

Vergleichende Ökobilanz von Varianten einer Hallenkonstruktion

Studie im Auftrag des Instituts Feuerverzinken GmbH

Schlussfassung / Bilanzversion 5

Freiburg, 28.11.2024

Autorinnen und Autoren:

Carl-Otto Gensch
Hannah Lorösch

Weitere Mitarbeit:

Ran Liu
Kevin Stuber-Rousselle (bis August 2023)

Kontakt

info@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	9
Zusammenfassung	10
1 Hintergrund, Zielsetzung und Anwendung der Studie	29
2 Methodisches Vorgehen	30
2.1 Ökobilanz als methodische Grundlage der Studie	30
2.2 Betrachtete Alternativen	31
2.3 Funktionelle Einheit und Referenzflüsse	32
2.3.1 Auswahl einer exemplarischen Halle	32
2.3.2 Festlegung der funktionellen Einheit	35
2.3.3 Referenzflüsse	36
2.4 Systemgrenze und Abschneidekriterien	38
2.5 Anforderungen an die Datenqualität	45
2.6 Kuppelprodukte, Allokationsverfahren und Gutschriften	46
2.6.1 Prozessallokation	48
2.6.2 Systemallokation	48
2.7 Methode der Wirkungsabschätzung und Auswahl der Wirkungskategorien	49
2.7.1 Auswahl der Wirkungskategorien	50
2.7.2 Nicht berücksichtigte potenzielle Umweltauswirkungen	52
2.8 Modellierungsgrundlage	53
2.9 Iteratives Vorgehen in Bilanzversionen, Basisvergleich und Sensitivitätsanalysen	53
2.10 Normkonformität und Kritische Prüfung	54
3 Grundlagen der Sachbilanz	55
3.1 Herstellung der Hallenkonstruktion	55
3.1.1 Stahlkonstruktion (zur Feuerverzinkung oder Nassbeschichtung)	55
3.1.1.1 Feuerverzinkte Variante	56
3.1.1.2 Nassbeschichtete Variante	59
3.1.2 Holzkonstruktion	62
3.1.3 Stahlbetonkonstruktion	64

3.1.4	Montageaufwand auf der Baustelle	64
3.1.5	Erdaushub für die Fundamente	65
3.2	Unterhalt / Instandhaltung der Hallenkonstruktion	65
3.2.1	Stahlkonstruktion, feuerverzinkt	65
3.2.2	Stahlkonstruktion, nassbeschichtet	66
3.3	Rückbau, Wiederverwendung, Recycling und Entsorgung der Hallenkonstruktion	67
3.3.1	Rückbau	67
3.3.2	Wiederverwendung, Recycling und Entsorgung	68
3.3.2.1	Grundsätzliche Überlegungen	68
3.3.2.2	Modellierung der thermischen Verwertung von Altholz aus dem End-of-Life der Holzkonstruktion	69
3.4	Verwendete Datensätze der Sachbilanz und Bewertung der Datenqualität	70
3.4.1	Verwendete Datensätze	70
3.4.2	Stellungnahme zur Datenqualität	79
4	Auswertung und Diskussion der Ergebnisse	81
4.1	Signifikanz der Ergebnisse	81
4.2	Ergebnisse im Basisszenario	82
4.2.1	Treibhausgaspotenzial	82
4.2.2	Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Energieträger)	84
4.2.3	Landnutzung	85
4.2.4	Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Mineralien und Metalle)	86
4.2.5	Inanspruchnahme von knappen Wasserressourcen	87
4.2.6	Photochemisches Oxidantienbildungs-Potential (POCP)	88
4.2.7	Kumulierter Energieaufwand	89
4.3	Sensitivitätsanalysen	91
4.3.1	Variante Stahlkonstruktion, nassbeschichtet	91
4.3.2	Variante Stahlkonstruktion, feuerverzinkt	93
4.3.3	Vergabe von Gutschriften aus dem End-of-Life	95
4.3.4	Erhöhung der Wiederverwendungsquote von 10% (Basisszenario) auf 50%	97
4.3.5	Alternative Datensätze für Transportbeton unterschiedlicher Festigkeitsklassen	99
5	Auswertung	100
5.1	Identifizierung der signifikanten Parameter	100
5.1.1	Signifikante Parameter aus der Festlegung der betrachteten Ausführungsvarianten und der Definition der Funktionellen Einheit	100

5.1.2	Signifikante Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzungs-Phasen der Ökobilanz	101
5.1.3	Zusammenfassung der erkannten signifikanten Parameter	102
5.2	Beurteilung unter Einbezug der Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen	102
5.2.1	Vollständigkeitsprüfung	102
5.2.2	Sensitivitätsprüfung	103
5.2.3	Konsistenzprüfung	104
5.3	Einschätzung zu Einschränkungen in Hinblick auf Schlussfolgerungen	104
6	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	106
7	Bericht zur Kritischen Prüfung	111
9	Anhang	123
9.1	Ermittlung des Materialaufwands für die untersuchten Tragwerkskonstruktionen	123
9.2	Ergebnisse für alle 16 Wirkungsindikatoren	124
9.3	Detailergebnisse Kumulierter Energieaufwand	126

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Grundstruktur und Teilschritte einer Ökobilanz	31
Abbildung 2-2: Eigenschaften der beispielhaft ausgewählten Halle	33
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der beiden unterschiedlichen statischen Systeme in der von bauforumstahl e.V. herausgegebenen Studie „Ökobilanzieller Vergleich von Hallen unterschiedlicher Bauweisen“	34
Abbildung 2-4: Vereinfachte Darstellung des Lebenswegs und der Systemgrenze für die Variante „Stahlkonstruktion, feuerverzinkt“	40
Abbildung 2-5: Vereinfachte Darstellung des Lebenswegs und der Systemgrenze für die Variante „Stahlkonstruktion, nassbeschichtet“	41
Abbildung 2-6: Vereinfachte Darstellung des Lebenswegs und der Systemgrenze für die Variante „Stahlbetonkonstruktion“	42
Abbildung 2-7: Vereinfachte Darstellung des Lebenswegs und der Systemgrenze für die Variante „Holzkonstruktion“	43
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Zinkbilanz im Verzinkungsprozess	57
Abbildung 3-2: Beispiele für Anschlusssteile aus feuerverzinktem Stahl für Holzkonstruktionen	63
Abbildung 4-1: Treibhausgaspotenzial der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in t CO ₂ -eq/Halle	83
Abbildung 4-2: Vergleich des Treibhausgaspotenzial für die Tragwerke in der verzinkten und in der nassbeschichteten Bauweise in t CO ₂ -eq/Halle	84
Abbildung 4-3: Fossile Ressourcennutzung der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in MWh/Halle	85
Abbildung 4-4: Landnutzung der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in Pt/Halle	86
Abbildung 4-5: Ressourcennutzung Minerale und Metalle der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in kg Sb eq/Halle	87
Abbildung 4-6: Wassernutzung der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in m ³ depriv./Halle	88
Abbildung 4-7: Photochemisches Oxidantienbildungs-Potential der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in m ³ depriv./Halle	89
Abbildung 4-8: Vergleich des Treibhausgaspotenzials von vier Varianten der Stahlkonstruktion, nassbeschichtet [t CO ₂ -eq/Halle]	93

- Abbildung 4-9: Vergleich unterschiedlicher Ansätze zur Modellierung der Vorkette Zink für die Variante Stahlkonstruktion, feuerverzinkt am Beispiel des Treibhausgaspotenzials in t CO₂-eq/Halle 94
- Abbildung 4-10: Treibhausgaspotenzial der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in t CO₂-eq/Halle – oben: Basisszenario ohne Gutschriften, unten Sensitivitätsbetrachtung mit Gutschriften aus dem End-of-Life 96
- Abbildung 4-11: Sensitivitätsanalyse: Erhöhung der Wiederverwendungsquote von 10% (Basisszenario) auf 50%- Treibhausgaspotenzial pro funktionelle Einheit in t CO₂-eq/Halle 98
- Abbildung 4-12: Alternative Datensätze für Transportbeton unterschiedlicher Druckfestigkeitsbereiche – Treibhausgaspotenzial pro Fundament für die untersuchten Konstruktionsvarianten in t CO₂-eq/Halle 99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Statische Systeme und betrachtete Ausführungsvarianten in der von bauforumstahl e.V. herausgegebenen Studie „Ökobilanzieller Vergleich von Hallen unterschiedlicher Bauweisen“	33
Tabelle 2-2:	Referenzflüsse zur Bereitstellung der Halle in t / Halle (mit 900 m ² Bruttogrundfläche)	37
Tabelle 2-3:	Kuppelprodukte sowie anfallende / genutzte produktsystemübergreifende Stoff- und Energieströme entlang des Lebenswegs der untersuchten Tragwerksvarianten und Fundamente	47
Tabelle 2-4:	Überblick zur ausgewerteten Wirkungskategorien	51
Tabelle 3-1:	Materialbedarf für eine Halle (bestehend aus 11 Rahmen) in der Stahlbau-Konstruktionsvariante	55
Tabelle 3-2:	Oberfläche des Tragwerks pro Halle (bestehend aus 11 Rahmen)	56
Tabelle 3-3:	Zusammensetzung des Zinkbedarfs im Feuerverzinkungsprozess	57
Tabelle 3-4:	Energiebedarf für das Oxidieren von Zink aus Hartzink und Feinasche zu Zinkoxid	58
Tabelle 3-5:	Energiebedarf im Feuerverzinkungsprozess	58
Tabelle 3-6:	Generisches Beschichtungssystem - getroffene Annahmen	59
Tabelle 3-7:	Zusammensetzung der Beschichtungsstoffe im Nassbeschichtungsverfahren	60
Tabelle 3-8:	Materialbedarf für eine Erstbeschichtung (3 Schichten) im Nassbeschichtungsverfahren	61
Tabelle 3-9:	Energiebedarf für das Nassbeschichten auf Metallgrund in kWh/m ²	62
Tabelle 3-10:	Materialbedarf für die Konstruktion einer Halle (bestehend aus 11 Rahmen) in der Holzbauweise	63
Tabelle 3-11:	Materialbedarf für die Konstruktion einer Halle (bestehend aus 11 Rahmen) in der Stahlbetonbauweise	64
Tabelle 3-12:	Dieserverbrauch der Mobilkräne für die verschiedenen Hallentypen	65
Tabelle 3-13:	Erdaushub in m ³ für die verschiedenen Hallentypen	65
Tabelle 3-14:	Energiebedarf für die Ausbesserung von 1 m ² in der nassbeschichteten Stahlbaukonstruktion	66
Tabelle 3-15:	Bedarf für die Vollerneuerung von 1 m ² in der nassbeschichteten Stahlbaukonstruktion	67
Tabelle 3-16:	Dieserverbrauch für die Demontage der Halle je nach Ausführungsvariante	67

Tabelle 3-17:	Annahmen zur Wiederverwendung und dem Recycling von Hallenelementen (Umsetzung in der Bilanzierung für das Gutschriftenszenario wird kursiv dargestellt)	68
Tabelle 3-18:	Wirkungsgrad BMHKW nach Flamme et al. (2018)	70
Tabelle 3-19:	Zur Erstellung der Sachbilanz verwendete spezifische und allgemeine / generische Datensätze	71
Tabelle 4-1:	Wesentlichkeitsschwellen bei den Wirkungsindikatorergebnissen	81
Tabelle 4-2:	KEA, gesamt der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in GJ/Halle	90
Tabelle 4-3:	KEA, differenziert nach den Anteilen fossil, biogen und regenerativ der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in GJ/Halle	90
Tabelle 9-1:	Ermittlung des Materialaufwands für die untersuchten Tragwerkskonstruktionen	123
Tabelle 9-2:	Ergebnisse für alle 16 Wirkungsindikatoren	124
Tabelle 9-3:	Detailergebnisse Kumulierter Energieaufwand	126

Abkürzungsverzeichnis

APOS	Allocation at the point of Substitution
BSt 500 S(A)	Betonstahl zur Bewehrung von Stahlbetonteilen
bspw.	beispielsweise
C25/30	Druckfestigkeitsklasse Beton: Zylinderdruckfestigkeit 25 N/mm ² , Würfeldruckfestigkeit 30 N/mm ²
C30/37	Druckfestigkeitsklasse Beton: Zylinderdruckfestigkeit 30 N/mm ² , Würfeldruckfestigkeit 37 N/mm ²
EF	Environmental Footprint
EPD	Environmental Product Declarations, deutsch: Umwelt-Produktdeklaration
GWP	Global Warming Potential
IF	Institut Feuerverzinken GmbH
IPE 360	Mittelbreite Stahlträger mit 360 mm Breite (außen)
IPE 400	Mittelbreite Stahlträger mit 400 mm Breite (außen)
KEA	Kumulierte Energieaufwand
S355	Baustahlsorte (Kohlenstoff-Mangan-Stahl)

Zusammenfassung

Zielsetzung und Untersuchungsrahmen

Die vorliegende Studie wurde vom Institut Feuerverzinken GmbH (im Folgenden IF) beauftragt. Ziel der Studie ist ein Vergleich von vier Varianten einer Hallenkonstruktion auf der methodischen Grundlage einer Ökobilanz. Am Beispiel einer konkreten Halle werden vier verschiedene Ausführungsvarianten der Tragwerkskonstruktion einschließlich der erforderlichen Fundamente entlang des gesamten Lebenswegs vergleichend gegenübergestellt werden. Für alle untersuchten Ausführungsvarianten werden auch die Beiträge einzelner Lebenswegphasen (Herstellungs- und Errichtungsphase, Nutzungsphase und Entsorgungsphase) und relevanter Prozesse betrachtet, um Hinweise auf Schwerpunkte zu den betrachteten potenziellen Umweltbelastungen zu erhalten. Auf der Grundlage dieser Beitragsanalysen können in weiteren Studien tiefergehende Überlegungen zur umweltbezogenen Optimierung der einzelnen Ausführungsvarianten angestellt werden.

Als Ausführungsvarianten wurden eine Stahlkonstruktion mit Feuerverzinkung als Korrosionsschutz, eine Stahlkonstruktion mit einem Nassbeschichtungssystem¹ als Korrosionsschutz, eine Stahlbetonausführung sowie eine Holzbaukonstruktion (mit stückverzinkten Bauelementen, sogenannten Anschlüssen zur Abstützung und Verbindung der Balkenkonstruktion) festgelegt. Diese vier Ausführungsvarianten werden als funktional äquivalent angesehen, siehe im Detail Abschnitt 2.3.2).

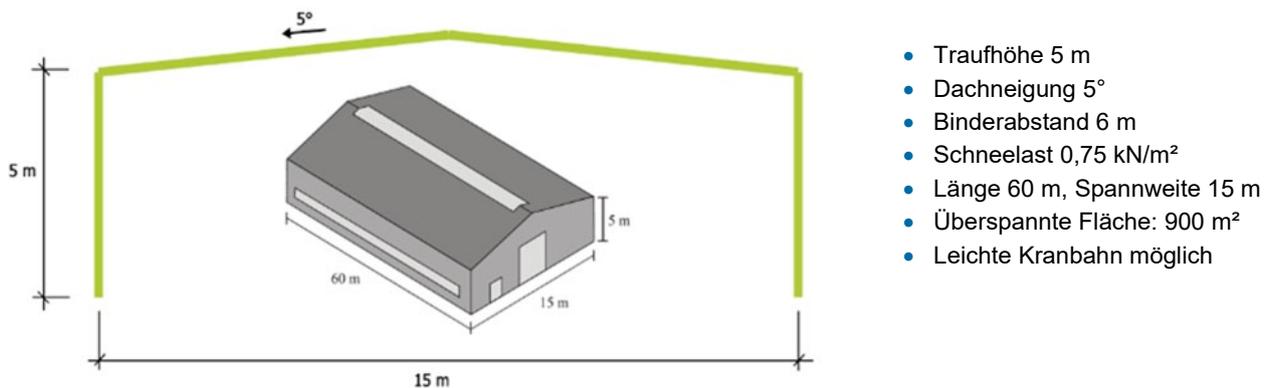
Die Studie ist zum einen als Informationsgrundlage für die Mitglieds- und Partnerunternehmen des Industrieverbands Feuerverzinken vorgesehen. Zum anderen soll die Zusammenfassung der Studie auch zur Kommunikation gegenüber weiteren Akteur*innen eingesetzt werden. Damit wird mit dieser Studie eine breite Zielgruppe angesprochen, diese umfasst u.a.

- Fachplaner*innen aus Ingenieur-/Architekturbüros,
- Entscheidungsträger*innen in Unternehmen und anderen privaten oder auch staatlichen Organisationen, die mit der Beschaffung von (in der Regel gewerblich genutzten) Hallen befasst sind und
- weitere Marktakteure sowie die interessierte (Fach-)Öffentlichkeit.

Mit der Studie soll aufgezeigt werden, welche der vier untersuchten Tragwerksvarianten einer exemplarischen Hallenkonstruktion in einer auf den Lebensweg ausgerichteten Analyse jeweils mit welchen systemspezifischen relevanten potenziellen Umweltauswirkungen verbunden ist. Aus der vergleichenden Gegenüberstellungen können Akteure auch Präferenzen für eigene Planungen und Entscheidungen ableiten, wobei bei allen Schlussfolgerungen und Empfehlungen sowohl methoden- als auch datenbedingte Einschränkungen zu beachten sind – auf diese Punkte wird bei der Darstellung und Diskussion der Ergebnisse näher eingegangen.

Der in der Studie vorgenommene Vergleich bezieht sich auf Tragwerksvarianten für eine Halle mit einer festgelegten Größe (Höhe, Fläche, Spannweite, Trauffhöhe etc., siehe Abbildung 1-1) und spezifischen Nutzungsbedingungen (Nutzungsdauer, Umgebungsbedingungen, Anforderungen an den Korrosionsschutz, siehe unten).

¹ Unter "Nassbeschichten" versteht man die Applikation von Flüssig-Beschichtungsstoffen auf Oberflächen, umgangssprachlich wird dies als „Lackieren“ bezeichnet. Im Unterschied zur Nassbeschichtung werden bei der Beschichtung mit sogenannten Pulverlacken keine Lösemittel verwendet.

Abbildung 1-1 : Eigenschaften der beispielhaft ausgewählten Halle


Quelle: Siebers und Hauke 2015, Kocker und Möller 2016

Die Ergebnisse dieser Studie und gezogene Schlussfolgerungen sind an diese Rand- und Rahmenbedingungen gebunden. Eine Übertragung der in dieser Studie erarbeiteten Ergebnisse und Schlussfolgerungen auf andere Tragwerksvarianten ist nur auf der Grundlage von weiteren, detaillierten Analysen möglich. Zudem fokussiert diese Studie die Tragwerksplanung (einschließlich der damit verbundenen Fundamente), weitere Bauelemente der Gebäudehülle (Decken und Wände) liegen außerhalb des Untersuchungsrahmens, da sie weitgehend unabhängig von den Tragwerken ausgewählt werden können.

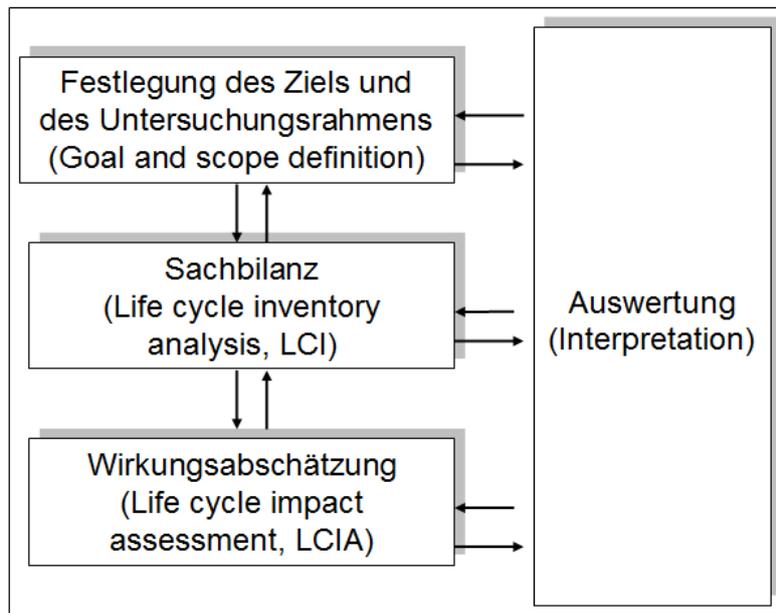
Ökobilanz als methodische Grundlage

Der in dieser Studie vorgenommene Vergleich von Typlösungen für die Tragwerke von Hallen wurde auf der Grundlage der standardisierten Ökobilanz-Methode nach DIN EN ISO 14040:2021-02 und DIN EN ISO 14044:2021-02 durchgeführt. In einer Ökobilanz werden möglichst umfassend der gesamte Lebensweg eines Produktes bzw. Produktsystems und die zugehörigen potenziellen ökologischen Auswirkungen erfasst. Die entlang des Lebenswegs auftretenden Stoff- und Energieumsätze und daraus resultierende potenzielle Umweltbelastungen, wie beispielsweise das Treibhauspotenzial, werden quantifiziert. Bei der Ökobilanz handelt es sich um eine systematische Methode, mit der die umweltseitigen Auswirkungen von Produkten und Prozessen in vier Teilschritten erfasst und analysiert werden (siehe Abbildung 1-2).

Diese Studie ist zur Veröffentlichung vorgesehen. Da der Bericht für die Veröffentlichung vergleichende Aussagen zu den untersuchten Varianten beinhaltet, werden dementsprechend die in diesen Normen vorgegebenen erweiterten Anforderungen an die Berichterstattung an Dritte berücksichtigt. Entsprechend der Vorgaben in DIN EN ISO 14040:2021-02 Abschnitt 7.3.2 ist daneben auch die Durchführung einer Kritischen Prüfung der Ergebnisse der Ökobilanz und des hier vorgelegten Studienberichts durch ein unabhängiges, aus mindestens drei Experten bestehendes Gutachtergremium (engl. Critical Review Panel) erforderlich. Der Bericht des Panels ist Bestandteil dieses Berichts und als Abschnitt 7 dieser Studie aufgenommen.

Die Ökobilanz-Methode ist eine Rahmenmethode, weshalb die Ersteller*innen einer Ökobilanz in einigen Punkten sogenannte methodische Wahlfreiheiten haben. Vor diesem Hintergrund und um sicherzustellen, die Ergebnisse einer Ökobilanz nachvollziehbar und transparent zu kommunizieren, werden im nachfolgenden Abschnitt die als wesentlich erkannten methodischen Festlegungen dieser Studie beschrieben.

Abbildung 1-2: Grundstruktur und Teilschritte einer Ökobilanz



Quelle: DIN EN ISO 14040:2021-02

Wesentliche methodische Festlegungen

Auswahl einer exemplarischen Tragwerkskonstruktion einer Halle

In dieser Studie werden vier verschiedene Typlösungen für das Tragwerk einer konkreten Hallenkonstruktion betrachtet:

- Stahlkonstruktion mit Korrosionsschutz durch Feuerverzinken gemäß DIN EN ISO 1461:2022 (im Weiteren als „Stahlkonstruktion, feuerverzinkt“ bezeichnet)
- Stahlkonstruktion mit Korrosionsschutz durch Nassbeschichtung gemäß DIN EN ISO 12944 Teile 1-8 (DIN EN ISO 12944) („Stahlkonstruktion, nassbeschichtet“)
- Stahlbetonbauweise gemäß DIN 1045-1:2023-08 („Stahlbetonkonstruktion“)
- Holzbaukonstruktion (mit stückverzinkten Bauelementen, sogenannte „Anschlüsse“, zur Abstützung und Verbindung der Balkenkonstruktion – „Holzkonstruktion“)

Die Grundlagen für die Auslegung dieser Varianten wurden einer vom Institut Feuerverzinken zur Verfügung gestellten Veröffentlichung des bauforumstahl e.V. (Kocker und Möller 2016) und einer ergänzenden Berechnung (Oberhaidinger 2023) entnommen. Die vier auch in der Praxis vorkommenden Ausführungsvarianten wurden so konzipiert, dass die Funktion der Hallenkonstruktion gleichwertig erfüllt werden kann.

Die betrachteten Typlösungen unterscheiden sich in der Stabilisierung der Rahmen: Bei den beiden Stahlvarianten (feuerverzinkt oder nassbeschichtet) kann die Stabilisierung durch 2-Gelenkrahmen mit biegesteifer Eckausbildung und gelenkig angeschlossenen Fundamenten erfolgen, demgegen-

über erfolgt bei der Holzkonstruktion und bei der Stahlbetonkonstruktion die Stabilisierung in der Regel über die eingespannten Stützenstiele, mit gelenkiger Auflagerung der (horizontalen) Holz- bzw. Stahlbetonbinder. Dadurch fallen die Massen für die Köcherfundamente beim Stahlbeton- und beim Holz-Tragwerk im Vergleich zu den Blockfundamenten für das Stahl-Tragwerk deutlich größer aus. Die Ergebnisse dieser Ökobilanz gelten daher nur für die hier ausgewählten und den Varianten üblicherweise zugeordneten Stabilisierungssystemen. Sollten davon abweichend andere Stabilisierungssysteme gewählt werden oder eine tragwerksplanerische Optimierung der Konstruktionsweisen erfolgen, müsste die Ökobilanz mit dann veränderten Referenzflüssen neu berechnet werden.

Festlegung der Funktionellen Einheit

Mit der funktionellen Einheit wird der quantifizierte Nutzen des untersuchten Produktsystems festgelegt. Ein wesentlicher Zweck dieser Festlegung ist die Angabe einer Bezugsgröße, auf die die Input- und Output-Daten im mathematischen Sinn normiert werden. Deshalb muss die funktionelle Einheit eindeutig definiert und messbar sein (DIN EN ISO 14044:2021-02). Darüber hinaus muss die funktionelle Einheit dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Studie entsprechen, was im hier vorliegenden Fall bedeutet, dass sie einen direkten Vergleich der verschiedenen Typlösungen für Varianten von Tragwerken einer konkreten Halle erlaubt. Die funktionelle Einheit für diese Studie wurde wie folgt festgelegt:

Bereitstellung des Tragwerks (samt erforderlicher Fundamente) für eine multifunktional nutzbare Halle mit einer überspannten Fläche von 900 m² über eine Nutzungszeit von 50 Jahren

Das multifunktionale Nutzungsszenario sieht neben der Möglichkeit zur Umnutzung während der Nutzungszeit von 50 Jahren auch Anforderungen an den Korrosionsschutz nach Korrosivitätskategorie C 3 vor. Beide Festlegungen führen bei den untersuchten Stahlvarianten zu sehr spezifischen Anforderungen an die Sicherstellung des Korrosionsschutzes. Bei der feuerverzinkten Variante muss der Zinküberzug eine Mindestdicke aufweisen, bei der nassbeschichteten Variante besteht die Beschichtung aus drei Schichten (Grundierung, Zwischenschicht und Deckschicht) und der Notwendigkeit zur Instandhaltung, siehe im Detail Abschnitt 3.2.2.

Bei einer kürzeren Nutzungsdauer der Tragwerkskonstruktionen würde sich auch die Art des Korrosionsschutzes und die Bedingungen zur Instandhaltung ändern. Der Geltungsbereich der Ergebnisse dieser Ökobilanz ist somit klar umrissen, eine „Umrechnung“ bspw. auf ein Szenario von bspw. 20 Jahren Nutzungszeit ist aufgrund der Komplexität des Korrosionsschutz nicht möglich.

Systemgrenze und Abschneidekriterien

Die Systemgrenze legt fest, welche Prozessmodule in der Ökobilanz enthalten sein müssen. Die Auswahl der Systemgrenze muss mit dem Ziel der Studie übereinstimmen. Im vorliegenden Fall umfasst die Systemgrenze den gesamten Lebenszyklus der untersuchten Konstruktionsvarianten. Dies sind:

- Prozesse zur Entnahme der Rohstoffe,
- Herstellung und Fertigung der Baumaterialien einschließlich des initialen Korrosionsschutzes,
- Montage auf der Baustelle,
- Unterhalt und Instandhaltung während der festgelegten Nutzungsdauer von 50 Jahren,

- die Demontage und die Prozesse der Nachgebrauchsphase (Wiederverwendung von Bauteilen, Sortierung, Recycling, Entsorgung Sortierreste etc.) und
- die erforderlichen Transporte entlang des Lebenswegs der Konstruktionsvarianten.

Es handelt sich damit bei der vorliegenden Studie um eine Bilanz von der „Wiege bis zur Bahre“ (engl. „from-cradle-to-grave“). In der Studie stehen die energetischen und stofflichen Inputströme zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Materialien für die untersuchten Konstruktionsvarianten im Fokus. Um den Bearbeitungsaufwand bei der Durchführung von Ökobilanzen im Rahmen zu halten, werden in vielen Studien quantifizierte Abschneidekriterien (beispielsweise nach Masse, Energie oder Umweltrelevanz) festgelegt, um den Ausschluss von einzelnen Prozessen oder Materialströmen im Lebensweg der betrachteten Varianten zu begründen. Auch in dieser Studie wurden einzelne Prozesse bzw. Abschnitte im Lebensweg der Konstruktionsvarianten ausgeschlossen. Im Einzelnen:

- Die Baustelleneinrichtung (Absperrung mit Zäunen, Schaffung Zufahrtswege, Infrastruktur für Arbeiter*innen auf der Baustelle, Überwachung) wurde nicht einbezogen mit der Annahme, dass sich hier die betrachteten Varianten nicht unterscheiden.
- Der Einsatz von (mobilen) Baukränen zur Montage (und Demontage) der Tragwerke wird berücksichtigt, nicht hingegen weitere Einrichtungen zur Montage wie Gerüste oder Hubwagen. Dieser Ausschluss begründet sich dadurch, dass generell die Bauwerkselemente Dach und Seitenteile nicht betrachtet werden (siehe Abschnitt 2.3.1).
- Speziell bei der Variante „Stahlkonstruktion, nassbeschichtet“ mussten aus Vereinfachungsgründen oder mangels belastbarer, repräsentativer Daten Teilprozesse ausgeschlossen werden: (1) Energieaufwand für die Abluftbehandlung bei der initialen Nassbeschichtung in stationären Anlagen, (2) Verbrauch an Schleif- und Strahlmittel bei der Instandsetzung. Mit diesen Ausschlüssen wird die Variante „Stahlkonstruktion, nassbeschichtet“ gegenüber den drei anderen untersuchten Varianten und insbesondere im Vergleich zur Variante „Stahlkonstruktion feuerverzinkt“ in der Tendenz bessergestellt, wobei eine Quantifizierung dieses Effekts im Rahmen dieser Studie nicht vorgenommen werden konnte.

Umgang mit Sekundärrohstoffen aus dem End-of-Life, Vergabe von Gutschriften

In der Studie wird für das End-of-Life nach der Nutzungsdauer von 50 Jahren angenommen, dass die für die hier untersuchten Tragwerksvarianten verwendeten Konstruktionselemente und -materialien (Stahl, Stahlbeton, Holz) teilweise wiederverwendet werden und der verbleibende Anteil einer werkstofflichen Verwertung (bei Holz: einer thermischen Verwertung) zugeführt wird, wodurch anteilig die entsprechende Primärproduktion an Materialien und Nutzenergie vermieden wird. Auch wenn zwischen Anfall und Verwendung bei langlebigen Gütern ein Zeitverzug auftritt, tragen die Wieder- oder Weiterverwendung von Bauelementen sowie die Verwertung der Materialien als Sekundärrohstoffe in den meisten Fällen zur Ressourcenschonung und Verringerung von negativen Umweltauswirkungen bei. Eine richtungssichere Quantifizierung dieses Effekts ist allerdings schwierig, insbesondere weil derzeit noch keine konsistenten und geprüften Ökobilanz-Hintergrunddaten zur Verfügung stehen, um Gutschriften für die Nutzung von Sekundärrohstoffen zu berechnen. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse in dieser Studie im Basisszenario ohne Gutschriften für Sekundärrohstoffe aus dem End-of-Life berechnet und ausgewiesen.

Auswahl der Wirkungsabschätzungsindikatoren

Für die Durchführung der Wirkungsabschätzung in produktbezogenen Ökobilanzen stehen verschiedene Methoden und Methodensets zur Verfügung. In der vorliegenden Studie werden die Indikatoren auf der Grundlage einer Auswahl des vom Joint Research Centre (JRC) im Rahmen der Entwicklung der PEF-Methodik zusammengestellten Sets *Environmental Footprint (EF) 3.0* abgeschätzt. Die Ergebnisse werden jeweils auf Ebene der Midpoint-Indikatoren für ausgewählte Wirkungskategorien ausgewiesen. Die Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethode EF 3.0 für diese Studie begründet sich darin, dass die Wirkungsindikatoren dieser Methodensammlung international akzeptiert sind. Zudem ist zu erwarten, dass die EU-Kommission in den kommenden Jahren Rechtsakte erlassen wird, die zukünftig Vorgaben für in der EU getätigte umweltbezogene Aussagen zu Produkten an bestimmte Kriterien knüpfen wird, die auch die Wahl der Wirkungsabschätzungsmethoden betreffen. Daher wird davon ausgegangen, dass das gewählte Methodenset weiter an Relevanz gewinnen wird. Die Environmental Footprint (EF) 3.0-Methode enthält derzeit 16 Umweltwirkungsindikatoren, von denen jedoch nicht alle für die vorliegende Untersuchung relevant sind. Ausgehend von einer initialen Ergebnisliste für alle 16 Indikatoren wurde eine Fokussierung auf sechs Indikatoren vorgenommen, mit der die typischen potenziellen Umweltauswirkungen für die in dieser Studie behandelten Systeme von Baumaterialien gut abgebildet werden, vgl. Tabelle 1-1.

Tabelle 1-1: Überblick zu ausgewerteten Wirkungskategorien

Wirkungs-kategorie	In diesem Bericht verwendete Bezeichnung	Einheit	Kurzbeschreibung ²	Signifikanzschwelle
Climate change	Treibhausgaspotenzial	kg CO ₂ -eq	Globales Erwärmungspotenzial über einen Zeithorizont von 100 Jahren, basierend auf IPCC AR5 (2013).	>10 %
Land use	Landnutzung	Pt	Bodenqualitätsindex basierend auf der LANCA-Methodik.	>20 %
Resource use, fossils	Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Energieträger)	MJ	Abiotische Ressourceninanspruchnahme fossiler Energieträger	>10 %
Resource use, minerals and metals	Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Mineralien und Metalle)	kg Sb eq	Abiotische Ressourceninanspruchnahme, Mineralien und Metalle	>20 %
Water use	Inanspruchnahme von knappen Wasserressourcen	m ³ depriv.	Wirkungsbasierte Inanspruchnahme von Wasserressourcen basierend auf dem AWARE-Modell ³	>20 %
Photochemical ozone formation	Photochemisches Oxidantienbildungspotential	kg NMVOC eq	Ausdruck des potenziellen Beitrags zur photochemischen Ozonbildung.	>10 %

Quelle: eigene Zusammenstellung auf Basis von EF 3.0

² Die ausführliche Beschreibung der Wirkungskategorien und -indikatoren ist online verfügbar unter: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/TR_SupportingCF_FINAL.pdf, zuletzt abgerufen am 01.06.2021

³ <http://wulca-waterlca.org/aware/>, zuletzt abgerufen am 01.03.2021

In Tabelle 1-1, rechte Spalte, wurden für die näher betrachteten Wirkungsindikatoren zusätzlich auch Signifikanzschwellen angegeben. Es handelt sich um empirische Werte, ab denen die Unterschiede für einzelne Wirkungsindikatorergebnisse als signifikant angesehen werden können.

Wirkungsabschätzungsergebnisse sind generell relative Aussagen, die keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken machen können. Speziell bezogen auf die Wirkungskategorie Landnutzung ist zudem anzumerken, dass der ausgewählte Indikator aus Sicht der Studienersteller keine umfassende Abschätzung potenziell biodiversitätsrelevanter Umweltwirkungen darstellt. Dies ist insofern relevant, als dass die Forstwirtschaft (als Rohstoffgrundlage für die untersuchte Tragwerksvariante Holzkonstruktion) je nach Art und Intensität der Bewirtschaftung sowohl positiv wie negativ zu Biodiversität beitragen kann. Im Rahmen dieser Studie konnte dieser Aspekt allerdings nicht so differenziert erfasst werden, dass eine belastbare Abschätzung biodiversitätsrelevanter Aspekte möglich gewesen wäre.

Insgesamt wird vor dem Hintergrund der voranstehenden Überlegungen das ausgewählte Indikatoren-Set von den Erstellern dieser Ökobilanz als für die vorliegende Studie geeigneter Ansatz zur Abschätzung potenzieller Umweltwirkungen der betrachteten Produktsysteme angesehen.

Nicht berücksichtigte potenzielle Umweltauswirkungen

Bei den in Ökobilanzen betrachteten Produktsystemen kann es potenzielle Umweltauswirkungen geben, die nicht oder nur unter großem Aufwand quantitativ betrachtet werden können. Bei den hier untersuchten Systemen ist das bei folgenden Aspekten der Fall:

- Während der Nutzungsphase von Beton, in geringerem Umfang auch von verzinkten Bauteilen, findet eine sogenannte Karbonatisierung statt, das heißt es erfolgt eine Absorption/Adsorption von Kohlendioxid in das Material, vgl. beispielsweise Nordby und Shea 2013. Dieser Effekt fällt bei den in dieser Studie untersuchten Tragwerksvarianten mit maximal 2 % der THG-Emissionen eher gering aus. Zudem hätte bei einer Berücksichtigung des Effekts auch die Verteilung auf der Zeitachse betrachtet werden müssen, was zusätzliche methodische Fragen aufwirft. Vor diesem Hintergrund wurde der Effekt in dieser Studie vernachlässigt.
- Bei der nassbeschichteten Stahlkonstruktion kann es durch Versprödung und Verwitterung an der Oberfläche dazu kommen, dass Partikel unterschiedlicher Größe abblättern, wodurch auch Beiträge zur Mikroplastik-Problematik nicht ausgeschlossen werden können. In der fachlichen Diskussion stehen allerdings andere Emissionsquellen im Vordergrund. Zudem wäre eine quantitative Nachverfolgung dieses Aspekts im gesetzten Rahmen dieser Studie nicht möglich gewesen.
- Neueren Untersuchungen zufolge kann nicht mehr a priori angenommen werden, dass Holz ein klimaneutraler Werkstoff ist: So nimmt die Senkenfunktion des Waldes mit Blick auf die CO₂-Bindung aus der Atmosphäre bei stark bewirtschafteten Wäldern ab (Fehrenbach et al. 2022). In den bislang durchgeführten Treibhausgasbilanzen von Holzprodukten wird die Dynamik der Kohlenstoffspeicherung in Wäldern, die als Kohlenstoffspeicherbilanz in Wäldern (CSBF) ausgedrückt werden kann, überwiegend nicht berücksichtigt. Fehrenbach et al. 2022 stellen in ihrer Veröffentlichung eine Methode und auch die Ergebnisse für mehrere Produktgruppen vor. Im gegebenem Rahmen und nicht zuletzt wegen abweichenden Parametern (zum Beispiel zeitlicher Betrachtungsraum) konnte der Aspekt in dieser Studie nicht berücksichtigt werden.

Modellierungsgrundlage und iteratives Vorgehen bei der Modellierung

Die durchgeführte Ökobilanz wurde mit der Software OpenLCA, Version 2.0.3 berechnet. Datengrundlage für Hintergrunddaten ist die Datenbank ecoinvent, Version 3.9. Diese Datenbank hat nach unseren Erfahrungen den Vorteil, dass die Datensätze sehr transparent dokumentiert sind und damit auch komplexer zusammengesetzte Datensätze dekonstruiert und angepasst werden können, wie es in dieser Studie beispielsweise beim Feuerverzinken oder bei der Energiebereitstellung für das Nassbeschichten erfolgte.

Generell wurde bei der Modellierung ein iteratives Vorgehen gewählt, indem die Sachbilanzen sukzessive im Projektverlauf verfeinert und präzisiert wurden, um insbesondere bei den Teilmodulen im Lebensweg der untersuchten Varianten, die signifikant zu den Indikatorergebnissen aus der Wirkungsabschätzung beitragen, möglichst genaue und repräsentative Daten in der Sachbilanz zu hinterlegen. Die Modellierung erfolgte in fünf Versionen, Version 5 bildet die in diesem Abschlussbericht dokumentierte finale Version ab. In dieser Version wurden auch die im Rahmen der Kritischen Prüfung eingegangenen Kommentare berücksichtigt.

Datengrundlagen der Sachbilanz

Für die in dieser Studie erstellte Sachbilanzen für die vier untersuchten Konstruktionsvarianten wurden Daten für drei Bereiche erfasst, nach den im Untersuchungsrahmen festgelegten Datenqualitätskriterien bewertet und in die Berechnungen eingestellt:

- Der erste Bereich umfasst Daten, die für alle vier untersuchten Tragwerkslösungen den Bedarf an einschlägigen Baumaterialien, wie Stahl, Beton, Holz etc. abbilden. Hier konnte als Datenquelle auf Planungsgrundlagen zurückgegriffen werden, die vom Institut Feuerverzinken als Auftraggeber der Studie zur Verfügung gestellt wurden.
- Der zweite Bereich umfasst Daten, die sehr spezifisch für die in der Studie untersuchten Konstruktionsvarianten sind. Dies betraf hier insbesondere die feuerverzinkte und die nassbeschichtete Stahlkonstruktion. Sowohl für das Feuerverzinken als auch für die Nassbeschichtung wurden bei Anwendern dieser Prozesse aktuelle Daten erhoben, Diese Daten wurden auch abgeglichen und auf Plausibilität geprüft mit Angaben in anderen Studien, technischen Normen und Regelwerken sowie Datensätzen aus Ökobilanz-Datenbanken.
- Der dritte Bereich betrifft typische Hintergrunddaten, darunter zählen neben Basisdaten zur Bereitstellung von Nutzenergie und Kraftstoffen sowie Bereitstellung von Basismaterialien wie Stahl, Beton oder Holz auch Datensätze, die Transporte und typische Prozesse im End-of-Life betreffen.

Bei der Festlegung des Untersuchungsrahmens der Studie wurden unter Berücksichtigung der Zielfestlegung und der vorgesehenen Anwendung der Studie auch Anforderungen an die Datenqualität festgelegt. Die Anforderungen umfassen den geographischen, zeitbezogenen und technologischen Erfassungsbereich der Daten sowie die Aspekte Präzision, Vollständigkeit, Repräsentativität, Konsistenz und Reproduzierbarkeit. Die der Studie zugrunde liegenden Datensätze wurden nach den Merkmalen geographischer, zeitbezogener und technologischer Erfassungsbereich in einer Übersicht dargestellt und charakterisiert. Zusammenfassend ist aus unserer Sicht die Datenqualität insgesamt hinreichend und erfüllt damit das Ziel und den Untersuchungsrahmen der vorliegenden Studie. Durch Sensitivitätsanalysen (siehe unten sowie Abschnitt 4.3) konnte die Belastbarkeit der Datengrundlagen und Annahmen bestätigt werden.

