer der Materialien: Denn wenn der lineare Teil der Materialflüsse (LFI) gleich Null ist, wirkt sich die Multiplikation mit dem Nutzungsfaktor nicht aus.

Für ein Betonbauteil von 1.000 kg mit 390 kg²⁹ rezyklierter Gesteinskörnung, das zu 100% recycelbar ist (sortenrein), wobei die Effizienz des Recyclingprozesses 50%³⁰ beträgt, und bei dem davon ausgegangen werden kann, dass die potenzielle Lebensdauer der branchenüblichen entspricht, ergibt sich folgender Circularity Indicator:

$$\begin{aligned} CI &= 1 - \frac{610 \text{ kg} + 0 \text{ kg} + \frac{390 \text{ kg} + 500 \text{ kg}}{2}}{2.000 \text{ kg} + \frac{390 \text{ kg} - 500 \text{ kg}}{2}} \times \frac{0,9}{1} \\ &= 0,51 \text{ oder } 51\% \end{aligned}$$

Um die (Un-)Vollständigkeit des Datensatzes in der Madaster-Datenbank zu berücksichtigen, wird der CI-Wert für Gebäude um zwei Korrekturfaktoren angepasst. Hierfür wird das Ergebnis zunächst mit dem Prozentsatz der Massen, für den die Materialien bekannt sind, und anschließend mit dem Prozentsatz der Massen, für den eine NL-SfB-Codierung verfügbar ist, multipliziert. Wäre kein einziges Material bekannt (hätte also keine „Identität“), würde der CI 0,0 bzw. 0% betragen.

Der Anwender kann die Madaster-Datenbank „anreichern“, indem er selbst ein Produkt in der Datenbank anlegt und mit Material- oder Zirkularitätsdaten hinterlegt. Inwieweit diese Daten von Madaster geprüft werden, ist nicht bekannt.

29 Nach Hillebrandt/Seggewies [129] beträgt das Material-Loop-Potenzial (MLP) von Konstruktionsbeton (durch Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung) 39%.

30 Beim Betonrecycling beträgt der nicht verwertbare Feinanteil ca. 50% [130].

Um die Plattform weiterzuentwickeln, wollen die Betreiber Verknüpfungen zu externen Datenbanken mit Herstellerdaten herstellen. Nach Auffassung der Verfasserin dieser Arbeit kann dies nur mit wissenschaftlicher Überprüfung oder unabhängiger Drittzertifizierung, z. B. nach ISO 14020 Typ I und III (s. Kapitel 4.2.1), erfolgen.

Anwendbarkeit

Der Madaster CI ist eine quantitative Methode, mit der die Zirkularität von Gebäuden messbar gemacht wird. Die Ergebnisse sind gut ablesbar in Kreisdiagrammen dargestellt. Die Systematik berücksichtigt die Effizienz von Recyclingprozessen, indem dabei entstehende, nicht verwertbare Abfälle einkalkuliert werden.

Ein großer Pluspunkt ist die Registrierung des Gebäudes und seiner Materialien in einer zentralen Datenbank, wodurch die Bewertung während der Nutzungsphase des Gebäudes überwacht und angepasst werden kann. So besteht die Möglichkeit, die Daten nach Instandhaltungs- und Umbaumaßnahmen zu aktualisieren. Technische Innovationen in Recyclingprozessen oder Änderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen, die einen Einfluss auf die End-of-Life-Szenarien von Materialien haben, können eingepflegt werden und zu angepassten Bewertungen führen.

Die Bewertung von Materialien in der Madaster-Datenbank ist allerdings nicht transparent. So sind weder Zirkularitätsdaten von vorbewerteten Produkten oder Materialien (wie Sekundärrohstoffanteile oder Effizienzdaten zu Recyclingprozessen) noch typische Materialzuordnungen zu den End-of-Life-Szenarien ersichtlich. Der Release-Beschreibung zum Madaster CI [131] ist lediglich in einem Bildschirmauszug (Screenshot aus der Software) zu entnehmen, dass Materialzusammensetzungen auf Produktebene nach %-Anteilen von

- Stein (mineralisch),
- Holz,
- Glas,
- Metall,
- Kunststoff,
- Organischem und
- Unbekanntem

aufgeschlüsselt werden.

Die Recyclingfähigkeit kann anhand dieser groben Einteilung keinesfalls beurteilt werden. Wissenschaftliche Untersuchungen oder Datenerhebungen wurden bisher nicht beschrieben.

Bei der Zuordnung der End-of-Life-Szenarien wird das Recycling (stoffliche Verwertung) außerdem nicht weiter differenziert. Eine Verwertung unter Qualitätsverlust (Downcycling) wird bisher gleichgesetzt mit einer Verwertung zu vergleichbaren Produkten [134].

Der Rückbauaufwand wird auch bei dieser Bewertungsmethodik vernachlässigt. Die qualitative Beurteilung der Demontagefähigkeit nach Abb. A 4.22 ist nicht aussagekräftig und gibt keine quantitative Berücksichtigung des Rückbauaufwands vor, sodass auch im Madaster CI dessen Einfluss auf die Wiedergewinnung von Material nicht ersichtlich wird.