Kernergebnisse der Studie

Bevor weiter unten auf die Ergebnisse der einzelnen Wirkungsindikatoren eingegangen wird, können als übergreifende Ergebnisse dieser Studie folgende Aspekte festgehalten werden:

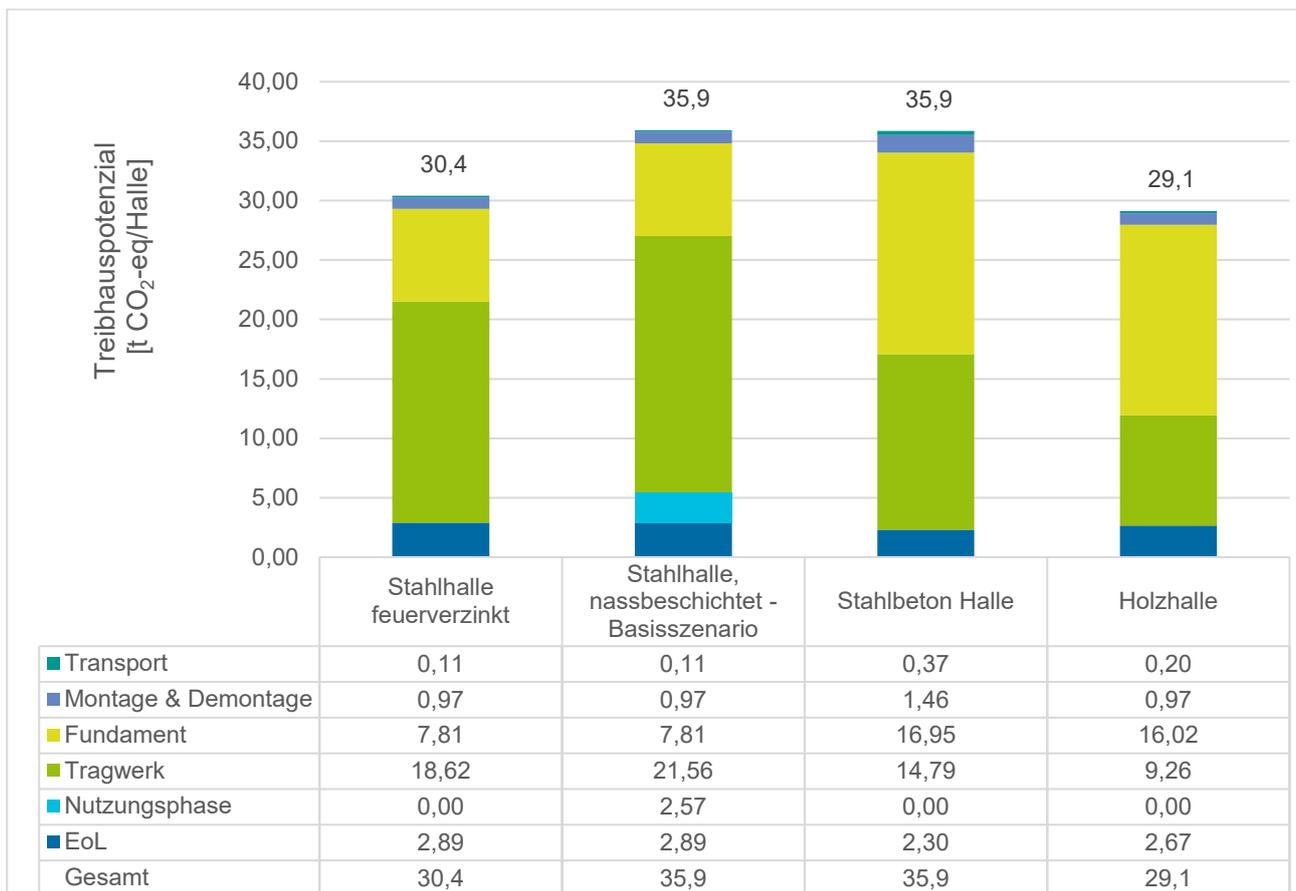
- Die Herstellung der für die untersuchte Konstruktionsvarianten eingesetzten Baumaterialien dominiert alle Indikatorergebnisse mit Beitragsanteilen zwischen 70 % bis rund 95 %. Wenn die Baumaterialien funktionell eingeteilt werden, sind es die Tragwerke und die Fundamente, welche besonders signifikant sind. Die Relevanz der Tragwerke und Fundamente zeigt sich analog aus den Beitragsanalysen, die zusätzlich zu den genannten Wirkungsindikatoren für den Sachbilanzindikator Kumulierter Energieaufwand (KEA), differenziert nach den Anteilen fossil, biogen und regenerativ, durchgeführt wurde. Vor diesem Hintergrund sind die der Studie zur Ermittlung der Referenzflüsse zugrundeliegenden Daten zum Bedarf an einzelnen Baumaterialien von zentraler Bedeutung. Dies gilt im Besonderen für die Bemessung der Fundamente, da diese, wie bereits oben erläutert wurde, abhängig von der konstruktiven Lösung zur statischen Stabilisierung der Konstruktionsvarianten ist.
- Im Basisszenario wurden begründet keine Gutschriften für systemübergreifend genutzte sekundäre Energie- und Materialflüsse vergeben. Die Wieder- oder Weiterverwendung von Bauelementen sowie die werkstoffliche oder energetische Verwertung von Baumaterialien als Sekundärrohstoffe können zwar zur Ressourcenschonung und Verringerung von negativen Umweltauswirkungen beitragen. Eine richtungssichere Quantifizierung dieses Effekts ist allerdings schwierig, insbesondere da noch keine konsistenten und geprüften Ökobilanz-Hintergrunddaten für die nach klimaneutralen Schlüsseltechnologien hergestellten Materialien wie Stahl, Zement bzw. Beton sowie Chemikalien zur Verfügung, zur Quantifizierung von Gutschriften herangezogen werden könnten. In anderen Studien werden gleichwohl Gutschriften vergeben. Die hier erzielten Erkenntnisse können somit nicht unmittelbar mit Ergebnissen anderer Studien in Beziehung gesetzt werden.
- Die Ergebnisse sind zudem stark abhängig von den Annahmen zur Wiederverwendungsquote. Derzeit steht der Wieder- bzw. Weiterverwendung von konstruktiven Bauteilen und Bauelementen eine Reihe von Hemmnissen entgegen. Die in der Literatur beschriebenen Hemmnisse sind eher von grundsätzlicher Natur und durch die grundlegenden Produktions- und Organisationsstrukturen bedingt. Vor diesem Hintergrund wird im Basisszenario dieser Ökobilanz für alle untersuchten Tragwerke eine Wiederverwendungsquote von lediglich 10 % angenommen. Um die Signifikanz dieser Festlegung zu prüfen und gleichzeitig die Umweltentlastungspotenziale einer stärker ausdifferenzierten Circular Economy nach einer Nutzungsphase der Tragwerke von 50 Jahren einschätzen zu können, wurde in einer der durchgeführten Sensitivitätsanalysen eine Wiederverwendungsquote von 50 % betrachtet, siehe unten. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen am Beispiel des Wirkungsindikators Treibhausgaspotenzial, dass die Erhöhung der Wiederverwendungsquote von 10 % auf 50 % zu einer signifikanten Verringerung der THG-Emissionen bei allen hier betrachteten Konstruktionsvarianten beitragen könnte. Diese Verringerung ist zum einen darauf zurückzuführen, dass durch die Wiederverwendung die Neuherstellung von Bauteilen anteilig verringert wird. Zum anderen trägt eine Erhöhung der Wiederverwendungsquote dazu bei, die Aufwendungen im End-of-Life zu verringern.

Treibhausgaspotenzial

Die nachstehende Abbildung 1-3 zeigt die Ergebnisse für das Treibhausgaspotenzial – bezogen auf die festgelegte funktionelle Einheit von einer Halle mit einer überspannten Fläche von 900 m² über

eine Nutzungszeit von 50 Jahren. Hier schneidet die Holzvariante gegenüber den anderen untersuchten Varianten am besten ab, gefolgt von der feuerverzinkten Variante. Die gesamten THG-Emissionen der Holzvariante sind weniger als 2 % geringer im Vergleich zur feuerverzinkten Konstruktionsvariante, der Unterschied ist also nicht signifikant mit Blick auf die in Abschnitt 4.1 festgelegten Signifikanzschwellen. Die feuerverzinkte Konstruktionsvariante hat auch ein signifikant geringeres THG-Potenzial im Vergleich zur nassbeschichteten Stahlhalle. Das höchste THG-Potenzial weist neben der Stahlbetonkonstruktion die nassbeschichtete Stahlhalle auf, der Unterschied zur feuerverzinkten Stahlhalle ist hier vor allen Dingen auf die Notwendigkeit einer Instandsetzung während der Nutzungsphase als auch einen grundsätzlich höheren Energiebedarf bei der Erstbeschichtung im Vergleich zum Auftrag des Zinküberzugs zurückzuführen. Ein ähnlich hohes THG-Potenzial zeichnet die Stahlbetonhalle aus, hier wirkt sich v.a. der hohe Beitrag für das schwerere Fundament aus. Der Beitrag des Fundaments ist zwar auch bei der Holzvariante ggü. den beiden Stahlvarianten wesentlich höher, bedingt durch den geringeren Beitrag des Tragwerks wird dieser Nachteil überkompensiert.

Abbildung 1-3: Treibhausgaspotenzial der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in t CO₂-eq/Halle



Quelle: Eigene Darstellung

Zur Absicherung der Ergebnisse wurden für diesen Wirkungsindikator auch Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Diese zeigen,

- dass die getroffenen Annahmen zur Modellierung der Stahlvariante (nassbeschichtet) richtungssicher sind, die Unterschiede bei den Ergebnisse zum THG-Potenzial liegen innerhalb der typischen Ergebnisschwellen bei Ökobilanzen (Abschnitt 4.3.1);
- dass bei der feuerverzinkten Stahlvariante alternative Datensätze zur Modellierung der Vorkette Zink die Ergebnisse beim THG-Potenzial nur marginal verändern (Abschnitt 4.3.2);
- dass der geographisch abweichende Datensatz für Transportbeton als Materialinput zur Herstellung der Fundamente als belastbar angesehen werden kann (Abschnitt 4.3.5).

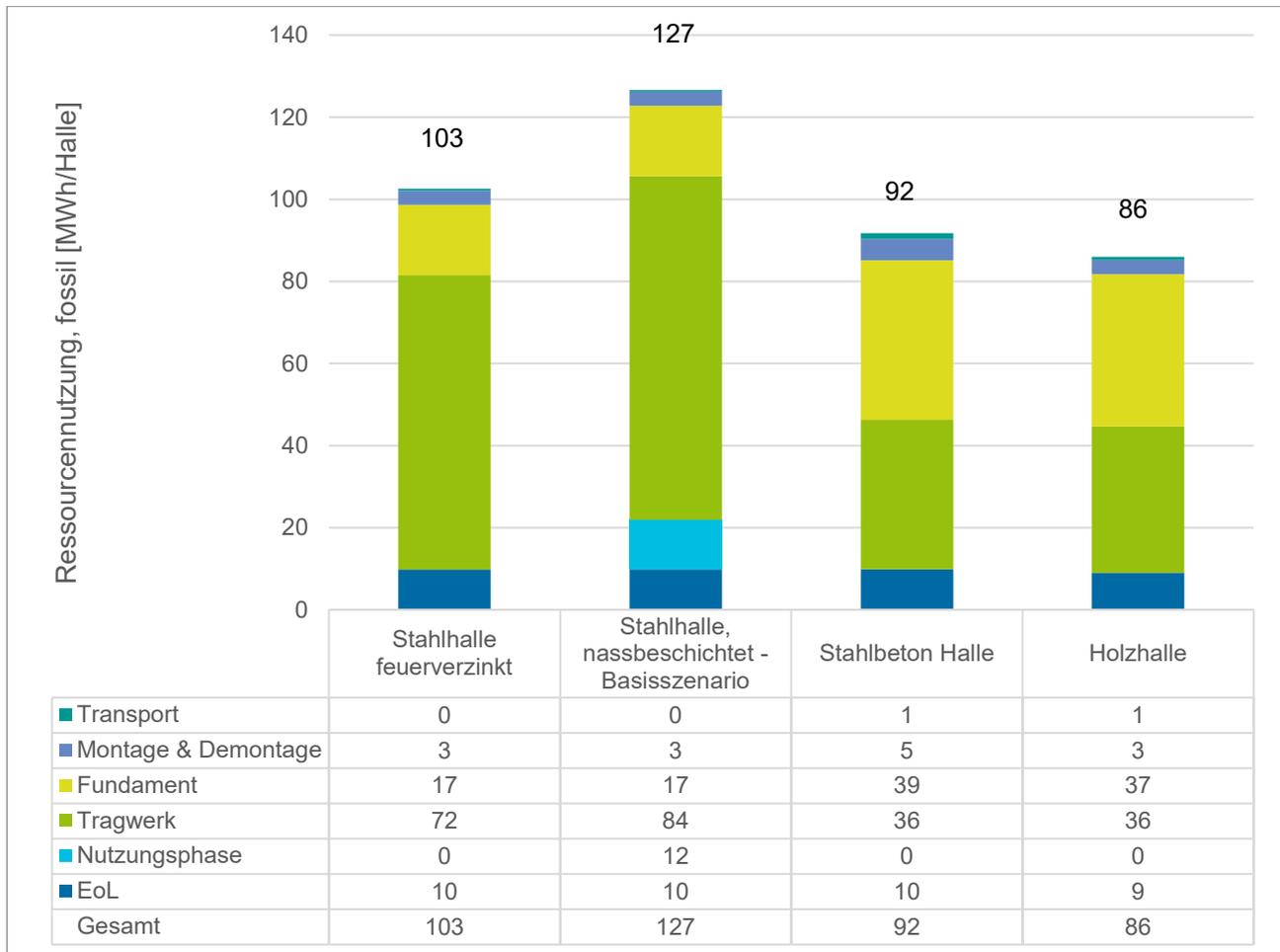
Als übergeordnetes Ergebnis aus diesen Sensitivitätsanalysen kann festgehalten werden, dass die zentralen Ergebnisse der Wirkungsabschätzung auch dann Bestand haben, wenn relevante Parameter bzw. Eingangsdaten variiert werden.

Wie bereits in Abschnitt oben ausgeführt wurde, kann nach neueren Untersuchungen nicht mehr a priori angenommen werden, dass Holz ein klimaneutraler Werkstoff ist, da bei stark bewirtschaften Wäldern die Senkenfunktion des Waldes mit Blick auf die CO₂-Bindung aus der Atmosphäre abnimmt (Fehrenbach et al. 2022). Im gegebenenem Rahmen dieser Studie konnte dieser Aspekt allerdings nicht berücksichtigt werden.

Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Energieträger)

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Betrachtung der fossilen Rohstoffnutzung, vgl. Abbildung 1-4. Hier schneidet die nassbeschichtete Stahlvariante gegenüber der feuerverzinkten Ausführung und der Variante aus Stahlbeton signifikant schlechter ab. Der Unterschied zwischen der feuerverzinkten Ausführung und der Stahlbeton-Variante ist knapp über der Signifikanzschwelle, d.h. bei diesem Wirkungsindikator liegt die Variante aus Stahlbeton geringfügig günstiger im Vergleich zur feuerverzinkten Stahlvariante. Erwartungsgemäß schneidet hier die Holzvariante wegen des hohen biogenen Rohstoffeinsatzes deutlich am besten ab.

Abbildung 1-4: Fossile Ressourcennutzung der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in MWh/Halle

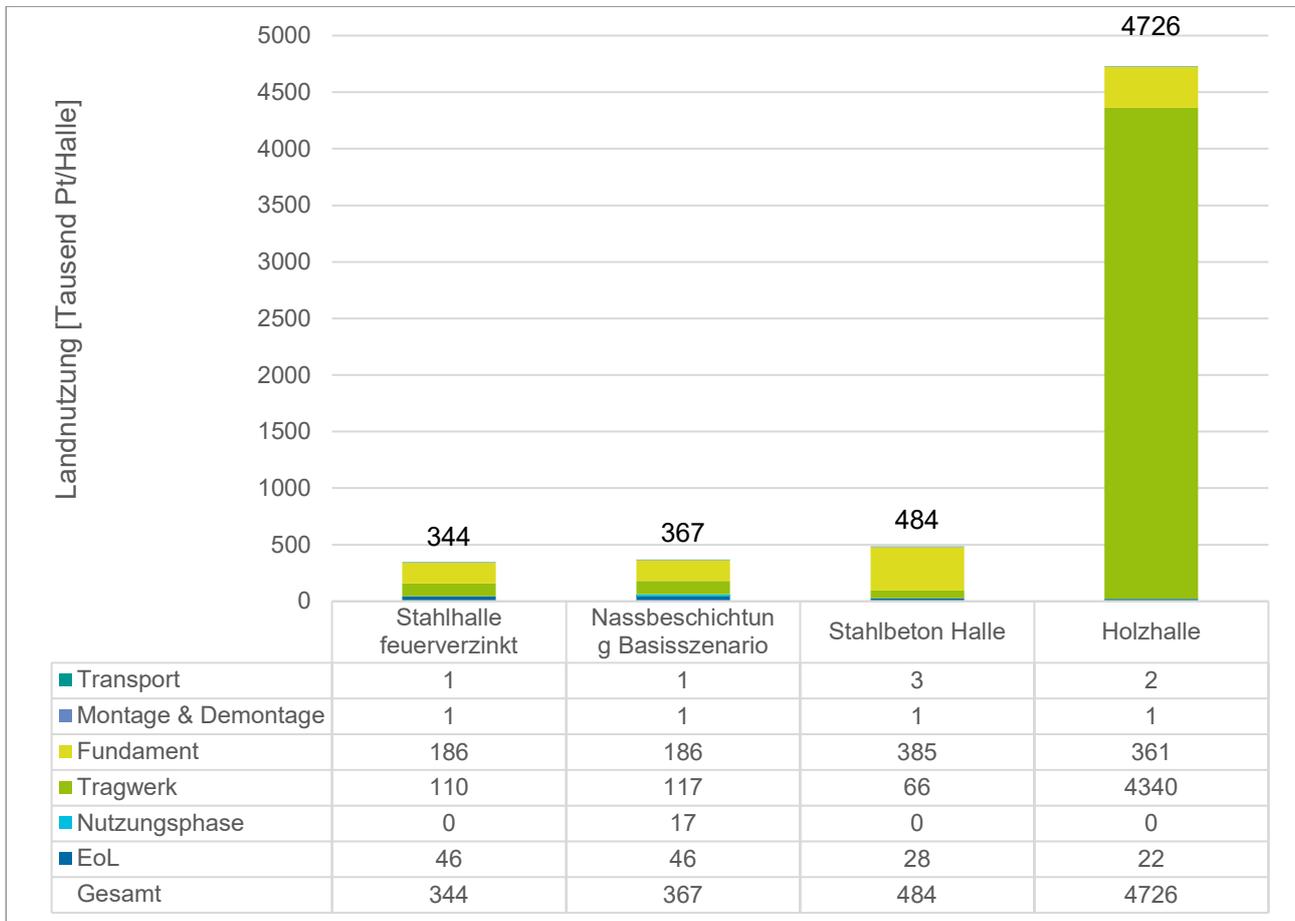


Quelle: Eigene Darstellung

Landnutzung

Die Landnutzung, siehe Abbildung 1-5, wird generell durch die Beiträge aus der Erstellung der Fundamente und der Tragwerke bestimmt. Beide Stahlkonstruktionen liegen hier unter Berücksichtigung der Signifikanzschwellen auf vergleichbarem Niveau, gefolgt von der Variante Stahlbetonkonstruktion, aufgrund des bei dieser Variante deutlich größeren Fundaments mit einem entsprechenden Mehrverbrauch an Sand, Kies und Mergel mit einer entsprechenden Landnutzung. Die Variante Holzkonstruktion hat gegenüber den anderen drei Varianten einen um Faktor 10 höhere Landnutzung, was sich typischerweise bei biogenen Materialien durch die entsprechende Inanspruchnahme von Flächen erklärt. Dabei ist zu beachten, dass der Wirkungsindikator Landnutzung keine umfassende Abschätzung potenziell biodiversitätsrelevanter Umweltwirkungen bietet.

Abbildung 1-5: Landnutzung der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in Pt/Halle

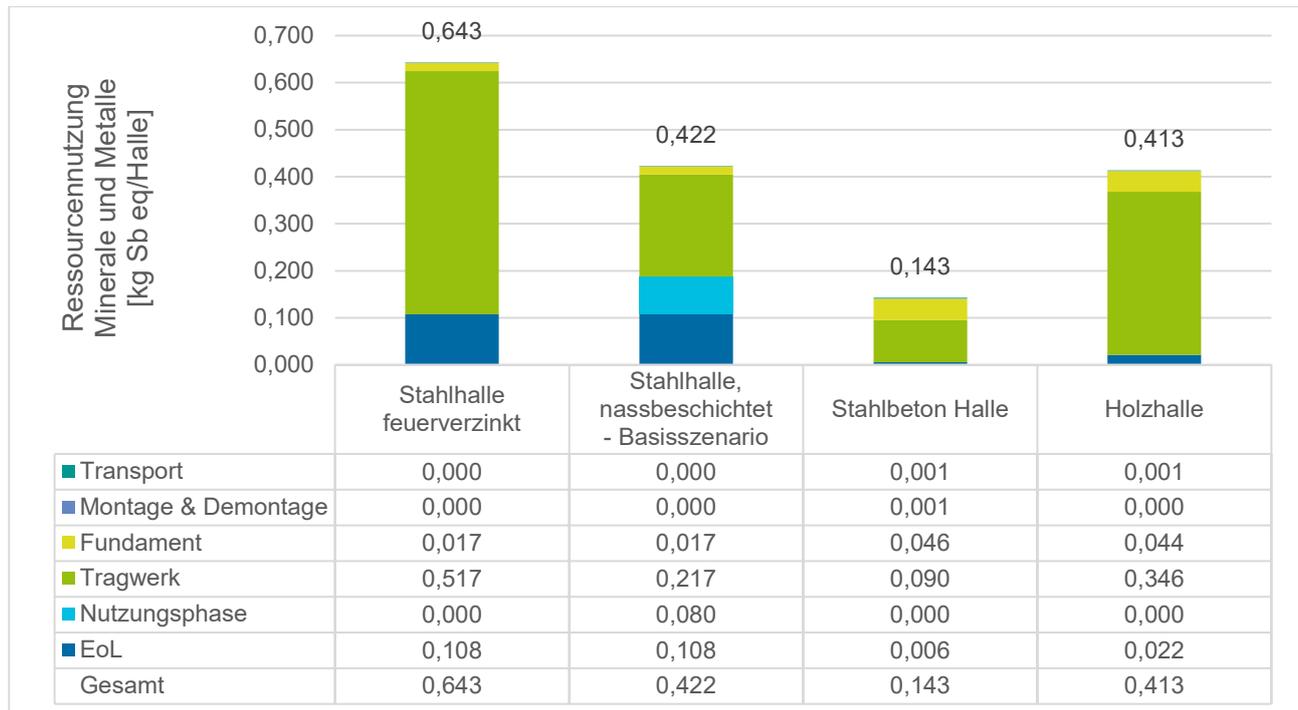


Quelle: Eigene Darstellung

Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Mineralien und Metalle)

Bei Betrachtung der Wirkungsindikatorergebnisse für diesen Wirkungsindikator fallen die vergleichsweise hohen Beiträge des Tragwerks bei den Varianten „Stahlkonstruktion, feuerverzinkt“ und „Holzkonstruktion“ auf, siehe Abbildung 1-6. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass dieser Wirkungsindikator stark vom Zinkverbrauch getrieben wird, während Eisen und weitere Stahllegierungselemente einen deutlich geringeren Beitrag bei diesem Wirkungsindikator haben. Speziell bei der Holzvariante stammen die Beiträge aus den feuerverzinkten Anschlussteilen, die bei dieser Konstruktionsvariante aus Gründen des konstruktiven Holzschutzes eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 3.1.2 und Abbildung 1-6).

Abbildung 1-6: Ressourcennutzung Minerale und Metalle der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in kg Sb eq/Halle

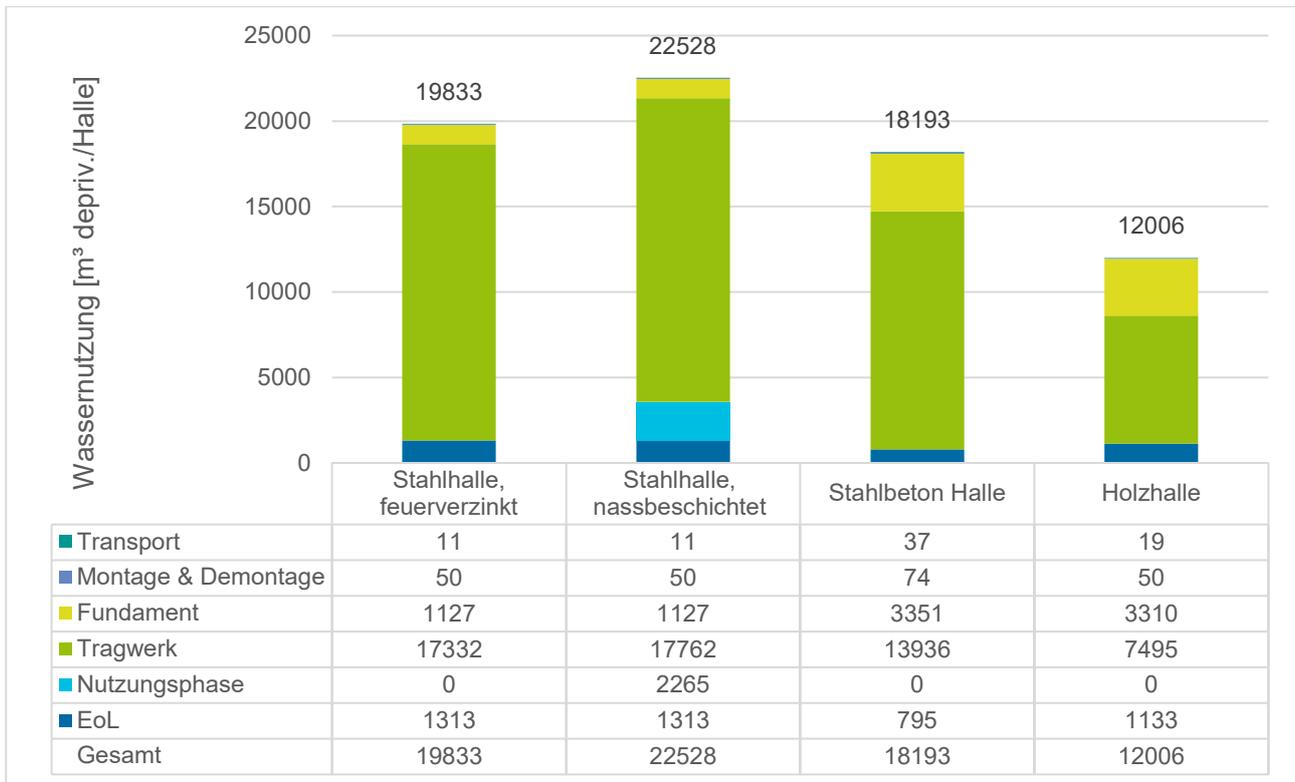


Quelle: Eigene Darstellung

Inanspruchnahme von knappen Wasserressourcen

Bei der Wassernutzung, siehe Abbildung 1-7, werden die Unterschiede zwischen den beiden Stahlvarianten ausschließlich durch den Beitrag der erforderlichen Instandhaltung bei der nassbeschichteten Variante bestimmt. Allerdings sind die Unterschiede bei Berücksichtigung der in Abschnitt 4.1 festgelegten Wesentlichkeitsschwelle (>20 % bei diesem Indikator) ebenso wenig signifikant wie die Unterschiede beider Stahlvarianten im Vergleich zur Konstruktionsvariante Stahlbeton. Nur die Holzkonstruktion weist bei diesem Wirkungsindikator ein signifikant besseres Ergebnis auf. Treiber der Wassernutzung sind mit Anteilen zwischen rund 60 und 90 % die Herstellung des Tragwerks, gefolgt von der Herstellung des Fundaments.

Abbildung 1-7: Wassernutzung der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in m³ depriv./Halle

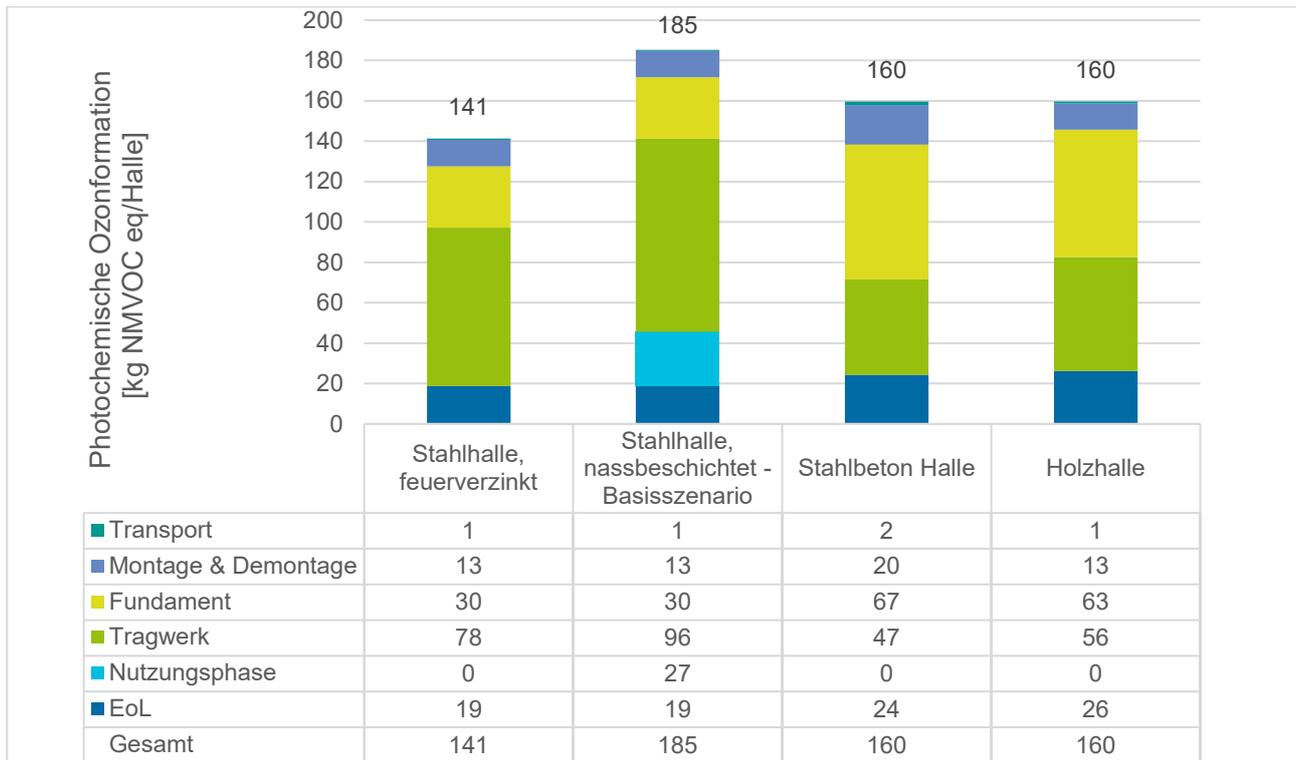


Quelle: Eigene Darstellung

Photochemisches Oxidantienbildungs-Potential (POCP)

Die Ergebnisse für diesen Wirkungsindikator werden bei den hier untersuchten Konstruktionsvarianten stark von der Herstellung der Tragwerke und Fundamente bestimmt, daneben tragen auch die Stickoxid-Emissionen aus dem Maschineneinsatz bei der Montage sowie der Demontage der Tragwerke mit rund 20 % zu den Gesamtergebnissen bei, siehe die nachfolgende Abbildung 1-8. Bei einer Wesentlichkeitsschwelle von >10 % für diesen Indikator (siehe Abschnitt 4.1) weist die feuerverzinkte Konstruktionsvariante gegenüber den Varianten Stahlbetonkonstruktion und Holzkonstruktion leichte Vorteile auf. Im Vergleich zur nassbeschichteten Variante sind die Unterschiede zu allen Vergleichsvarianten deutlich signifikanter. Dies ist auf die Lösemittlemissionen in der Nutzungsphase durch die Instandhaltung (vgl. Abschnitt 3.2.2) zurückzuführen.

Abbildung 1-8: Photochemisches Oxidantienbildungs-Potential der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in m³ depriv./Halle



Quelle: Eigene Darstellung

Relevante Ergebnisse aus den Sensitivitätsanalysen

In weiteren Sensitivitätsanalysen wurden die Relevanz der Vergabe von Gutschriften und die Relevanz der Höhe der Wiederverwendungsquote untersucht.

Vergabe von Gutschriften aus dem End-of-Life

Bei der Erläuterung der wesentlichen methodischen Festlegungen wurde festgestellt, dass in der Basisversion der Bilanzierungen keine Gutschriften vergeben wurden. Um die Ergebnisrelevanz dieser Festlegung offenzulegen, erfolgt in dieser Sensitivitätsanalyse am Beispiel des THG-Potenzials eine Darstellung mit Vergabe von Gutschriften. Es zeigt sich, dass die Vergabe von Gutschriften bei allen untersuchten vier Varianten zu einer Verringerung der THG-Emissionen führt. Bei den beiden Stahlvarianten und der Stahlbetonvariante liegt die Verringerung in einer Bandbreite von 3 bis 5 % bezogen auf die Ausgangswerte ohne Gutschriften. Besonders signifikant wirkt sich demgegenüber die Gutschrift bei der Holzvariante aus. Dies lässt sich rechnerisch so erklären, dass hier im EoL das als klimaneutral bewertete Holz als Altholz energetisch verwertet wird und fossile Energieträger substituiert, was zu einer entsprechend hohen Gutschrift an CO₂-Emissionen in Höhe von rund 13 t CO₂-Äquivalente pro Halle führt. Die der Gutschrift zugrundeliegende Annahme, dass auch in 50 Jahren fossile Energieträger substituiert werden, kann begründet hinterfragt werden. Das Umweltbundesamt koordiniert sogenannte Projektionen, in denen die Frage behandelt wird, ob Klimaziele mit der aktuellen Klimaschutzpolitik erreicht werden können. Die Projektionen werden im Rahmen des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) an den Deutschen Bundestag sowie an die Vereinten Nationen und die Europäische Union berichtet. Dadurch sollen frühzeitig Lücken der Klimapolitik identifiziert werden, um eine rechtzeitige Nachsteuerung zu ermöglichen⁴. Nach dem

⁴ Siehe [Webseite des Umweltbundesamtes](#), zuletzt aufgerufen 19.09.2024

letzten Projektionsbericht kann u.a. davon ausgegangen werden, dass im Energiesektor die THG-Emissionen in Deutschland von rund derzeit 210 Mio. t CO₂-Äquivalente bis zum Jahr 2050 auf unter 50 Mio. t CO₂-Äquivalente sinken werden, im Gebäudesektor von derzeit rund 100 Mio. t CO₂-Äquivalente auf etwa 5 Mio. t CO₂-Äquivalente im Jahr 2050 (Wehnemann und Schultz 2024). Diese Entwicklung wird technisch gesehen dadurch erreicht, dass die Wärmebereitstellung bis 2050 nahezu ausschließlich auf defossiliertener Energieträgerbasis erfolgen wird. Die Substitutionsgutschrift für vermiedene THG-Emissionen würde daher wesentlich geringer oder kalkulatorisch negativ ausfallen. Dieses Beispiel verdeutlicht die Schwierigkeit, in einer Phase der Transformation nach dem Substitutionsprinzip Gutschriften zu berechnen und stärkt die in dieser Studie vorgenommene Entscheidung, im Basisszenario keine Gutschriften für Sekundärrohstoffe aus dem End-of-Life zu vergeben.

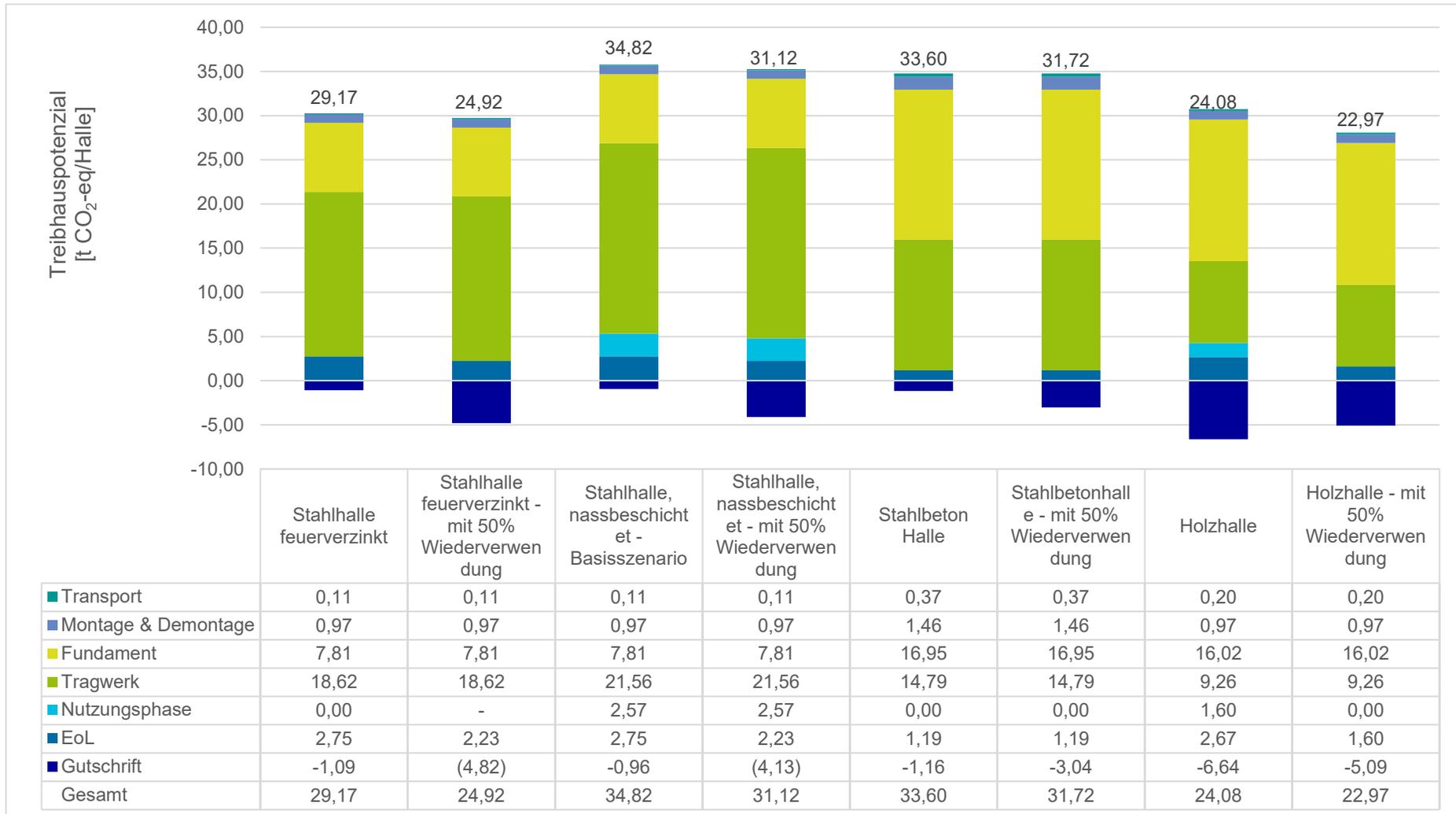
Erhöhung der Wiederverwendungsquote auf 50 %

Im Basisszenario wurde die Wieder- bzw. Weiterverwendungsquote mit lediglich 10 % angenommen. Um die Signifikanz dieser Festlegung zu prüfen und gleichzeitig die Umweltentlastungspotenziale einer stärker ausdifferenzierten Circular Economy nach einer Nutzungsphase der Tragwerke von 50 Jahren einschätzen zu können, wird mit dieser Sensitivitätsanalyse eine Wiederverwendungsquote von 50 % betrachtet.

Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse sind in der nachfolgenden Abbildung für den Wirkungsindikator Treibhausgaspotenzial zusammengefasst. Bei allen vier in dieser Studie untersuchten Konstruktionsvarianten führt die Erhöhung der Wiederverwendungsquote von 10 % auf 50 % zu einer signifikanten Verringerung der THG-Emissionen. Diese Verringerung ist auf zwei Aspekte zurückzuführen:

- Der größere Beitrag zur Verringerung ist auf höhere Gutschriften zurückzuführen. Höhere Gutschriften ergeben sich grundsätzlich dadurch, dass durch die Wiederverwendung die Neuherstellung von Bauteilen anteilig verringert wird. Dies wirkt sich bei den vier betrachteten Konstruktionsvarianten unterschiedlich stark aus. Bei der feuerverzinkten Variante erhöht sich die Gutschrift im Vergleich zum Basisszenario am meisten. Dies liegt daran, dass hier im Gegensatz zur nassbeschichteten Stahlvariante davon ausgegangen wird, dass nach 50 Jahren noch ein ausreichender Korrosionsschutz durch den Zinküberzug besteht, so dass keine erneute Feuerverzinkung notwendig ist. Hier wird demnach die vermiedene Herstellung der Stahlbauteile inklusive des vermiedenen Korrosionsschutzes gutgeschrieben. Bei der Holzkonstruktion und der Stahlbetonkonstruktion führt die Erhöhung der Wiederverwendung gleichzeitig zu einer Verringerung der Gutschriften für das Recycling von Beton und Holz. Bei der Holzhalle hat das sogar den Effekt, dass die Gutschrift bei dem Szenario mit einer Wiederverwendung von 50 % geringer als im Basisszenario ausfällt. Diese geringere Gutschrift erklärt sich dadurch, dass in dieser Studie der Werkstoff Holz als CO₂-neutral bewertet wird. Durch die höhere Wiederverwendung von Holz verringert sich die Gutschrift, weil kalkulatorisch weniger Strom und Wärme aus fossilen Energieträgern substituiert wird.
- Darüber hinaus führt eine Erhöhung der Wiederverwendungsquote zu geringeren Aufwendungen im End-of-Life; die dadurch erreichten Einsparungen an THG-Emissionen sind allerdings deutlich geringer als durch die höheren Gutschriften. So führt beispielsweise bei der feuerverzinkten Stahlkonstruktion die Erhöhung der Wiederverwendungsquote zu einer Erhöhung der Gutschrift von 3,73 t CO₂-eq/Halle, die verringerten Aufwendungen im End-of-Life tragen demgegenüber lediglich mit 0,52 t CO₂-eq/Halle bei.

Abbildung 1-9: Sensitivitätsanalyse: Erhöhung der Wiederverwendungsquote von 10% (Basisszenario) auf 50 %- Treibhausgaspotenzial pro funktionelle Einheit in t CO₂-eq/Halle



Quelle: Eigene Darstellung

Zusammenfassend wird dem Institut Feuerverzinken GmbH als Auftraggeber der Studie empfohlen, bei der Kommunikation der im Rahmen der hier durchgeführten Ökobilanz gewonnenen Ergebnisse gegenüber Dritten ausgewogen zu kommunizieren. Das bedeutet, dass festgestellte Vorteile bei der feuerverzinkten Konstruktionsvariante bei den Indikatoren THG-Potenzial und Inanspruchnahme knapper Ressourcen (Energieträger), auch die Indikatoren zu betrachten, bei denen die feuerverzinkte Variante systembedingt Nachteile aufweist (Inanspruchnahme Metalle). Zudem sollte untersucht werden, mit welchen Technologien und Maßnahmen Potenziale zur Verringerung dieser Beiträge erschlossen werden können.

Zudem sollten in weiteren Arbeiten einzelne Aspekte vertieft werden, die im Rahmen dieser Studie nicht im Detail untersucht werden konnten. Dies betrifft zum einen die nicht berücksichtigten Prozesse bei der Stahlkonstruktion, nassbeschichtet, zum anderen die Frage nach der CO₂-Neutralität von Holz als Baumaterial.

1 Hintergrund, Zielsetzung und Anwendung der Studie

Die vorliegende Studie wurde vom Institut Feuerverzinken GmbH (im Folgenden IF) beauftragt. Ziel der Studie ist ein Vergleich von vier Varianten einer Hallenkonstruktion auf der methodischen Grundlage einer Ökobilanz. Am Beispiel einer konkreten Halle sollen vier verschiedene Ausführungsvarianten der Tragwerkskonstruktion einschließlich der erforderlichen Fundamente entlang des gesamten Lebenswegs vergleichend gegenübergestellt werden. Für alle untersuchten Ausführungsvarianten werden auch die Beiträge einzelner Lebenswegphasen (Herstellungs- und Errichtungsphase, Nutzungsphase und Entsorgungsphase) und relevanter Prozesse betrachtet, um Hinweise auf Schwerpunkte zu den betrachteten potenziellen Umweltbelastungen zu erhalten. Auf der Grundlage dieser Beitragsanalysen können in weiteren Studien tiefergehende Überlegungen zur umweltbezogenen Optimierung der einzelnen Ausführungsvarianten angestellt werden.

Als Ausführungsvarianten wurden eine Stahlkonstruktion mit Feuerverzinkung als Korrosionsschutz, eine Stahlkonstruktion mit einem Nassbeschichtungssystem⁵ als Korrosionsschutz, eine Stahlbetonausführung sowie eine Holzbaukonstruktion (mit stückverzinkten Bauelementen zur Abstützung und Verbindung der Balkenkonstruktion) festgelegt. Diese vier Ausführungsvarianten werden als funktional äquivalent angesehen, siehe im Detail Abschnitt 2.3.2.

Die Studie ist zum einen als Informationsgrundlage für die Mitglieds- und Partnerunternehmen des Industrieverbands Feuerverzinken vorgesehen. Zum anderen soll die Zusammenfassung der Studie auch zur Kommunikation gegenüber weiteren Akteur*innen eingesetzt werden⁶. Damit wird mit dieser Studie eine breite Zielgruppe angesprochen, diese umfasst u.a.

- Fachplaner*innen aus Ingenieur-/Architekturbüros,
- Entscheidungsträger*innen in Unternehmen und anderen privaten oder auch staatlichen Organisationen, die mit der Beschaffung von (in der Regel gewerblich genutzten) Hallen befasst sind und
- weitere Marktakteure sowie die interessierte (Fach-)Öffentlichkeit.

Mit der Studie soll aufgezeigt werden, welche der vier untersuchten Tragwerksvarianten einer exemplarischen Hallenkonstruktion in einer auf den Lebensweg ausgerichteten Analyse jeweils mit welchen systemspezifischen relevanten potenziellen Umweltauswirkungen verbunden ist. Aus der vergleichenden Gegenüberstellungen können Akteure auch Präferenzen für eigene Planungen und Entscheidungen ableiten, wobei bei allen Schlussfolgerungen und Empfehlungen sowohl methoden- als auch datenbedingte Einschränkungen zu beachten sind. Darauf wird insbesondere im Abschnitt 4 dieser Studie eingegangen.

Aus der beschriebenen Zielsetzung und dem Untersuchungsrahmen ergeben sich aber auch Anwendungen, für die die Studie nicht vorgesehen ist. Konkret gehören zu den nicht vorgesehenen Anwendungen der Studie:

⁵ Unter "Nassbeschichten" versteht man die Applikation von Flüssig-Beschichtungsstoffen auf Oberflächen, umgangssprachlich wird dies als „Lackieren“ bezeichnet. Im Unterschied zur Nassbeschichtung werden bei der Beschichtung mit sogenannten Pulverlacken keine Lösemittel verwendet.

⁶ Aus Transparenzgründen wird darüber hinaus auf Nachfrage der komplette Studienbericht (ohne vertrauliche Daten) der interessierten Öffentlichkeit durch das IF zur Verfügung gestellt.

- Der in der Studie vorgenommene Vergleich bezieht sich auf Tragwerksvarianten für eine Halle mit einer festgelegten Größe (Höhe, Fläche, Spannweite, Traufhöhe etc.) und angenommenen Nutzungsbedingungen (Nutzungsdauer, Umgebungsbedingungen). Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Studie sind an diese Rand- und Rahmenbedingungen gebunden. Eine Übertragung der in dieser Studie erarbeiteten Ergebnisse und Schlussfolgerungen auf andere Tragwerksvarianten ist nicht bzw. nur auf der Grundlage von weiteren, detaillierten Analysen möglich.
- Die Ableitung von Schlussfolgerungen zur konkreten Ausführungsplanung von Hallen: Die Studie fokussiert die Tragwerksplanung (einschließlich der damit verbundenen Fundamente), demgegenüber sind Bauelemente der Gebäudehülle (Decken und Wände) außerhalb des Untersuchungsrahmens.
- Vor dem Hintergrund dieser generellen Einschränkungen können (abgesehen von den formalen und prozeduralen Anforderungen) **aus den quantitativen Ergebnissen** dieser Studie auch keine Daten im Sinne von Umwelt-Produktdeklarationen (Environmental Product Declaration, EPD) abgeleitet werden,

Bei Ökobilanzen, in denen Vergleiche zwischen Systemen vorgenommen werden (hier: Varianten der Tragwerkskonstruktion einer Halle) und bei denen die Aussagen zur Veröffentlichung vorgesehen sind, müssen dem Normenwerk für Ökobilanzen⁷ folgende bestimmte methoden- und datenbezogene sowie prozedurale Anforderungen eingehalten werden. Diese Anforderungen zielen insbesondere darauf ab, dass die zur Erstellung der Ökobilanz herangezogenen Daten, Methoden und Annahmen transparent und mit ausreichender Ausführlichkeit dargelegt werden. Zudem müssen nach den Anforderungen die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Ökobilanz der angesprochenen Zielgruppe vollständig, korrekt und unvoreingenommen mitgeteilt werden, einschließlich erkannter Einschränkungen.

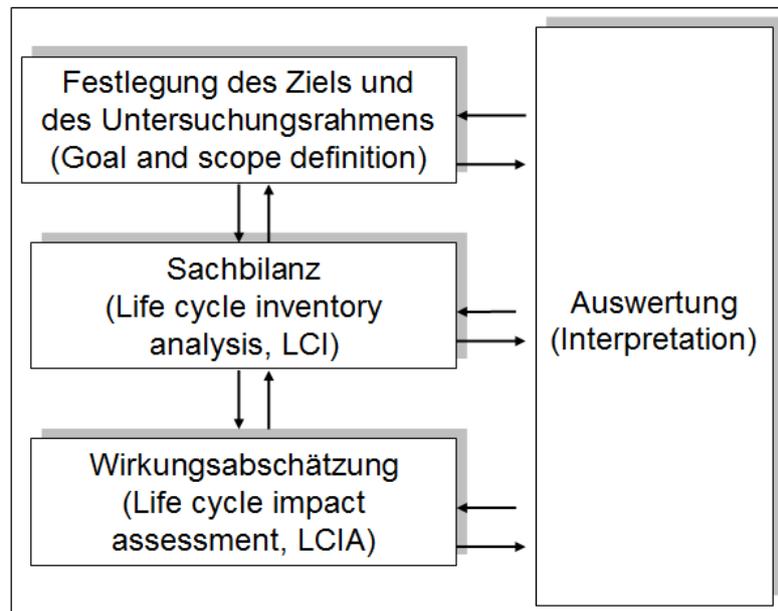
Auf die konkreten Anforderungen wird in den nachfolgenden Abschnitten dieses Berichts im Detail eingegangen.

2 Methodisches Vorgehen

2.1 Ökobilanz als methodische Grundlage der Studie

Der in dieser Studie vorgenommene Vergleich von vier Varianten einer Hallenkonstruktion wurde auf der Grundlage der standardisierten Ökobilanz-Methode nach DIN EN ISO 14040:2021-02 und DIN EN ISO 14044:2021-02 durchgeführt. In einer Ökobilanz werden möglichst umfassend der gesamte Lebensweg eines Produktes bzw. Produktsystems und die zugehörigen potenziellen ökologischen Auswirkungen erfasst. Die entlang des Lebenswegs auftretenden Stoff- und Energieumsätze und daraus resultierende potenzielle Umweltbelastungen, wie beispielsweise das Treibhauspotenzial, werden quantifiziert. Bei der Ökobilanz handelt es sich um eine systematische Methode, mit der die umweltseitigen Auswirkungen von Produkten und Prozessen in vier Teilschritten erfasst und analysiert werden (siehe Abbildung 2-1).

⁷ DIN EN ISO 14040:2021-02 und DIN EN ISO 14044:2021-02, vgl. folgenden Abschnitt 2.1

Abbildung 2-1: Grundstruktur und Teilschritte einer Ökobilanz


Quelle: DIN EN ISO 14040:2021-02

Neben dem Ökobilanz-Normenwerk existieren weitere Normen, die für den Baubereich bzw. den Gebäudesektor relevant sind:

- Die DIN EN DIN EN 15643:2021-12 („Nachhaltigkeit von Bauwerken - Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken) behandelt Aspekte, die über eine umweltbezogene Analyse hinausgehen: "Dieses Dokument stellt die Grundsätze und Anforderungen für die Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken hinsichtlich ihrer umweltbezogenen, sozialen und ökonomischen Qualität unter Berücksichtigung ihrer technischen und funktionalen Eigenschaften bereit."
Da diese weitergehenden Aspekte nicht Gegenstand dieser Studie sind, wurde diese Norm nicht als Grundlage herangezogen.
- Die DIN EN 15804:2012-04 („Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte“) liefert grundlegende Produktkategorieregeln (PCR) für Typ-III-Umweltdeklarationen für Bauprodukte und Bauleistungen und beinhaltet unter anderem eine Nomenklatur zur einheitlichen Bezeichnung von Lebenswegabschnitten.
Die in dieser Studie betrachteten Lebenswegphasen entsprechen sinngemäß auch den in dieser Norm zugrundeliegenden Prinzipien, von einer detaillierten Übernahme der Bezeichnungen für die einzelnen Lebenszyklusstadien wurde allerdings abgesehen.

Der in Abbildung 2-1 dargestellten Grundstruktur folgend wird in den folgenden Abschnitten zunächst der Untersuchungsrahmen der Studie näher beschrieben.

2.2 Betrachtete Alternativen

Es wurden vier verschiedene Typlösungen für das Tragwerk einer konkreten Hallenkonstruktion betrachtet; die Grundlagen wurden einer vom IF zur Verfügung gestellten Veröffentlichung des

bauforumstahl e.V. (Kocker und Möller 2016) und einer ergänzenden Berechnung (Oberhaidinger 2023) entnommen.

- Stahlkonstruktion mit Korrosionsschutz durch Feuerverzinken gemäß DIN EN ISO 1461:2022 (im Weiteren als „Stahlkonstruktion, feuerverzinkt“ bezeichnet)
- Stahlkonstruktion mit Korrosionsschutz durch Nassbeschichtung gemäß DIN EN ISO 12944 Teile 1-8 (DIN EN ISO 12944) („Stahlkonstruktion, nassbeschichtet“)
- Stahlbetonbauweise gemäß DIN 1045-1:2023-08 („Stahlbetonkonstruktion“)
- Holzbaukonstruktion (mit stückverzinkten Bauelementen, sogenannte „Anschlüsse“, zur Abstützung und Verbindung der Balkenkonstruktion – „Holzkonstruktion“)

In dieser Studie werden die Ausführungsvarianten entlang des gesamten Lebensweges und unter Berücksichtigung eventueller Maßnahmen zur Bauwerksunterhaltung während der Nutzungsphase untersucht und vergleichend gegenübergestellt. Die vier Ausführungsvarianten wurden so konzipiert, dass die Funktion der Hallenkonstruktion gleichwertig erfüllt werden kann (vgl. Abschnitt 2.3). Alle vier Varianten kommen in der Praxis vor.

Stahlkonstruktionen können zusätzlich mit sogenannten Duplex-Systemen vor Korrosion geschützt werden (Heine und van Daele 2021): Auf einem feuerverzinkten Überzug werden zusätzlich Zwischen- und/oder Deckbeschichtungen (Lacke und Farben) aufgebracht. Duplex-Systeme kommen auch aus optischen Gründen zum Einsatz, wenn der „zinkgraue“ Korrosionsschutz farblich an Umgebungsbedingungen angepasst werden soll.

Im Rahmen dieser Studie werden Duplex-Systeme nicht betrachtet, um die wesentlichen Systemunterschiede im Korrosionsschutz zwischen Feuerverzinkung einerseits und Nassbeschichtung andererseits darstellen zu können. Aus Gründen der hohen Anforderungen an den Korrosionsschutz wird auch die Pulverbeschichtung von Stahlbauteilen, wie sie beispielsweise bei Innenraumanwendungen wie für Büromöbel gängig ist, in dieser Studie nicht berücksichtigt.

2.3 Funktionelle Einheit und Referenzflüsse

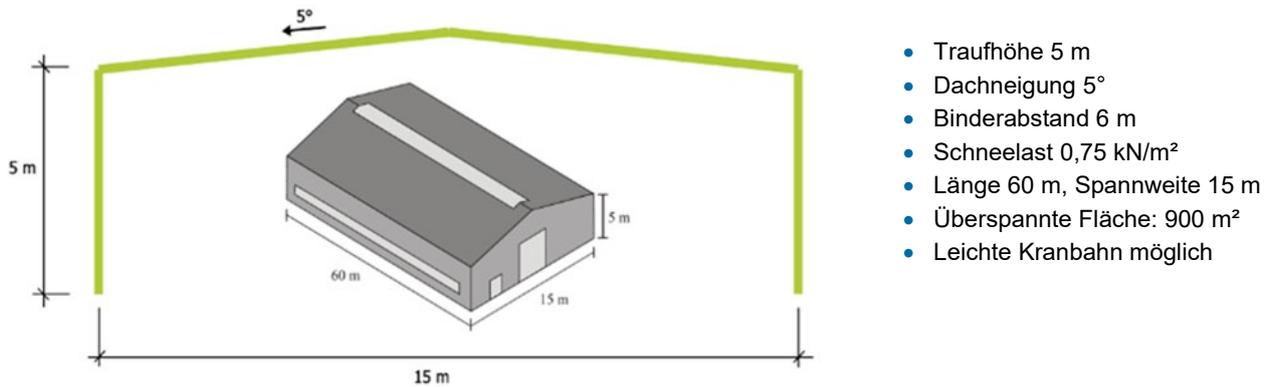
2.3.1 Auswahl einer exemplarischen Halle

Für den Vergleich wurde die Konstruktion einer beispielhaften Halle herangezogen, wie sie von bauforumstahl e.V. für eine eigene Ökobilanz im Jahr 2015 herangezogen wurde (Siebers und Hauke 2015; Kocker und Möller 2016). In dieser Ökobilanz stand der Vergleich der für das Tragwerk (samt Fundament) eingesetzten Baustoffe im Vordergrund. Dabei heben die Autoren der Ökobilanz hervor, dass die Konstruktion des Tragwerkes einer Halle mit unterschiedlichen statischen Systemen erfolgen kann, wodurch sich abhängig von der gewählten Konstruktion Unterschiede in den benötigten Baustoffmengen bei identischer Hallengröße ergeben (Siebers und Hauke 2015). Als beispielhafte Musterhalle wurde in dieser Ökobilanz eine als typisch angesehene Hallenkonstruktion (von den Autoren entsprechend auch als „Typenhalle“ bezeichnet) mit Spannweite 15 m, Traufhöhe 5 m, Dachneigung 5°, Binderabstand 6 m und einer Schneelast von 75 kg/m² herangezogen, vgl. Abbildung 2-2.

Durch die offene Bauweise kann die Halle während der angenommenen Nutzungsdauer für sehr unterschiedliche Zwecke eingesetzt werden (Lager-/Produktionshalle, Sporthalle, Reithalle etc.). In

dieser Studie wird ausschließlich die Tragwerkskonstruktion samt zugehöriger Fundamente der Halle bilanziert, die Konstruktion eines Daches sowie eventuell benötigter Wände ist nicht in die Bilanzierung inbegriffen, da diese Bauelemente unabhängig von der Rahmenkonstruktion angebracht werden könnten.

Abbildung 2-2: Eigenschaften der beispielhaft ausgewählten Halle



Quelle: Siebers und Hauke 2015, Kocker und Möller 2016

In der von bauforumstahl e.V. veröffentlichten Ökobilanz wurden zwei verschiedene statische Systeme mit drei unterschiedlichen Ausführungsvarianten betrachtet: Während für das Stahl-Tragwerk als statisches System ein Zweigelenkrahmen mit biegesteifen Rahmenecken und einem Blockfundament ausgewählt wurde, beruhen sowohl das Tragwerk aus Stahlbeton als auch das kombinierte Tragwerk aus Stahlbeton (für die vertikalen Stützen) und Holz (für die horizontalen Binder) auf einem statischen System aus eingespannten Stützen mit gelenkig angeschlossener Binder und Köcherfundamenten. Diese Unterschiede sind in der nachstehenden Tabelle 2-1 zusammengefasst; in Abbildung 2-3 werden die beiden unterschiedlichen statischen Systeme schematisch dargestellt.

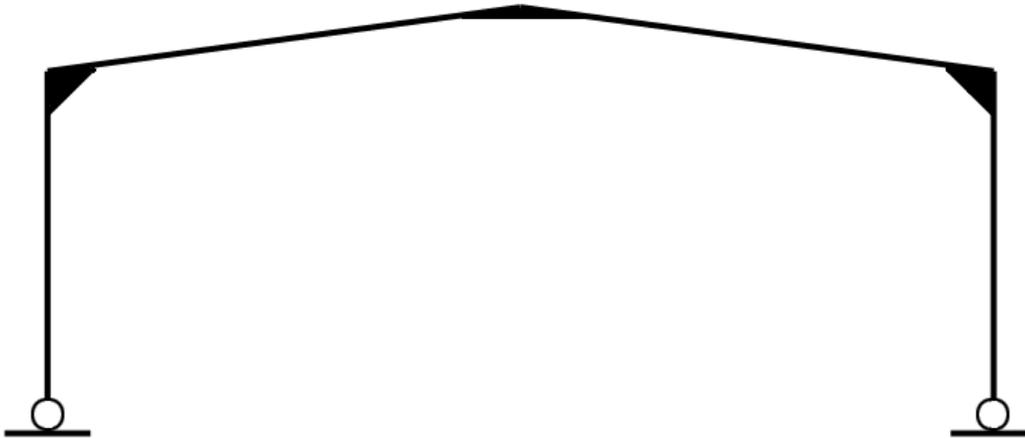
Tabelle 2-1: Statische Systeme und betrachtete Ausführungsvarianten in der von bauforumstahl e.V. herausgegebenen Studie „Ökobilanzieller Vergleich von Hallen unterschiedlicher Bauweisen“

Statisches System	Ausführungsvarianten (Hauptmaterial)
Zweigelenkrahmen mit biegesteifen Rahmenecken, Blockfundamente	Stahl-Tragwerk (Stahl S 355)
Eingespannte Stützen mit gelenkig angeschlossener Binder, Köcherfundamente	Stahlbeton-Tragwerk (Beton C30/37) Stahlbeton-Holz-Tragwerk (Stützen: Beton C30/37, Binder: Brettschichtholz BS 16)

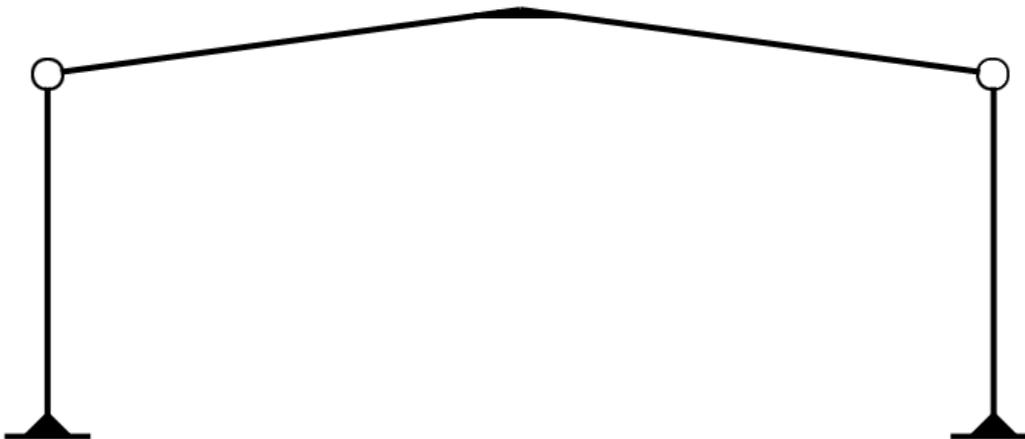
Quelle: Siebers und Hauke 2015, verändert

Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der beiden unterschiedlichen statischen Systeme in der von bauforumstahl e.V. herausgegebenen Studie „Ökobilanzieller Vergleich von Hallen unterschiedlicher Bauweisen“

Zweigelenrahmen mit biegesteifen Rahmenecken, Blockfundamente



Eingespannte Stützen mit gelenkig angeschlossenem Binder, Köcherfundamente



Quelle: Siebers und Hauke 2015

Für die drei in der Ökobilanz von bauforumstahl e.V. betrachteten Ausführungsvarianten und Konstruktionsweisen wurden die gleichen Lastannahmen getroffen, sie werden als vergleichbar angesehen und kommen in der Praxis vor (Kocker 2024). Grundlage der Planung ist dabei das europäische Fachregelwerk, Eurocodes 1 – 10 (Huckshold 2024).

In Vorgriff auf die Festlegung und Dokumentation der Referenzflüsse (siehe Abschnitt 2.3.3) kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass die Wahl des statischen Systems mit Blick auf die Auslegung und Größe der Fundamente eine signifikante Festlegung ist, da die Fundamentmassen bei den Köcherfundamenten (für das Stahlbeton- und für das Stahlbeton-Holz-Tragwerk) deutlich größer als bei den Blockfundamenten (für das Stahl-Tragwerk) ausfallen. Dieser Sachverhalt wird in

einer Stellungnahme des baumforumstahl e.V. wie folgt plausibilisiert: „In Analogie zur Ermittlung der Querschnitte und Bauteilgrößen für die Tragkonstruktion ergeben sich die notwendigen Querschnitte und Massen inkl. des Bewehrungsstahls für die Fundamente aus den statischen Berechnungen der einzelnen Varianten. Die stark voneinander abweichenden Fundamentmassen sind auf die unterschiedlichen Stabilisierungsvarianten der Rahmen zurückzuführen. Während im Stahlbau 2-Gelenkrahmen mit biegesteifer Eckausbildung und gelenkig angeschlossenen Fundamenten bei Spannweiten bis 100 m üblich sind, erfolgt im Stahl- und Spannbetonbau die Stabilisierung üblicherweise über die eingespannten Stützenstiele, während der Stahlbetonbinder gelenkig aufgelagert wird. Gleiches gilt für den Holzbinder auf Stahlbetonstützen. Die Gründe liegen in der ansonsten notwendigen konstruktiven Ausbildung der biegesteifen Rahmenecke zwischen Stahlbetonstütze und Binder auf der Baustelle, was nur mit extrem hohem Aufwand und Kosten möglich wäre. Infolgedessen werden beim Stahlrahmen überwiegend vertikale Beanspruchungen über das Fundament in den Baugrund eingeleitet, während die Stabilisierungslasten der Stahlbetonstützen im Fundament zusätzlich Momente erzeugen, die im Baugrund zu Bodenpressungen führen, die nur durch entsprechend größere Dimensionierung der Fundamentquerschnitte aufgenommen werden können.“ (Kocker 2024)

Die Berechnungsgrundlagen für den Materialaufwand der Typlösungen finden sich im Anhang 9.1.

2.3.2 Festlegung der funktionellen Einheit

Mit der funktionellen Einheit wird der quantifizierte Nutzen des untersuchten Produktsystems festgelegt. Ein wesentlicher Zweck der funktionellen Einheit ist die Angabe einer Bezugsgröße, auf die die Input- und Output-Daten im mathematischen Sinn normiert werden. Deshalb muss die funktionelle Einheit eindeutig definiert und messbar sein (DIN EN ISO 14044:2021-02). Darüber hinaus muss die funktionelle Einheit dem Ziel und dem Untersuchungsrahmen der Studie entsprechen, was im hier vorliegenden Fall bedeutet, dass sie einen direkten Vergleich der verschiedenen Typlösungen für Varianten von Tragwerken einer konkreten Halle erlaubt.

Die funktionelle Einheit für diese Studie wurde wie folgt festgelegt:

Bereitstellung des Tragwerks (samt erforderlicher Fundamente) für eine multifunktional nutzbare Halle mit einer überspannten Fläche von 900 m² über eine Nutzungszeit von 50 Jahren

Da in Anbetracht der langen Nutzungsdauer nicht nur von einer einzigen Nutzung ausgegangen werden kann, wird folgendes Szenario für die Hallennutzung angenommen: Die Halle wird für verschiedene Zwecke verwendet (denkbare Nutzer sind beispielsweise ein Brauereibetrieb, ein Agrar- oder Lebensmittelbetrieb oder ein Logistikbetrieb). Entsprechend dieses Szenarios ist die Halle in einer funktionsoffenen Bauweise mit 11 Rahmen im Abstand von 6 m konstruiert, wodurch die Möglichkeit zur Umnutzung während der Nutzungsdauer gegeben ist. Weiterhin wird gemäß des Nutzungsszenarios eine mittlere Korrosionsbelastung (Korrosivitätskategorie C 3) nach DIN EN ISO 14713-1:2017-08 für die Hallenkonstruktion angenommen. Diese Kategorie steht für eine mäßige Belastung, d.h. die Luft kann feucht und verunreinigt sein. Diese Bedingung stimmt mit dem festgelegten Szenario der Hallennutzung überein (verunreinigte Luft in Industriegebieten, feuchte Abluft eines Brauereibetriebs).

Die Festlegung der langen Nutzungsdauer in Verbindung mit der Korrosionsbelastung nach Kategorie C 3 führt zu entsprechenden Anforderungen an den Korrosionsschutz. Je nach Art und Dauer der Nutzung würde sich bei einer kürzeren Nutzungsdauer daher auch die Art des

Korrosionsschutzes und die Instandhaltung ändern. Das muss im Rahmen der Auswertung der Ergebnisse und bei der Ableitung von Schlussfolgerungen berücksichtigt werden.

2.3.3 Referenzflüsse

Auf der Grundlage der Festlegung der funktionellen Einheit müssen die Referenzflüsse festgelegt werden. Vergleiche zwischen Systemen müssen auf der Grundlage derselben Funktion, mit derselben funktionellen Einheit in Form ihrer Referenzflüsse quantifiziert werden.

Für die Tragwerksvarianten „Stahlkonstruktion, feuerverzinkt“, „Stahlkonstruktion, nassbeschichtet“ und „Stahlbetonkonstruktion“ konnte dabei unmittelbar auf die Planungsgrundlagen für die von bauforumstahl e.V. vorgelegten Ökobilanz (Siebers und Hauke 2015; Kocker und Möller 2016) zurückgegriffen werden. Dabei wurde der statische Nachweis nach den geltenden anzuwendenden Normen und Regelwerken durchgeführt und erbracht; es wurde bewusst darauf geachtet, dass die ausgewählten Querschnitte und Bauteile nicht überdimensioniert wurden, um eine Vergleichbarkeit sicherzustellen (Kocker 2024). Von Seiten des IF als Auftraggeber der vorliegenden Ökobilanz bestand die Absicht, anstatt der von bauforumstahl e.V. berücksichtigten hybriden Variante „Stahlbeton-Holz-Tragwerk“ (siehe Tabelle 2-1) eine reine Holzvariante (also Binder und Stützen, hier als „Holzkonstruktion“ bezeichnet) zu berücksichtigen. Dafür wurde vom IF ein Fachgutachten beauftragt, um die Abmessung und konstruktive Einbindung der Holzstützen (anstelle der Stützen aus Stahlbeton) zu berechnen (Oberhaidinger 2023).

Die konkreten Berechnungsgrundlagen aus den genannten Quellen (Siebers und Hauke 2015; Oberhaidinger 2023) sind im Detail im Anhang zusammengestellt; die nach Materialgruppen aggregierten Referenzflüsse mit Bezug auf die im vorangegangenen Abschnitt festgelegten funktionellen Einheit sind in der nachstehenden Tabelle 2-2 zusammengefasst.

Die beiden oberen Zeilen in der Tabelle bilden den jeweiligen Bedarf für das Fundament ab, die darauffolgenden Zeilen den Bedarf für das jeweilige Tragwerk (Stützen und Träger/Binder). Bei der Stahlbetonvariante begründet sich der mehr als doppelt so hohe Materialbedarf im Vergleich zu den Stahlvarianten darin, dass das Gesamtgewicht, das vom Fundament aufgenommen werden muss, im Vergleich zu den Stahlvarianten um rund Faktor 10 höher ausfällt. Das Gewicht des Tragwerks ist bei den beiden Stahlvarianten mit jeweils $18,6 \text{ kg/m}^2$ in ähnlicher Größenordnung wie bei der Holzvariante ($18,7 \text{ kg/m}^2$ zuzüglich $2,8 \text{ kg/m}^2$ verzinkter Stahl für Anschlusssteile etc.). Dennoch ist der Materialbedarf für das Fundament für die Holzvariante im Vergleich zum Bedarf bei den Stahlvarianten annähernd doppelt so hoch. Dies begründet sich darin, dass bei der Holzkonstruktion (wie auch bei der Stahlbetonkonstruktion) als statisches System von eingespannte Stützen mit gelenkig angeschlossenem Binder ausgegangen wurde, da die ansonsten notwendige konstruktive Ausbildung der biegesteifen Rahmenecke zwischen Stahlbetonstütze und Binder auf der Baustelle nur mit einem hohen Aufwand und Kosten möglich wäre (vgl. Abschnitt 2.3.1).

Zusammenfassend kann mit Blick auf die zugrunde gelegten Referenzflüsse festgehalten werden, dass die sich aus der Statik ergebenden Massen sowie die ausgewählten Querschnitte und Bauteilgrößen gerechtfertigt sind und alle statischen Anforderungen erfüllen. Auf eine tragwerksplanerische Optimierung der Konstruktionsweisen und Querschnitte wurde allerdings bewusst verzichtet, um im Zuge der Vergleichbarkeit keine Verzerrungen herbeizuführen und den zeitlichen Aufwand zu begrenzen (Kocker 2024).

**Tabelle 2-2: Referenzflüsse zur Bereitstellung der Halle in t / Halle (mit 900 m² Brutto-
grundfläche)**

Baustoff	Stahl- konstruktion feuerverzinkt	Stahl- konstruktion beschichtet	Stahlbeton- konstruktion	Holz- konstruktion	Einheit
Fundament					
Beton C25/30	46,8	46,8	95,2	89	t / Halle
Bewehrungsstahl BSt 500 SA	0,4	0,4	9,2	2	
Tragwerk					
IPE 400 feuerverzinkt	7,2				
IPE 360 feuerverzinkt	9,6				
IPE 400 lackiert		7,2			
IPE 360 lackiert		9,6			
Beton C30/37			104,1		
Stahl feuerverzinkt S355				2,6	
Brettschichtholz Nadelholz				16,9	
Gesamt	64	64	208,5	110,4	

2.4 Systemgrenze und Abschneidekriterien

Die Systemgrenze legt fest, welche Prozessmodule in der Ökobilanz enthalten sein müssen. Die Auswahl der Systemgrenze muss mit dem Ziel der Studie übereinstimmen. Im vorliegenden Fall umfasst die Systemgrenze den gesamten Lebenszyklus der untersuchten Konstruktionsvarianten, dies sind:

- Prozesse zur Entnahme der Rohstoffe,
- Herstellung und Fertigung der Baumaterialien einschließlich des initialen Korrosionsschutzes,
- Montage auf der Baustelle,
- Unterhalt und Instandhaltung während der festgelegten Nutzungsdauer von 50 Jahren,
- die Demontage und die Prozesse der Nachgebrauchsphase (Wiederverwendung von Bauteilen, Sortierung, Recycling, Entsorgung Sortierreste etc.) und
- die erforderlichen Transporte entlang des Lebenswegs der Konstruktionsvarianten.

Es handelt sich damit bei der vorliegenden Studie um eine Bilanz von der „Wiege bis zur Bahre“ (engl. „from-cradle-to-grave“).

In den nachstehenden vier Abbildungen (Abbildung 2-4 bis Abbildung 2-7) werden für die untersuchten vier Optionen die Systemgrenzen und die wesentlichen Prozesse entlang des jeweiligen Lebenswegs dargestellt. Um die Abbildungen übersichtlich zu halten, werden weder die als Energieträger verwendeten Rohstoffe noch die Vorketten von Hilfs- und Betriebsstoffen dargestellt. Die für die Sachbilanz herangezogenen Datensätze werden in den Abschnitten 3.1 bis 3.4 aufgeführt und beschrieben.

Allen vier Optionen gemein ist, dass für die Konstruktionen Fundamente erforderlich sind. Die Größe dieser Fundamente fällt allerdings aufgrund der unterschiedlichen Gewichte der Tragwerke und aus weiteren konstruktionsbedingten Sachverhalten signifikant unterschiedlich aus, siehe oben im Begleittext zu Tabelle 3-1. Daher wurden in dieser Studie nicht nur die Tragwerke, sondern auch die Fundamente mit in die Systemgrenzen hineingenommen.

Die Fundamente werden aus mit Stahl bewehrtem Beton gefertigt. Für den Betonanteil erforderliche Rohstoffe sind Sand, Kies und Zement, wobei Zement durch Brennen eines Gemischs aus Kalkstein und Tonen („Mergel“) hergestellt wird. Sand und Kies können teilweise bereits ersetzt werden durch sekundäre Zuschlagsstoffe, wie beispielsweise Betonsplit aus der Verwertung von Altbeton. Rohstoffe für den Bewehrungsstahl sind Eisenerz und Koks (für die Hochofenroute) sowie Stahlschrott (für die Elektrostahlroute). Daneben werden noch diverse Legierungselemente eingesetzt, um die für den Bewehrungsstahl erwünschten technischen Eigenschaften zu gewährleisten.

Den beiden Stahlvarianten ist gemein, dass das Tragwerk aus Stahlträgern besteht, die – vergleichbar zum Bewehrungsstahl für das Fundament – auf den Rohstoffen Eisenerz und Koks (für die Hochofenroute) sowie Stahlschrott (für die Elektrostahlroute) beruht, daneben werden noch diverse Legierungselemente eingesetzt, um die für die Stahlträger erwünschten technischen Eigenschaften zu gewährleisten.

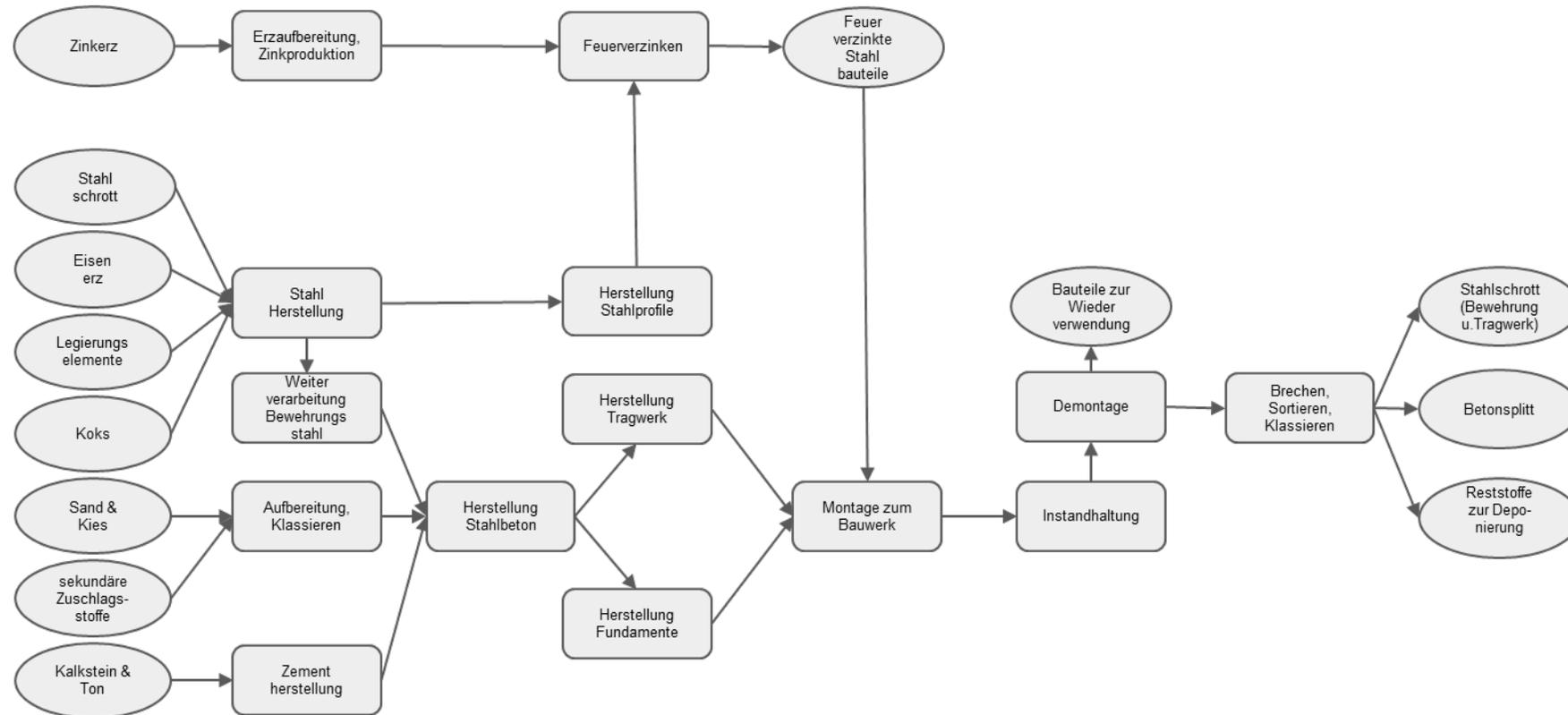
Der Unterschied bei den Stahlvarianten besteht im Korrosionsschutz. Bei der Variante „Stahlkonstruktion, feuerverzinkt“ (siehe Abbildung 2-4) müssen für den Korrosionsschutz zink-

haltige Erze gefördert, aufbereitet und (ggf. mit sekundären Einsatzstoffen) zu Zink verhüttet werden. Die vorgefertigten Stahlbauteile werden dann im Zinkbad feuerverzinkt. Die Dicke des Zinküberzugs wird so eingestellt, dass während der Nutzungsdauer der Halle von 50 Jahren keine Instandhaltung erforderlich ist. Anders verhält es sich bei der Variante „Stahlkonstruktion, nassbeschichtet“. Hier muss der Korrosionsschutz während der Nutzungsdauer zum Teil erneuert werden. Die Komponenten der Nassbeschichtungssysteme bestehen aus Pigmenten, Harzen und Lösemittel. Die hier zum Einsatz kommenden Pigmente werden aus metallischen und mineralischen Rohstoffen hergestellt, Harze und Lösemittel aus den fossilen Rohstoffen Erdöl und Erdgas, vgl. Abbildung 2-5.

Die Stahlbetonvariante ist mit Blick auf die Rohstoffe und deren Verarbeitung weniger komplex als bei den anderen Varianten, da sowohl Fundament als auch Tragwerk aus den gleichen Materialien hergestellt werden, wenngleich die Materialspezifikationen im Detail abweichen (vgl. Abbildung 2-6 und Tabelle 2-2). Bei der Holzvariante wird neben Holz eine Binderkomponente benötigt, um verschiedene Lagen des Konstruktionsholzes zu verleimen. Daneben werden bei dieser Variante aus Gründen des konstruktiven Holzschutzes verzinkte Stahlteile eingesetzt (siehe Abbildung 2-7). Bei allen untersuchten Varianten wird angenommen, dass im Sinne der Umsetzung der Prinzipien einer Circular Economy im End of Life nach der Demontage des Bauwerks Teile des Tragwerks wiederverwendet oder zu ähnlichen Tragwerken weiterverwendet werden. Derzeit steht der Wieder- bzw. Weiterverwendung von konstruktiven Bauteilen und Bauelementen eine Reihe von Hemmnissen entgegen, vgl. eingehend Dechantsreiter et al. 2014. Zwar wurde diese Studie bereits vor zehn Jahren erstellt, die festgestellten Hemmnisse sind allerdings eher von grundsätzlicher Natur und durch die grundlegenden Produktions- und Organisationsstrukturen bedingt (beispielsweise bei Holzkonstruktionen die Trennung von unbehandelten/mit Holzschutzmitteln behandelten Hölzern oder die Art der Bauteilverbindungen, die teilweise nicht zerstörungsfrei lösbar sind). Vor diesem Hintergrund wird im Basisszenario dieser Ökobilanz für alle untersuchten Tragwerke eine Wiederverwendungsquote von lediglich 10 % angenommen. Um die Signifikanz dieser Festlegung zu prüfen und gleichzeitig die Umweltentlastungspotenziale einer stärker ausdifferenzierten Circular Economy nach einer Nutzungsphase der Tragwerke von 50 Jahren einschätzen zu können, wird im Rahmen der durchgeführten Sensitivitätsanalysen zusätzlich eine Wiederverwendungsquote von 50 % betrachtet, vgl. Abschnitt 4.3.4.

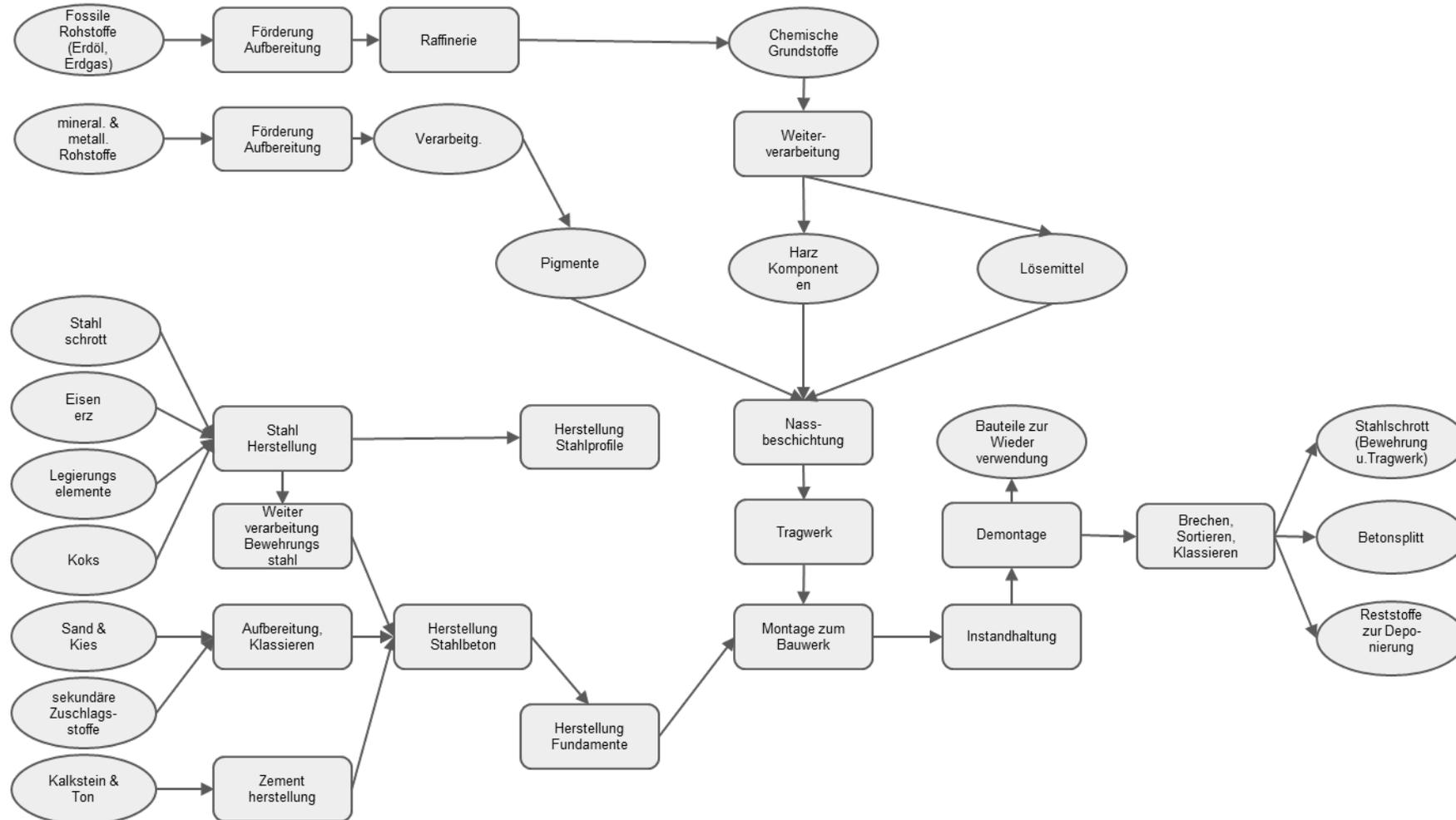
Die Fundamente sowie die nicht wiederverwendeten Teile des Tragwerks werden zerkleinert, klassiert und nach Aufbereitung als sekundäre Rohstoffe (im Wesentlichen als Stahlschrott und Betonsplitt) der Primärproduktion zugeführt. Für das Altholz wird eine thermische Verwertung angenommen.

Abbildung 2-4: Vereinfachte Darstellung des Lebenswegs und der Systemgrenze für die Variante „Stahlkonstruktion, feuerverzinkt“



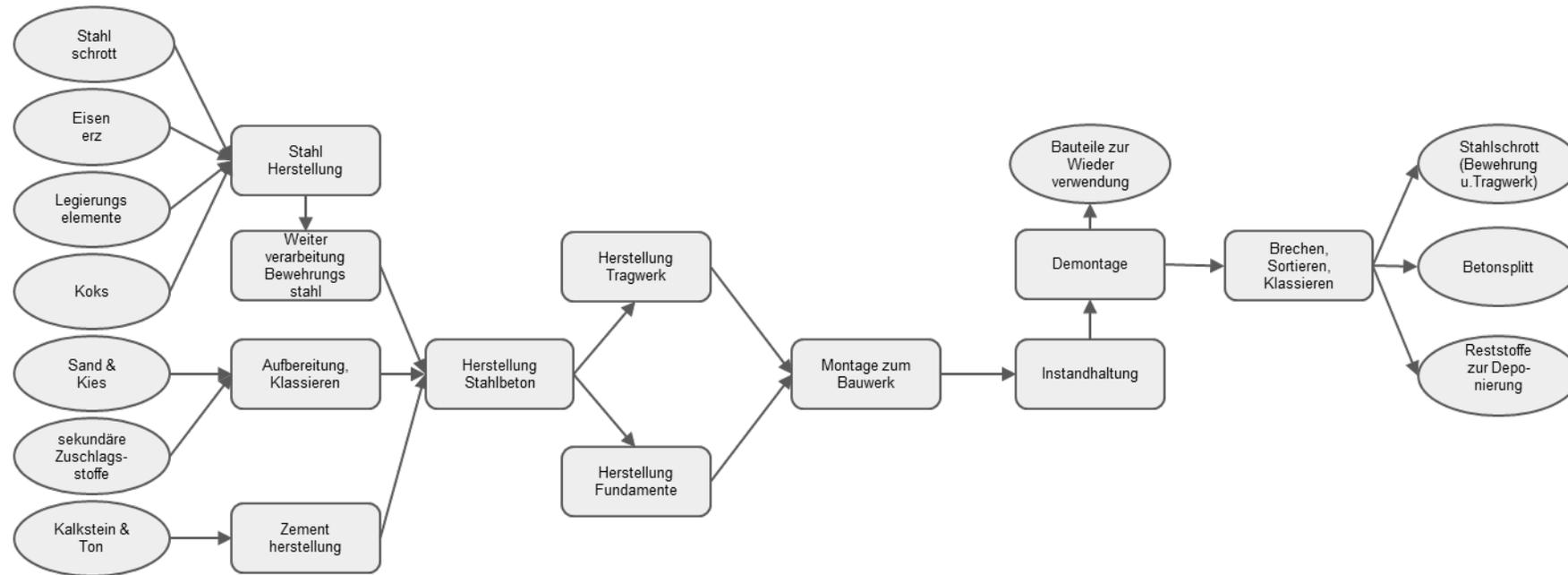
Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 2-5: Vereinfachte Darstellung des Lebenswegs und der Systemgrenze für die Variante „Stahlkonstruktion, nassbeschichtet“



Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 2-6: Vereinfachte Darstellung des Lebenswegs und der Systemgrenze für die Variante „Stahlbetonkonstruktion“



Quelle: Eigene Darstellung

Die im Rahmen der Erstellung der Ökobilanz angewandten Abschneidekriterien⁸ müssen ebenso wie die Annahmen, unter denen diese aufgestellt werden, eindeutig beschrieben werden. In der Praxis der Ökobilanz gibt es mehrere Möglichkeiten zur Festlegung der Abschneidekriterien, wie z.B. Masse, Energie und Umweltrelevanz. (vgl. DIN EN ISO 14044:2021-02).