Der reine Materialwert eines Gebäudes kann aktuell über die Madaster-Datenbank ermittelt werden. Das ist durchaus ein Vorteil für Immobilienbesitzer, Abbruchunternehmer und andere. Jedoch ist bisher nicht transparent, auf welcher Datenbasis der Wert ermittelt wird. Bei Metallen ist dies relativ einfach, da Schrotte an Sekundärrohstoffbörsen gehandelt werden. Aber wie wird z.B. der Wert der mineralischen Abbruchmaterialien gemessen? Zurzeit ist dieser Wert negativ, da in der Regel Entsorgungsgebühren anfallen. Statistiken über Entsorgungsgebühren werden jedoch bisher nicht geführt.

Außerdem erweckt der reine Materialwert einen falschen Eindruck, da zum einen der Rückbauaufwand nicht berücksichtigt wird; zum anderen können auch Materialien, die nicht den Demontagerkriterien des Madaster CI entsprechen (z.B. Kupferheizrohre in Gussasphaltestrich vergossen) einen hohen Wert haben, der beim Rückbau (z.B. durch Einschmelzen) realisiert werden kann.

Der Madaster CI wurde mit verschiedenen Institutionen entwickelt [134], darunter

- Copper8, Unternehmensberatung für Circular-Economy-Strategien, NL
- EPEA GmbH³¹
- TNO³², Niederländische Organisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung

Universitäre Forschung wurde – abgesehen von der vorausgegangenen Masterarbeit von Verbene – nach Recherchen der Verfasserin dieser Arbeit nicht betrieben.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Methodik eingeschränkt geeignet ist, Kreislaufpotenziale von Gebäuden quantitativ abzubilden. Sie ist sehr praxisorientiert; jedoch fehlen die wissenschaftlichen Grundlagen oder sind nicht transparent dargestellt. So ist die Bewertungsgrundlage undurchsichtig und unvollständig und muss weiterentwickelt werden.

Weitere Arbeiten

Neben den Wissenschaftlern vom IBO und der Madaster Foundation haben sich außerdem Durmisevic [136] und Schwede/Störl [137] mit der Bewertung der Rückbau- und Recyclingfähigkeit von Baukonstruktionen befasst. Durmisevic hat einen Transformationskapazitätsindex (Transformation Capacity Index – TC-Index) entwickelt. Da die Bewertung jedoch nicht quantitativ sondern qualitativ erfolgt, wird die Arbeit hier nicht weiter dargestellt.

Schwede/Störl haben einen „Recycling-Graph“ entwickelt, eine wissenschaftliche Methode zur Analyse der Rezyklierbarkeit von Baukonstruktionen unter besonderer Berücksichtigung der Verbindungstechniken. Eine Zusammenfassung der qualitativen Bewertungsmethode wurde von der Verfasserin der hier vorliegenden Arbeit im Atlas Recycling [138] veröffentlicht.

31 Environmental Protection Encouragement Agency, ehemals Internationale Umweltschutzforschung GmbH, seit 01/2019 Teil des deutschen Projektmanagers Drees & Sommer
 32 Niederländisch: Nederlandse Organisatie voor toegepast-natuurwetenschappelijk onderzoek; die TNO ist eine Körperschaft öffentlichen Rechts und bezieht ihren Erlös zu etwa einem Drittel aus der öffentlichen Hand. [135]

4.4. Zwischenfazit

In den Gebäudezertifizierungssystemen werden die zirkulären Eigenschaften von Baukonstruktionen bisher unzureichend und ungenau abgebildet. Die deutschen Systeme berücksichtigen zwar die Rückbau- und Recyclingfähigkeit am Ende der Nutzungsdauer, die Bewertung erfolgt jedoch rein qualitativ und führt bisher nicht zum Ziel. Die Bewertungsinstrumente werden von den Anwendern bisher kaum zur Optimierung genutzt, da sie schwer handhabbar sind.

Ziel der Zertifizierungssysteme ist es, die Nachhaltigkeit von Bauwerken zu messen. Deshalb sollte der Bewertung des kreislaufgerechten Bauens auch eine quantitativ messbare Methodik zugrunde gelegt werden. Die Ökobilanzierung ist zwar eine quantitative Methode, sie bildet aber die Recyclingaspekte – vor allem in der praktischen Anwendung auf Gebäudeebene – nur unzureichend ab.

Ebenso findet die ökonomische Relevanz des Recyclings in den Zertifizierungssystemen bisher keine Beachtung. Die Kosten für Rückbau und Entsorgung bleiben in der Berechnung der Lebenszykluskosten (LCC) außen vor. Die Begründung für deren Nichtbeachtung lautet oft, dass die End-of-Life-Kosten aufgrund des geringen Anteils an den Gesamtlebenszykluskosten zu vernachlässigen seien – mit Blick auf knapper werdende Ressourcen und steigende Entsorgungskosten ein falsches Signal. Vielmehr fallen diese Kosten aufgrund der angewandten Barwertmethode³³ in der Berechnung der Lebenszykluskosten nicht ausreichend ins Gewicht.