Nachstehend wird das konkrete Vorgehen in dieser Studie beschrieben:

- Der Aufwand für die Herstellung, den Unterhalt und die Entsorgung für die Produktionsanlagen, die zur Fertigung und Verarbeitung der Materialien für die betrachteten Konstruktionsvarianten eingesetzt werden, also beispielsweise Anlagen zur Verarbeitung der Stahlbauteile, Anlagen zur Feuerverzinkung oder Nassbeschichtung, wird nicht einbezogen. Da diese Anlagen in der Regel über sehr lange Betriebszeiten betrieben werden und die Materialflüsse zur Herstellung, zum Unterhalt und zur Entsorgung dieser Anlagen klein, im Vergleich zum Fluss der in den Anlagen verarbeiteten Materialien sehr klein ausfällt, ist dieser Ausschluss, der in vielen Ökobilanzen analog vorgenommen wird, gerechtfertigt.
- Für die vorliegende Studie stehen somit die energetischen und stofflichen Inputströme zur Herstellung, Nutzung und Entsorgung der Materialien für die untersuchten Konstruktionsvarianten im Fokus. Um den Bearbeitungsaufwand bei der Durchführung von Ökobilanzen im Rahmen zu halten, werden in vielen Studien quantifizierte Abschneidekriterien (beispielsweise nach Masse, Energie oder Umweltrelevanz) festgelegt, um den Ausschluss von einzelnen Prozessen oder Materialströmen im Lebensweg der betrachteten Varianten zu begründen. In dieser Studie wurde auf eine formale Anwendung dieses Prinzips verzichtet, sondern der Ausschluss jeweils mit spezifischen Argumenten begründet. Im Einzelnen:
 - Die Baustelleneinrichtung (Absperrung mit Zäunen, Schaffung Zufahrtswege, Infrastruktur für Arbeiter*innen auf der Baustelle, Überwachung) wurde nicht einbezogen mit der Annahme, dass sich hier die betrachteten Varianten nicht unterscheiden.
 - Der Einsatz von (mobilen) Baukränen zur Montage (und Demontage) der Tragwerke wird berücksichtigt, nicht hingegen weitere Einrichtungen zur Montage wie Gerüste oder Hubwagen. Dieser Ausschluss begründet sich dadurch, dass generell die Bauwerkselemente Dach und Seitenteile nicht betrachtet werden (siehe Abschnitt 2.3.1).
 - Speziell bei der Variante „Stahlkonstruktion, nassbeschichtet“ mussten aus Vereinfachungsgründen oder mangels belastbarer, repräsentativer Daten Teilprozesse ausgeschlossen werden:
 - Der Energieaufwand für die Abluftbehandlung bei der initialen Nassbeschichtung in stationären Anlagen wurde nicht berücksichtigt, obwohl dieser wegen der hohen Abluftmengen nicht vernachlässigbar ist. Ausschlaggebend für den Ausschluss ist, dass die Abluftbehandlung gesetzlich nur bei einem Teil der Betriebe ab einem bestimmten Durchsatz überhaupt erforderlich ist und eine repräsentative Marktübersicht im Rahmen dieser Studie nicht durchführbar war.

⁸ Als Abschneidekriterien bezeichnet man in der Ökobilanz die Festlegung der Stoffmenge, eines Energieflusses oder des Grades der Umweltrelevanz, die/der mit Prozessmodulen oder Produktsystemen verbunden sind, welche von einer Studie auszuschließen sind (DIN EN ISO 14040:2021-02).

- Bei der Instandsetzung der nassbeschichteten Variante wurde zwar der Energiebedarf für Schleifen (samt Absaugung) begründet abgeschätzt, der Verbrauch an Schleifmittel (damit Vorkette) dagegen nicht betrachtet, da hierfür keine belastbaren Daten erhoben werden konnten.
- Analog dazu wurde bei der nassbeschichteten Variante die Vorkette des Strahlmittels nur in einer Sensitivitätsanalyse betrachtet.

Zusammenfassend wird mit diesen Ausschlüssen die Variante „Stahlkonstruktion, nassbeschichtet“ gegenüber den drei anderen untersuchten Varianten und insbesondere im Vergleich zur Variante „Stahlkonstruktion feuerverzinkt“ in der Tendenz bessergestellt, wobei eine Quantifizierung dieses Effekts im Rahmen dieser Studie nicht vorgenommen werden konnte. Bei der Interpretation der Ergebnisse wird dieser Sachverhalt aufgegriffen.

2.5 Anforderungen an die Datenqualität

Mit den Anforderungen an Daten und Datenqualität werden in allgemeiner Form die Merkmale der Daten festgelegt, die für die Durchführung der Ökobilanz benötigt werden. Entsprechend den Vorgaben des Ökobilanz-Normenwerks, namentlich DIN EN ISO 14044:2021-02 Abschnitt 4.2.3.6.2, muss die Datenqualität durch bestimmte Kennwerte festgelegt werden, die sowohl quantitative als auch qualitative Aspekte sowie die Verfahren zur Sammlung und Verwendung dieser Daten beschreiben. Nachstehend werden die in dieser Studie zugrunde gelegten Anforderungen zusammenfassend dargestellt:

- **Zeitbezogener Erfassungsbereich:**

Der zeitbezogene Erfassungsbereich der Daten legt Anforderungen fest an das Alter der Daten und das kleinste Zeitintervall, über das die Daten gesammelt werden sollen.

In dieser Studie sollen die einbezogenen Daten für ergebnisrelevante Prozesse nicht älter als 10 Jahre sein.

- **Geographischer Erfassungsbereich:**

Mit dem geographischen Erfassungsbereich wird der räumliche Bereich festgelegt, für den Daten für die Prozessmodule erfasst werden.

Die in dieser Studie erfassten und zugrunde gelegten Daten sollen sich auf Deutschland oder Mitteleuropa beziehen.

- **Technologischer Erfassungsbereich:**

Mit dem technologischen Erfassungsbereich werden Anforderungen festgelegt, welche Technologien bzw. welcher Technologiemix mit den Daten für die Prozessmodule abgebildet werden.

Die in dieser Studie verwendeten Daten sollen grundsätzlich den realisierten mittleren Stand der Technik für die vier untersuchten Tragwerksvarianten abbilden.

- **Präzision:**

Dieser Aspekt legt die Anforderungen an Schwankungsbreite der Werte für die zugrunde gelegten Daten fest.

Die Schwankungsbreite der für die Festlegung der mit den Tragwerken verbundenen

Materialverbräuche soll innerhalb der branchenüblichen Toleranzen liegen. Bei den Nennmaßen der Tragwerke mit 15 m Breite und 60 m Länge liegen nach DIN 18202:2019-07 die Grenzabweichungen in Bereichen von 24 bis 30 mm.

- **Vollständigkeit:**

Dieser Aspekt beschreibt den prozentualen Anteil eines Energie- oder Materialflusses der gemessen oder geschätzt wird.

Im Rahmen dieser Studie soll die Summe der erfassten Energie- und Materialflüsse mindestens 95 % der tatsächlichen Flüsse umfassen.

- **Repräsentativität:**

Dieser Aspekt beschreibt als qualitative Einschätzung den Grad, in dem die herangezogene Datenmenge die wahre Grundgesamtheit (bezüglich zeitbezogenen, geographischen und technologischen Erfassungsbereich) widerspiegelt.

Die in der Studie zugrunde gelegten Daten sollen für die hier untersuchten Typlösungen von Tragwerkskonstruktionen unter den festgelegten Bedingungen (insbesondere bezogen auf die Festlegung der Funktionellen Einheit) als repräsentativ und übertragbar angesehen werden.

- **Konsistenz:**

Die Konsistenz beschreibt als ebenfalls qualitative Einschätzung, ob die Anforderungen an die Datenqualität auf die verschiedenen Komponenten der Analyse einheitlich angewendet werden. Hier wird eine hohe Konsistenz angestrebt, um einen tragfähigen Vergleich der Tragwerksvarianten zu ermöglichen. Unterschiede bei der Datengenerierung sollen mithilfe von Sensitivitätsanalysen auf die Ergebnisrelevanz überprüft werden.

- **Reproduzierbarkeit:**

Dieser Aspekt beschreibt, inwiefern ein unabhängiger Ersteller mit den dokumentierten Methoden und Datenquellen die in der Studie angegebenen Daten reproduzieren kann.

Hier wird eine ausführliche, hinreichend genaue Dokumentation der verwendeten Datenbasis und der Annahmen angestrebt, so dass eine grundsätzliche Reproduzierbarkeit gewährleistet wird. Allerdings ist dieser Grundsatz aus lizenzrechtlichen Gründen sowie aufgrund der Vertraulichkeit einzelner Daten zum Produktionsprozess eingeschränkt.

Zusätzlich zu den aufgeführten Aspekten werden die zugrundeliegenden Daten mit Quellenangaben versehen und ggf. die Unsicherheit der Information bei der Behandlung der Grundlagen der Sachbilanz (siehe Abschnitte 3.1 bis 3.3) im Einzelnen beschrieben. Zusammenfassend werden die herangezogenen Datensätze in Abschnitt 3.4 mit Datenherkunftsindikatoren gekennzeichnet.

2.6 Kuppelprodukte, Allokationsverfahren und Gutschriften

Unter Allokation werden bei der Durchführung von Ökobilanzen Zuordnungsverfahren verstanden, die dann erforderlich sind, wenn zum einen bei den betrachteten Systemen mehrere verwertbare Produkte („Kuppelprodukte“) erzeugt werden, und zum anderen, wenn in betrachtete Teilprozesse Stoff- und Energieströme von anderen, nicht betrachteten Systemen einfließen. Dies beiden Sachverhalte sind für alle vier betrachteten Tragwerksvarianten einschließlich der zugehörigen Fundamente an verschiedenen Stellen in den betreffenden Lebenswegen (siehe Abbildung 2-4 bis Abbildung 2-7) relevant. In der nachstehenden Übersicht werden wesentliche Kuppelprodukte sowie produktsystemübergreifend genutzte oder anfallende Sekundärrohstoffe aufgeführt. Um

Wiederholungen zu vermeiden, werden in der Tabelle die für alle Tragwerksvarianten relevanten Fundamente am Tabellenende gesondert aufgeführt.

Tabelle 2-3: Kuppelprodukte sowie anfallende / genutzte produktsystemübergreifende Stoff- und Energieströme entlang des Lebenswegs der untersuchten Tragwerksvarianten und Fundamente

Variante	Kuppelprodukte und anfallende / genutzte Stoff- und Energieströme
Stahlkonstruktion, feuerverzinkt	<ul style="list-style-type: none"> • Stahlschrott als Sekundärrohstoff im Input zur Stahlherstellung • Kuppelprodukte aus der Verarbeitung von Metallerzen (Eisen, Zink, Legierungselemente) • Neben- und Folgeprodukte aus der Koksherstellung (wie Steinkohlenteer, Rohbenzol, Schwefelsäure und Kokerei-Gas) • Zinkhaltige Stahlwerksstäube als Sekundärrohstoff bei der Zinkverhüttung und genutzte Reststoffe aus dem Feuerverzinken (siehe Abbildung 3-1) • Anfallender Stahlschrott bei der Stahlweiterverarbeitung • End-of-Life: Stahlteile des Tragwerks zur Wiederverwendung und / oder zur Verwertung als Stahlschrott
Stahlkonstruktion, nassbeschichtet	<ul style="list-style-type: none"> • Stahlschrott als Sekundärrohstoff, Kuppelprodukte aus der Verarbeitung von Metallerzen, Neben- und Folgeprodukte Koksherstellung, anfallender Stahlschrott aus der Stahlweiterverarbeitung und End-of-Life analog zur Variante „Stahlkonstruktion, feuerverzinkt“ • Organische Kuppelprodukte aus der Förderung und Verarbeitung von Erdöl und Erdgas und aus der Verarbeitung von chemischen Grundstoffen zu Harzkomponenten und Lösemitteln • Anorganische Kuppelprodukte aus der Förderung und Verarbeitung von mineralischen Rohstoffen zu Pigmenten
Stahlbetonkonstruktion	<ul style="list-style-type: none"> • Stahlschrott als Sekundärrohstoff, Kuppelprodukte aus der Verarbeitung von Metallerzen, Neben- und Folgeprodukte Koksherstellung und anfallender Stahlschrott aus der Stahlweiterverarbeitung analog zur Variante „Stahlkonstruktion, feuerverzinkt“ • Kuppelprodukte aus der Aufbereitung von Sand, Kies, Ton und Kalkstein • Betonsplitt als sekundärer Zuschlagstoff zur Herstellung Stahlbeton • Genutzte Sekundärrohstoffe wie Altreifen, Tiermehle und -fette, sonstige Abfälle als Brennstoff für die Zementherstellung • End-of-Life: Stahlbetonteile des Tragwerks zur Wiederverwendung und/oder Stahlschrott (aus Bewehrung) und Betonsplitt zur Verwertung
Holzkonstruktion ⁹	<ul style="list-style-type: none"> • Reststoffe aus der Schnittholzverarbeitung (etwa Holzspäne) als Sekundärrohstoffe • Organische Kuppelprodukte aus der Förderung und Verarbeitung von Erdöl und Erdgas und aus der Verarbeitung von chemischen Grundstoffen zu Bindemitteln • End-of-Life: Holzbauteile des Tragwerks zur Wiederverwendung und/oder Restholz zur thermischen Verwertung
Fundamente (alle Varianten)	<ul style="list-style-type: none"> • Stahlschrott als Sekundärrohstoff, Kuppelprodukte aus der Verarbeitung von Metallerzen, Neben- und Folgeprodukte Koksherstellung und anfallender Stahlschrott aus der Stahlweiterverarbeitung analog zur Variante „Stahlkonstruktion, feuerverzinkt“ • Kuppelprodukte aus der Aufbereitung von Sand, Kies, Ton und Kalkstein • Betonsplitt als sekundärer Zuschlagstoff zur Herstellung Stahlbeton • Genutzte Sekundärrohstoffe wie Altreifen, Tiermehle und -fette, sonstige Abfälle als Brennstoff für die Zementherstellung • End-of-Life: Stahlschrott (aus Bewehrung) und Betonsplitt zur Verwertung

Quelle: eigene Zusammenstellung

⁹ Um die tabellarische Aufstellung übersichtlich zu halten, wurden verzinkte Stahlbauteile, die aus Gründen des konstruktiven Holzschutzes eingesetzt werden, hier nicht aufgeführt. Es gelten für diese sinngemäß alle Einträge, wie sie bei der Variante „Stahlkonstruktion, feuerverzinkt“ aufgeführt sind.

In dieser Studie wurde mit Blick auf die Wahl von Allokationsregeln und die Vergabe von Gutschriften aus der Wiederverwendung oder Weiterverwertung nach zwei Fällen unterschieden:

1. Kuppelprodukten und produktsystemübergreifenden Stoff- und Energieströmen, die mit der Produktion der hier untersuchten Tragwerksvarianten (einschließlich zugehöriger Fundamente) verbunden sind und wo Anfall und Nutzung mehr oder weniger in der Gegenwart oder nahen Zukunft (also innerhalb der wenigen nächsten Jahre) erfolgt; dafür wird häufig auch der Begriff Prozessallokation verwendet.
2. Sekundärprodukten oder Sekundärrohstoffen aus der End-of-Life-Phase der untersuchten Tragwerksvarianten, die erst nach der Nutzungsphase von 50 Jahren anfallen. Dieser Fall wird als Systemallokation bezeichnet.

In den nachstehenden Abschnitten werden die gewählten Allokationsregeln für die beiden Fälle beschrieben und begründet.

2.6.1 Prozessallokation

Die Bilanzierung der Produktionsphase der untersuchten Tragwerksvarianten beruht im Hintergrundsystem auf Datensätzen aus der Ökobilanz-Datenbank ecoinvent, Version 3.9. Für die Modellierung des Hintergrundsystems der vorliegenden Studie wurden ausschließlich Datensätze nach dem Allokationsmodell „Allokation am Ort der Substitution“ (Allocation at the point of Substitution, kurz APOS) herangezogen. Beim Systemmodell APOS wird eine partielle Erweiterung der Produktsysteme vorgenommen, um eine Allokation innerhalb der Behandlungssysteme zu vermeiden. Der Vorteil liegt darin, dass einige Tätigkeiten, z. B. das Einsammeln von Siedlungsabfällen und deren Transport zu einer Deponie, innerhalb von komplexen Behandlungssystemen stattfinden und es daher schwierig ist, für diese einzelnen Schritte geeignete Allokationsfaktoren, wie z. B. Erlöse, zu finden. APOS wurde entwickelt, um solche Zuordnungen generell zu vermeiden und stattdessen die wertvollen Nebenprodukte von Behandlungssystemen zusammen mit der Tätigkeit zuzuordnen, die das zu behandelnde Material (d. h. den Abfall) erzeugt hat¹⁰.

2.6.2 Systemallokation

Neben den Allokationen bei einzelnen Prozessmodulen der Ökobilanz besteht ein weiterer Festlegungsbedarf in Bezug auf Sekundärrohstoffe und die Frage nach der Vergabe für Gutschriften (und ggf. Lastschriften). Es wurde grundsätzlich angenommen, dass die für die hier untersuchten Tragwerksvarianten verwendeten Konstruktionselemente und -materialien (Stahl, Stahlbeton, Holz) teilweise wiederverwendet werden und der verbleibende Anteil einer werkstofflichen Verwertung (bei Holz: einer thermischen Verwertung) zugeführt wird, wodurch anteilig die entsprechende Primärproduktion an Materialien und Nutzenergie vermieden wird.

Bei langlebigen Gütern, und das ist bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren bei den hier betrachteten Konstruktionsvarianten der Fall, wird von manchen Ökobilanz-Expert*innen auch von einem „Quasi-Closed-Loop-System“ gesprochen, weil zwischen der Nutzung von primären und sekundären Rohstoffen im Input und der Nachnutzung der aus dem Recycling gewonnenen Sekundärrohstoffe mehrere Jahrzehnte vergehen. Demgegenüber beträgt diese Zeitdauer beispielsweise bei

¹⁰ Siehe eingehend: https://support.ecoinvent.org/system-models#Allocation_Substitution. Letzter Aufruf 10.09.2024

Verpackungsmaterialien nur wenige Monate, so dass in diesen Fällen auch von „Closed-Loop-Systemen“ gesprochen wird.

Auch wenn zwischen Anfall und Verwendung bei langlebigen Gütern ein Zeitverzug auftritt, tragen die Wieder- oder Weiterverwendung von Bauelementen sowie die Verwertung der Materialien als Sekundärrohstoffe in den meisten Fällen zur Ressourcenschonung und Verringerung von negativen Umweltauswirkungen bei. Eine richtungssichere Quantifizierung dieses Effekts ist allerdings schwierig:

- Konkret müsste beispielsweise das Wissen verfügbar sein, in welchen Prozessen mit welchen Energievorketten die in fünfzig Jahren anfallenden Sekundärrohstoffe verarbeitet, und welche anderen Prozesse und (primären) Rohstoffe zu diesem Zeitpunkt durch die aus dem Recycling gewonnenen Sekundärrohstoffe substituiert werden.
- Zwar sind die Schlüsseltechnologien für eine klimaneutrale Herstellung von Stahl, Chemie und Zement vorhanden und stehen auch weitgehend vor der Marktreife, die großtechnische Umsetzung und Realisierung setzt allerdings politische Rahmenbedingungen zur Umsetzung voraus, vgl. zusammenfassend Joas et al. 2019.
- Es stehen noch keine konsistenten und geprüften Ökobilanz-Hintergrunddaten für die nach klimaneutralen Schlüsseltechnologien hergestellten Materialien, wie Stahl, Zement bzw. Beton sowie Chemikalien zur Verfügung, zur Quantifizierung von Gutschriften herangezogen werden könnten.

Aus diesem Grund werden die Wirkungsindikatorergebnisse in dieser Studie im Basisszenario ohne Gutschriften für Sekundärrohstoffe aus dem End-of-Life berechnet und ausgewiesen. Um Vergleiche der hier erzielten Ergebnisse mit anderen Studien, in denen trotz der dargestellten Unsicherheiten Gutschriften vergeben werden, zu ermöglichen, wird in einer der durchgeführten Sensitivitätsanalysen für das THG-Potenzial eine Ergebniszusammenstellung mit Gutschriften dargestellt (siehe Abschnitt 4.3.3). Zudem gehen wir in Abschnitt 4.3.4 in einer weiteren Sensitivitätsanalyse der Frage nach, wie sich eine Erhöhung der Weiterverwendungsquote von 10 % (der Annahme im Basisszenario) auf 50 % auswirkt.

Um die Grundlage für die abweichend vom Basisszenario vergebenen Gutschriften nachvollziehen zu können, werden die Grundlagen dafür in Abschnitt 3.3.2 gegeben.

2.7 Methode der Wirkungsabschätzung und Auswahl der Wirkungskategorien

Im Zuge der Festlegung des Untersuchungsrahmens muss auch bestimmt werden, welche Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodelle in der Ökobilanz-Studie berücksichtigt werden. Die Wirkungsabschätzung orientiert sich an den Vorgaben von DIN EN ISO 14040:2021-02 und DIN EN ISO 14044:2021-02. Letztere benennt die nachfolgend aufgeführten verbindlichen Bestandteile der Wirkungsabschätzung:

- Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen;
- Zuordnung der Sachbilanzergebnisse zu den ausgewählten Wirkungsindikatoren (sogenannte Klassifizierung);
- Berechnung der Wirkungsindikatorwerte (sogenannte Charakterisierung).

Neben den verbindlichen Teilen benennt die DIN EN ISO 14044:2021-02 auch optionale Bestandteile der Wirkungsabschätzung. Diese umfassen die Normierung, Ordnung und Gewichtung der Wirkungsabschätzungsergebnisse sowie die Analyse der Datenqualität. Eine Normierung, Ordnung oder Gewichtung der Ergebnisse wird in der vorliegenden Studie nicht vorgenommen. Eine Bewertung der Datenqualität der für die Sachbilanz herangezogenen Daten vor dem Hintergrund der in Abschnitt 2.5 formulierten Anforderungen erfolgt in Abschnitt 3.4 dieser Studie, auf die Wesentlichkeitsschwellen der Wirkungsindikatoren wird in Abschnitt 4.1 eingegangen.

2.7.1 Auswahl der Wirkungskategorien

Für die Durchführung der Wirkungsabschätzung in produktbezogenen Ökobilanzen stehen verschiedene Methoden und Methodensets zur Verfügung, die regelmäßig Aktualisierungen bzw. Ergänzungen unterworfen sind und die zum Teil auch untereinander Bezug zueinander nehmen. Zu nennen sind beispielsweise die vom Centrum voor Milieukunde (CML) der Universität Leiden entwickelte CML-Methode oder die Methode ReCiPe 2016, die vom niederländischen Rijksinstituut voor Volksgezondheid (RIVM) entwickelt wurde.

In der vorliegenden Studie werden die Indikatoren und Modelle der Wirkungsabschätzung auf der Grundlage einer Auswahl des vom Joint Research Centre (JRC) im Rahmen der Entwicklung der PEF-Methodik¹¹ zusammengestellten Sets *Environmental Footprint (EF) 3.0*.¹² abgeschätzt. Die Ergebnisse werden im vorliegenden Bericht jeweils auf Ebene der Midpoint-Indikatoren für ausgewählte Wirkungskategorien ausgewiesen.

Die Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethode EF 3.0. für diese Studie begründet sich wie folgt:

- Es handelt sich um eine Methodenzusammenstellung, bei der die Wirkungsindikatoren international akzeptiert sind – dies ist eine obligatorische Voraussetzung bei Ökobilanzen, die als Grundlage für zur Veröffentlichung vorgesehene vergleichende Aussagen bestimmt sind.
- Es ist zu erwarten, dass die EU-Kommission in den kommenden Jahren Rechtsakte erlassen wird, die zukünftig Vorgaben für in der EU getätigte umweltbezogene Aussagen zu Produkten an bestimmte Kriterien knüpfen wird, die auch die Wahl der Wirkungsabschätzungsmethoden betreffen. Daher wird erwartet, dass das gewählte Methodenset weiter an Relevanz gewinnen wird.

Die Environmental Footprint (EF) 3.0-Methode enthält derzeit 16 Umweltwirkungsindikatoren, von denen jedoch nicht alle für die vorliegende Untersuchung relevant sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Product Environmental Footprint als genereller Ansatz zur Abschätzung potenzieller Umweltwirkungen entwickelt wurde. Die diesbezügliche Grundidee des PEF besteht darin, mit dem Indikatoren-Set eine möglichst breite, dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechende Wirkungsabschätzungsmethode bereitzustellen, aus der dann die für die jeweiligen Produktgruppen relevantesten Wirkungskategorien und -indikatoren ausgewählt werden. Konkret wurde in dieser Studie für die Auswahl wie folgt vorgegangen:

¹¹ (EU) 2021/2279: Empfehlung der der Kommission vom 15.12.2021 zur Anwendung der Methoden für die Berechnung des Umweltfußabdrucks zur Messung und Offenlegung der Umwelleistung von Produkten und Organisationen entlang ihres Lebenswegs

¹² European Commission, EF 3.0 reference package, November 2019-<https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN-developerEF.xhtml>, zuletzt abgerufen am 01.03.2021)

- In einem ersten Schritt erfolgte für alle 16 Indikatoren eine Gesamtauswertung (siehe Anlage in Abschnitt 9.2).
- Aufgrund der insgesamt hohen Bedeutung des Klimaschutzes wurde das Treibhausgaspotenzial herangezogen.
- Zudem wurden Indikatoren identifiziert, bei denen zwischen den untersuchten Tragwerksvarianten typische, materialspezifische Unterschiede bestehen und/oder bei denen die Ressourceninanspruchnahme aufgrund der Materialherkunft naheliegt. Dies sind: Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Energieträger), Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Mineralien und Metalle), Landnutzung sowie die Inanspruchnahme von knappen Wasserressourcen.
- Schließlich wurde als weiterer Indikator das Photochemische Oxidantienbildungs-Potential in die Auswahl aufgenommen, da bei der Herstellung und der Instandsetzung der nassbeschichteten Variante Emissionen an organischen Lösemitteln auftreten (vgl. Abschnitte 3.1.1.2 und 3.2.2) und diese mit zur photochemischen Ozonbildung beitragen.

Die auf diese Weise ausgewählten Wirkungskategorien und -indikatoren sind nachstehend aufgeführt, vgl. Tabelle 2-4.

Tabelle 2-4: Überblick zur ausgewerteten Wirkungskategorien

Wirkungskategorie	In diesem Bericht verwendete Bezeichnung	Einheit	Kurzbeschreibung ¹³
Climate change	Treibhausgaspotenzial	kg CO ₂ -eq	Globales Erwärmungspotenzial über einen Zeithorizont von 100 Jahren, basierend auf IPCC AR5 (2013).
Land use	Landnutzung	Pt	Bodenqualitätsindex basierend auf der LANCA-Methodik.
Resource use, fossils	Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Energieträger)	MJ	Abiotische Ressourceninanspruchnahme fossiler Energieträger
Resource use, minerals and metals	Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Mineralien und Metalle)	kg Sb eq	Abiotische Ressourceninanspruchnahme, Mineralien und Metalle
Water use	Inanspruchnahme von knappen Wasserressourcen	m ³ depriv.	Wirkungsbasierte Inanspruchnahme von Wasserressourcen basierend auf dem AWARE-Modell ¹⁴
Photochemical ozone formation	Photochemisches Oxidantienbildungspotential	kg NMVOC eq	Ausdruck des potenziellen Beitrags zur photochemischen Ozonbildung.

Quelle: eigene Zusammenstellung auf Basis von EF 3.0

¹³ Die ausführliche Beschreibung der Wirkungskategorien und -indikatoren ist online verfügbar unter: https://eplca.jrc.ec.europa.eu/permalink/TR_SupportingCF_FINAL.pdf, zuletzt abgerufen am 01.06.2021

¹⁴ <http://wulca-waterlca.org/aware/>, zuletzt abgerufen am 01.03.2021

Zu beachten ist, dass Wirkungsabschätzungsergebnisse generell relative Aussagen sind, die keine Voraussagen über Auswirkungen auf die Wirkungsendpunkte, Schwellenwertüberschreitungen, Sicherheitsspannen oder Risiken machen können. Speziell bezogen auf die Wirkungskategorie Landnutzung ist anzumerken, dass der ausgewählte Indikator aus Sicht der Studierersteller keine umfassende Abschätzung potenziell biodiversitätsrelevanter Umweltwirkungen darstellt.

Generell werden in der vorliegenden Ökobilanz keine Biodiversitätseffekte ausgewertet bzw. es werden keine Aussagen zu biodiversitätsrelevanten Vor- oder Nachteilen der betrachteten Produktsysteme getroffen. Dies ist insofern relevant, als dass die Forstwirtschaft (als Rohstoffgrundlage für die untersuchte Tragwerksvariante Holzkonstruktion) je nach Art und Intensität der Bewirtschaftung sowohl positiv wie negativ zu Biodiversität beitragen kann. Im Rahmen dieser Studie konnte dieser Aspekt allerdings nicht so differenziert erfasst werden, dass eine belastbare Abschätzung biodiversitätsrelevanter Aspekte möglich gewesen wäre.

Ergänzend wird in dieser Studie als ausgewertete Sachbilanzgröße der Kumulierte Energieaufwand (KEA) aufgenommen. Der KEA ist ein Maß für den gesamten Verbrauch an energetischen Ressourcen, die für die Bereitstellung eines Produktes oder einer Dienstleistung benötigt werden und wird in MJ-Äquivalenten berechnet. Im KEA enthalten ist auch der Energiegehalt, der im Produkt selbst enthalten ist. Der KEA weist generell alle nicht erneuerbaren und erneuerbaren energetischen Ressourcen als Primärenergiewerte aus. Im Ergebnisteil dieser Studie werden die Sachbilanzindikatoren KEA_{biogen} , $KEA_{\text{regenerativ}}$ und $KEA_{\text{nicht regenerativ}}$ aufgenommen.

Insgesamt wird vor dem Hintergrund der voranstehenden Überlegungen das ausgewählte Indikatoren-Set von den Erstellern dieser Ökobilanz als für die vorliegende Studie geeigneter Ansatz zur Abschätzung potenzieller Umweltwirkungen der betrachteten Produktsysteme angesehen.

2.7.2 Nicht berücksichtigte potenzielle Umweltauswirkungen

Nachfolgend werden bekannte potenzielle Umweltauswirkungen benannt, die mit den hier untersuchten Systemen im Zusammenhang stehen, die aber nach dem derzeitigen Stand nicht sicher quantifiziert werden können:

- Während der Nutzungsphase von Beton, in geringerem Umfang auch von verzinkten Bauteilen, findet eine sogenannte Karbonatisierung statt, das heißt es erfolgt eine Absorption/Adsorption von Kohlendioxid in das Material, vgl. beispielsweise Nordby und Shea 2013. In vorliegenden Umwelt-Produktdeklarationen wird dieser Effekt zum Teil auch quantifiziert. Während bei Porenbeton bei einer Nutzungsdauer von 80 Jahren das aufgenommene CO_2 bezogen auf das GWP der Produktionsphase rund 46 % beträgt (eigene Berechnung nach Daten aus Institut Bauen und Umwelt e.V. 2021), liegt dieses Verhältnis bei Beton für den Ingenieurbau bei 2 % (eigene Berechnung nach Daten aus Institut Bauen und Umwelt e.V. 2023). Bei Zink ist das Verhältnis mit rund 0,5 % noch geringer (eigene Berechnung nach Daten aus Institut Bauen und Umwelt e.V. 2022). Vor dem Hintergrund, dass der Effekt bei den für die in dieser Studie untersuchten Tragwerksvarianten mit maximal 2 % eher gering ausfällt und bei einer Berücksichtigung zudem die Verteilung auf der Zeitachse hätte betrachtet werden müssen, wurde der Effekt in dieser Studie vernachlässigt.
- Bei der nassbeschichteten Stahlkonstruktion kann es durch Versprödung und Verwitterung an der Oberfläche dazu kommen, dass Partikel unterschiedlicher Größe abblättern, wodurch auch Beiträge zur Mikroplastik-Problematik nicht ausgeschlossen werden können. In der fachlichen Diskussion stehen allerdings andere Emissionsquellen im Vordergrund. Zudem wäre eine

quantitative Nachverfolgung dieses Aspekts im gesetzten Rahmen dieser Studie nicht möglich gewesen.

- Neueren Untersuchungen zufolge kann nicht mehr a priori angenommen werden, dass Holz ein klimaneutraler Werkstoff ist: So nimmt die Senkenfunktion des Waldes mit Blick auf die CO₂-Bindung aus der Atmosphäre bei stark bewirtschafteten Wäldern ab (Fehrenbach et al. 2022). In den bislang durchgeführten Treibhausgasbilanzen von Holzprodukten wird die Dynamik der Kohlenstoffspeicherung in Wäldern, die als Kohlenstoffspeicherbilanz in Wäldern (CSBF) ausgedrückt werden kann, bislang überwiegend nicht berücksichtigt. Fehrenbach et al. 2022 stellen in ihrer Veröffentlichung eine Methode vor und stellen auch die Ergebnisse für mehrere Produktgruppen¹⁵ vor. Im gegebenen Rahmen und nicht zuletzt wegen abweichenden Parametern (zum Beispiel zeitlicher Betrachtungsraum) konnte der Aspekt in dieser Studie nicht berücksichtigt werden.

2.8 Modellierungsgrundlage

Die durchgeführte Ökobilanz wurde mit der Software OpenLCA, Version 2.0.3 berechnet. Datengrundlage für Hintergrunddaten ist die Datenbank ecoinvent, Version 3.9. Diese Datenbank hat nach unseren Erfahrungen insbesondere gegenüber Datensätzen anderer Anbieter wie GaBi den Vorteil, dass die Datensätze sehr transparent dokumentiert sind und damit auch komplexer zusammengesetzte Datensätze dekonstruiert und angepasst werden können, wie es in dieser Studie beispielsweise beim Feuerverzinken oder bei der Energiebereitstellung für das Nassbeschichten erfolgte. Auf diese Punkte gehen wir im Detail in den Abschnitten 3.1 bis 3.3 dieser Studie ein.

2.9 Iteratives Vorgehen in Bilanzversionen, Basisvergleich und Sensitivitätsanalysen

Generell wurde bei der Bearbeitung ein iteratives Vorgehen gewählt, indem die Sachbilanzen sukzessive im Projektverlauf verfeinert und präzisiert wurden, um insbesondere bei den Teilmodulen im Lebensweg der untersuchten Varianten, die signifikant zu den Indikatorergebnissen aus der Wirkungsabschätzung beitragen, möglichst genaue und repräsentative Daten in der Sachbilanz zu hinterlegen. Konkret wurde wie folgt verfahren:

- Version 1 der Sachbilanz wurde ausschließlich auf der Grundlage von vorliegenden Sekundärdaten bzw. Durchschnittsdatsätzen aus ecoinvent¹⁶ erstellt. Ursprünglich war angedacht, hier auch Daten aus vorliegenden EPD heranzuziehen. In einem dieser Ökobilanz vorangegangenen Arbeitspaket wurde allerdings im Ergebnis festgestellt, dass dies aus Konsistenzgründen nicht möglich ist. Ausschlaggebend war dafür, dass in den in Frage kommenden EPD unterschiedliche Wirkungsabschätzungsmodelle herangezogen waren und eine „Umrechnung“ ohne Offenlegung der Sachbilanzdatenbasis nicht möglich ist. Zudem wurden in den EPD unterschiedliche Versionen von Hintergrunddaten aus der Ökobilanzdatenbank GaBi herangezogen.

¹⁵ Bauholz, Spanplatten und mitteldichte Faserplatten (MDF) für die stoffliche Nutzung sowie Holzspäne, Pellets und Brennholz für die energetische Nutzung.

¹⁶ Zum Zeitpunkt der ersten Bilanzversion wurden die Datenbankversion 3.7 herangezogen; auch in der vorliegenden Version unveränderte Teilmodule wurden zwischenzeitlich mit Daten der Version 3.9 hinterlegt.

- Bei Version 2 wurden die globalen Datensätze für die Hintergrundprozesse so weit wie möglich und sinnvoll in Teilmodule aufgesplittet, um so spezifische Gegebenheiten beispielsweise zur Energiebereitstellung (etwa Kraft-Wärme-Kopplung vs. Industriefeuerung) oder verfahrenstechnische Verbesserungen bei einzelnen Prozessen abgebildet werden können.
- In Version 3 wurden für alle Prozesse entlang der betrachteten Lebenswege der vier untersuchten Varianten, die signifikant zum Gesamtergebnis beitragen, nach Möglichkeit spezifisch erhobene Daten hinterlegt und die Bilanzierung entsprechend präzisiert, zu den Details siehe Abschnitt 3 dieser Studie. Version 3 diente auch als Kommentarversion für den Auftraggeberkreis einschließlich von Experten aus Mitglieds- und Partnerunternehmen sowie weiteren Branchenexperten.
- Version 4 diente zur Präsentation und Diskussion mit dem Kreis der Gutachter und der Vorsitzenden des Panels zur Kritischen Prüfung der Ökobilanz.
- Version 5 bildet die in diesem Abschlussbericht dokumentierte finale Version ab. In dieser Version wurden auch die im Rahmen der Kritischen Prüfung eingegangenen Kommentare berücksichtigt.

2.10 Normkonformität und Kritische Prüfung

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung sind in der abschließenden Fassung (Bilanzversion 5) zur Veröffentlichung vorgesehen. Da der Bericht für die Veröffentlichung vergleichende Aussagen zu den untersuchten Varianten beinhaltet, werden dementsprechend auch die erweiterten Anforderungen an die Berichterstattung an Dritte berücksichtigt. Entsprechend der Vorgaben in DIN EN ISO 14040:2021-02 Abschnitt 7.3.2 ist daneben auch die Durchführung einer Kritischen Prüfung der Ergebnisse der Ökobilanz und des hier vorgelegten Studienberichts durch ein unabhängiges, aus mindestens drei Experten bestehendes Gutachtergremium (engl. Critical Review Panel) erforderlich. Der Bericht des Panels ist Bestandteil dieses Berichts und als Abschnitt 7 dieser Studie aufgenommen.

3 Grundlagen der Sachbilanz

In den nachstehenden Abschnitten werden für die vier untersuchten Ausführungsvarianten der Hallenkonstruktion alle wesentlichen Datengrundlagen benannt und, sofern möglich, mit entsprechenden Nachweisen und Quellenangaben versehen. Die Darstellung beinhaltet die Prozesse zur Herstellung der Hallenkonstruktion (Abschnitt 3.1), Prozesse zum Unterhalt und Instandsetzung während der Nutzungsphase der Halle (Abschnitt 3.2) und Prozesse der Nachnutzungsphase, wie Rückbau Wiederverwendung, Recycling etc. (Abschnitt 3.3). Die herangezogenen Hintergrunddatensätze werden in Abschnitt 3.4 aufgeführt; dort erfolgt auch die Kennzeichnung und Reflektion der Datenqualität.

3.1 Herstellung der Hallenkonstruktion

3.1.1 Stahlkonstruktion (zur Feuerverzinkung oder Nassbeschichtung)

Für einen Rahmen in den Stahlbau-Konstruktionsvarianten verzinkt und nassbeschichtet werden auf der Grundlage der 2015 von bauforumstahl e.V. veröffentlichten Ökobilanz (Siebers und Hauke 2015) folgende Baustoffe benötigt:

Tabelle 3-1: Materialbedarf für eine Halle (bestehend aus 11 Rahmen) in der Stahlbau-Konstruktionsvariante

	Bauteil	Baustoff		Einh.	relatives Gewicht	Einh.	Masse pro Rahmen [kg]	Masse pro Halle [t]
Fundament		Beton C25/30	0,9	m ³	2365	kg/m ³	2128,5	23,4
		Bewehrungsstahl BSt 500 SA	17,63	kg			17,6	0,194
		Gesamt (2 Fundamente)					4292,3	47,2
Tragwerk	Stütze	IPE 400	5	m	65,04	kg/m	325,2	3,58
	Binder	IPE 360	15,06	m	58,23	kg/m	876,9	9,65
	Gesamt	2 Stützen+ 1Binder					1527,3	16,8
Gesamt	Rahmen	2 Stützen + 1Binder+2 Fundamente					5819,6	64,0

Die zu verzinkende bzw. zu beschichtende Oberfläche pro Halle liegt bei 385,51 m²:

Tabelle 3-2: Oberfläche des Tragwerks pro Halle (bestehend aus 11 Rahmen)

IPE Stahlträger (nach DIN 1025-5:1994-03)	360	400	Einheit
Oberfläche pro Längeneinheit	1,35	1,47	m ² /m
Oberfläche pro Stütz/Binder	20,38	7,34	m ²
Oberfläche Stahlträger insgesamt pro Rahmen	35,05		m ²
Oberfläche Stahlträger insgesamt pro Halle	385,51		m ²

Analog zur EPD (2023) von bauforumstahl e.V. zu Baustahl wird sowohl für die feuerverzinkte als auch für die nassbeschichtete Stahlbau-Variante angenommen, dass zu 100 % Elektro Stahl aus Sekundärstahl verwendet wird.

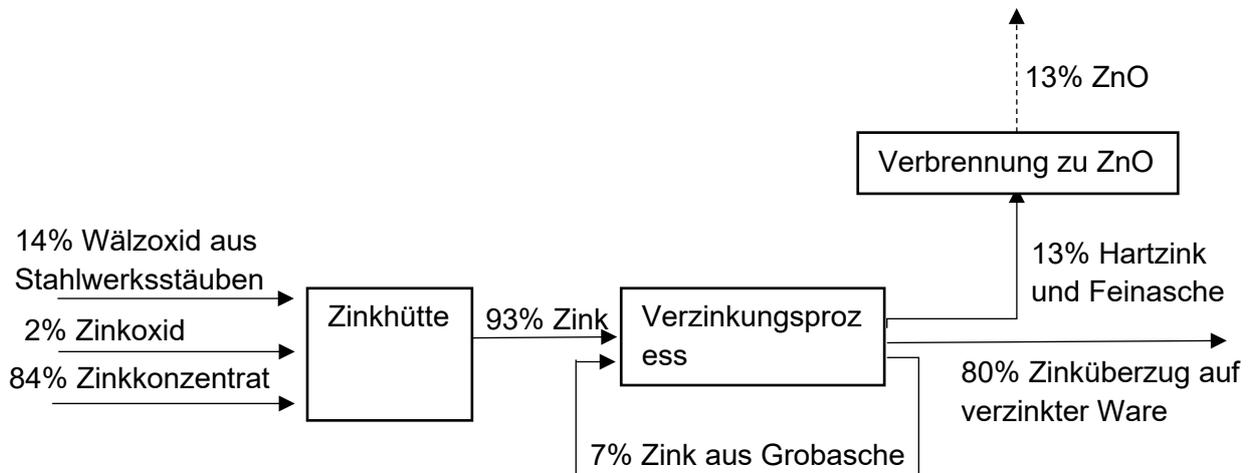
3.1.1.1 Feuerverzinkte Variante

Materialbedarf

In der feuerverzinkten Variante werden Doppel-T-Träger mit einer Stegdicke von 8 bzw. 8,6 mm (IPE 360 und IPE 400) verwendet. Für Bauteile mit einer Materialdicke größer als 6 mm ergibt sich eine Mindestschichtdicke für den Zinküberzug von 85 µm nach DIN EN ISO 1461:2022.

Der Bedarf an Zink zur Erfüllung der Mindestschichtdicke von 85 µm wird anhand des spezifischen Gewichts von Zink berechnet. Zusätzlich wird ein Mehrbedarf von 20 % Zink durch Verluste während des Verzinkungsprozesses angenommen (Peißker und Huckshold 2016; Aries et al. 2022). 10 % des Mehrbedarfs entfallen auf das im Verzinkungsprozess entstehende Hartzink (96,5 % Zink, 3,5 % Eisen), welches dem externen Recycling zu Zinkoxid zugeführt wird. Die anderen 10 % des Mehrbedarfs entfallen auf die im Verzinkungsprozess entstehende Zinkasche (Grobasche). Aus der Grobasche wird durch Ausschmelzen im sogenannten Zink-Off-Ofen 70 % metallisches Zink direkt in der Feuerverzinkerei zurückgewonnen und im geschlossenen Kreislauf dem Verzinkungsprozess wieder zugeführt. Die 3 % verbleibende Feinasche, welche im Wesentlichen aus Zinkoxid und Zinkchlorid und einem geringen Anteil an metallischem Zink besteht, wird ebenfalls dem externen Recycling zu ZnO zugeführt. 93 % des Zinkbedarfs für den Verzinkungsprozess werden extern zugekauft. Dieses Zink wird in der Zinkhütte aus anteilig 84 % Zinkkonzentrat, 14 % Wälzoxid und 2 % Zinkoxid hergestellt (Daten aus dem ecoinvent Datensatz primary zinc production from concentrate – RoW sowie International Zinc Association (2023)). Die Umweltauswirkungen aus dem Abbau zinkhaltiger Metallerze und der Verhüttung werden je nach Herkunftsland unterschiedlich ausfallen. Allerdings ist eine transparente Zuordnung der Lieferkette derzeit nicht für alle feuerverzinkenden Betriebe in Deutschland möglich. Daher wurde im Basisszenario der ecoinvent Datensatz „primary zinc production from concentrate – RoW“ herangezogen. Um die Sensitivität dieser Festlegung zu prüfen, erfolgte eine Sensitivitätsanalyse mit Variationen des Datensatzes zur Vorkette (vgl. Abschnitt 4.3.2).

Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Zinkbilanz im Verzinkungsprozess



Quelle: Eigene Darstellung

Aus den getroffenen Annahmen ergibt sich somit bei einer gesamten zu verzinkenden Oberfläche von 385,51 m² pro Halle und einem spezifischen Gewicht von Zink von 7130 kg/m³ folgender Zinkbedarf für die feuerverzinkte Stahlbaukonstruktion:

Tabelle 3-3: Zusammensetzung des Zinkbedarfs im Feuerverzinkungsprozess

Zinkinput	Zinkbedarf [kg /Halle]	Anteil am Gesamtzinkbedarf [%]
Zink aus Zinkhütte	271,60	93
Zink aus Zinkasche (im geschlossenen Kreislauf)	20,44	7
Gesamtzinkbedarf	292,05	100

Im Basisszenario wird angenommen, dass vollständig konventionell erzeugtes Zink eingesetzt wird. Nach Angaben des IF wird derzeit zu einem Anteil von 36,9 % der gesamten feuerverzinkten Stahlwaren in Deutschland sogenanntes low-carbon-Zink des Unternehmens Boliden eingesetzt. Durch Effizienzmaßnahmen in der Zinkproduktion kann das Unternehmen den CO₂-Fußabdruck des Primärzinks von im Durchschnitt 3,6 auf weniger als 1 kg CO₂äqu/kg Zink reduzieren (Boliden Mineral AB; Boliden Mineral AB 2021). In einer Sensitivitätsanalyse wird der Effekt des Einsatzes von low-carbon-Zink näherungsweise quantifiziert (siehe Abschnitt 4.3.2).

Recycling des Zinks im Feuerverzinkungsprozess

7 % des eingesetzten Zinks im Verzinkungsprozess befindet sich in einem geschlossenen Kreislauf innerhalb des Betriebs. Der Energieaufwand für das interne Aufbereiten der Grobasche im Zink-Off-Ofen ist im Energiebedarf des Verzinkungsprozesses enthalten.

13 % des Zinks wird einem externen Recycling zugeführt. Für den Transport der Zinkreste aus der Produktion zum nächsten Recyclingunternehmen wird eine Entfernung von 500 km angenommen.

Das Hartzink wird in einem Drehrohr bei ca. 1000 °C in einem indirekten Verfahren zu Zinkoxid verarbeitet. Die Sachbilanz für das indirekte Verfahren wurde von Krüger (2001) übernommen. Das Zink aus der Feinasche hat mit einem Zinkgehalt von etwa 65 % einen geringeren Zinkgehalt als das Hartzink (96,5 %). In Ermangelung von Sachbilanzdaten zum Recycling der Feinasche wird die Feinasche anhand des Zinkgehalts in Hartzinkäquivalente umgerechnet, um sie im Recyclingprozess berücksichtigen zu können. Für das aus dem Recycling der Zinkreste entstehende Zinkoxid wird die Produktion von Zinkoxid aus Primärzink als vermiedene Produktion gutgeschrieben.

Tabelle 3-4: Energiebedarf für das Oxidieren von Zink aus Hartzink und Feinasche zu Zinkoxid

Gesamtzinkinput pro Halle [kg]	Zink in Hartzink und Feinasche [kg] = 13% des Gesamtzinkinputs	Energiebedarf für Verbrennung zu ZnO [kWh]
292,05	37,97	37,05

Weiterhin wurde der ecoinvent-Datensatz zur Zinkherstellung in der Zinkhütte (primary zinc production from concentrate – RoW) modifiziert, in dem 14 % des Zinkkonzentrats durch Wälzoxid aus dem Recycling von Stahlwerksstäuben im Wälzrohrverfahren ersetzt wurde (International Zinc Association 2023). Die Aufbereitung der Stahlwerksstäube zu Wälzoxiden wurde anhand der Sachbilanzdaten von Krüger (2001) modelliert.

Energiebedarf

Generell wird der Energiebedarf beim Feuerverzinken im Wesentlichen bestimmt durch die erforderliche Energie, um die Betriebstemperatur eines Verzinkungsbades zwischen 440° bis 460 °C aufrechtzuhalten. Der konkrete Energieverbrauch wird neben anlagenspezifischen Parametern auch von Flächengewicht der Werkstücke bestimmt. Die hier zugrunde gelegten Daten wurden vom IF aus Rohdaten zur Erstellung der im Juni 2024 veröffentlichten aktualisierten EPD „Feuerverzinkte Baustähle: Stahlprofile und Stabstähle“ (Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) 2024) abgeleitet und können als repräsentativ für die im Rahmen dieser Studie relevanten Werkstücke angesehen werden:

Tabelle 3-5: Energiebedarf im Feuerverzinkungsprozess

	Energieverbrauch pro m ² Zinküberzug [kWh/m ²]	Energieverbrauch pro t verzinktem Stahl [kWh/t]	Energieverbrauch pro Halle [kWh]
thermisch	13,07	300	5040
elektrisch	2,18	50	840

Der thermische Energiebedarf wird in Verzinkereien standardmäßig durch Erdgasverfeuerung in einem industriellen Ofen gedeckt, wobei die Abwärme mittels Wärmetauscher beispielsweise für das Aufheizen der Vorbehandlungsbäder genutzt wird.

Zusammenfassung der Modifikationen des ecoinvent-Datensatzes zinc coating, pieces

Im Vergleich zum ecoinvent -Datensatz für den Feuerverzinkungsprozess zinc coating, pieces – RER wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- Anpassung der Energieverbräuche auf Grund von Rohdaten für die Erstellung von EPDs
- Veränderung des Wärmebezugs zur ausschließlichen Erdgasfeuerung in einem industriellen Ofen, im ecoinvent-Datensatz wurde ein Marktmix für die Wärmebereitstellung angenommen (Mischung aus Erdgas und anderen Energieträgern (Öl, Elektrizität) sowie eine Mischung aus Kraft-Wärme-Kopplung und konventionellen Öfen)
- Der Zinkverbrauch wurde an den berechneten Zinkverbrauch inklusive Overspray und internes Zinkrecycling der Feinasche angepasst. Das open-loop-Recycling der Grobasche sowie des Hartzinks zu Zinkoxid für eine weitere Anwendung beispielsweise in der Kosmetikindustrie wird berücksichtigt. Im ecoinvent-Datensatz wird kein Recycling (weder internes, noch open-loop-Recycling) berücksichtigt. Es wird von einem Einsatz von 14 % Sekundärzink ausgegangen, im ecoinvent-Datensatz wird dagegen 100 % Primärzink als Input verwendet.

Um die Auswirkungen dieser Modifikationen offen darzulegen, wurde eine Sensitivitätsanalyse für die feuerverzinkte Stahlhalle durchgeführt, in welcher der ursprüngliche ecoinvent-Datensatz verwendet wurde (vgl. Abschnitt 4.3.2).

3.1.1.2 Nassbeschichtete Variante

Materialbedarf

Identisch zur feuerverzinkten Variante werden auch bei der nassbeschichteten Variante Doppel-T-Träger mit einer Stegdicke von 8 bzw. 8,6 mm (IPE 360 und IPE 400) verwendet. Gemäß der DIN EN ISO 12944-5:2019 sowie den Technischen Prüfvorschriften für Ingenieurbauten (BMDV Januar 2022) besteht das Standard-Beschichtungssystem für mit der Funktionellen Einheit definierten Korrosivitätskategorie C3 in der Schutzdauerklasse Hoch (15 - 25 Jahre) aus 3 Schichten (Grundierung, Zwischenschicht, Deckschicht) mit einer Trockenschichtdicke von jeweils 80 µm.

Für die Nassbeschichtung können unterschiedlichste Beschichtungen eingesetzt werden, die sich in den jeweiligen Harzkomponenten, Pigmenten, Füllstoffen, Verdünnungsmitteln und Lösemitteln unterscheiden. Um diese Vielfalt abzubilden, wurde in Abstimmung mit dem Institut Feuerverzinken GmbH ein generisches Beschichtungssystem definiert. Dieses beinhaltet Harzkomponenten, Pigmente und Lösemittel mit folgender generischer Zusammensetzung:

Tabelle 3-6: Generisches Beschichtungssystem - getroffene Annahmen

	Stoffe	Spez. Gewicht	Anmerkung
Harzkomponenten	Alkydharz	950 kg/m ³	
	Epoxidharz	1100 kg/m ³	
	Polyurethanharz	1125 kg/m ³	
Generisches Harz	Acrylharz	950 kg/m ³	
		1031 kg/m ³	Je ein Viertel der Harzkomponenten
Pigment	Zinkpulver	7133 kg/m ³	Grundierung
	Zinkphosphat	3750kg/m ³	Grundierung

	Stoffe	Spez. Gewicht	Anmerkung
	Pigment, Grundierung, generisch	5197kg/m ³	Je die Hälfte Zinkphosphat und Zinkpulver
	Eisenoxid	5250 kg/m ³	Zwischen- und Deckschicht
	Stoffe	Anteil	
Generisches Lösemittel	Xylol	1/3	
	Alkohole	1/3	
	Wasser	1/3	
Füllstoff	Füllstoffe sind u.a. Kalk, Talk, Quarz	Verwendung von modifiziertem ecoinvent-Datensatz acrylic filler production	
Verdünnungsmittel	Wasser		

Zur Bilanzierung des Zinkpulvers wurde analog zur feuerverzinkten Stahlhalle der ecoinvent-Datensatz zur Zinkherstellung in der Zinkhütte (primary zinc production from concentrate – RoW) modifiziert, in dem 14 % des Zinkkonzentrats durch Wälzoxid aus dem Recycling von Stahlwerkstäuben im Wälzrohrverfahren ersetzt wurde (International Zinc Association 2023).

Die Zusammensetzung der Beschichtungsstoffe wurde in Anlehnung an gängige Beschichtungsstoffe (BMDV Januar 2022; BBSR 2023) wie folgt angenommen:

Tabelle 3-7: Zusammensetzung der Beschichtungsstoffe im Nassbeschichtungsverfahren

Schicht	Komponente	Anteil an Endprodukt	Anteil für die Berechnung Trockenschichtdicke
Grundierung	Generisches Harz	31%	45%
	Pigment, generisch	36%	52%
	Füllstoff	2%	3%
Zwischen- und Deckschicht	Generisches Harz	31%	45%
	Pigment (Eisenoxid)	32%	47%
	Füllstoff	6%	8%
Alle Schichten	Lösemittelzuschlag	23%	0%
	Verdünnungsmittel	9%	0%

Die erforderliche Masse an Beschichtungsstoffen wurde analog zum Berechnungsverfahren bei der Feuerverzinkungsvariante anhand der Mindestschichtdicke und dem spezifischen Gewicht der Feststoffe berechnet. Um die erforderliche Masse für die Trockenschichtdicke zu erhalten, wurde das Lösemittel und das Verdünnungsmittel bei der Berechnung der Trockenschichtdicke aus der Zusammensetzung herausgerechnet, da angenommen wurde, dass sie während der Trocknungsphase vollständig in die Abluft emittieren.

Bei der Nassbeschichtung kommt es bedingt durch unvermeidbaren Overspray zu einem Mehrbedarf an Beschichtungsstoffen. Dieser Mehrbedarf wurde von einem angefragten

Unternehmen als Bandbreite zwischen 20 und 25 % angenommen (Industrieangabe 2024c); für die Bilanzierung wurde daher das arithmetische Mittel, also 22,5 % Mehrbedarf angenommen.

Entsprechend dieser Annahmen ergibt sich folgender Materialbedarf für die Erstbeschichtung (bestehend aus 3 Schichten à 80 µm):

Tabelle 3-8: Materialbedarf für eine Erstbeschichtung (3 Schichten) im Nassbeschichtungsverfahren

Schicht	Beschichtungskomponente	Masse Farbstoff [kg/m ²]	Masse Farbstoff [kg/Halle]
Grundierung	Generisches Pigment	0,176	67,67
	Generisches Harz	0,151	58,28
	Füllstoff	0,009	3,56
	Generisches Lösemittel	0,112	43,28
	Verdünnungsmittel	0,042	16,29
	Summe	0,49	189,06
Zwischenschicht & Deckschicht (jeweils)	Pigment (Eisenoxid)	0,152	58,48
	Generisches Harz	0,146	56,30
	Füllstoff	0,027	10,32
	Lösemittel	0,112	43,28
	Verdünnungsmittel	0,042	16,29
	Summe	0,48	184,66
Erstbeschichtung (bestehend aus Grundierung, Zwischen- und Deckschicht)	Summe	1,45	558,39

Emissionen

Alle Lackierereien, die mehr als 5 Tonnen Lösemittel im Jahr einsetzen, unterliegen den Anforderungen der Lösemittelverordnung (31. BImSchV). Demnach können sie entweder ihre Lösemittel-emissionen nach einem Reduktionsplan vermindern, indem sie Einsatzstoffe mit einem verminderten Lösemittelgehalt einsetzen. Alternativ kann eine Abluftreinigung eingesetzt werden. Da keine unternehmensspezifischen Daten für eine exakte Abbildung des Umgangs mit den Lösemittellemissionen von den Lackierereien in Deutschland vorlagen, wurden folgende Annahmen zur Modellierung getroffen:

- 100 % des eingesetzten Lösemittels emittiert in die Abluft
- 50 % der Betriebe führen keine Abgasnachbehandlung durch (<5 t Lösemittel/Jahr oder Reduktionsplan) --> Modellierung als direkte Emission von Ethanol und Xylol
- 50 % führen eine Abgasnachbehandlung durch, in der die Lösemittel oxidiert werden --> Modellierung der entstehenden CO₂-Emissionen

Der Energieaufwand der Abgasnachbehandlung wurde aufgrund zu hoher Unsicherheiten in der Datengrundlage in der Bilanz nicht berücksichtigt.

Energiebedarf

Zur Ermittlung des Energiebedarfs für die Beschichtung von 1 m² wurde der Durchschnittswert aus drei spezifischen Unternehmensangaben verwendet (Industrieangabe 2024a). Der thermische Energiebedarf wird in Lackierereien standardmäßig durch Erdgasverfeuerung in einem industriellen Ofen gedeckt.

Tabelle 3-9: Energiebedarf für das Nassbeschichten auf Metallgrund in kWh/m²

Prozessschritt	Energieart	Energiebedarf Nassbeschichten Metalluntergrund [kWh/m ²]	Energiebedarf Nassbeschichten Metalluntergrund [kWh/Halle]
Strahlen/Vorbehandlung (Oberflächenvorbereitungsgrad Sa 2 ½ gemäß DIN EN ISO 8501-1 DIN EN ISO 8501-1:2007-12)	elektrisch	2,00	770
Beschichtung (pro Schicht)	elektrisch	1,12	430
	thermisch	8,3	3200
Material verpacken (Angaben von 2 Unternehmen)	elektrisch	0,55	210
	thermisch	4,81	1850
Summe pro Erstbeschichtung (3 Schichten)	elektrisch	5,91	2280
	thermisch	29,70	11450

3.1.2 Holzkonstruktion

Für die Holzbaukonstruktionsvariante wurden generische Datensätze aus ecoinvent (siehe Abschnitt 3.4) verwendet. Analog zur Stahlbauweise wurde jedoch 100 % Elektrostahl aus Europa als Stahlinput sowohl für den Bewehrungsstahl als auch für den Baustahl verwendet. In der von bauforumstahl e.V. veröffentlichten Ökobilanz war lediglich eine hybride Variante „Stahlbeton-Holz-Tragwerk“ (siehe Tabelle 2-1) berücksichtigt. Um in dieser Studie eine Holzvariante einzubeziehen, bei der nicht nur die Binder, sondern auch die Stützen aus Holz bestehen, wurde vom IF ein Fachgutachten beauftragt, um die Abmessung und konstruktive Einbindung der Holzstützen (anstelle der Stützen aus Stahlbeton) zu berechnen (Oberhaidinger 2023). Der aus diesem Gutachten resultierende Materialbedarf ist in der nachstehenden Tabelle 3-10 zusammengefasst.

Zur Verbindung von Bindern und Stützen sowie zur Sicherstellung des konstruktiven Holzschutzes der Stützen gegenüber den Fundamenten werden sogenannte Anschlüsse eingesetzt. Diese werden in der Regel aus feuerverzinkten Stahlteilen gefertigt, siehe beispielhaft zwei Ausführungen in der nachstehenden Abbildung 3-2.

Tabelle 3-10: Materialbedarf für die Konstruktion einer Halle (bestehend aus 11 Rahmen) in der Holzbauweise

	Bauteil	Baustoff		Einheit	relatives Gewicht [kg/m³]	Masse pro Rahmen [kg]	Masse pro Halle [t]
Fundament		Beton C25/30	1,71	m³	2365	4044	44,5
		Bewehrungsstahl BSt 500 SA	91	kg		91	1
		Gesamt (2 Fundamente)				8270	91
Tragwerk	Stütze	Brettschichtholz Nadelholz	0,66	m³	460	303	3,3
	Anschluss Stütze	Stahl, feuerverzinkt	0,015	m³	7850	116	1,3
	Binder	Brettschichtholz Nadelholz	1,8	m³	515	927	10,2
	Gesamt	2 Stützen + 2 Anschlüsse + 1 Binder				1765	19,4
Gesamt	Rahmen	2 Stützen + 2 Anschlüsse + 1 Binder + 2 Fundamente				10035	110,39

Abbildung 3-2: Beispiele für Anschlusssteile aus feuerverzinktem Stahl für Holzkonstruktionen


Quelle: Eigene Darstellung

Für die Bilanzierung der Brettschichtholzes für das Holztragwerk wurde ein generischer Datensatz aus ecoinvent verwendet. Dieser Datensatz basiert auf der Thünen-Studie „Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz“ (Rüter und Diederichs 2012), die von folgender Zusammensetzung des Brettschichtholzes ausgeht: 87,7 % Nadelholz, 10,5 % Wasser, 1,7 % Bindemittel (generische Mischung aus vier verschiedenen Bindemitteln, hauptsächlich Melamin-Harnstoff-Formaldehyd). Transport sowie die benötigte Infrastruktur ist im Datensatz inkludiert.

3.1.3 Stahlbetonkonstruktion

Genauso wie bei der Holzbaukonstruktionsvariante wurden bei der Stahlbetonbauweise generische Datensätze aus ecoinvent (Abschnitt 3.4) verwendet. Ebenso wurde der Stahlinput zu 100 % Elektro Stahl aus Europa modifiziert. Der in der nachstehenden Tabelle zusammengefasste Materialbedarf beruht auf den Planungsdaten der von bauforumstahl e.V. vorgelegten Ökobilanz (Siebers und Hauke 2015).

Tabelle 3-11: Materialbedarf für die Konstruktion einer Halle (bestehend aus 11 Rahmen) in der Stahlbetonbauweise

	Bauteil	Baustoff		Einheit	relatives Gewicht [kg/m³]	Masse pro Rahmen [kg]	Masse pro Halle [t]
Fundament		Beton C25/30	1,83	m³	2365	4328	47,6
		Bewehrungsstahl BSt 500 SA	88	kg		88	0,97
		Gesamt				8832	97,2
Tragwerk	Stütze	Beton C30/37	0,8	m³	2365	1892	20,8
		Bewehrungsstahl	86,5	kg		87	0,95
		Gesamt				1979	21,8
	Binder	Beton C30/37	2,4	m³	2365	5676	62,4
		Bewehrungsstahl	486	kg		486	5,4
		Gesamt				6162	67,8
Gesamt	2 Stützen+ 1Binder				10119	111,3	
Gesamt	Rahmen	2 Stützen+ 1Binder+2 Fundamente				18951	208,5

3.1.4 Montageaufwand auf der Baustelle

Für die Montage der Halle in Stahlbauweise wird von einer benötigten Kranzeit von 44 Stunden (5,5 Tagen mit 8 Arbeitsstunden am Tag) für den Aufbau der Rahmenkonstruktion ausgegangen (Kocker und Möller 2016). Aus den maximal zu hebenden Einzelteilgewichten sowie der maximal erforderlichen Kran-Ausladung wird der für den jeweiligen Hallentyp benötigte Mobilkran ermittelt

(Industrieangabe 2024d). Die angegebenen Verbrauchswerte beziehen sich auf neue Mobilkranmodelle von Liebherr (LTM 1040-2.1 und LTM 1090-4.2). Ältere Bestandskräne werden einen höheren Dieserverbrauch aufweisen, weshalb mit der getroffenen Annahme tendenziell eine Unterschätzung des tatsächlichen Treibhausgaspotenzials der Montage (und Demontage) verbunden ist. Dies würde v.a. die Variante Stahlbetonkonstruktion bevorzugen, da hier das Tragwerk wesentlich schwerer als bei den anderen Varianten ausfällt.

Tabelle 3-12: Dieserverbrauch der Mobilkräne für die verschiedenen Hallentypen

Hallentyp	Angesetztes Brutto-Gewicht [t]	Benötigte Krangröße [t]	Durchschnittlicher Dieserverbrauch [l/h]	Dieserverbrauch für Montage der Rahmenkonstruktion [l]
Stahlhalle und Holzhalle	1,5	40	4	176
Stahlbetonhalle	6,5	90	6	264

3.1.5 Erdaushub für die Fundamente

Zusätzlich zu den Kranarbeiten für die Montage der Rahmen wird der Erdaushub in Abhängigkeit des benötigten Volumens für die Fundamente der Stützen bilanziert. Hierfür wird der generische Ecoinvent-Datensatz excavation, hydraulic digger – RER verwendet.

Tabelle 3-13: Erdaushub in m³ für die verschiedenen Hallentypen

Hallentyp	benötigtes Volumen für die Fundamente [m ³]
Stahlhalle	19,8
Holzhalle	37,62
Stahlbetonhalle	40,26

3.2 Unterhalt / Instandhaltung der Hallenkonstruktion

Um die Notwendigkeit von Instandhaltungsarbeiten während der Nutzungsdauer von 50 Jahren zu ermitteln, wurde der Korrosionsschutz bzw. die Materialbeständigkeit bei einer mittleren Korrosionsbelastung (C3) der verschiedenen Ausführungsvarianten berücksichtigt.

3.2.1 Stahlkonstruktion, feuerverzinkt

Bei einer mittleren Korrosionsbelastung (C 3) wird von einem durchschnittlichen Zinkabtrag von 0,7 bis 2,0 μm im ersten Jahr ausgegangen (Institut Feuerverzinken GmbH). In der Realität ist der Zinkabtrag im ersten Jahr am höchsten, danach bildet sich eine Patina, die nur bei freier Bewitterung weiter abgetragen wird. Nimmt man in einer Worst-Case-Betrachtung für die gesamte Nutzungsdauer von 50 Jahren den unteren Bereich der Spannweite der Korrosivitätskategorie C3, jedoch unter Berücksichtigung eines linearen Ansatzes, ist mit einem gesamten Abtrag von 35 μm zu rechnen. Bei einer Mindestschichtdicke von 85 μm verbleiben somit 50 μm am Ende der Nutzungsdauer; der Zinküberzugs ist bei einem berechneten Abtrag von 35 μm sehr großzügig

bemessen. Für die Erfüllung des Korrosionsschutzes über 50 Jahre wird daher keine Instandhaltung in Form einer erneuten Verzinkung angenommen.

3.2.2 Stahlkonstruktion, nassbeschichtet

Die Erstbeschichtung der nassbeschichteten Stahlhalle ist auf eine mittlere Korrosionsbelastung mit einer hohen Schutzdauer von 15 bis 25 Jahren ausgelegt (DIN EN ISO 12944-5:2019). Es wurde angenommen, dass nach 15 Jahren eine Ausbesserung von vereinzelt stark beanspruchten Flächen notwendig ist, während eine Vollerneuerung der Beschichtung erst am Ende der Schutzdauer nach 25 Jahren erfolgt:

- Nach 15 Jahren: Ausbesserung von schadhafte Stellen auf 15 % der Fläche durch eine Erneuerung der Grundierung, Zwischen- und Deckschicht nach vorherigem Abschleifen
- Nach 25 Jahren: Erneuerung der Grundierung, Zwischen- und Deckschicht auf 100 % der Fläche nach vorherigem Abstrahlen mit einem Oberflächenvorbereitungsgrad Sa 2 ½ gemäß DIN EN ISO 8501-1:2007-12
- Nach 40 Jahren: Ausbesserung von schadhafte Stellen auf 15 % der Fläche durch eine Erneuerung der Grundierung, Zwischen- und Deckschicht nach vorherigem Abschleifen

Eine weitere Vollerneuerung aller Flächen wäre nach 50 Jahren notwendig, wenn die Halle noch weiter genutzt werden sollte. Diese Instandsetzung ist kein Teil der Bilanzierung, da der betrachtete Nutzungszeitraum mit 50 Jahren festgelegt ist.

Die Instandhaltung erfolgt vor Ort ohne vorherige Demontage des Tragwerks. Bei der Ausbesserung von schadhafte Stellen auf 15 % der Fläche wird davon ausgegangen, dass die Stellen des Tragwerks, die einer Nachbeschichtung bedürfen, vor Ort abgeschliffen werden. Dabei wird der Maschinenaufwand (Schleifgerät und Absaugung) bilanziert, wobei pro qm Oberfläche von einem Zeitbedarf von 30 min ausgegangen wird. Aus dieser Annahme und Werten zur elektrischen Nennleistung der Geräte und dem Erfahrungswert, dass diese Nennleistung im laufenden Betrieb zu etwa 40 % abgerufen wird, lässt sich der elektrische Energiebedarf approximativ wie folgt ermitteln:

Tabelle 3-14: Energiebedarf für die Ausbesserung von 1 m² in der nassbeschichteten Stahlbaukonstruktion

Prozessschritt	Energieart	Energiebedarf [kWh/m ²]	Annahmen
Schleifen	elektrisch	0,15	Annahme: 30 min pro 1 m ² , 40% der elektrischen Nennleistung von 750 Watt
Absaugen	elektrisch	0,24	Annahme: 30 min pro 1 m ² , 40% der elektrischen Nennleistung von 1200 Watt

Die Herstellung des Schleifmittels wird auf Grund einer mangelnden Datenlage nicht in der Bilanzierung berücksichtigt. Weiterhin wird davon ausgegangen, dass kein weiterer Energiebedarf für die Beschichtung anfällt, sondern dass die Beschichtung durch Streichen aufgebracht wird und anschließend ohne weiter Wärmezufuhr bei Raumtemperatur trocknet.

Für die Vollerneuerung der Grundierung der Zwischen- und Deckschicht nach 25 Jahren werden folgende Arbeitsschritte in der Bilanzierung berücksichtigt:

- Energieaufwand für das Abstrahlen der Stahlträger mit einem Oberflächenvorbereitungsgrad Sa 2 ½ gemäß DIN EN ISO 8501-1:2007-12 sowie einer Staubabsaugung (analog zu der Absaugung bei der Ausbesserung)
- Energieaufwand für das Auftragen der Nassbeschichtung mittels Druckluftspritzens (Industrieangabe 2024b)

Das eingesetzte Strahlmittel wird in der Basisbilanzierung nicht berücksichtigt. In einer Sensitivitätsanalyse wird der Beitrag der Strahlmittelproduktion annähernd berechnet und dargestellt.

Tabelle 3-15: Bedarf für die Vollerneuerung von 1 m² in der nassbeschichteten Stahlbaukonstruktion

Prozessschritt	Bedarf		Annahmen
Abstrahlen Sa 2 ½	Druckluft (5 bar)	30,7 m ³ /m ²	Luftverbrauch von 4,6 m ³ /min (Schmidt Sandstrahltechnik GmbH) bei einem Düsendurchmesser von 10 mm und 5 bar Strahldruck sowie einer Strahlleistung von 9 m ² /h (Treibacher Schleifmittel GmbH 2012)
Absaugen	Energie, elektrisch	0,05 kWh/m ²	Annahme: rund 7 min pro 1 m ² (Strahlleistung von 9 m ² /h), 40% der elektrischen Nennleistung von 1200 Watt
Beschichten	Energie, elektrisch	1,27 kWh/m ²	Beschichten mittels Druckluftspritzen (Industrieangabe 2024b)

3.3 Rückbau, Wiederverwendung, Recycling und Entsorgung der Hallenkonstruktion

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Datengrundlagen für das End-of-Life beschrieben. In Abschnitt 2.6 wurde bereits dargestellt, dass in der Basisversion der Bilanzierungen keine Gutschriften vergeben wurden, da dies mit Blick auf zukünftige Produktionsstrukturen mit einer dann defossilierten Rohstoffgrundlage mit hohen Unsicherheiten verbunden wäre. Um die von dieser Grundregel abweichende Sensitivitätsanalyse nachvollziehbar zu machen, erfolgen in den nachfolgenden Abschnitten auch Aussagen zur Vergabe von Gutschriften.

3.3.1 Rückbau

Der Rückbau der Halle wurde analog zur Montage modelliert, wobei die Hälfte des Zeitaufwandes im Vergleich zur Montage angenommen wurde (vgl. 3.13.1.4).

Tabelle 3-16: Dieserverbrauch für die Demontage der Halle je nach Ausführungsvariante

Ausführungsvariante	Dieserverbrauch [l]
Stahl- und Holzbauweise	88
Stahlbetonbauweise	132

3.3.2 Wiederverwendung, Recycling und Entsorgung

3.3.2.1 Grundsätzliche Überlegungen

Im Basisszenario wurden keine Gutschriften für das Recycling oder die Wiederverwendung von Baustoffen nach der betrachteten Nutzungsdauer von 50 Jahren vergeben, vgl. dazu Abschnitt 2.6.2. Die Wiederverwendungsquote von 10 % des Stahl- und Holztragwerkes sowie der Betonträger wurde insofern in der Bilanzierung berücksichtigt, dass nur 90 % des Stahl- und Holztragwerks sowie 90 % der Betonträger für das anschließende Recycling bzw. die anschließende thermische Verwertung vorbereitet werden mussten. Der Demontageaufwand wurde dahingegen noch für 100 % der Materialien berechnet.

Bezüglich des Entsorgung- bzw. Recyclingaufwandes der Hallenmaterialien Stahl und Beton werden generische Datensätze zur Bilanzierung verwendet. Hierbei werden alle der Demontage folgenden Aktivitäten berücksichtigt (Transport zum Recyclingbetrieb sowie benötigter Maschinen- und Energieeinsatz im Recyclingunternehmen). In nachfolgender Tabelle 3-17 sind die Annahmen bezüglich der Wiederverwendung bzw. des Recyclings von Hallenelementen sowie die entsprechenden Anpassungen in der Bilanzierung zusammengefasst. Hierbei muss zwischen der Umsetzung in der Basisversion und im Gutschriftenszenario unterschieden werden. Für Annahmen, die das End-of-Life betreffen, werden ausschließlich im Gutschriftenszenario Gutschriften vergeben (kursiv dargestellt). Da es sich hierbei um kein Closed-Loop-Recycling im gleichen System handelt, wird nach der 50/50-Gutschriftenmethode vorgegangen. Demnach werden sowohl der Nutzen des Recyclings bzw. der Wiederverwendung (in Form von Gutschriften) als auch der Aufwand für das Recycling bzw. der Entsorgungsaufwand der wiederverwendeten Materialien zu gleichen Teilen zwischen dem Produzenten und dem Nutzenden der Sekundärmaterialien aufgeteilt. Die Zuordnung der Gutschriften und Lasten bleibt somit auf zwei Nutzungszyklen beschränkt.

Für Annahmen, die das Recycling während des Produktionsprozesses betreffen, werden auch in der Basisversion Gutschriften für die vermiedene Produktion von Primärstoffen vergeben, da hier das Recycling unmittelbar erfolgt und demnach eine Gutschriftenvergabe mit geringeren Unsicherheiten verbunden ist. Konkret betrifft das das Recycling von Hartzink und Feinasche zu Zinkoxid im Prozess des Feuerverzinkens. Auch hier wird nach der 50/50-Gutschriftenmethode vorgegangen.

Tabelle 3-17: Annahmen zur Wiederverwendung und dem Recycling von Hallenelementen (Umsetzung in der Bilanzierung für das Gutschriftenszenario wird kursiv dargestellt)

Ausführungs-variante	Annahmen zur Wiederverwendung	Umsetzung in der Bilanzierung	Annahmen zum Recycling	Umsetzung in der Bilanzierung
Stahlkonstruktion nassbeschichtet	10% Wiederverwendung Stahlbalken	<i>Gutschrift: 0,1*0,5*negativer Wert von Stahlträger ohne Beschichtung</i>	Recycling des Betons aus dem Fundament	<i>Gutschrift: die vermiedene Kiesgewinnung wird zur Hälfte diesem System angerechnet</i>
Stahlkonstruktion feuerverzinkt	10% Wiederverwendung Stahlbalken	<i>Gutschrift: 0,1*0,5*negativer Wert von feuerverzinktem Stahlträger</i>	Recycling des Betons aus dem Fundament	<i>Gutschrift: die vermiedene Kiesgewinnung wird zur Hälfte diesem System angerechnet</i>

Ausführungs- variante	Annahmen zur Wiederverwendung	Umsetzung in der Bilanzierung	Annahmen zum Recycling	Umsetzung in der Bilanzierung
			7% Recycling des Zinks in der Verzinkerei	verringertes Einsatz an Zink aus der Zinkhütte
			13% Verbrennung des Zinks zu Zinkoxid	Gutschrift: die vermiedene Zinkoxidproduktion wird zur Hälfte diesem System angerechnet
Stahlbeton- bauweise			Recycling des Betons	<i>Gutschrift: die vermiedene Kiesgewinnung wird zur Hälfte diesem System angerechnet</i>
	10% Wiederverwendung Holzbalken	<i>Gutschrift: 0,1*0,5*negativer Wert von Holzbalken</i>	Recycling des Betons aus dem Fundament	<i>Gutschrift: die vermiedene Kiesgewinnung wird zur Hälfte diesem System angerechnet</i>
Holzbau- konstruktion			thermische Verwertung von 90% der Holzbalken in BMHKW	<i>Gutschrift: die vermiedene elektrischen und thermischen Energieproduktion durch die thermische Verwertung wird zur Hälfte diesem System angerechnet</i>

Der eingesetzte Stahl wird zu 100 % recycelt, hierfür wird allerdings keine Gutschrift angerechnet, da bereits recycelter Stahl als Inputstrom verwendet wurde. Damit liegt ein Quasi-Closed-Loop-Recycling vor und Gutschriften für die Nutzung von Stahlschrott im End-of-Life des abgebenden Systems und die Lastschrift für die Nutzung von Sekundärstahl wären identisch. Bei der feuerverzinkten Stahlhalle ist auch nach Ablauf der 50 Jahre Nutzungszeit unter Betrachtung eines Worst-Cases noch 50 µm Restzinküberzugsdicke vorhanden, weshalb in diesem Fall von einer Wiederverwendung von 10 % der feuerverzinkten Stahlträger ausgegangen wird, also kein neuer Korrosionsschutz erforderlich ist. Bei der nassbeschichteten Stahlhalle hingegen wäre ein neuer Korrosionsschutz notwendig, weshalb in der Gutschrift nur unbeschichtete Stahlträger berücksichtigt werden.

3.3.2.2 Modellierung der thermischen Verwertung von Altholz aus dem End-of-Life der Holzkonstruktion

Für die Modellierung der thermischen Verwertung von Altholz aus dem End-of-Life der Holzkonstruktion wurde das Verbrennungsmodell aus einer Studie (Bulach et al. 2022) verwendet, in der verschiedene Optionen des Recyclings und der Behandlung von Restabfällen untersucht wurden. Die Parameter dieses Verbrennungsmodells wurden für den spezifischen Fall der Verbrennung von Altholz in einem Biomasseheizkraftwerk (BMHKW) angepasst. Es wurde eine Transportdistanz des Altholzes zum nächsten BMHKW von durchschnittlich 75 km angenommen. Das Altholz wurde mit einer Zusammensetzung von 10 % Wasser und 90 % Nadelholz in Anlehnung an die Umwelt-Produktdeklaration von Brettschichtholz (EPD 2019) bilanziert. Der Anteil des Klebstoffes (0,72 %)

wurde in der Zuordnung des biogenen und fossilen Kohlenstoffes bei der Verbrennung berücksichtigt.

In Biomasseheizkraftwerken wird die entstehende Verbrennungswärme zum Antrieb einer Turbine genutzt. Somit entsteht elektrische Energie, die in der Modellierung gegenüber dem deutschen Strommix gutgeschrieben werden kann. Die Kondensationswärme wird in der Regel als Fernwärme ausgekoppelt und kann gegenüber dem deutschen Wärmemix gutgeschrieben werden. Die Menge der ausgekoppelten Nutz-Energie ergibt sich aus dem Netto-Wirkungsgrad der Verbrennungsanlage, siehe nachstehende Tabelle. Der Netto-Wirkungsgrad ist im Vergleich zum Brutto-Wirkungsgrad bereits um den Eigenenergiebedarf der Anlage (z. B. für die Vorzerkleinerung von Abfall, die Abgasreinigung, Turbine etc.) bereinigt.

Tabelle 3-18: Wirkungsgrad BMHKW nach Flamme et al. (2018)

		Netto-Wirkungsgrade
Wirkungsgrad BMHKW	elektrisch	26,3%
	thermisch	15,0%

Die Strom- und Wärmemenge, die gutgeschrieben werden kann, ist somit die Abfallmenge (m_{Abfall}) multipliziert mit dem Heizwert des Abfalls und den Wirkungsgraden ($\eta_{th/el}$). Bei der exportierten Wärme muss zusätzlich eine Korrektur um die Verluste in der Fernwärmeverteilung (Verluste: 15 %) und Verluste bei der Hausübergabestation (Verluste: 10 %) vorgenommen werden.

$$\dot{Q}_{el} = m_{Abfall} * Heizwert_{Abfall} * \eta_{el,Verbrennungsanlage}$$

$$\dot{Q}_{th} = m_{Abfall} * Heizwert_{Abfall} * \eta_{th,Verbrennungsanlage} * (1 - 0,15) * (1 - 0,1)$$

Die nach dieser Methode berechneten Gutschriften werden allerdings aus den in Abschnitt 2.6.2 genannten Gründen im Basisszenario nicht berücksichtigt, sondern nur in einer der durchgeführten Sensitivitätsrechnungen berücksichtigt (siehe Abschnitt 4.3.3).

3.4 Verwendete Datensätze der Sachbilanz und Bewertung der Datenqualität

Im nachfolgenden Abschnitt 3.4.1 werden die in dieser Ökobilanz herangezogenen Datensätze aufgeführt und jeweils bezüglich der Datenqualität (zeitlich, geographisch, berücksichtigte Technologien, Quellenangaben) gekennzeichnet. Daran schließt sich eine Diskussion und Bewertung der erreichten Datenqualität der Sachbilanz an (vgl. Abschnitt 3.4.2).

3.4.1 Verwendete Datensätze

Neben den in den Abschnitten 3.1 bis 3.3 behandelten spezifischen Datensätzen und Annahmen wurden bei allen hier untersuchten Varianten auch allgemeine Datensätze zu Hintergrundprozessen hinterlegt, etwa zur Bereitstellung von Basismaterialien, zur Bereitstellung von Energieträgern und Nutzenergie oder zu Transport- und Entsorgungsdienstleistungen. Sowohl die spezifischen Datensätze als auch die Datensätze aus Datenbanken und anderen Quellen werden in der nachstehenden Übersicht aufgeführt und anhand von Datenherkunftsindikatoren charakterisiert.

Tabelle 3-19: Zur Erstellung der Sachbilanz verwendete spezifische und allgemeine / generische Datensätze

#	Bezeichnung	Relevant für	Zeitlicher Erfahrungsbereich	Geographischer Erfahrungsbereich	Anmerkungen, Technologie etc.	Quelle
Spezifische Datensätze zur Modellierung der Herstellung der Konstruktionsvarianten						
1	Materialbedarf Stahlkonstruktion	Stahlkonstruktion (zur Feuerverzinkung oder Nassbeschichtung)	2015 – 2024	Deutschland	Grundlagen zur statischen Auslegung beruhen auf einer 2015 von bauforumstahl e.V. publizierten Ökobilanz; Grundlagen und Annahmen 2024 verifiziert	Kocker und Möller 2016; Kocker 2024; Huckshold 2024
2	Feuerverzinken	Stahlkonstruktion (zur Feuerverzinkung)	2001 – 2023	Deutschland	Siehe eingehend Abschnitt 3.1.1.1: <ul style="list-style-type: none"> Energiebedarf Prozess nach 2022 erhobenen Primärdaten in feuerverzinkenden Betrieben Zinkbedarf: BAT-Angaben und Branchenexperten Zinkrecycling und Aufbereitung Sekundärzink aus um 2000 erhobenen Primärdaten; Energievorketten aktualisiert 	Peißker und Huckshold 2016; Aries et al. 2022; International Zinc Association 2023; Boliden Mineral AB 2021; Krüger 2001
3	Nassbeschichten – Materialbedarf und Materialzusammensetzung	Stahlkonstruktion (zur Nassbeschichtung)	2019 – 2023	Deutschland	Siehe eingehend Abschnitt 3.1.1.2: <ul style="list-style-type: none"> Materialbedarf nach technischen Normen und Prüfvorschriften Materialzusammensetzung angenommen nach typischen Rahmenrezepturen 	DIN EN ISO 12944 2018 – 2020; BMDV Januar 2022; BBSR 2023
4	Nassbeschichten – Energiebedarf	Stahlkonstruktion (zur Nassbeschichtung)	2024	Deutschland	Durchschnittswert aus drei Betrieben	Industrieangabe 2024a
5	Nassbeschichten - Instandhaltung	Stahlkonstruktion (zur Nassbeschichtung)	2019 – 2024	Deutschland	Siehe eingehend Abschnitt 3.2.2: <ul style="list-style-type: none"> Schutzdauer abgeleitet aus technischer Norm Ausbesserungsanteile näherungsweise abgeschätzt Oberflächenvorbereitungsgrad nach technischer Norm 	DIN EN ISO 12944 2018 – 2020; Treibacher Schleifmittel GmbH 2012; Industrieangabe 2024b

#	Bezeichnung	Relevant für	Zeitlicher Erfahrungsbereich	Geographischer Erfahrungsbereich	Anmerkungen, Technologie etc.	Quelle
					<ul style="list-style-type: none"> Maschineneinsatzzeiten abgeschätzt (Schleifen) bzw. nach Industrieangabe (Strahlen) Elektrische Leistungsaufnahme Schleifen und Absaugen nach Typschildern und Messung der tatsächlichen Leistung an typischen Geräten 	
6	Verbrauchswerte Mobilkräne	Montage /Demontage aller Konstruktionsvarianten	2024	Deutschland	Siehe Abschnitte 3.1.4 und 3.3.1	Industrieangabe 2024d
Allgemeine / generische Datensätze zur Modellierung der Herstellung der Konstruktionsvarianten (samt Fundamente)						
7	concrete production, 25-30 MPa, with cement, Portland- IN	Fundamente aller Varianten	2014 - 2023	Indien	Produktionsdaten eines indischen Unternehmens; für die geforderte Druckfestigkeit 25-30 MPa enthält Ecoinvent nur dieses Datensatz	ecoinvent 3.9
8	concrete production, 20 MPa	Fundamente aller Varianten, Sens.-analyse Abschnitt 4.3.5	2006 – 2022	Europa	Transportbeton mit einer Druckfestigkeit von 20 MPa, der für den Hochbau mit Portlandzement verwendet wird. Dichte: 2.335 kg/m³. Bestandteile (für 1 m³): Zement 204 kg, Wasser 160 kg, Kies 1009 kg, Sand 925 kg, Flugasche 36,38 kg, Zusatzmittel (Luftporenbildner und Superverflüssiger) 1,2 kg. Prozessdaten aus Verbandsstatistiken	ecoinvent 3.9
9	concrete production, 50 MPa	Fundamente aller Varianten, Sens.-analyse Abschnitt 4.3.5	2019 – 2022	Europa	Transportbeton mit einer Druckfestigkeit von 50 MPa mit Portlandzement. Dichte: 2.332 kg/m³. Bestandteile (für 1 m³): Zement 344 kg, Wasser 155 kg, Kies 950 kg, Sand 798 kg, Flugasche, Silikastaub oder Hochofenschlacke 81,85 kg, Zusatzmittel (Luftporenbildner, wasserreduzierendes Zusatzmittel und Superverflüssiger) 3,75 kg. 50 MPa-Beton ist für strukturell verstärkte Spezialanwendungen vorgesehen. Prozessdaten aus Verbandsstatistiken	ecoinvent 3.9

#	Bezeichnung	Relevant für	Zeitlicher Erfahrungsbereich	Geographischer Erfahrungsbereich	Anmerkungen, Technologie etc.	Quelle
10	market for steel, low-alloyed	<ul style="list-style-type: none"> Fundamente aller Varianten Stahlkonstruktion (zur Feuerverzinkung oder Nassbeschichtung) 	2011-2022	Europa	Originaldatensatz ist global mit einem Mix aus Stahl aus Hochofen- und Elektroroute unterschiedlicher Weltregionen definiert. Modifikation dahingehend, dass ausschließlich europäischer Stahl über die Elektrostahlroute abgebildet wird, da dies nach Kenntnis des Industrieverbands Feuerverzinken den Stand der Technik abbildet.	ecoinvent 3.9, modifiziert
11	hot rolling, steel	<ul style="list-style-type: none"> Fundamente aller Varianten Stahlkonstruktion (zur Feuerverzinkung oder Nassbeschichtung) 	1997-2022	Europa	Datensatz beruht auf IPPC (2001) Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC); Reference Document on Best Available Techniques in the Ferrous Metals Processing Industry. European Commission	ecoinvent 3.9
12	excavation, hydraulic digger – RER	Fundamente aller Varianten	1996-2022	Repräsentativ für Europa basierend auf der Schweiz	Volumen des Erdaushubs abhängig von den Varianten, vgl. Abschnitt 3.1.5; Datensatz beschreibt den Aushub von 1 m ³ Material und umfasst die Herstellung des Baggers, Schmieröl- und Kraftstoffverbrauch sowie einige gemessene Luftemissionen als Output.	ecoinvent 3.9; Volumen nach Auslegung Siebers und Hauke 2015 sowie Oberhaidinger 2023
13	market for zinc – GLO	Stahlkonstruktion (zur Feuerverzinkung oder Nassbeschichtung)	2011 – 2022	Global	modifiziert: 14% des Zinkkonzentrats wird durch Wälzoxid ersetzt (siehe Datensatz Nr. 16)	ecoinvent 3.9, modifiziert
14	zinc coating, pieces - RER	<ul style="list-style-type: none"> Stahlkonstruktion, feuerverzinkt Holzkonstruktion (Anschlusssteile) 	1996-2022	Europa	Datensatz modifiziert mit spezifischen Zink- und Energieverbräuchen, Wärmebereitstellung über heat production, natural gas, at industrial furnace >100kW - Europe without Switzerland, sowie Modifizierung des Datensatzes primary zinc production from concentrate – RoW: 14% des Zinkkonzentrats wird durch Wälzoxid ersetzt, vgl. Abschnitt 3.1.1.1	ecoinvent 3.9, modifiziert
15	Recycling von Hartzink und Feinasche	<ul style="list-style-type: none"> Stahlkonstruktion, feuerverzinkt 	2001 (Prozessdaten); 2023	Europa	Datensatz beschreibt die Weiterverarbeitung der Prozessabfälle Hartzink und Feinasche aus dem Prozess des Feuer-	Eigene Modellierung nach Krüger 2001; ecoinvent 3.9