Der eigentliche Grund für die Nichtbeachtung ist auch hier die mangelnde Datengrundlage für die Kosten der End-of-Life-Phase, vor allem, wenn diese nicht pauschal auf Basis von Flächenkennwerten oder Rauminhalten berechnet werden sollen, sondern unter Berücksichtigung der zirkulären Eigenschaften, insbesondere der Kreislaufpotenziale.

Riegler-Floors und Hillebrandt [132] haben im Atlas Recycling für drei Modellprojekte die Lebenszykluskosten kreislaufoptimierter Konstruktionen mit denen konventioneller Konstruktionen unter Berücksichtigung der Rückbau- und Entsorgungskosten verglichen. Im Ergebnis schnitten die kreislaufgerechten Konstruktionen in der Gegenüberstellung besser ab, wobei sich höhere Herstellungskosten durch geringere Instandhaltungskosten und niedrigere End-of-Life-Kosten im Laufe des Lebenszyklus bezahlt machen. Bei dem Vergleich handelt es sich jedoch um Einzelfallbetrachtungen. **Um die End-of-Life-Phase generell bei der Ermittlung der Lebenszykluskosten berücksichtigen zu können, bedarf es weiterer Forschung, die jedoch über die Ziele dieser Arbeit hinausgeht.**

Die bestehenden Produktzertifizierungssysteme wie FSC/PEFC oder Umweltproduktdeklarationen bieten gute Grundlagen, auf denen eine Gebäudebewertung aufbauen kann. Besonders die Ausweisung von

33 Ein oberhalb der Preissteigerungsrate liegender Diskontierungszinssatz bewirkt im Zusammenspiel mit den langen Zeiträumen bis zum Rückbau einen geringen Gegenwartswert der späteren Rückbau- und Entsorgungskosten. Dies führt zu einem verfälschten Bild der tatsächlichen Kosten.

Sekundärrohstoffanteilen oder Angaben zu (nachhaltig) nachwachsenden Rohstoffen bis hin zu Informationen zur Verwertung können Daten für die Berechnung der Kreislaufpotenziale liefern.

Hillebrandt und Seggewies [133] haben diese Informationsquellen durch Recherche bei Bauproduktherstellern und Verbänden ergänzt und im Atlas Recycling übersichtlich zusammengestellt. Hierauf wird im Kapitel 5.1 „Materielle Ebene“ zurückgegriffen.

Von den Forschungsarbeiten und Entwicklungen der letzten Jahre bildet der parallel zu dieser Arbeit entstandene Madaster Circularity Indicator die zirkulären Eigenschaften eines Bauwerks am besten ab. Er berücksichtigt im Gegensatz zum Entsorgungsindikator des IBO den vollständigen Lebenszyklus – von der Herstellung über die Nutzung bis hin zur Verwertung. Die Systemgrenzen entsprechen damit denjenigen, die in dieser Arbeit zugrunde gelegt werden.

Die Recyclingfähigkeit wird zudem quantitativ bewertet, indem die recycelten und recyclingfähigen Massenanteile ermittelt werden – allerdings bisher ohne Berücksichtigung der Qualität des Recyclings. Die Effizienz der Recyclingprozesse soll durch die Berechnung der prozessbedingten Abfälle berücksichtigt werden, wird aber pauschalisiert, solange keine Daten hierfür vorliegen.

Zusammenfassend lassen sich aus der Recherche zum Stand von Forschung und Technik folgende Schlüsse ziehen:

- Keine der Forschungsarbeiten oder angewandten Systeme bildet den Rückbauaufwand und die damit zusammenhängende Wirtschaftlichkeit des selektiven Rückbaus angemessen ab. Dies ist jedoch eine wichtige Voraussetzung für die Rückgewinnung von Wertstoffen.
- Keine der existierenden Methoden berücksichtigt die Grenzen der Einsetzbarkeit von Sekundärrohstoffen in Neuprodukten (Material-Loop-Potenzial).
- Eine Differenzierung zwischen Re- und Downcycling findet in keiner der Methoden statt. Einzig im DGNB-System werden Bonuspunkte gewährt, wenn die eingesetzten Baustoffe auf gleichem Qualitätsniveau werkstofflich verwertbar sind.
- In den angewandten Systemen fehlen wissenschaftliche Grundlagen zur quantitativen Bewertung der Recyclingfähigkeit und des Rückbauaufwands.
- Eine praxisorientierte Systematik zur Bewertung der zirkulären Eigenschaften von Bauwerken ist parallel zu dieser Arbeit entstanden, bedarf aber der Weiterentwicklung, um eine objektive, transparente und wissenschaftlich fundierte Bewertung inkl. des Rückbauaufwands zu ermöglichen.
- Die Arbeiten von Graubner et al. und die Produktzertifizierungssysteme bieten Grundlagen für die Entwicklung von messbaren Parametern zur quantitativen und objektiven Bewertung der Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen.