#	Bezeichnung	Relevant für	Zeitlicher Erfahrungsbereich	Geographischer Erfahrungsbereich	Anmerkungen, Technologie etc.	Quelle
		<ul style="list-style-type: none"> Holzkonstruktion (Anschlusssteile) 	(Vorkette Erdgas für Drehrohröfen)		verzinkens. Spezifischer Energiebedarf für die Oxidation im Drehrohröfen nach Krüger 2001, Vorkette Erdgas nach econvent	
16	Recycling zinkhaltiger Stahlwerksstäube zu Wälzoxid	<ul style="list-style-type: none"> Stahlkonstruktion, feuerverzinkt Holzkonstruktion (Anschlusssteile) 	2001 (Prozessdaten); 2023 (Vorkette Erdgas für Wälzrohrverfahren)	Europa	Datensatz beschreibt die Gewinnung von zinkhaltigen Wälzoxid aus der Aufbereitung von Stahlwerksstäuben Spezifischer Energiebedarf nach Krüger 2001, Vorkette Erdgas nach econvent	Eigene Modellierung nach Krüger 2001; econvent 3.9
17	market for alkyd resin, long oil, without solvent, in 70% white spirit solution state – RER	Stahlkonstruktion zur Nassbeschichtung	2018 – 2022	Europa	Das Produkt „Alkydharz, langölig, ohne Lösungsmittel, in 70%-iger Testbenzin-Lösung“ steht für ein bestimmtes langöliges Alkyd und wird hier als eine der möglichen Harzkomponenten des generischen Nassbeschichtungssystems (siehe Abschnitt 3.1.1.2) betrachtet. Bei seiner Herstellung werden Sojaöl als Fettsäure, Phthalsäureanhydrid als mehrbasige Säure und Pentaeritrol als Polyol verwendet.	Ecoinvent 3.9
18	market for epoxy resin, liquid – RER	Stahlkonstruktion zur Nassbeschichtung	2018 – 2022	Europa	Epoxidharz ist eine weitere Harzkomponente des generischen Nassbeschichtungssystems (vgl. Abschnitt 3.1.1.2). Epoxidharz ist ein Kunststoffprodukt fossilen Ursprungs, nicht biologisch abbaubar und ein Duroplast.	Ecoinvent 3.9
19	market for polyurethane adhesive – GLO	Stahlkonstruktion zur Nassbeschichtung	2015 – 2022	Global	Polyurethan ist eine weitere Harzkomponente des generischen Nassbeschichtungssystems (vgl. Abschnitt 3.1.1.2). Chemisch bestehen Polyurethane aus Isocyanaten und Polyolen.	Ecoinvent 3.9
20	market for acrylic binder, with water, in 54% solution state – RER	Stahlkonstruktion zur Nassbeschichtung	2018 – 2022	Europa	Acrylharz ist eine weitere Harzkomponente des generischen Nassbeschichtungssystems (vgl. Abschnitt 3.1.1.2).: Der originäre Datensatz bezieht sich auf Acrylbindemittel mit Wasser in einem 54-prozentigen Lösungszustand, weshalb er so modifiziert wurde, dass nur der feste Teil des Bindemittels dargestellt wird.	ecoinvent 3.9, modifiziert

#	Bezeichnung	Relevant für	Zeitlicher Erfahrungsbereich	Geographischer Erfahrungsbereich	Anmerkungen, Technologie etc.	Quelle
21	market for ethanol, without water, in 99.7% solution state, from ethylene – RER	Stahlkonstruktion zur Nassbeschichtung	2018 – 2022	Europa	Ethanol ist eines der Lösemittel für das generische Nassbeschichtungssystem (vgl. Abschnitt 3.1.1.2). Datensatz bildet die technische Herstellung über das Edukt Ethen ab.	ecoinvent 3.9
22	market for water, completely softened – RER	Stahlkonstruktion zur Nassbeschichtung	2015 – 2022	Europa	(Vollständig enthärtetes) Wasser ist eines der Lösemittel für das generische Nassbeschichtungssystem (vgl. Abschnitt 3.1.1.2).	ecoinvent 3.9
23	market for xylene – RER	Stahlkonstruktion zur Nassbeschichtung	2018 – 2022	Europa	Xylol ist eines der Lösemittel für das generische Nassbeschichtungssystem (vgl. Abschnitt 3.1.1.2). Datensatz bildet im Wesentlichen die Gewinnung aus Reformbenzin ab mit den Schritten Flüssig-Flüssig-Extraktion von den Nichtaromaten und anschließenden Destillationsschritten mit Transalkylierung und Disproportionierung zur Umwandlung von Toluol in zusätzliche Xylole. Literaturreferenzen ecoinvent: IFEU/PlasticsEurope (2021): Eco-profile of Benzene, Toluene, and Xylenes; Folkins H.O. (2021): Benzene, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley VCH.	ecoinvent 3.9
24	market for zinc monosulfate – RER	Stahlkonstruktion zur Nassbeschichtung	2018 - 2022	Europa	Zinksulfat wird hier ersatzweise für Zinkphosphat herangezogen. Datensatz bildet die Herstellung aus Zinkoxid und Schwefelsäure, bei einer Ausbeute von 95 % ab. Das Zinksulfat-Monohydrat wird entweder durch thermische Dehydratisierung oder durch Dehydratisierung mit 95 %igem Ethanol hergestellt.	ecoinvent 3.9
25	market for magnetite – GLO	Stahlkonstruktion zur Nassbeschichtung	2011 – 2022	Global	Eisenoxid Magnetit als Pigment für das Nassbeschichtungssystem. Magnetit entsteht direkt aus der Reaktion zwischen Eisensulfat und Natriumhydroxid und ist ein	ecoinvent 3.9

#	Bezeichnung	Relevant für	Zeitlicher Erfahrungsbereich	Geographischer Erfahrungsbereich	Anmerkungen, Technologie etc.	Quelle
					Nebenprodukt des Betriebs von Ilmenit-Magnetit-Minen.	
26	market for acrylic filler – RER	Stahlkonstruktion zur Nassbeschichtung	2018-2022	Europa	Füllstoff auf Basis organischer Lösemittel für die Nassbeschichtung. Datensatz dahingehend modifiziert, dass die Anteile an Binder und Wasser herausgerechnet wurden, um ausschließlich den Füllstoffanteil (Mischung aus Kreide, Kalkmehl, Talkum oder Quarz) abzubilden.	ecoinvent 3.9, modifiziert
27	concrete production, 37MPa, for building construction, for exterior use, with cement ZN/D – CH	Stahlbetonkonstruktion	2020 – 2022	Schweiz	Transportbeton mit einer Druckfestigkeit von 37 MPa. Dieses Produkt wird für vertikale oder horizontale Außenbauteile unter direkter Bewitterung (Regen, Frost, Taumittel (Sprühnebel) ausgesetzt) verwendet, wie z. B. Bauelemente von Brücken mit Spritzwasser, Betondecken, Parkdecks, Solebäder.	ecoinvent 3.9
28	reinforcing steel production - Europe without Austria	Stahlbetonkonstruktion	2000 – 2022	Europa	„Bewehrungsstahl“ wird im Bausektor für Brücken, Gebäude, Lagerhallen und Fundamente eingesetzt, um die Festigkeit einer Betonstruktur zu erhöhen. Er entsteht aus Warmwalzen von Stahl. Modifizierung des Datensatzes dahingehend, dass dieser Stahl ausschließlich über die Elektrostahlroute gewonnen wird.	ecoinvent 3.9, modifiziert
29	market for glued solid timber	Holzkonstruktion	2012 – 2022	Deutschland	„Brettschichtholz“ ist ein industriell gefertigtes Produkt für tragende Konstruktionen. Der Datensatz spiegelt eine Stichprobe der deutschen Brettschichtholzproduktion wider. Zitierte Quelle in ecoivent: Rüter, S. and S. Diederichs (2012): Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie Nr. 2012/1, Johann Heinrich von Thünen-Institut (vTI), Hamburg	ecoinvent 3.9

#	Bezeichnung	Relevant für	Zeitlicher Erfahrungsbereich	Geographischer Erfahrungsbereich	Anmerkungen, Technologie etc.	Quelle
Datensatz zur Modellierung der Montage (und Demontage) der Konstruktionsvarianten						
30	diesel, burned in building machine – GLO	Alle Konstruktionen (Kraneinsatz zur Montage, vgl. Abschnitt 3.1.4)	1996 – 2022	Global	Datensatz beschreibt den Einsatz von Diesel in typischen Baumaschinen (wie hier Kraneinsatz) und umfasst neben den direkten (Luft-)Emissionen auch die Produktion und Bereitstellung des Kraftstoffs	ecoinvent 3.9
Allgemeine / generische Datensätze zur Modellierung der Instandhaltung bei der Stahlkonstruktion, nassbeschichtet						
31	market for electricity, low voltage – DE	Instandhaltung Stahlkonstruktion, nassbeschichtet (vgl. Abschnitt 3.2.2)	2014 – 2022	Deutschland	Bereitstellung von elektrischer Energie auf Niederspannungsebene (230 V Wechselstrom / 400 Volt Drehstrom). Im Datensatz werden die im Inland erzeugten und aus Importen stammenden und in Niederspannung umgewandelten Strommengen unter Einbezug der Stromverluste bei der Übertragung Hochspannung, Mittelspannung, Niederspannung abgebildet.	ecoinvent 3.9
32	market for compressed air, 600 kPa gauge – RER	Instandhaltung Stahlkonstruktion, nassbeschichtet (vgl. Abschnitt 3.2.2)	2011 – 2022	Europa	Datensatz beschreibt die Bereitstellung von „Druckluft mit einem Arbeitsdruck von 600 kPa. Originaldatensatz wurde dahingehend modifiziert, dass ausschließlich optimierte und beste Anlagen zur Druckluftherzeugung berücksichtigt werden. Dadurch werden im modifizierten Datensatz im Unterschied zu einer Durchschnittsbetrachtung keine älteren, ineffizienten Anlagen einbezogen.	ecoinvent 3.9, modifiziert
Allgemeine / generische Datensätze zur Modellierung von Rückbau, Wiederverwendung, Recycling und Entsorgung der Konstruktionsvarianten						
33	sorting and pressing of iron scrap – RER	Behandlung von Stahlschrott aus dem End-of-Life der Varianten Stahlkonstruktion, feuerverzinkt und Stahlkonstruktion, nassbeschichtet	2002-2022	Europa	Datensatz beschreibt die Erfassung, Sortierung und Kompaktierung von Stahlschrott (als Input zur Weiterverarbeitung als Sekundärstahl).	ecoinvent 3.9

#	Bezeichnung	Relevant für	Zeitlicher Erfahrungsbereich	Geographischer Erfahrungsbereich	Anmerkungen, Technologie etc.	Quelle
34	treatment of waste reinforced concrete, sorting plant - Europe without Switzerland	Behandlung von Betonresten aus dem End-of-Life der Variante Stahlbetonkonstruktion	2002 – 2022	Europa	Datensatz beschreibt den Abriss von Gebäuden mit Kompaktladern und die Folgeprozesse (Vorsortierung von Mischabfällen, Zerkleinerung und manuelle Sortierung) bis hin zur Endlagerung von nicht verwerteten Abfallstoffen	ecoinvent 3.9
35	Verbrennung von Baualtholz, chromimprägniert, in BMHKW	Behandlung von Holzabfällen aus dem End-of-Life der Variante Holzkonstruktion	2022	Deutschland	Eigene Modellierung, vergleiche Abschnitt 3.3.2.2	Bulach et al. 2022
Allgemeine / generische Datensätze für die Berechnung von Gutschriften aus der Wieder-/Weiterverwendung und aus der Verwertung von eingesetzten Materialien der Konstruktionsvarianten						
36	Stahlträger / Stahlstützen zur Wieder-/Weiterverwendung	Stahlkonstruktion (zur Feuerverzinkung oder Nassbeschichtung)	2011 – 2022 (für Stahl, niedriglegiert) 1997 – 2022 (für Warmwalzen)	Europa	Siehe Datensätze 10 und 11	ecoinvent 3.9, modifiziert
37	Holzstützen / Binder zur Wiederverwendung	Holzkonstruktion	2012 – 2022	Deutschland	Siehe Datensatz 29	ecoinvent 3.9
38	Stahlbetonträger zur Wiederverwendung	Stahlbetonkonstruktion	2020 – 2022 (für Beton) 2000 – 2022 (für Bewehrungsstahl)	Europa	Siehe Datensätze 27 und 28	ecoinvent 3.9
39	Strom und Wärme aus der Verbrennung von Baualtholz in BMHKW	Holzkonstruktion	2022	Deutschland	Siehe Datensatz 35	Bulach et al. 2022
40	Gesteinskörner aus Betonrecycling	Stahlbetonkonstruktion	2011 – 2022	Schweiz	Datensatz „market for gravel, crushed – CH“ beschreibt die Herstellung von gebrochenem Kies aus dem primären Abbau aus Steinbrüchen	ecoinvent 3.9

3.4.2 Stellungnahme zur Datenqualität

Bei der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens dieser Ökobilanz wurden auch Anforderungen an die Datenqualität festgelegt, vgl. Abschnitt 2.5.

In diesem Abschnitt wird die Frage behandelt, inwiefern die recherchierten Grundlagen zu spezifischen Daten sowie die Hintergrunddaten, wie sie im vorangegangenen Abschnitt 3.4.1 beschrieben wurden, diesen Anforderungen entsprechen bzw. zu welchen Aspekten weitere Schritte erforderlich sind, um die Belastbarkeit der Datenbasis der Sachbilanz und die Richtungssicherheit der Bilanzergebnisse sicherzustellen.

- **Zeitbezogener Erfassungsbereich:**

Nach den festgelegten Anforderungen sollen die einbezogenen Daten für ergebnisrelevante Prozesse nicht älter als 10 Jahre sein.

Dies trifft für den Großteil der Datengrundlagen zu. Allerdings beruhen die prozessbezogenen Daten zur Aufarbeitung von beim Feuerverzinken anfallenden Rückständen (Hartzink und Feinasche) und für sekundäres Zinkkonzentrat aus der Aufarbeitung von Stahlwerksstäuben zu Wälzoxid auf einer Sachbilanz, die vor mehr als zwei Jahrzehnten veröffentlicht wurde (Krüger 2001). Der Fachliteratur folgend (Peißker und Huckshold 2016) dürfte sich an den betreffenden industriellen Prozessen im Kern nichts geändert haben, zudem wurden die Energievorketten (Erdgasfeuerung mit Vorkette) mit Daten aus dem Jahr 2022 aktualisiert. Vor diesem Hintergrund wird die Datengrundlage mit Blick auf den zeitbezogenen Erfassungsbereich als belastbar angesehen.

- **Geographischer Erfassungsbereich:**

Die in dieser Studie erfassten und zugrunde gelegten Daten sollen sich auf Deutschland oder Mitteleuropa beziehen. Dies trifft auf die zugrunde gelegten Datensätze mit folgender Ausnahme zu. Für Transportbeton wurde ein Datensatz (#7 in Tabelle 3-19) herangezogen, der sich auf Indien bezieht, da für die geforderte Druckfestigkeit von 25 - 30 MPa Ecoinvent nur dieses Datensatz anbietet. Vor diesem Hintergrund wurde mit Hilfe einer Sensitivitätsanalyse mit alternativen Datensätzen (#8 für 20 MPa, #9 für 50 MPa Druckfestigkeit, beide Datensätze mit Europa als geographischen Bezugsraum) nachgewiesen, dass das gewählte Vorgehen belastbar ist und zu keiner signifikanten Veränderung der Ergebnisse führt, vgl. Abschnitt 4.3.5.

- **Technologischer Erfassungsbereich:**

Die in dieser Studie verwendeten Daten sollen grundsätzlich den realisierten mittleren Stand der Technik für die vier untersuchten Tragwerksvarianten abbilden. Dies trifft sowohl für die ermittelten spezifischen Daten als auch für die der Modellierung hinterlegten Hintergrunddaten zu. Um die derzeit in Deutschland eingesetzten Technologien zu berücksichtigen, erfolgten bei wenigen Datensätzen Modifikationen, beispielsweise mit Blick auf den Einsatz von Sekundärstahl aus der Elektroofenroute, dem Prozess der Feuerverzinkens einschließlich der Energiebereitstellung oder zur Effizienz der Druckluftbereitstellung, vgl. die Datensätze #10, 13, 14 und 32 in Tabelle 3-19.

- **Präzision:**

Die Schwankungsbreite der für die Festlegung der mit den Tragwerken verbundenen Materialverbräuche soll innerhalb der branchenüblichen Toleranzen liegen. Bei den Nennmaßen der Tragwerke mit 15 m Breite und 60 m Länge liegen nach DIN 18202 die Grenzabweichungen in Bereichen von 24 bis 30 mm.

Es wird davon ausgegangen, dass bei einer Realisierung der hier untersuchten Varianten des

Tragwerks von Hallenkonstruktionen durch Maßnahmen der Qualitätssicherung und bei der Abnahme etwaige Abweichungen innerhalb zulässiger Toleranzbereiche liegen.

- **Vollständigkeit:**

Im Rahmen dieser Studie soll die Summe der erfassten Energie- und Materialflüsse mindestens 95 % der tatsächlichen Flüsse umfassen. Am Ende des Abschnitts 2.4 wurde bereits dargestellt, dass bei der nassbeschichteten Stahlkonstruktion wenige Energie- und Materialflüsse vernachlässigt wurden (Energiebedarf Abluftbehandlung, Verbrauch an Schleifmitteln und Strahlmittel bei der Instandhaltung). Die in Abschnitt 4.3.1 durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigt, dass diese Auslassungen keinen signifikanten Einfluss auf die Lage der Ergebnisse und des Vergleichs der untersuchten Konstruktionsvarianten haben.

- **Repräsentativität:**

Die in der Studie zugrunde gelegten Daten sollen für die hier untersuchten Typlösungen von Tragwerkskonstruktionen unter den festgelegten Bedingungen (insbesondere bezogen auf die Festlegung der Funktionellen Einheit) als repräsentativ und übertragbar angesehen werden. Bei der Wahl der spezifischen und der generischen Datensätze wurde darauf geachtet, dass die Daten mit Blick auf ihren zeitlichen als aktuell und im räumlichen Bezug deutsche bzw. europäische Bezüge aufweisen. Vor diesem Hintergrund wird die Datengrundlage der Sachbilanz als repräsentativ bewertet.

- **Konsistenz:**

Bei den vier hier untersuchten Tragwerksvarianten konnte nicht in allen Belangen auf gleichermaßen aktualisierte und repräsentative Daten zurückgegriffen werden. Im Vorgriff auf die durchgeführten Sensitivitätsanalysen (vgl. Abschnitt 4.3) kann festgestellt werden, dass die Belastbarkeit der Ergebnisse davon unberührt ist.

- **Reproduzierbarkeit:**

Die verwendete Datenbasis und die getroffenen Annahmen wurden so dokumentiert, dass die Ergebnisse der Ökobilanz grundsätzlich als reproduzierbar angesehen werden. Einzelne Daten zum Produktionsprozess sind vertraulich, so dass insbesondere die durchgeführten Sensitivitätsanalysen nicht sämtlich durch Dritte reproduziert werden könnten.

4 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

4.1 Signifikanz der Ergebnisse

Gemäß DIN EN ISO 14044:2021-02 können für das bessere Verständnis der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung einer Ökobilanz zusätzliche Methoden und Informationen notwendig sein, um zu entscheiden, ob zwischen den verglichenen Produktalternativen signifikante Unterschiede bestehen und um die Überinterpretation sehr kleiner, nicht signifikanter Unterschiede zwischen den verglichenen Systemen zu vermeiden.

Die Identifikation der signifikanten Parameter ist Teil der Auswertungsphase einer Ökobilanz und erfolgt auch in der vorliegenden Studie im entsprechenden Berichtskapitel. Vor dem Hintergrund des prozessorientierten Vorgehens im Rahmen einer Ökobilanz erscheint es dennoch sinnvoll, bereits an dieser Stelle darauf hinzuweisen, dass die Identifikation der signifikanten Parameter in der gängigen ökobilanziellen Praxis in der Regel nicht auf Basis von klassischen Methoden der Fehlerrechnung wie der mathematisch-stochastischen Unsicherheitsanalyse (z. B. Monte-Carlo-Simulation), erfolgt. Vielmehr werden in der ökobilanziellen Praxis häufig heuristisch Signifikanzschwellen abgeleitet. Auf Basis langjähriger Erfahrung in der Durchführung von Ökobilanzen hält das Öko-Institut die nachfolgend dargestellten Wesentlichkeitsschwellen für gleichermaßen praktikabel wie zweckmäßig. Die Wirkungsindikatoren können dabei in drei Gruppen eingeordnet werden, vgl. die nachstehende tabellarische Übersicht.

Tabelle 4-1: Wesentlichkeitsschwellen bei den Wirkungsindikatorergebnissen

Wirkungskategorie	Einheit	Signifikanzschwellenwert
Treibhausgaspotenzial (biogen, fossil und Landnutzung und -transformation)	kg CO ₂ eq	>10 %
Versauerung	mol H ⁺ eq	
Süßwasser-Eutrophierungspotenzial	kg P eq	
Marines Eutrophierungspotenzial	kg N eq	
Terrestrisches Eutrophierungspotenzial	mol N eq	
Photochemisches Oxidanzienbildungspotenzial	kg NMVOC eq	
Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Energieträger)	MJ	>20 %
Ionisierende Strahlung	kBq U-235 eq	
Landnutzung	Pt	
Ozonabbau-Potenzial	kg CFC11 eq	
Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Mineralien und Metalle)	kg Sb eq	
Feinstaub	disease inc.	
Inanspruchnahme von knappen Wasserressourcen	m ³ depriv.	Mindestens zwei Größenordnungen
Ökotoxizität, Süßwasser	CTUe	
Humantoxizitätspotenzial (nicht cancerogene Effekte)	CTUh	
Humantoxizitätspotenzial (cancerogene Effekte)	CTUh	

Quelle: Eigene Darstellung

In der vorliegenden Studie werden wie in Abschnitt 2.7 bereits ausgeführt, eine Auswahl an Wirkungsindikatoren dargestellt, ausgewertet und für die Schlussfolgerungen und Empfehlungen herangezogen, weshalb in der obigen Tabelle die Signifikanzschwellen für die anderen Wirkungsindikatoren grau formatiert sind.

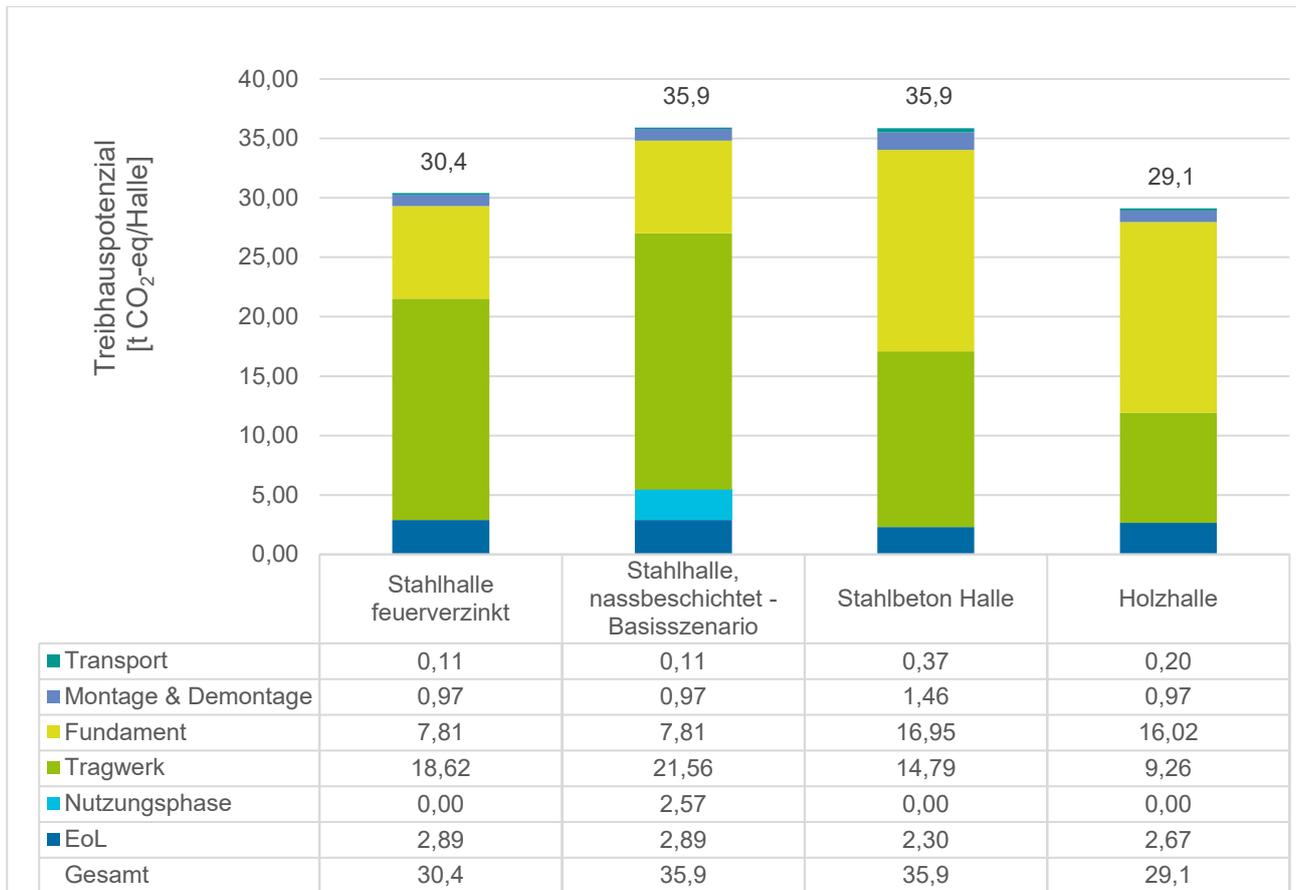
4.2 Ergebnisse im Basisszenario

4.2.1 Treibhausgaspotenzial

Die nachstehende Abbildung 4-1 zeigt die Ergebnisse für das Treibhausgaspotenzial – bezogen auf die festgelegte funktionelle Einheit von einer Halle mit einer überspannten Fläche von 900 m² über eine Nutzungszeit von 50 Jahren. Hier schneidet die Holzvariante gegenüber den anderen untersuchten Varianten am besten ab, gefolgt von der feuerverzinkten Variante. Die gesamten THG-Emissionen der Holzvariante sind weniger als 2% geringer im Vergleich zur feuerverzinkten Konstruktionsvariante, der Unterschied ist also nicht signifikant mit Blick auf die in Abschnitt 4.1 festgelegten Signifikanzschwellen. Die feuerverzinkte Konstruktionsvariante hat auch ein signifikant geringeres THG-Potenzial im Vergleich zur nassbeschichteten Stahlhalle. Das höchste THG-Potenzial weist neben der Stahlbetonkonstruktion die nassbeschichtete Stahlhalle auf, der Unterschied zur feuerverzinkten Stahlhalle ist hier vor allen Dingen auf die Notwendigkeit einer Instandsetzung während der Nutzungsphase als auch einen grundsätzlich höheren Energiebedarf bei der Erstbeschichtung im Vergleich zum Auftrag des Zinküberzugs zurückzuführen. Ein ähnlich hohes THG-Potenzial zeichnet die Stahlbetonhalle aus, hier wirkt sich v.a. der hohe Beitrag für das schwerere Fundament aus. Der Beitrag des Fundaments ist zwar auch bei der Holzvariante ggü. den beiden Stahlvarianten wesentlich höher, bedingt durch den geringeren Beitrag des Tragwerks wird dieser Nachteil überkompensiert.

Wie bereits in Abschnitt 2.7.2 ausgeführt wurde, kann nach neueren Untersuchungen nicht mehr a priori angenommen werden, dass Holz ein klimaneutraler Werkstoff ist, da bei stark bewirtschafteten Wäldern die Senkenfunktion des Waldes mit Blick auf die CO₂-Bindung aus der Atmosphäre abnimmt (Fehrenbach et al. 2022). Im gegebenem Rahmen dieser Studie konnte dieser Aspekt nicht berücksichtigt werden, d.h. es wird davon ausgegangen, dass Holz bei langlebigen Anwendungen als CO₂-neutrales Material bewertet wird.

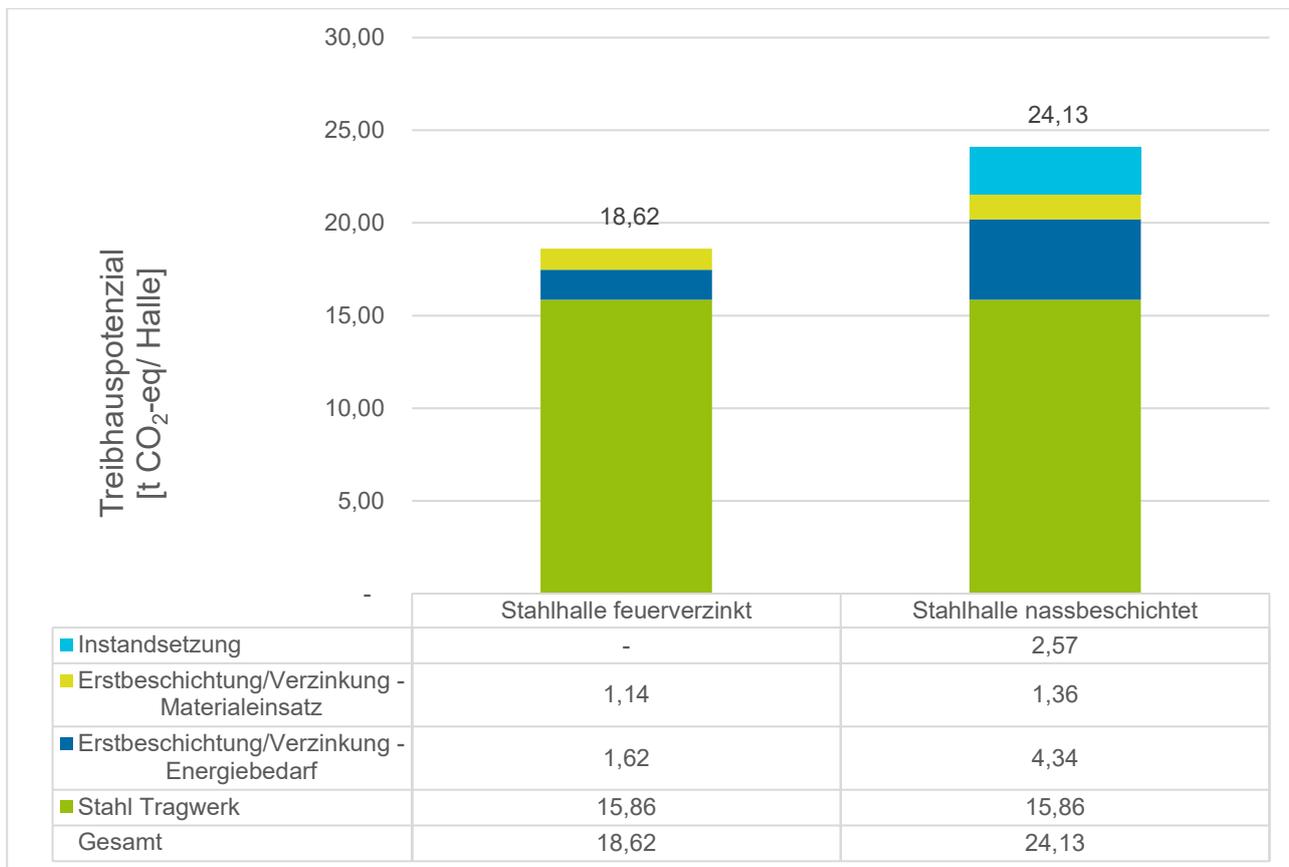
Abbildung 4-1: Treibhausgaspotenzial der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in t CO₂-eq/Halle



Quelle: Eigene Darstellung

In der folgenden Abbildung 4-2 wird am Beispiel der THG-Emissionen der Unterschied zwischen den beiden Stahlvarianten detaillierter und ohne den identischen Beitrag der Fundamente dargestellt. Der Beitrag der Tragwerke ist identisch und auch die Beiträge für den Materialbedarf zur Gewährleistung des Korrosionsschutzes sind sehr ähnlich. Die Unterschiede stammen im Wesentlichen aus dem höheren Energieeinsatz für das initiale Nassbeschichten sowie die Notwendigkeit, diese während der Nutzungsdauer von 50 Jahren durch Instandhaltungsmaßnahmen auszubessern bzw. vollständig zu erneuern. Das im Vergleich zur Erstbeschichtung geringere THG-Potenzial bei der Instandsetzung ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass bei der Instandsetzung eine Trocknung bei Umgebungstemperatur ohne weitere Wärmezufuhr angenommen wurde.

Abbildung 4-2: Vergleich des Treibhausgaspotenzial für die Tragwerke in der verzinkten und in der nassbeschichteten Bauweise in t CO₂-eq/Halle

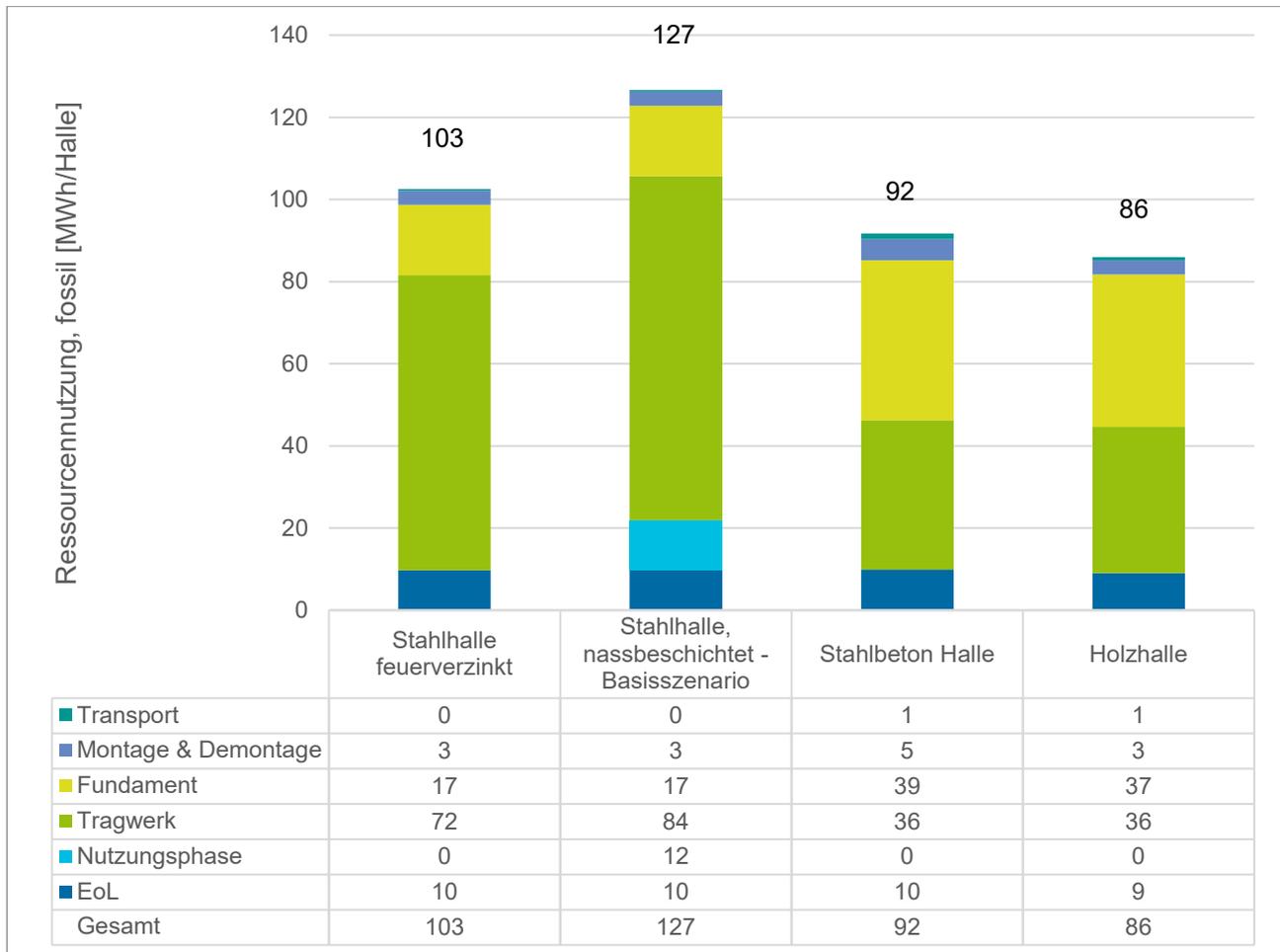


Quelle: Eigene Darstellung

4.2.2 Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Energieträger)

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Betrachtung der fossilen Rohstoffnutzung, vgl. Abbildung 4-3. Hier schneidet die nassbeschichtete Stahlvariante gegenüber der feuerverzinkten Ausführung und der Variante aus Stahlbeton signifikant schlechter ab. Der Unterschied zwischen der feuerverzinkten Ausführung und der Stahlbeton-Variante ist knapp über der Signifikanzschwelle, d.h. bei diesem Wirkungsindikator liegt die Variante aus Stahlbeton geringfügig günstiger im Vergleich zur feuerverzinkten Stahlvariante. Erwartungsgemäß schneidet hier die Holzvariante wg. des hohen biogenen Rohstoffeinsatzes deutlich am besten ab.

Abbildung 4-3: Fossile Ressourcennutzung der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in MWh/Halle

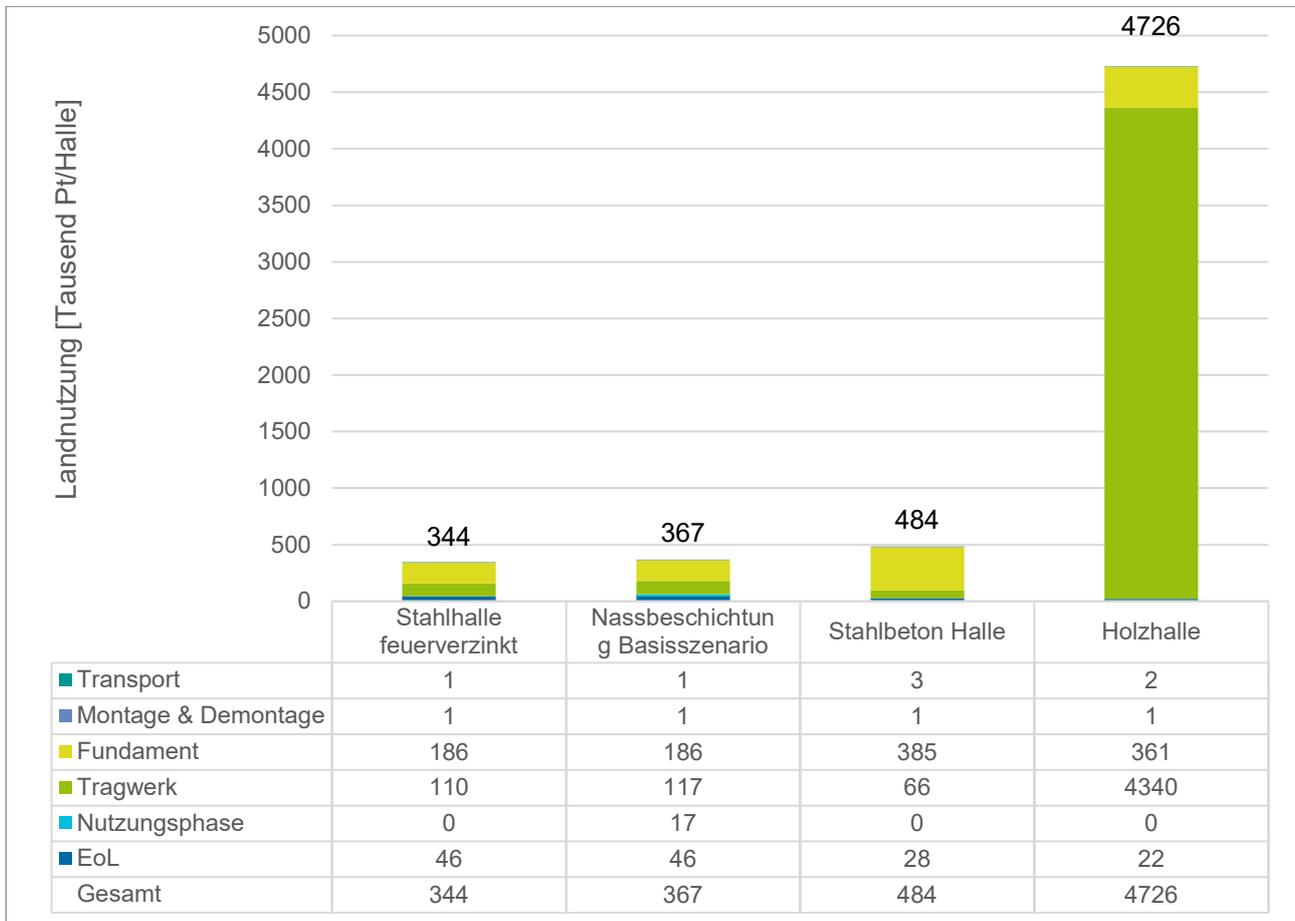


Quelle: Eigene Darstellung

4.2.3 Landnutzung

Die Landnutzung, siehe Abbildung 4-4, wird generell durch die Beiträge aus der Erstellung der Fundamente und der Tragwerke bestimmt. Beide Stahlkonstruktionen liegen hier unter Berücksichtigung der Signifikanzschwellen auf vergleichbarem Niveau, gefolgt von der Variante Stahlbetonkonstruktion, aufgrund des bei dieser Variante deutlich größeren Fundaments mit einem entsprechenden Mehrverbrauch an Sand, Kies und Mergel mit einer entsprechenden Landnutzung. Die Variante Holzkonstruktion hat gegenüber den anderen drei Varianten einen um Faktor 10 höhere Landnutzung, was sich typischerweise bei biogenen Materialien durch die entsprechende Inanspruchnahme von Flächen erklärt. Wie bereits in Abschnitt 2.7.1 ausgeführt wurde, stellt der Wirkungsindikator Landnutzung keine umfassende Abschätzung potenziell biodiversitätsrelevanter Umweltwirkungen dar.

Abbildung 4-4: Landnutzung der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in Pt/Halle

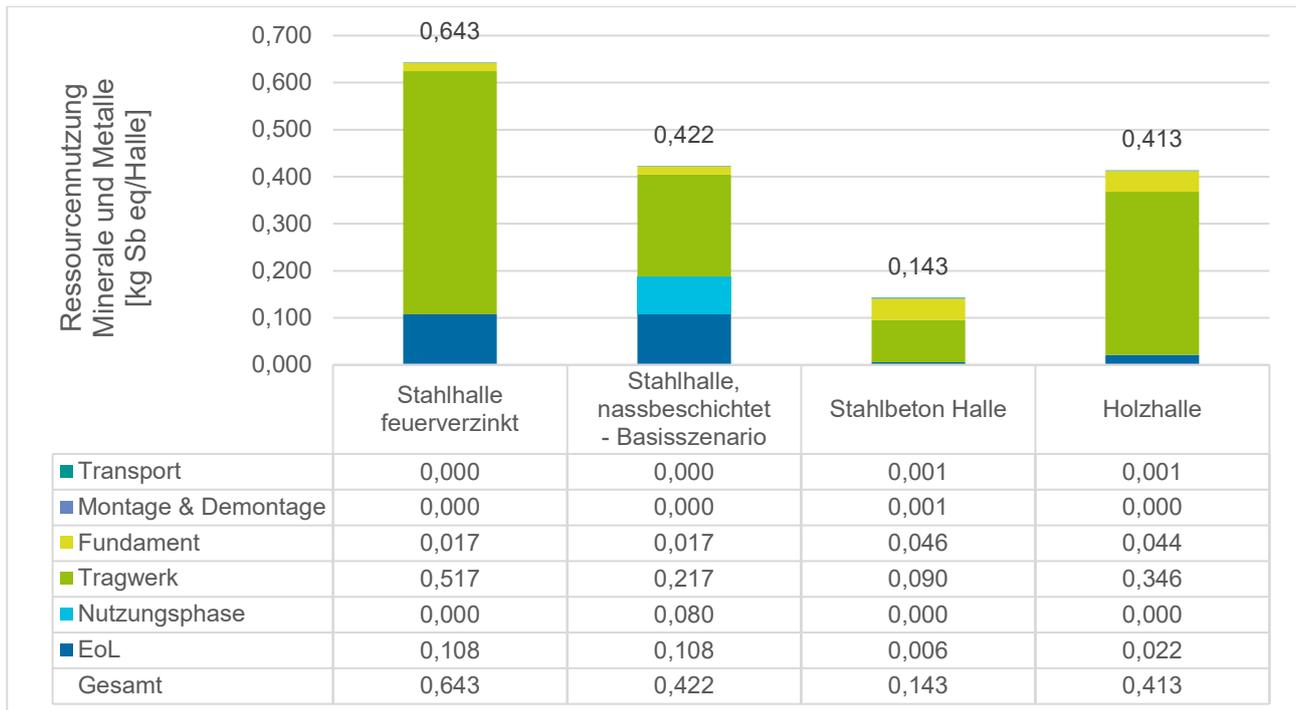


Quelle: Eigene Darstellung

4.2.4 Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Mineralien und Metalle)

Bei Betrachtung der Wirkungsindikatorergebnisse für diesen Wirkungsindikator fallen die vergleichsweise hohen Beiträge des Tragwerks bei den Varianten „Stahlkonstruktion, feuerverzinkt“ und „Holzkonstruktion“ auf, siehe Abbildung 4-5. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass dieser Wirkungsindikator stark vom Zinkverbrauch getrieben wird, während Eisen und weitere Stahllegierungselemente einen deutlich geringeren Beitrag bei diesem Wirkungsindikator haben. Speziell bei der Holzvariante stammen die Beiträge aus den feuerverzinkten Anschlussteilen, die bei dieser Konstruktionsvariante aus Gründen des konstruktiven Holzschutzes eingesetzt werden (vgl. Abschnitt 3.1.2 und Abbildung 3-2).

Abbildung 4-5: Ressourcennutzung Minerale und Metalle der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in kg Sb eq/Halle

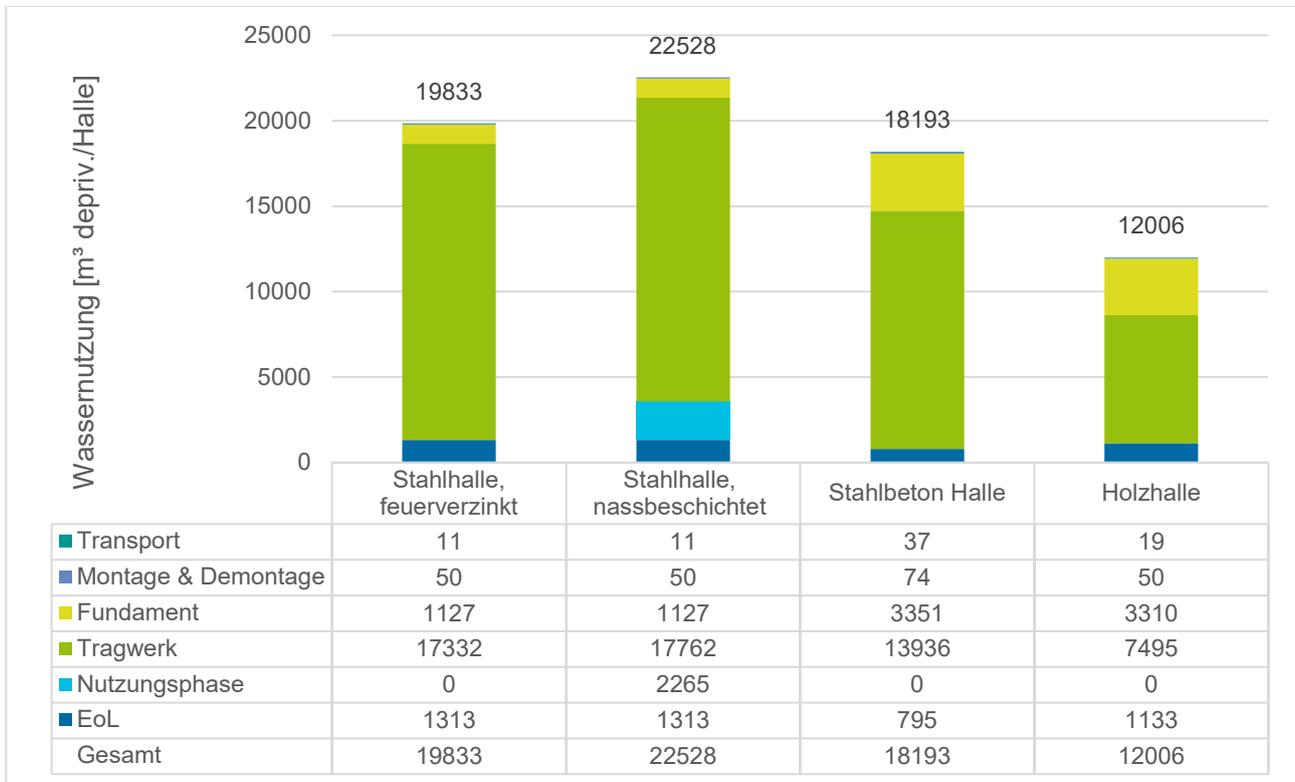


Quelle: Eigene Darstellung

4.2.5 Inanspruchnahme von knappen Wasserressourcen

Bei der Wassernutzung, siehe Abbildung 4-6, werden die Unterschiede zwischen den beiden Stahlvarianten ausschließlich durch den Beitrag der erforderlichen Instandhaltung bei der nassbeschichteten Variante bestimmt. Allerdings sind die Unterschiede bei Berücksichtigung der in Abschnitt 4.1 festgelegten Wesentlichkeitsschwelle (>20 % bei diesem Indikator) ebenso wenig signifikant wie die Unterschiede beider Stahlvarianten im Vergleich zur Konstruktionsvariante Stahlbeton. Nur die Holzkonstruktion weist bei diesem Wirkungsindikator ein signifikant besseres Ergebnis auf. Treiber der Wassernutzung sind mit Anteilen zwischen rund 60 und 90% die Herstellung des Tragwerks, gefolgt von der Herstellung des Fundaments.

Abbildung 4-6: Wassernutzung der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in m³ depriv./Halle

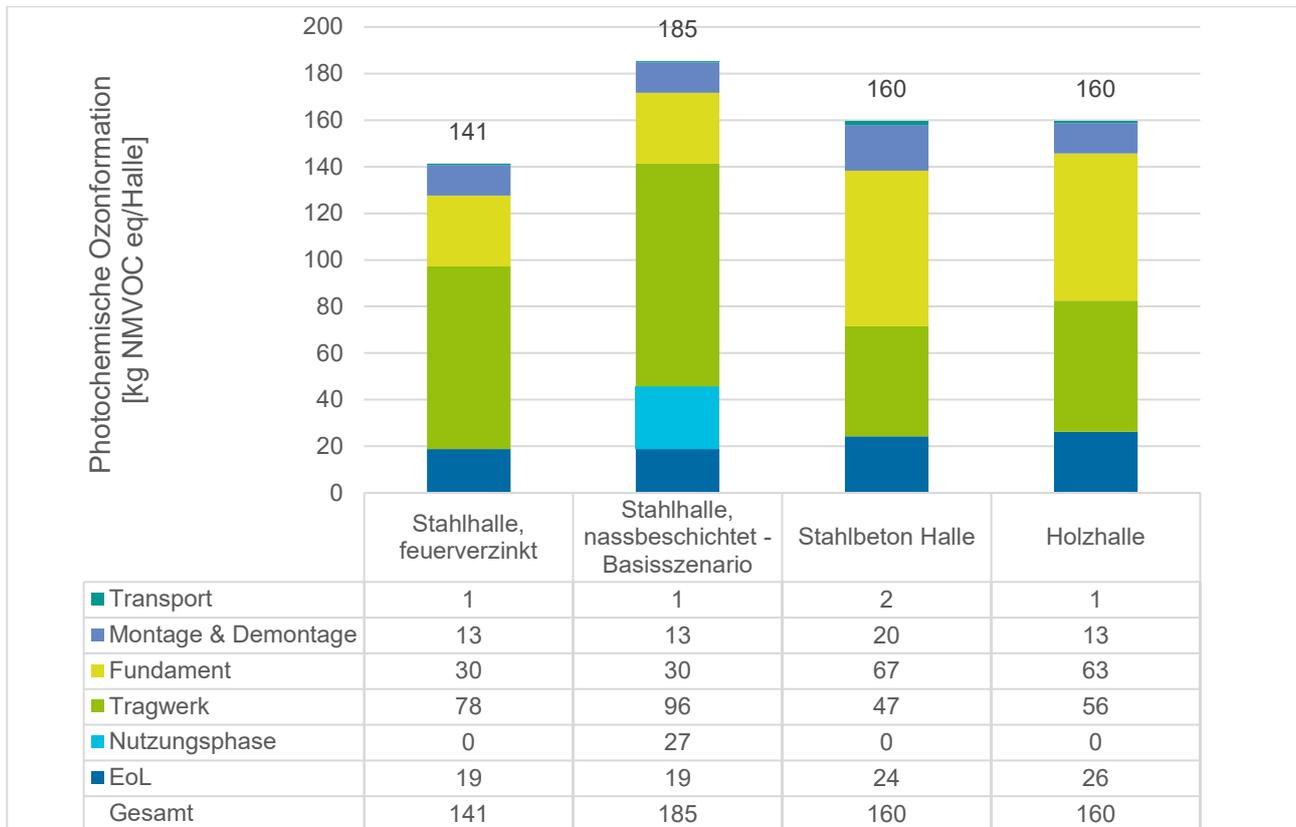


Quelle: Eigene Darstellung

4.2.6 Photochemisches Oxidantienbildungs-Potential (POCP)

Die Ergebnisse für diesen Wirkungsindikator werden bei den hier untersuchten Konstruktionsvarianten stark von der Herstellung der Tragwerke und Fundamente bestimmt, daneben tragen auch die Stickoxid-Emissionen aus dem Maschineneinsatz bei der Montage sowie der Demontage der Tragwerke mit rund 20% zu den Gesamtergebnissen bei, siehe die nachfolgende Abbildung 4-7. Bei einer Wesentlichkeitsschwelle von >10 % für diesen Indikator (siehe Abschnitt 4.1) weist die feuerverzinkte Konstruktionsvariante gegenüber den Varianten Stahlbetonkonstruktion und Holzkonstruktion leichte Vorteile auf. Im Vergleich zur nassbeschichteten Variante sind die Unterschiede zu allen Vergleichsvarianten deutlich signifikanter. Dies ist auf die Lösemittlemissionen in der Nutzungsphase durch die Instandhaltung (vgl. Abschnitt 3.2.2) zurückzuführen.

Abbildung 4-7: Photochemisches Oxidantienbildungs-Potential der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in m³ depriv./Halle



Quelle: Eigene Darstellung

4.2.7 Kumulierter Energieaufwand

Im Unterschied zu den in den vorangegangenen Abschnitten diskutierten Ergebnissen ist der Kumulierte Energieaufwand (KEA) methodisch gesehen kein Wirkungsindikator, mit dessen Hilfe potenzielle Umweltauswirkungen abgeschätzt werden können, sondern eine aggregierte Sachbilanzgröße. Die Ausweisung und Diskussion des KEA kann aber helfen, die Ergebnisse einer Ökobilanz besser einzuordnen, insbesondere wenn eine Differenzierung nach folgenden Beiträgen erfolgt:

- KEA, fossil (aus der Nutzung fossiler Energieträger wie Erdgas, Erdöl, Kohle etc.)
- KEA, regenerativ (aus der Nutzung erneuerbarer Energieträger wie Windkraft oder Photovoltaik)
- KEA, biogen (aus der Nutzung biogener Energieträger)

In der nachstehenden Tabelle 4-2 wird für die vier untersuchten Konstruktionsvarianten zunächst der gesamte Kumulierte Energieaufwand (KEA) angegeben, also die Summe aus KEA, fossil, KEA, regenerativ und KEA, biogen.

Tabelle 4-2: KEA, gesamt der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in GJ/Halle

KEA, gesamt [GJ pro Halle]	Stahlhalle, feuerverzinkt		Stahlhalle, nassbeschichtet		Stahlbeton-Halle		Holzhalle	
Herstellung Tragwerk	290,7	71,2%	336,9	66,7%	151,2	42,2%	676,5	78,2%
Herstellung Fundament	63,6	15,6%	63,6	12,6%	146,1	40,8%	139,4	16,1%
Montage u. Demontage	12,5	3,1%	12,5	2,5%	18,7	5,2%	12,5	1,4%
Transporte	1,6	0,4%	1,6	0,3%	5,2	1,4%	2,7	0,3%
Nutzungsphase (Instandhaltung)			50,9	10,1%				
EoL	40,1	9,8%	40,1	7,9%	37,2	10,4%	34,2	4,0%
Summe	408,4	100,0%	505,5	100,0%	358,4	100,0%	865,3	100,0%

Quelle: Eigene Darstellung

Es zeigt sich, dass bei allen untersuchten Varianten die großen Beiträge aus der Herstellung der Tragwerke und der Fundamente stammen, die Anteile liegen jeweils bei 80% oder höher. Die Instandhaltung nimmt bei der Stahlhalle, nassbeschichtet mit 10% einen relevanten Anteil ein und führt im Vergleich zur feuerverzinkten Variante und der Ausführung aus Stahlbeton zu einem signifikant höheren KEA, gesamt. Wird auch hier eine Wesentlichkeitsschwelle von 10% zugrunde gelegt, hat die Variante aus Stahlbeton gegenüber der feuerverzinkten Variante einen leichten signifikanten Vorteil. Den mit Abstand höchsten gesamten KEA weist die Holzkonstruktion auf, weil hier das Tragwerk aus Stützen und Bindern aus Holz gefertigt ist und Holz bei der Ermittlung des KEA als Energieträger bewertet wird. Dieser Zusammenhang wird deutlich, wenn man für die vier Varianten den KEA nach den einzelnen Anteilen differenziert, siehe die nachstehende Tabelle 4-3. Während bei beiden Varianten aus Stahl sowie der Stahlbeton-Konstruktion der gesamte KEA mit jeweils über 90% durch KEA, fossil dominiert wird, ist bei der Holzvariante KEA, biogen mit einem Anteil von über 60% der dominierende Beitrag. Unter der Bedingung einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung könnte dieser biogene Anteil als erneuerbar angesehen werden. Ob dies unter den gegebenen Bedingungen noch angenommen werden kann, steht offen, siehe die Diskussion zur Senkenfunktion des Waldes in Abschnitt 2.7.2 dieser Studie.

Tabelle 4-3: KEA, differenziert nach den Anteilen fossil, biogen und regenerativ der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in GJ/Halle

Anteile des KEA [GJ pro Halle]	Stahlhalle, feuerverzinkt		Stahlhalle, nassbeschichtet		Stahlbeton-Halle		Holzhalle	
KEA, fossil	369,2	90,4%	456,0	90,2%	330,3	92,2%	309,5	35,8%
KEA, biogen	11,1	2,7%	16,1	3,2%	6,2	1,7%	540,3	62,4%
KEA, regenerativ	28,1	6,9%	33,4	6,6%	21,8	6,1%	15,5	1,8%
KEA, gesamt	408,4	100,0%	505,5	100,0%	358,4	100,0%	865,3	100,0%

Quelle: Eigene Darstellung

4.3 Sensitivitätsanalysen

Sensitivitätsanalysen können bei der Durchführung von Ökobilanzen helfen, die Bedeutung von Datengrundlagen und Annahmen sowie die Relevanz von getroffenen methodischen Entscheidungen mit Blick auf einzelne Beiträge sowie die Richtungssicherheit der Ergebnisse besser beurteilen zu können. In diesem Sinne werden in den nachfolgenden Abschnitten

- Für die Variante nassbeschichtete Stahlkonstruktion vier getroffene Annahmen überprüft,
- für die Variante feuerverzinkte Stahlkonstruktion drei getroffene Annahmen untersucht,
- für alle Varianten die Auswirkungen der getroffenen methodischen Festlegung, keine Gutschriften für die Nutzung von Sekundärrohstoffen aus dem beim End-of-Life anzurechnen, untersucht,
- für alle Varianten die Auswirkungen einer Änderung der Wiederverwendungsquote auf 50% geprüft, und
- die Auswirkungen bei der Wahl von alternativen Datensätzen für die Bereitstellung von Beton zur Modellierung der Fundamente analysiert.

Im Rahmen der Kritischen Prüfung dieser Ökobilanz wurde aus dem Gutachterkreis angeregt, neben den o.a. Sensitivitätsanalysen aufgrund der erwartbaren Ergebnisrelevanz auch ein Szenario „Grüner Stahl“ zu rechnen. Nach Prüfung haben sich die Ersteller gegen die Aufnahme eines solchen Szenarios entschieden. Zum einen hätte die Modellierung aufwendig erweitert werden müssen, um konsistent zum festgelegten Rahmen dieser Ökobilanz vorzugehen. Dies war im gesetzten Rahmen dieser Ökobilanz nicht möglich. Zum anderen ist schwer zu beurteilen, in welchen Abnehmerbranchen ab wann und in welchen relevanten Mengen grüner Stahl zum Einsatz kommt. Neben technischen Fragen wird der Einsatz davon abhängen, inwiefern in den Anwendermärkten Mehrkosten akzeptiert oder durchgesetzt werden könnten. Erfahrungsgemäß wird dies anfänglich eher in den Hochpreissegmenten mit vergleichsweise geringen Mengenanteilen, nicht aber im Massengeschäft des Bausektors der Fall sein.

4.3.1 Variante Stahlkonstruktion, nassbeschichtet

Zur Beurteilung der Sensitivität der getroffenen Annahmen bei der nassbeschichteten Stahlvariante wurden zusätzlich zum Basisszenario vier Sensitivitätsanalysen durchgeführt:

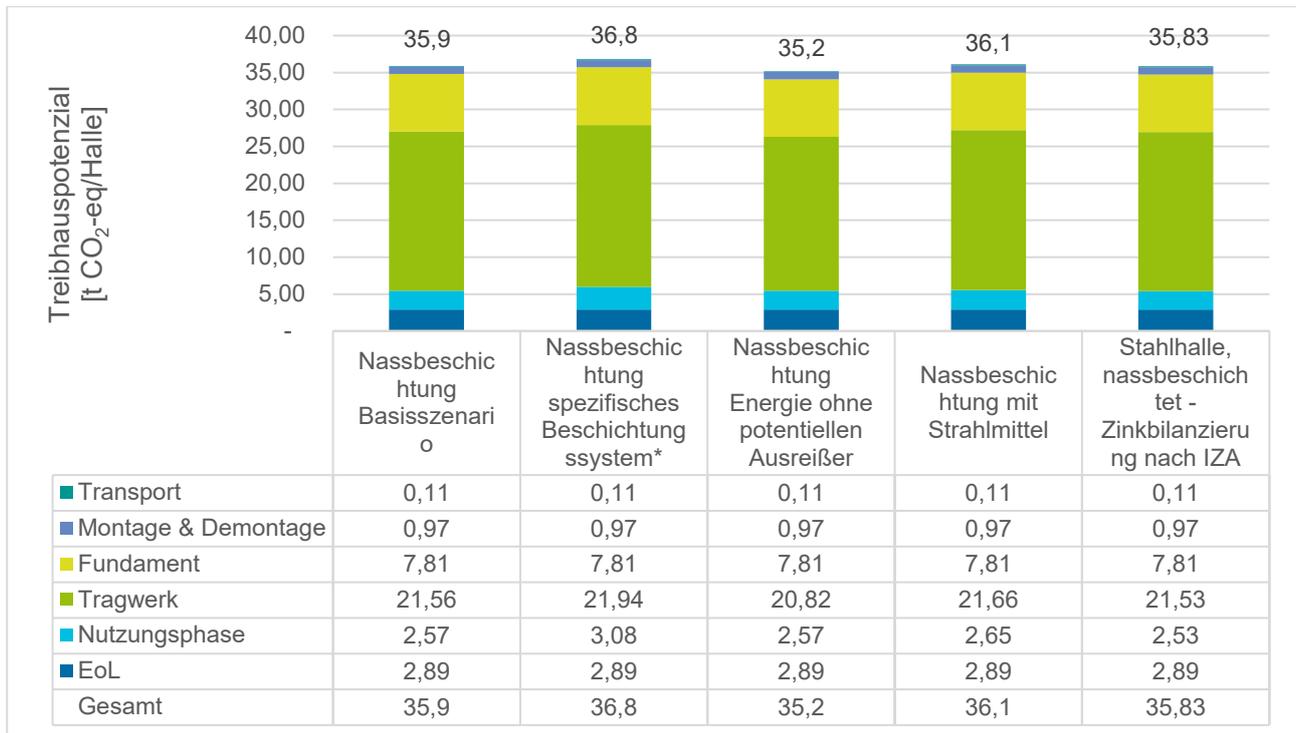
- Spezifisches Beschichtungssystem:
Im Basisszenario wurde für die nassbeschichtete Stahlkonstruktion ein generisch zusammengesetztes Beschichtungssystem angenommen. Um diese Annahme abzusichern, wurde als Variante ein spezifisches Beschichtungssystem¹⁷ dem generischen gegenübergestellt. Das spezifische Beschichtungssystem weicht bei den hier dargestellten THG-Emissionen geringfügig um 510 kg CO₂-eq pro Halle nach oben ab. Daraus kann abgeleitet werden, dass die Festlegung eines generischen Beschichtungssystem in dieser Studie als richtungssicher angesehen werden kann.

¹⁷ GEHOPON-E87-Zink als Grundierung ([GEHOPON-E87-Zink \(geholit-wiemer.de\)](http://geholit-wiemer.de)) und GEHOTEX-W92 als Zwischen- und Deckschicht ([GEHOTEX-W92 \(geholit-wiemer.de\)](http://geholit-wiemer.de)), was dem Blatt 92 (geeignet für C3 hoch) entspricht (Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach 2024).

- **Energiebedarf für die Erstbeschichtung:**
Der thermische und elektrische Energiebedarf für die Erstbeschichtung in der Produktionshalle wurde im Basisszenario als Mittelwert aus drei Unternehmensangaben ermittelt. Da die Energiewerte eines Unternehmens sich signifikant von denen der anderen beiden Unternehmen unterscheiden, wurden in der Sensitivitätsanalyse die Energiewerte des potenziellen Ausreißers nicht berücksichtigt. Hierdurch ergibt sich eine Verbesserung um 760 kg CO₂-eq pro Halle im Vergleich zum Basisszenario. Der Einfluss der potenziellen Ausreißerwerte beim Energiebedarf führt damit zu keiner signifikanten Änderung der THG-Emissionen im Vergleich zu den anderen untersuchten Varianten.
- **Berücksichtigung Strahlmittel vor Erstbeschichtung und Vollerneuerung:**
Im Basisszenario wurde der Einsatz des Strahlmittels bei der Oberflächenvorbereitung vor der Erstbeschichtung und vor der Vollerneuerung nicht berücksichtigt. Um abschätzen zu können, ob diese Vernachlässigung signifikante Auswirkungen hat, wurde das THG-Potenzial des Strahlmittelbedarfs näherungsweise in einer Sensitivitätsanalyse berechnet. In einer konservativen Annahme wurde von einer einfachen Benutzung des Strahlmittels ausgegangen, in der Realität kann ein Mehrwegstrahlmittel wie beispielsweise Normalkorund etwa 20-25 wiederverwendet werden (Kiess GmbH & Co. KG 2024). Als Strahlmittel wurde Normalkorund sowohl bei der Erstbeschichtung als auch bei der Vollerneuerung angenommen. Da keine Daten zum Strahlmittelverbrauch in den Strahlanlagen bei der Erstbeschichtung vorlagen, wurde der Strahlmittelverbrauch aus dem 2. Anwendungsbeispiel von Treibacher Schleifmittel GmbH (2012) für die Erstbeschichtung und die Vollerneuerung verwendet. Hieraus ergibt sich eine Erhöhung des THG-Potenzials von 170 kg CO₂-eq pro Halle im Vergleich zum Basisszenario.
- **Zinkbilanzierung gemäß IZA:**
Sowohl bei der Erstbeschichtung als auch bei der Instandsetzung der Nassbeschichtung wird für die Grundierung Zinkpulver als Pigment verwendet. Analog zum Zinkbezug bei der feuerverzinkten Stahlvariante wird angenommen, dass ein Anteil von 14% des Zinks Sekundärzink aus der Aufbereitung von Stahlwerksstäuben stammt. Die Herstellung des Sekundärzinks ist im Vergleich zum Primärzink mit einem höheren Treibhausgaspotenzial verbunden. Im Basisszenario wird sowohl der Recyclingsaufwand als auch eine Gutschrift für die vermiedene Primärzinkkonzentrat-Herstellung in der Bilanzierung berücksichtigt. Gemäß der neuesten Bilanzierungsleitlinien der International Zinc Association (IZA) wird in dieser Sensitivitätsanalyse sowohl der Aufwand als auch die Gutschrift für die Herstellung von Sekundärzink der Stahlproduktion zugewiesen, wodurch der Sekundärzink für nachfolgende Anwender in deren Bilanzierung effektiv als Primärzink eingeht (International Zinc Association 2024). Dieser Argumentation können sich die Ersteller dieser Ökobilanz nicht anschließen.

Die Ergebnisse der vier Sensitivitätsbetrachtungen zur nassbeschichteten Stahlvariante sind in der nachfolgenden Abbildung zusammengefasst. Es zeigt sich, dass Abweichungen von den im Basisszenario getroffenen Annahmen (bzw. Vereinfachungen) die Ergebnisse beim THG-Potenzial innerhalb der typischen Ergebnisschwellen bei Ökobilanzen praktisch kaum verändern. Damit kann das Basisszenario für die nassbeschichtete Stahlkonstruktion als richtungssicher angesehen werden.

Abbildung 4-8: Vergleich des Treibhausgaspotenzials von vier Varianten der Stahlkonstruktion, nassbeschichtet [t CO₂-eq/Halle]



Quelle: Eigene Darstellung

4.3.2 Variante Stahlkonstruktion, feuerverzinkt

Um die Sensitivität der für die feuerverzinkte Stahlhalle getroffenen Annahmen zu überprüfen, wurden drei Sensitivitätsanalysen durchgeführt:

- Verwendung des ecoinvent-Datensatzes für Feuerverzinken:
Im Basisszenario wurde der Datensatz für den Prozess des Feuerverzinkens modifiziert (vgl. Abschnitt 3.1.1.1 und Datensatz # 13 in Tabelle 3-19). In dieser Sensitivitätsanalyse wird der ursprüngliche ecoinvent-Datensatz verwendet¹⁸.
- Zinkbilanzierung gemäß IZA (analog zur Sensitivitätsanalyse bei der nassbeschichteten Stahlkonstruktion, siehe Abschnitt 4.3.1 oben)
- Einsatz von low-carbon-Zink von Boliden:
In dieser Sensitivitätsanalyse wurde für die feuerverzinkte Variante der anteilige Einsatz von low-carbon-Zink betrachtet, vergleiche die Diskussion dazu in Abschnitt 3.1.1.1. Nach Schätzung von Branchenexperten wird derzeit bereits bei den deutschen Betrieben anteilig rund 35% low-carbon-Zink eingesetzt.

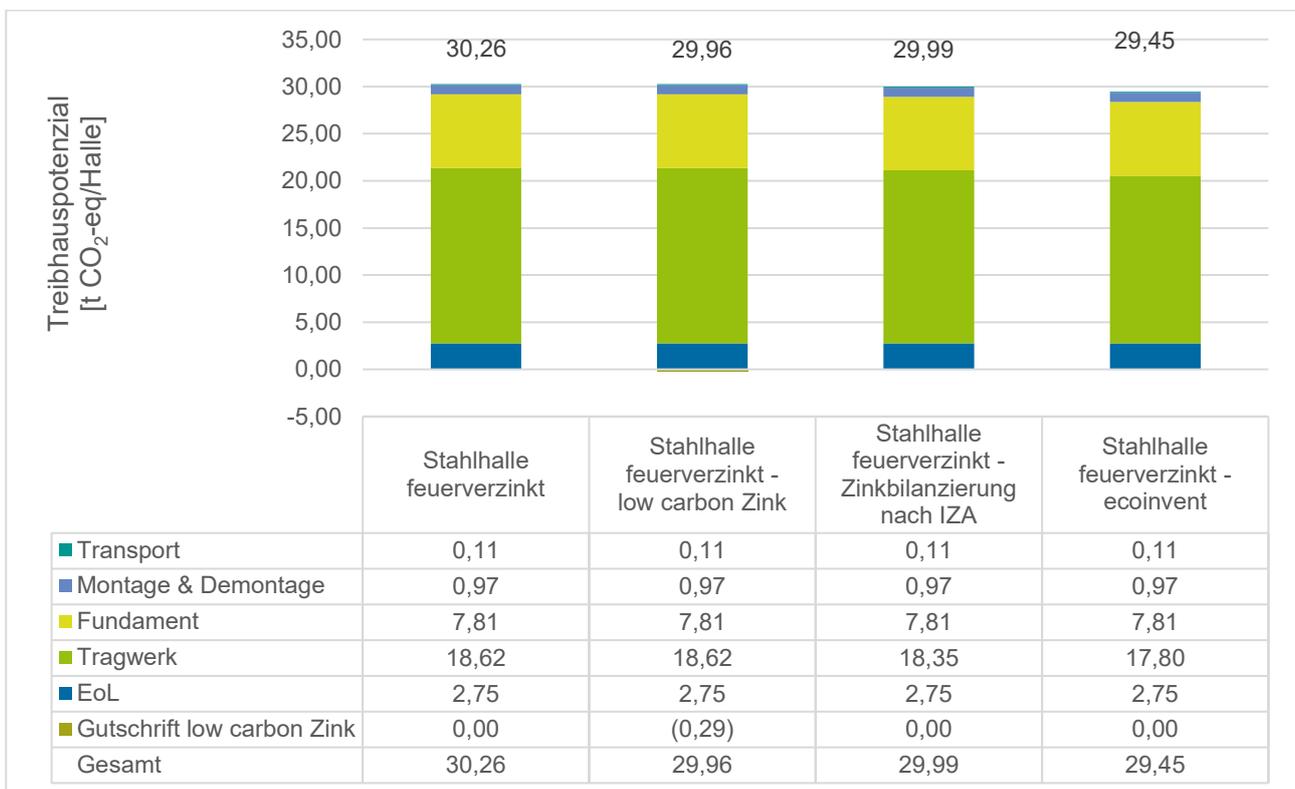
¹⁸ Im ecoinvent-Datensatz wird angenommen, dass die Prozesswärme für das Feuerverzinken mit Kraft-Wärme-gekoppelten Anlagen bereitgestellt wird. Dies ist in der betrieblichen Praxis nach eigener Beobachtung und der Fachliteratur (Peißker und Huckshold 2016) nicht der Fall.

Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalysen sind in der nachstehenden Abbildung 4-9 zusammengefasst.

Aufgrund der dominierend hohen Beiträge anderer Prozesse (v.a. Tragwerk und Fundament), trägt der Einsatz von low-carbon-Zink nur mit etwa 1% zur Verminderung der THG-Emissionen bei. Bei der Interpretation dieses Ergebnisses muss beachtet werden, dass bei anderen feuerverzinkten Produkten, bei denen andere Prozesse und Beiträge eine geringere Relevanz haben als bei einem Bauwerk mit hohen „Sockelbeiträgen“, die Verwendung von low carbon Zink allerdings signifikante Vorteile aufweisen könnte.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse am Beispiel der THG-Emissionen, dass sich die Lage der Ergebnisse auch bei abweichenden Modellierungsannahmen zur Vorkette Zink die Lage der Ergebnisse kaum verändert.

Abbildung 4-9: Vergleich unterschiedlicher Ansätze zur Modellierung der Vorkette Zink für die Variante Stahlkonstruktion, feuerverzinkt am Beispiel des Treibhauspotenzials in t CO₂-eq/Halle



Quelle: Eigene Darstellung

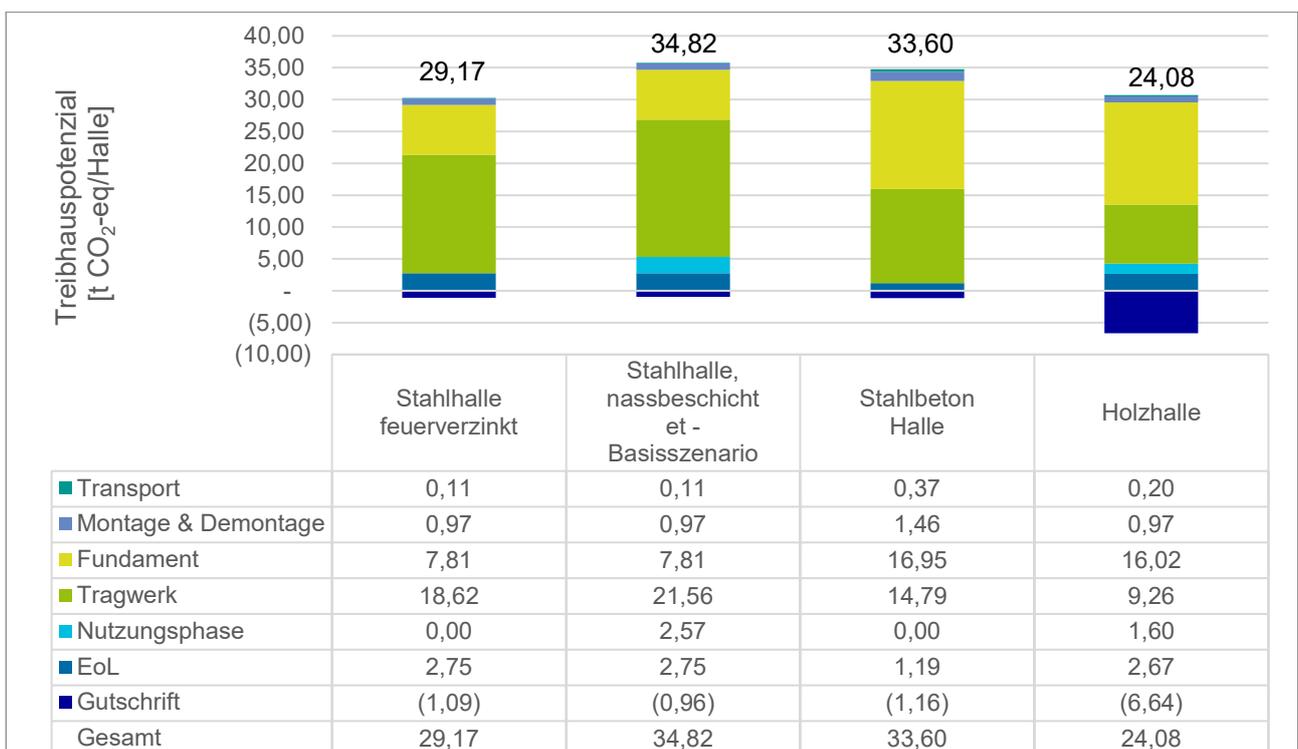
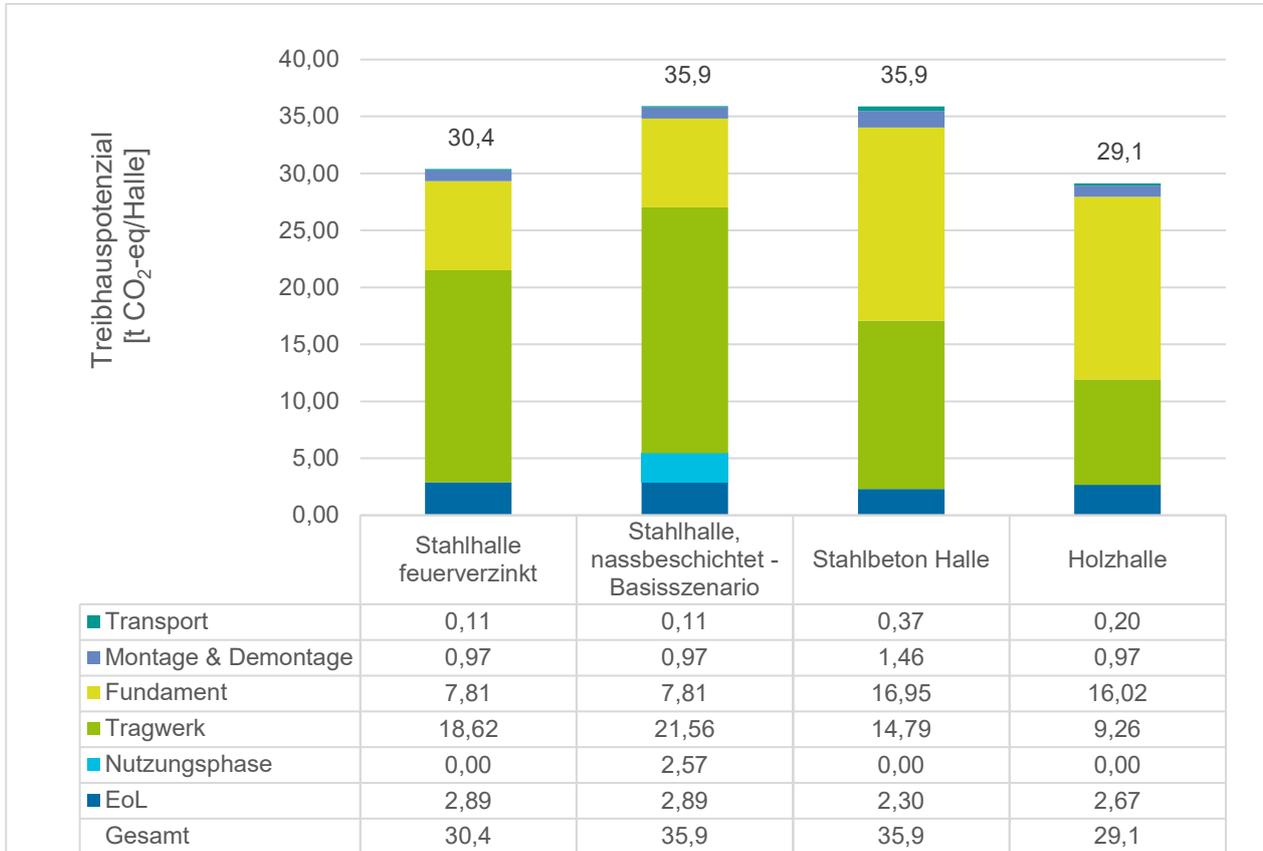
4.3.3 Vergabe von Gutschriften aus dem End-of-Life

In Abschnitt 2.6.2 wurde begründet, warum in der Basisversion der Bilanzierungen keine Gutschriften vergeben wurden. Um die Ergebnisrelevanz dieser Festlegung offenzulegen, erfolgt in dieser Sensitivitätsanalyse am Beispiel des THG-Potenzials eine Darstellung mit Vergabe von Gutschriften, vgl. Abbildung 4-10.

Es zeigt sich, dass die Vergabe von Gutschriften bei allen untersuchten vier Varianten zu einer Verringerung der THG-Emissionen führt. Bei den beiden Stahlvarianten und der Stahlbetonvariante liegt die Verringerung in einer Bandbreite von 3 bis 5% bezogen auf die Ausgangswerte ohne Gutschriften. Besonders signifikant wirkt sich demgegenüber die Gutschrift bei der Holzvariante aus. Dies lässt sich rechnerisch so erklären, dass hier im EoL das als klimaneutral bewertete Holz als Altholz energetisch verwertet wird und fossile Energieträger substituiert, was zu einer entsprechend hohen Gutschrift an CO₂-Emissionen in Höhe von rund 13 t CO₂-Äquivalente pro Halle führt. Die der Gutschrift zugrundeliegende Annahme, dass auch in 50 Jahren fossile Energieträger substituiert werden, kann begründet hinterfragt werden. Das Umweltbundesamt koordiniert sogenannte Projektionen, in denen die Frage behandelt wird, ob Klimaziele mit der aktuellen Klimaschutzpolitik erreicht werden können. Die Projektionen werden im Rahmen des Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) an den Deutschen Bundestag sowie an die Vereinten Nationen und die Europäische Union berichtet. Dadurch sollen frühzeitig Lücken der Klimapolitik identifiziert werden, um eine rechtzeitige Nachsteuerung zu ermöglichen¹⁹. Nach dem letzten Projektionsbericht kann u.a. davon ausgegangen werden, dass im Energiesektor die THG-Emissionen in Deutschland von rund derzeit 210 Mio. t CO₂-Äquivalente bis zum Jahr 2050 auf unter 50 Mio. t CO₂-Äquivalente sinken werden, im Gebäudesektor von derzeit rund 100 Mio. t CO₂-Äquivalente auf etwa 5 Mio. t CO₂-Äquivalente im Jahr 2050 (Wehnemann und Schultz 2024). Diese Entwicklung wird technisch gesehen dadurch erreicht, dass die Wärmebereitstellung bis 2050 nahezu ausschließlich auf defossilierten Energieträgerbasis erfolgen wird. Die Substitutionsgutschrift für vermiedene THG-Emissionen würde daher wesentlich geringer oder kalkulatorisch negativ ausfallen. Dieses Beispiel verdeutlicht die Schwierigkeit, in einer Phase der Transformation nach dem Substitutionsprinzip Gutschriften zu berechnen und stärkt die in dieser Studie vorgenommene Entscheidung, im Basisszenario keine Gutschriften für Sekundärrohstoffe aus dem EoL zu vergeben.

¹⁹ Siehe [Webseite des Umweltbundesamtes](#), zuletzt aufgerufen 19.09.2024

Abbildung 4-10: Treibhausgaspotenzial der verschiedenen Ausführungsvarianten pro funktionelle Einheit in t CO₂-eq/Halle – oben: Basisszenario ohne Gutschriften, unten Sensitivitätsbetrachtung mit Gutschriften aus dem End-of-Life



Quelle: Eigene Darstellung

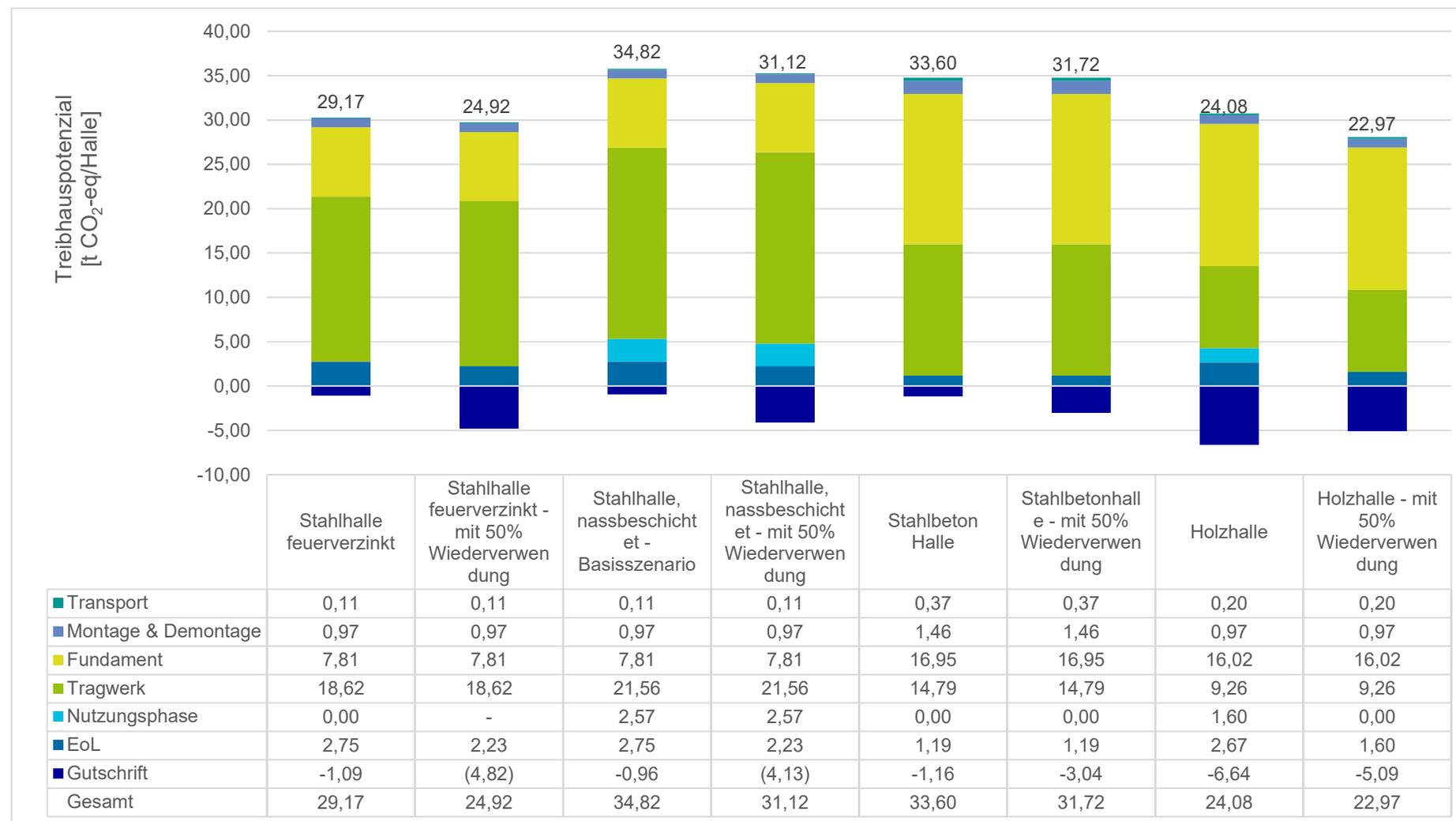
4.3.4 Erhöhung der Wiederverwendungsquote von 10% (Basisszenario) auf 50%

In Abschnitt 2.4 wurde begründet, dass im Basisszenario die Wieder- bzw. Weiterverwendungsquote mit lediglich 10% angenommen wurde. Um die Signifikanz dieser Festlegung zu prüfen und gleichzeitig die Umweltentlastungspotenziale einer stärker ausdifferenzierten Circular Economy nach einer Nutzungsphase der Tragwerke von 50 Jahren einschätzen zu können, wird mit dieser Sensitivitätsanalyse eine Wiederverwendungsquote von 50% betrachtet.

Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse sind in der nachfolgenden Abbildung 4-11 für den Wirkungsindikator Treibhausgaspotenzial zusammengefasst. Bei allen vier in dieser Studie untersuchten Konstruktionsvarianten führt die Erhöhung der Wiederverwendungsquote von 10% auf 50% zu einer signifikanten Verringerung der THG-Emissionen. Diese Verringerung ist auf zwei Aspekte zurückzuführen:

- Der größere Beitrag zur Verringerung ist auf höhere Gutschriften zurückzuführen. Höhere Gutschriften ergeben sich grundsätzlich dadurch, dass durch die Wiederverwendung die Neuherstellung von Bauteilen anteilig verringert wird. Dies wirkt sich bei den vier betrachteten Konstruktionsvarianten unterschiedlich stark aus. Bei der feuerverzinkten Variante erhöht sich die Gutschrift im Vergleich zum Basisszenario am meisten. Dies liegt daran, dass hier im Gegensatz zur nassbeschichteten Stahlvariante davon ausgegangen wird, dass nach 50 Jahren noch ein ausreichender Korrosionsschutz durch den Zinküberzug besteht, so dass keine erneute Feuerverzinkung notwendig ist. Hier wird demnach die vermiedene Herstellung der Stahlbauteile inklusive des vermiedenen Korrosionsschutzes gutgeschrieben. Bei der Holzhalle und der Stahlbetonhalle führt die Erhöhung der Wiederverwendung gleichzeitig zu einer Verringerung der Gutschriften für das Recycling von Beton und Holz. Bei der Holzhalle hat das sogar den Effekt, dass die Gutschrift bei dem Szenario mit einer Wiederverwendung von 50% geringer als im Basisszenario ausfällt. Diese geringere Gutschrift erklärt sich wie folgt: Holz wird in dieser Studie als CO₂-neutral bewertet, d.h. die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung am Ende des Lebenswegs werden bei der Berechnung des GWP nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass die CO₂-Emissionen aus der Verbrennung durch die Einbindungen von Kohlenstoff während des Wachstums der Bäume ausgeglichen werden. Aus der thermischen Verwertung von Holz werden Wärme und Strom erzeugt (siehe Abschnitt 3.3.2.2) und die Gutschrift zur Berechnung des GWP ergibt sich rechnerisch aus den entsprechend substituierten Anteilen des deutschen Wärmemixes bzw. Strom aus dem Stromnetz Deutschland mit den heute noch großen Anteilen an fossilen Energieträgern. Verringert sich nun durch die höhere Wiederverwendung von Altholz der thermisch verwertete Anteil, dann verringert sich auch signifikant diese vergleichsweise hohe Gutschrift.
- Darüber hinaus führt eine Erhöhung der Wiederverwendungsquote zu geringeren Aufwendungen im End-of-Life; die dadurch erreichten Einsparungen an THG-Emissionen sind allerdings deutlich geringer als durch die höheren Gutschriften. So führt beispielsweise bei der feuerverzinkten Stahlkonstruktion die Erhöhung der Wiederverwendungsquote zu einer Erhöhung der Gutschrift von 3,73 t CO₂-eq/Halle, die verringerten Aufwendungen im End-of-Life tragen demgegenüber lediglich mit 0,52 t CO₂-eq/Halle bei.

Abbildung 4-11: Sensitivitätsanalyse: Erhöhung der Wiederverwendungsquote von 10% (Basisszenario) auf 50%-Treibhausgaspotenzial pro funktionelle Einheit in t CO₂-eq/Halle

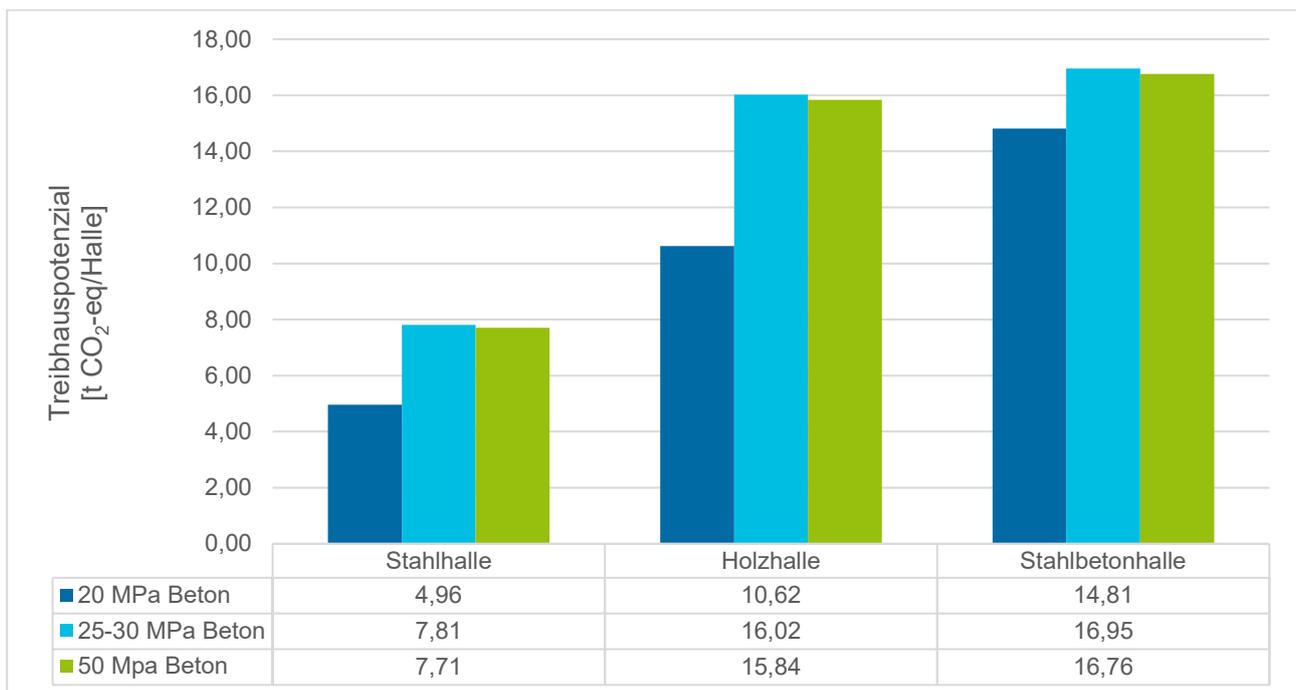


Quelle: Eigene Darstellung

4.3.5 Alternative Datensätze für Transportbeton unterschiedlicher Festigkeitsklassen

Im Basisszenario werden die Fundamente der vier verschiedenen Ausführungsvarianten mit Beton der Festigkeitsklasse C 25/30 bilanziert. Hierfür wurde der Datensatz concrete production, 25-30MPa, with cement, Portland verwendet. Da dieser Datensatz nur für den räumlichen Bezugsraum Indien verfügbar ist, wurde eine Sensitivitätsanalyse mit zwei weiteren Festigkeitsklassen C20 und C50 und einem europäischen räumlichen Bezug durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalyse sind in der nachfolgenden Abbildung 4-12 dargestellt. Es zeigt sich, dass Fundamente aus Beton mit einer geringeren Druckfestigkeit von 20 MPa bei allen Konstruktionsvarianten signifikant geringe THG-Emissionen aufweisen, während Beton mit einer höheren Druckfestigkeit von 50 MPa mehr oder weniger identische THG-Emissionen aufweist wie der im Basisszenario herangezogene Datensatz. Vor diesem Hintergrund gehen wir davon aus, dass der im Basisszenario ausgewählte Datensatz zweckmäßig ist. Zudem müssten bei Beton mit einer geringeren Druckfestigkeit die Fundamente mit einer höheren Masse ausgelegt werden, was die rechnerischen Vorteile bei den THG-Emissionen kompensieren dürfte.

Abbildung 4-12: Alternative Datensätze für Transportbeton unterschiedlicher Druckfestigkeitsbereiche – Treibhausgaspotenzial pro Fundament für die untersuchten Konstruktionsvarianten in t CO₂-eq/Halle



Quelle: Eigene Darstellung

5 Auswertung

Die Auswertung wird entsprechend der in DIN EN ISO 14040:2021-02 und DIN EN ISO 14044:2021-02 geforderten Bestandteile durchgeführt und beinhaltet folgende Aspekte:

- Identifizierung der signifikanten Parameter aus der Festlegung der betrachteten Ausführungsvarianten und auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzungsphasen der Ökobilanz (siehe Abschnitt 5.1.1);
- eine Beurteilung, die die Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen berücksichtigt (siehe Abschnitt 5.2);
- eine Darstellung zu Einschränkungen, die bei der Ableitung von Schlussfolgerungen und Empfehlungen berücksichtigt werden müssen (siehe Abschnitt 5.1.3);
- die Ableitung von Schlussfolgerungen und Empfehlungen (siehe Kapitel 6 dieser Studie).

5.1 Identifizierung der signifikanten Parameter

5.1.1 Signifikante Parameter aus der Festlegung der betrachteten Ausführungsvarianten und der Definition der Funktionellen Einheit

In dieser Studie werden vier Varianten einer Hallenkonstruktion auf der methodischen Grundlage einer Ökobilanz untersucht. Dabei handelt es sich um vier verschiedene Typlösungen für das Tragwerk einer konkreten Hallenkonstruktion. Die Grundlagen wurden einer vom IF zur Verfügung gestellten Veröffentlichung des bauforumstahl e.V. (Kocker und Möller 2016) und einer ergänzenden Berechnung (Oberhaidinger 2023) entnommen. Die vier auch in der Praxis vorkommenden Ausführungsvarianten wurden so konzipiert, dass die Funktion der Hallenkonstruktion gleichwertig erfüllt werden kann. Die funktionelle Einheit für diese Studie wurde wie folgt festgelegt:

"Bereitstellung des Tragwerks (samt erforderlicher Fundamente) für eine multifunktional nutzbare Halle mit einer überspannten Fläche von 900 m² über eine Nutzungszeit von 50 Jahren." Das multifunktionale Nutzungsszenario sieht neben der Möglichkeit zur Umnutzung während der Nutzungszeit von 50 Jahren auch Anforderungen an den Korrosionsschutz nach Korrosivitätskategorie C 3 vor.

Mit dieser zentralen Festlegung der Studie ergeben sich zwei relevante Rückschlüsse mit Blick auf signifikante Parameter:

- Die Festlegung der langen Nutzungsdauer in Verbindung mit der Korrosionsbelastung nach Kategorie C 3 führt zu entsprechenden Anforderungen an den Korrosionsschutz. Je nach Art und Dauer der Nutzung würde sich beispielsweise bei einer kürzeren Nutzungsdauer auch die Art des Korrosionsschutzes und die Instandhaltung ändern. Der Geltungsbereich der Ergebnisse dieser Ökobilanz ist somit klar umrissen, eine „Umrechnung“ bspw. auf ein Szenario von bspw. 20 Jahren Nutzungszeit ist aufgrund der Komplexität des Korrosionsschutz nicht möglich.
- Die betrachteten Typlösungen unterscheiden sich in der Stabilisierung der Rahmen: Bei den beiden Stahlvarianten (feuerverzinkt oder nassbeschichtet) kann die Stabilisierung durch 2-Gelenkrahmen mit biegesteifer Eckausbildung und gelenkig angeschlossenen Fundamenten erfolgen, demgegenüber erfolgt bei der Holzkonstruktion und bei der Stahlbetonkonstruktion die

Stabilisierung in der Regel über die eingespannten Stützenstiele, mit gelenkiger Auflagerung der (horizontalen) Holz- bzw. Stahlbetonbinder. Dadurch fallen die Massen für die Köcherfundamente beim Stahlbeton- und beim Holz-Tragwerk im Vergleich zu den Blockfundamenten für das Stahl-Tragwerk deutlich größer aus. Die Ergebnisse dieser Ökobilanz gelten daher nur für die hier ausgewählten und den Varianten üblicherweise zugeordneten Stabilisierungssystemen. Sollten davon abweichend andere Stabilisierungssysteme gewählt werden oder eine tragwerksplanerische Optimierung der Konstruktionsweisen erfolgen, müsste die Ökobilanz mit dann veränderten Referenzflüssen neu berechnet werden.

5.1.2 Signifikante Parameter auf der Grundlage der Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzungs-Phasen der Ökobilanz

Die Modellierung des Lebenszyklus der Konstruktionsvarianten beruht jeweils auf einer konsistenten, hinreichend detaillierten und unter Qualitätsgesichtspunkten bewerteten Datenbasis (siehe Abschnitt 3.4.2). Eine vollständige Auflistung und Charakterisierung der zur Modellierung in der Ökobilanzsoftware openLCA genutzten Datensätze ist in Abschnitt 3.4.1 dieser Studie enthalten.

Für die Ermittlung der Wirkungsabschätzungsergebnisse wurden Charakterisierungsmodelle herangezogen, die wissenschaftlich begründet und international anerkannt sind. Es wurden begründet sechs Wirkungsindikatoren ausgewählt, die für die hier betrachteten Konstruktionsvarianten und verwendete Baumaterialien als relevant angesehen werden (vgl. Abschnitt 2.7.1).

Die in den Abschnitten 4.2.1 bis 4.2.6 für die ausgewählten Wirkungsindikatoren²⁰ vorgenommenen Beitragsanalysen zeigen, dass die Herstellungsphase der für die untersuchte Konstruktionsvarianten eingesetzten Baumaterialien die Indikatorergebnisse dominieren. Wenn die Baumaterialien funktionell eingeteilt werden, sind es die Tragwerke und die Fundamente, welche als signifikante Parameter angesehen werden können. Die Relevanz der Tragwerke und Fundamente zeigt sich analog aus den Beitragsanalysen, die zusätzlich zu den genannten Wirkungsindikatoren für den Sachbilanzindikator Kumulierter Energieaufwand (KEA), differenziert nach den Anteilen fossil, biogen und regenerativ, durchgeführt wurde (siehe Abschnitt 4.2.7).

Weitere signifikante Parameter ergeben sich aus system- oder materialspezifischen Zusammenhängen sowie aus der Frage, wie mit systemübergreifenden Allokationsfragen/Vergabe von Gutschriften umgegangen wird:

- KEA, biogen (und damit die Frage nach biogenen CO₂-Senken und -Quellen) ist aufgrund des hohen Beitrags bei der Holzkonstruktion ein signifikanter Parameter.
- Der abiotische Ressourcenanspruchnahme von Mineralien und Metallen wird wesentlich vom Einsatz von Zink dominiert (siehe Abschnitt 4.2.4).
- Die Instandhaltung bei der Variante Stahlkonstruktion (nassbeschichtet) nimmt bei allen ausgewählten Wirkungsindikatoren eine vergleichsweise hohe Bedeutung ein.
- Die Entscheidung, im Basisszenario keine Gutschriften für die Wieder-/Weiterverwendung oder das Recycling zu vergeben (vgl. Abschnitt 2.6.2).

²⁰ Treibhausgaspotenzial, Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (unterteilt in fossile, Mineralien und Metalle sowie knappen Wasserressourcen), Landnutzung sowie Photochemisches Oxidantien-Potenzial

5.1.3 Zusammenfassung der erkannten signifikanten Parameter

Auf der Grundlage der in den vorangegangenen Abschnitten diskutierten Zusammenhänge können für diese Ökobilanz folgende Parameter als signifikant angesehen werden:

- Materialeinsatz für die Tragwerke und Fundamente (in Abhängigkeit von der konstruktiven Lösung zur statischen Stabilisierung der Konstruktionsvarianten)
- Anforderungen an den Korrosionsschutz bei einer Nutzungsdauer von 50 Jahren bei der Variante Stahlkonstruktion, nassbeschichtet
- KEA, biogen (und damit die Frage nach biogenen CO₂-Senken und -Quellen) bei der Holzkonstruktion
- Die abiotische Ressourceninanspruchnahme (Mineralien und Metalle) mit Blick auf den Einsatz von Zink
- Vergabe von Gutschriften im Zusammenhang mit der langen Nutzungszeit

5.2 Beurteilung unter Einbezug der Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen

Die Beurteilung als weiterer Teil der Auswertung zielt darauf ab, das Vertrauen in die Ergebnisse und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse der Ökobilanzstudie zu bilden und zu stärken. Die Ergebnisse der Beurteilung sollen der Zielgruppe der Studie einen klaren und verständlichen Überblick über das Resultat der Studie ermöglichen. Die Beurteilung umfasst drei Aspekte:

- Vollständigkeitsprüfung (siehe Abschnitt 5.2.1);
- Sensitivitätsprüfung (siehe Abschnitt 5.2.2);
- Konsistenzprüfung (siehe Abschnitt 5.2.3).

5.2.1 Vollständigkeitsprüfung

Zweck der Vollständigkeitsprüfung ist die Sicherstellung, dass alle relevanten Informationen und die für die Auswertung benötigten Daten zur Verfügung stehen und vollständig sind. Im Rahmen der Sachbilanz wurde mit darauf geachtet und geprüft, dass für alle vier hier betrachteten Konstruktionsvarianten eine gute und auch vergleichbar detaillierte Datengrundlage vorliegt.

Für die vorliegende Studie stehen die energetischen und stofflichen Inputströme zur Herstellung, Nutzung/Instandhaltung und dem End-of-Life der Konstruktionsvarianten im Fokus. Bezüglich der Herstellung der für die Konstruktionsvarianten erforderlichen Baumaterialien wurden folgende Aspekte für alle untersuchten Konstruktionsvarianten generell ausgeschlossen (siehe Abschnitt 2.4 dieser Studie):

- Die Baustelleneinrichtung (Absperrung mit Zäunen, Schaffung Zufahrtswege, Infrastruktur für Arbeiter*innen auf der Baustelle, Überwachung) wurde nicht einbezogen mit der Annahme, dass sich hier die betrachteten Varianten nicht unterscheiden.

- Der Einsatz von (mobilen) Baukränen zur Montage (und Demontage) der Tragwerke wird berücksichtigt, nicht hingegen weitere Einrichtungen zur Montage wie Gerüste oder Hubwagen. Dieser Ausschluss begründet sich dadurch, dass generell die Bauwerkselemente Dach und Seitenteile nicht betrachtet werden.

Es wird davon ausgegangen, dass diese beiden ausgeschlossenen Aspekte mit der Zielsetzung der Studie vereinbar und mit Blick auf die Schlussfolgerungen nicht relevant sind.

Schwieriger zu bewerten ist die Ergebnisrelevanz mit Blick auf die ausgeschlossenen Teilprozesse bei der Variante „Stahlkonstruktion, nassbeschichtet“ (Energieaufwand für die Abluftbehandlung bei der initialen Nassbeschichtung, Verbrauch an Schleifmitteln und des Strahlmittels bei der Instandhaltung). Eine Quantifizierung der Relevanz dieser Ausschlüsse konnte im Rahmen dieser Studie nicht vorgenommen werden. Dies muss bei den Schlussfolgerungen und Empfehlungen berücksichtigt werden, siehe Kapitel 6.

Von dieser Ausnahme abgesehen kann auf der Grundlage der Vollständigkeitsprüfung der Schluss gezogen werden, dass ein Vergleich der Bilanzierungsergebnisse der vier hier untersuchten Konstruktionsvarianten zulässig ist.

5.2.2 Sensitivitätsprüfung

Bei der Darstellung und Diskussion der Ergebnisse des Basisszenarios wurden für die relevanten Wirkungsindikatoren Beitragsanalysen vorgenommen (vgl. Abschnitt 4.2). Auf dieser Grundlage konnten die signifikanten Parameter abgeleitet werden (vgl. Abschnitt 5.1.2 oben) und Rückschlüsse zur Durchführung der Sensitivitätsanalysen (Abschnitt 4.3) gezogen werden.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen zeigen,

- dass die getroffenen Annahmen zur Modellierung der Stahlvariante (nassbeschichtet) richtungssicher sind, die Unterschiede bei den Ergebnisse zum THG-Potenzial liegen innerhalb der typischen Ergebnisschwellen bei Ökobilanzen (Abschnitt 4.3.1);
- dass bei der feuerverzinkten Stahlvariante alternative Datensätze zur Modellierung der Vorkette Zink die Ergebnisse beim THG-Potenzial nur marginal verändern (Abschnitt 4.3.2);
- dass der geographisch abweichende Datensatz für Transportbeton als Materialinput zur Herstellung der Fundamente als belastbar angesehen werden kann (Abschnitt 4.3.5).

Als übergeordnetes Ergebnis aus diesen Sensitivitätsanalysen kann festgehalten werden, dass die zentralen Ergebnisse der Wirkungsabschätzung auch dann Bestand haben, wenn relevante Parameter bzw. Eingangsdaten variiert werden.

In weiteren Sensitivitätsanalysen wurden die Relevanz der Vergabe von Gutschriften (Abschnitt 4.3.3) und die Relevanz der Höhe der Wiederverwendungsquote (Abschnitt 4.3.4) untersucht. In beiden Fällen ändern sich die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung am Beispiel des THG-Potenzials signifikant. Dieser Sachverhalt muss bei der Ableitung von Schlussfolgerungen und Empfehlungen berücksichtigt werden.

5.2.3 Konsistenzprüfung

Im Rahmen der Konsistenzprüfung ist festzustellen, ob die getroffenen Annahmen, verwendeten Methoden und herangezogenen Daten mit dem Ziel und dem Rahmen der Studie übereinstimmen bzw. umgekehrt, ob nicht auflösbare Inkonsistenzen die Belastbarkeit der Studienergebnisse beeinträchtigen, was bei den Schlussfolgerungen berücksichtigt werden müsste.

Das Ergebnis der Konsistenzprüfung kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Beiträge der Wirkungsindikatorergebnisse werden wesentlich durch die Herstellung der Baumaterialien für die Tragwerke und Fundamente bestimmt. Die zur Modellierung herangezogenen Datensätze beziehen sich auf den festgelegten geographischen und zeitbezogenen Bezugsraum.
- Eine Abweichung ist hier lediglich ein Datensatz, der sich auf Indien bezieht. Es konnte in einer Sensitivitätsanalyse gezeigt werden, dass der Datensatz dennoch geeignet ist und keine relevante Inkonsistenz hervorgerufen wird.
- Einige Datensätze wurden modifiziert oder mithilfe von Primärdaten (bei den Varianten „feuerverzinkte Stahlkonstruktion“ und „nassbeschichtete Stahlkonstruktion“) ergänzt, um die spezifischen Produktionsbedingungen abzubilden. Dadurch dass die Hintergrunddatensätze sämtlich auf der identischen Datenbank und Version beruhen, ist das Vorgehen konsistent.

Zusammenfassend ist aus unserer Sicht die der Auswertung zugrunde liegende Datenqualität insgesamt hinreichend und erfüllt damit das Ziel und den Untersuchungsrahmen der vorliegenden Studie. Die Verfahren zur Bewertung von Koppelprodukten und insbesondere die Allokationsregeln und die Systemgrenze wurden jeweils einheitlich auf alle Produktsysteme angewendet. Dasselbe gilt für die im Zuge der Auswertung durchgeführten Bestandteile der Wirkungsabschätzung, die ebenfalls für alle untersuchten Konstruktionsvarianten einheitlich und konsistent angewendet wurden.

5.3 Einschätzung zu Einschränkungen in Hinblick auf Schlussfolgerungen

Bevor aus den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung Schlussfolgerungen gezogen werden, sollen hier noch einmal wesentliche Einschätzungen und Einschränkungen dargestellt werden, auf die sich die gezogenen Schlussfolgerungen beziehen:

- Der Materialeinsatz für die Tragwerke und Fundamente bestimmt bei allen betrachteten relevanten Wirkungsindikatoren die Ergebnisse wesentlich. Die Bemessung der Fundamente ist abhängig von der konstruktiven Lösung zur statischen Stabilisierung der Konstruktionsvarianten. Sollten davon abweichend andere Stabilisierungssysteme gewählt werden oder eine tragwerksplanerische Optimierung der Konstruktionsweisen erfolgen, gelten die hier ermittelten Ergebnisse nicht und die Ökobilanz müsste mit dann veränderten Referenzflüssen neu berechnet werden.
- Die bei der Definition der Funktionellen Einheit getroffene Festlegung einer Nutzungsdauer von 50 Jahren hat zur Folge, dass bei der Variante Stahlkonstruktion, nassbeschichtet Instandhaltungsmaßnahmen vorgenommen werden müssen. Bei einer weniger langen Nutzungszeit würden die Anforderungen an die Erstbeschichtung sinken und es könnte auf die Instandhaltung verzichtet werden. Umgekehrt könnte auch der Zinküberzug bei der feuerverzinkten Konstruktionsvariante geringer ausfallen. Eine Quantifizierung dieser Zusammenhänge müsste in

einer Folgestudie betrachtet werden. In dieser Studie könnte ebenfalls versucht werden, ausgeschlossene Teilprozesse (Energieaufwand für die Abluftbehandlung bei der initialen Nassbeschichtung, Verbrauch an Schleifmitteln und der Strahlmitteln bei der Instandhaltung) zu quantifizieren.

- Im Basisszenario wurden begründet keine Gutschriften für systemübergreifend genutzte sekundäre Energie- und Materialflüsse vergeben. In anderen Studien werden gleichwohl Gutschriften vergeben. Die hier erzielten Erkenntnisse können somit nicht unmittelbar mit Ergebnissen anderer Studien in Beziehung gesetzt werden.
- Die Ergebnisse sind zudem stark abhängig von den Annahmen zur Wiederverwendungsquote. Damit verbunden ist die aus heutiger Sicht schwer zu beantwortende Frage, ob und in welchem Umfang in den nächsten 50 Jahren wirksame Maßnahmen ergriffen werden, derzeit vorhandene Hemmnisse, die einer Wiederverwendung von Bauteilen entgegenstehen, zu verringern oder abzubauen.
- In der Modellierung dieser Studie wird Holz als klimaneutraler Werkstoff betrachtet, d.h. es wird angenommen, dass während des Holzwachstums im Wald so viel CO₂ aus der Atmosphäre gebunden wird, wie nach 50 Jahren im End-of-Life bei der Verbrennung von Altholz freigesetzt wird. Neueren Untersuchungen zufolge kann dies nicht mehr a priori angenommen werden, da die Senken-Funktion des Waldes mit Blick auf die CO₂-Bindung aus der Atmosphäre bei stark bewirtschafteten Wäldern abnimmt. Eine quantitative Berücksichtigung dieses Aspekts müsste in einer weiteren Studie genauer untersucht werden.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

In dieser Studie wurden vier Typlösungen für Varianten von Tragwerken einer konkreten, multifunktional nutzbaren gewerblichen Halle auf der methodischen Grundlage einer Ökobilanz untersucht. Am Beispiel einer konkreten Halle mit einer überspannten Fläche von 900 m² über eine Nutzungszeit von 50 Jahren mit definierten Anforderungen an den Korrosionsschutz wurden vier verschiedene Ausführungsvarianten entlang des gesamten Lebenswegs und insbesondere unter Berücksichtigung der Maßnahmen zur Bauwerksunterhaltung während der Nutzungszeit vergleichend gegenübergestellt. Für alle untersuchten Ausführungsvarianten wurden zudem die Beiträge einzelner Lebenswegphasen und relevanter Prozesse betrachtet, um Hinweise auf Schwerpunkte zu den betrachteten potenziellen Umweltbelastungen zu erhalten.

Die Funktionelle Einheit für diese Studie wurde wie folgt festgelegt:

Bereitstellung des Tragwerks (samt erforderlicher Fundamente) für eine multifunktional nutzbare Halle mit einer überspannten Fläche von 900 m² über eine Nutzungszeit von 50 Jahren

Für die Studie wurde auf der Grundlage von technischen Gutachten der Materialeinsatz für die Tragwerke und Fundamente bestimmt. Die Bemessung der Fundamente ist abhängig von der konstruktiven Lösung zur statischen Stabilisierung der Konstruktionsvarianten. Sollten andere Stabilisierungssysteme gewählt werden oder eine tragwerksplanerische Optimierung der Konstruktionsweisen erfolgen, gelten die hier ermittelten Ergebnisse nicht, und die Ökobilanz müsste mit dann veränderten Referenzflüssen neu berechnet werden.

Mit der Funktionellen Einheit wurden nicht nur die Größe und Konstruktionsmerkmale der Halle, sondern auch Anforderungen an den Konstruktionsschutz (Korrosivitätskategorie C 3) festgelegt. Dies ist für die Ergebnisse der Studie insofern relevant, als bei der untersuchten Variante „nassbeschichtete Stahlkonstruktion“ aufgezeigt wird, dass der Aufwand zur Instandhaltung während der angenommenen Nutzungsdauer von 50 Jahren relevant ist. Bei Tragwerkskonstruktionen von Hallen mit einer kürzeren Nutzungsdauer von beispielsweise 20 Jahren würden sich die Aufwendungen für den Korrosionsschutz (initial und ggf. Instandhaltung) deutlich unterscheiden. Die in dieser Studie ermittelten Ergebnisse können ohne grundlegende Neuberechnungen nicht auf kürzere Nutzungsdauern übertragen werden können.

Zur Erstellung der Sachbilanz wurden in dieser Studie sowohl spezifische Daten, die in Unternehmen erhoben wurden, als auch generische Daten aus der Ökobilanzdatenbank ecoinvent zugrunde gelegt. Zusammenfassend ist aus unserer Sicht die Datenqualität insgesamt hinreichend und erfüllt damit das Ziel und den Untersuchungsrahmen der vorliegenden Studie. Durch Sensitivitätsanalysen (siehe unten sowie Abschnitt 4.3) konnte die Belastbarkeit der Datengrundlagen und Annahmen bestätigt werden.

Die Verfahren zur Bewertung von Koppelprodukten und insbesondere die Allokationsregeln und die Systemgrenze wurden jeweils einheitlich auf alle vier untersuchten Konstruktionsvarianten angewendet. Dasselbe gilt für die im Zuge der Auswertung durchgeführten Bestandteile der Wirkungsabschätzung, die ebenfalls für alle untersuchten Konstruktionsvarianten einheitlich und konsistent angewendet wurden.

In der vorliegenden Studie wurden die Indikatoren und Modelle der Wirkungsabschätzung auf der Grundlage einer Auswahl des vom Joint Research Centre (JRC) im Rahmen der Entwicklung der

PEF²¹-Methodik zusammengestellten Sets Environmental Footprint (EF) 3.0. abgeschätzt. Die Ergebnisse werden im vorliegenden Bericht jeweils auf Ebene der Midpoint-Indikatoren für ausgewiesen. Die Environmental Footprint (EF) 3.0-Methode enthält derzeit 16 Umweltwirkungsindikatoren. Mit diesem Indikatoren-Set soll eine möglichst breite, dem aktuellen Stand der Wissenschaft entsprechende Wirkungsabschätzungsmethode bereitgestellt werden, aus der dann die für die jeweiligen Produktgruppen relevantesten Wirkungskategorien und -indikatoren ausgewählt werden. Auf der Grundlage einer Gesamtschau von allen 16 Umweltwirkungsindikatoren erfolgte eine begründete Auswahl von sechs Umweltwirkungsindikatoren (siehe Abschnitt 2.7.1):

- Treibhausgaspotenzial
- Landnutzung
- Inanspruchnahme abiotischer, fossiler Ressourcen
- Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Mineralien und Metalle)
- Inanspruchnahme von knappen Wasserressourcen
- Photochemisches Oxidantien-Potenzial

Eine Gewichtung der einzelnen Indikatoren im Sinne eines Gesamtindex wurde in dieser Studie nicht vorgenommen, da dies nicht nur den Anforderungen der zugrundeliegenden Ökobilanzstandards widersprechen würde, sondern auch den Blick auf Systemzusammenhänge verstellen würde. Zusätzlich zu diesen sechs Wirkungsindikatoren wurde mit dem Kumulierten Energieaufwand (KEA) eine aggregierte Sachbilanzgröße, differenziert nach KEA fossil, KEA regenerativ und KEA biogen ausgewertet, um die Ergebnisse der Ökobilanz besser einzuordnen und Plausibilitätsüberlegungen zu ermöglichen.

Um die Bedeutung von Datengrundlagen und Annahmen sowie die Relevanz von getroffenen methodischen Entscheidungen mit Blick auf einzelne Beiträge sowie die Richtungssicherheit der Ergebnisse besser beurteilen zu können, wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Für die Varianten Stahlkonstruktion, nassbeschichtet und Stahlkonstruktion, feuerverzinkt sowie für die Fundamente aller Varianten wurde die Relevanz und Geeignetheit verschiedener Datengrundlagen überprüft. Zudem wurden für alle Varianten die Auswirkungen der getroffenen methodischen Festlegung, keine Gutschriften für die Nutzung von Sekundärrohstoffen aus dem beim End-of-Life anzurechnen, analysiert. Schließlich wurden für alle Varianten die Auswirkungen einer Änderung der Wiederverwendungsquote von 10 % im Basisszenario auf 50 % geprüft.

Bevor weiter unten auf die Ergebnisse der einzelnen Wirkungsindikatoren eingegangen wird, können als übergreifende Ergebnisse dieser Studie folgende Aspekte festgehalten werden:

- Die Herstellung der für die untersuchte Konstruktionsvarianten eingesetzten Baumaterialien dominiert alle Indikatorergebnisse mit Beitragsanteilen zwischen 70 % bis rund 95 %. Wenn die Baumaterialien funktionell eingeteilt werden, sind es die Tragwerke und die Fundamente, welche besonders signifikant sind. Die Relevanz der Tragwerke und Fundamente zeigt sich analog aus den Beitragsanalysen, die zusätzlich zu den genannten Wirkungsindikatoren für den Sachbilanzindikator Kumulierter Energieaufwand (KEA), differenziert nach den Anteilen fossil, biogen und regenerativ, durchgeführt wurde (siehe Abschnitt 4.2.7). Vor diesem Hintergrund sind die der

²¹ PEF: Product Environmental Footprint

Studie zur Ermittlung der Referenzflüsse zugrundeliegenden Daten zum Bedarf an einzelnen Baumaterialien von zentraler Bedeutung. Dies gilt im Besonderen für die Bemessung der Fundamente, da diese, wie bereits oben erläutert wurde, abhängig von der konstruktiven Lösung zur statischen Stabilisierung der Konstruktionsvarianten ist.

- Im Basisszenario wurden begründet keine Gutschriften für systemübergreifend genutzte sekundäre Energie- und Materialflüsse vergeben. Die Wieder- oder Weiterverwendung von Bauelementen sowie die werkstoffliche oder energetische Verwertung von Baumaterialien als Sekundärrohstoffe können zwar zur Ressourcenschonung und Verringerung von negativen Umweltauswirkungen beitragen. Eine richtungssichere Quantifizierung dieses Effekts ist allerdings schwierig, insbesondere da noch keine konsistenten und geprüften Ökobilanz-Hintergrunddaten für die nach klimaneutralen Schlüsseltechnologien hergestellten Materialien wie Stahl, Zement bzw. Beton sowie Chemikalien zur Verfügung, zur Quantifizierung von Gutschriften herangezogen werden könnten. In anderen Studien werden gleichwohl Gutschriften vergeben. Die hier erzielten Erkenntnisse können somit nicht unmittelbar mit Ergebnissen anderer Studien in Beziehung gesetzt werden.
- Die Ergebnisse sind zudem stark abhängig von den Annahmen zur Wiederverwendungsquote. Derzeit steht der Wieder- bzw. Weiterverwendung von konstruktiven Bauteilen und Bauelementen eine Reihe von Hemmnissen entgegen. Die in der Literatur beschriebenen Hemmnisse sind eher von grundsätzlicher Natur und durch die grundlegenden Produktions- und Organisationsstrukturen bedingt. Vor diesem Hintergrund wird im Basisszenario dieser Ökobilanz für alle untersuchten Tragwerke eine Wiederverwendungsquote von lediglich 10 % angenommen. Um die Signifikanz dieser Festlegung zu prüfen und gleichzeitig die Umweltentlastungspotenziale einer stärker ausdifferenzierten Circular Economy nach einer Nutzungsphase der Tragwerke von 50 Jahren einschätzen zu können, wurde in einer der durchgeführten Sensitivitätsanalysen eine Wiederverwendungsquote von 50 % betrachtet, vgl. Abschnitt 4.3.4. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen am Beispiel des Wirkungsindikators Treibhausgaspotenzial, dass die Erhöhung der Wiederverwendungsquote von 10 auf 50 % zu einer signifikanten Verringerung der THG-Emissionen bei allen hier betrachteten Konstruktionsvarianten beitragen könnte. Diese Verringerung ist zum einen darauf zurückzuführen, dass durch die Wiederverwendung die Neuerstellung von Bauteilen anteilig verringert wird. Zum anderen trägt eine Erhöhung der Wiederverwendungsquote dazu bei, die Aufwendungen im End-of-Life zu verringern.

Nachstehend werden die Kernergebnisse für die sechs untersuchten Wirkungskategorien zusammengefasst:

- **Klimawandel / Treibhausgaspotenzial:**

Gemessen am Treibhausgaspotenzial schneidet die Holzvariante gegenüber den anderen untersuchten Varianten am besten ab, gefolgt von der feuerverzinkten Variante. Die gesamten THG-Emissionen der Holzvariante sind weniger als 2 % geringer im Vergleich zur feuerverzinkten Konstruktionsvariante, der Unterschied ist also nicht signifikant mit Blick auf die in Abschnitt 4.1 festgelegten Signifikanzschwellen.

Die feuerverzinkte Konstruktionsvariante hat auch ein signifikant geringeres THG-Potenzial im Vergleich zur Stahlkonstruktion, nassbeschichtet. Das höchste THG-Potenzial weist neben der Stahlbetonkonstruktion die Stahlkonstruktion, nassbeschichtet auf, der Unterschied zur feuerverzinkten Stahlhalle ist bei dieser Variante vor allen Dingen auf die Notwendigkeit einer Instandsetzung während der Nutzungsphase als auch einen grundsätzlich höheren Energiebedarf bei der Erstbeschichtung im Vergleich zum Auftrag des Zinküberzugs zurückzuführen. Ein ähnlich hohes

THG-Potenzial zeichnet die Stahlbetonhalle aus, hier wirkt sich v.a. der hohe Beitrag für das deutlich schwerere Fundament aus. Der Beitrag des Fundaments ist zwar auch bei der Holzvariante gegenüber den beiden Stahlvarianten wesentlich höher, bedingt durch den geringeren Beitrag des Tragwerks wird dieser Nachteil überkompensiert.

Das im Vergleich zu den anderen Konstruktionsvarianten deutlich geringere THG-Potenzial der Holzkonstruktion beruht auf der Annahme, das Holz als klimaneutraler Werkstoff betrachtet werden kann. D.h. es wird angenommen, dass während des Holzwachstums im Wald so viel CO₂ aus der Atmosphäre gebunden wird, wie nach 50 Jahren im End-of-Life bei der Verbrennung von Altholz freigesetzt wird. Neueren Untersuchungen zufolge kann dies nicht mehr a priori angenommen werden, da die Senken-Funktion des Waldes mit Blick auf die CO₂-Bindung aus der Atmosphäre bei stark bewirtschafteten Wäldern abnimmt. Eine quantitative Berücksichtigung dieses Aspekts müsste in einer weiteren Studie genauer untersucht werden.

- **Landnutzung:**

Die Landnutzung wird generell durch die Beiträge aus der Erstellung der Fundamente und der Tragwerke bestimmt. Beide Stahlkonstruktionen liegen hier unter Berücksichtigung der Signifikanzschwellen auf vergleichbarem Niveau, gefolgt von der Variante Stahlbetonkonstruktion, aufgrund des bei dieser Variante deutlich größeren Fundaments mit einem entsprechenden Mehrverbrauch an Sand, Kies und Mergel mit einer entsprechenden Landnutzung. Die Variante Holzkonstruktion hat gegenüber den anderen drei Varianten einen um Faktor 10 höhere Landnutzung. Mit Blick auf die Interpretation des Wirkungsindikators Landnutzung ist anzumerken, dass dieser aus Sicht der Studierersteller keine umfassende Abschätzung potenziell biodiversitätsrelevanter Umweltwirkungen darstellt.

- **Inanspruchnahme abiotischer, fossiler Ressourcen:**

Bei der Betrachtung der fossilen Rohstoffnutzung zeigt sich ein ähnliches Bild wie beim THG-Potenzial. Hier schneidet die nassbeschichtete Stahlvariante gegenüber der feuerverzinkten Ausführung und der Variante aus Stahlbeton signifikant schlechter ab. Der Unterschied zwischen der feuerverzinkten Ausführung und der Stahlbeton-Variante ist knapp über der Signifikanzschwelle, d.h. bei diesem Wirkungsindikator liegt die Variante aus Stahlbeton geringfügig günstiger im Vergleich zur feuerverzinkten Stahlvariante. Erwartungsgemäß schneidet hier die Holzvariante wegen des hohen biogenen Rohstoffeinsatzes deutlich am besten ab. Dieser Sachverhalt wird auch durch die Auswertung der Sachbilanzgröße KEA bestätigt: Während bei beiden Varianten aus Stahl sowie der Stahlbeton-Konstruktion der gesamte KEA mit jeweils über 90 % durch KEA, fossil dominiert wird, ist bei der Holzvariante KEA, biogen mit einem Anteil von über 60 % der dominierende Beitrag. Unter der Bedingung einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung kann dieser biogene Anteil als erneuerbar angesehen werden. Ob dies unter den gegebenen Bedingungen noch angenommen werden kann, steht offen, siehe die Diskussion am Beispiel des THG-Potenzials (siehe oben) und generell zur Senken-Funktion des Waldes in Abschnitt 2.7.2 dieser Studie.

- **Inanspruchnahme abiotischer Ressourcen (Mineralien und Metalle):**

Bei Betrachtung der Wirkungsindikatorenergebnisse für die Ressourcennutzung Metalle fallen die vergleichsweise hohen Beiträge des Tragwerks bei den Varianten „Stahlkonstruktion, feuerverzinkt“ und „Holzkonstruktion“ auf. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass dieser Wirkungsindikator stark vom Zinkverbrauch getrieben wird, während Eisen und weitere Stahllegierungselemente einen deutlich geringeren Beitrag bei diesem Wirkungsindikator haben. Speziell bei der Holzvariante stammen die Beiträge aus den feuerverzinkten Anschlüssen und ähnlichen Konstruktionselementen, die aus Gründen des konstruktiven Holzschutzes mit eingesetzt werden.

- **Inanspruchnahme von knappen Wasserressourcen:**

Bei der Wassernutzung beruhen die Unterschiede zwischen den beiden Stahlvarianten ausschließlich durch den Beitrag der erforderlichen Instandhaltung bei der nassbeschichteten Variante. Allerdings sind die Unterschiede bei den festgelegten Relevanzschwellen ebenso wenig signifikant wie beim Vergleich mit der Konstruktionsvariante Stahlbeton. Nur die Holzkonstruktion weist bei diesem Wirkungsindikator ein signifikant besseres Ergebnis auf. Treiber der Wassernutzung sind mit Anteilen zwischen rund 60 und 90 % die Herstellung des Tragwerks, gefolgt von der Herstellung des Fundaments. Treiber der Wassernutzung auf Ebene einzelner Baumaterialien sind im Wesentlichen die Herstellung von Stahl und Beton.

- **Photochemisches Oxidantien-Potenzial:**

Die Ergebnisse für diesen Wirkungsindikator werden bei den hier untersuchten Konstruktionsvarianten stark von der Herstellung der Tragwerke und Fundamente bestimmt, daneben tragen auch die Stickoxid-Emissionen aus dem Maschineneinsatz bei der Montage sowie der Demontage der Tragwerke mit rund 20 % zu den Gesamtergebnissen bei. Bei einer Wesentlichkeitsschwelle von >10 % für diesen Indikator (siehe Abschnitt 4.1) weist die feuerverzinkte Konstruktionsvariante gegenüber den Varianten Stahlbetonkonstruktion und Holzkonstruktion leichte Vorteile auf. Im Vergleich zur nassbeschichteten Variante sind die Unterschiede zu allen Vergleichsvarianten deutlich signifikanter. Dies ist auf die Lösemittlemissionen in der Nutzungsphase durch die Instandhaltung (vgl. Abschnitt 3.2.2) zurückzuführen.

Zusammenfassend wird dem Institut Feuerverzinken GmbH als Auftraggeber der Studie empfohlen, bei der Kommunikation der im Rahmen der hier durchgeführten Ökobilanz gewonnenen Ergebnisse gegenüber Dritten neben den Vorteilen der feuerverzinkten Konstruktionsvariante mit Blick auf das Treibhausgaspotenzial auch die ambivalente Lage bei den anderen Indikatorergebnissen zu kommunizieren. Dazu gehört auch, neben den quantifizierten Ergebnissen auch die erkannten signifikanten Parameter (siehe zusammenfassend Abschnitt 5.1.3) und die erkannten Einschränkungen (Abschnitt 5.3) mit darzustellen. Zudem sollten in weiteren Arbeiten einzelne Aspekte vertieft werden, die im Rahmen dieser Studie nicht im Detail untersucht werden konnten. Dies betrifft zum einen die nicht berücksichtigten Prozesse bei der Stahlkonstruktion, nassbeschichtet, zum anderen die Frage nach der CO₂-Neutralität von Holz als Baumaterial.

7 Bericht zur Kritischen Prüfung

Ergebnis der kritischen Prüfung nach ISO 14040 und 14044 der Studie

„Vergleichende Ökobilanz von Varianten einer Hallenkonstruktion“

durchgeführt vom
Öko-Institut e.V., Freiburg

an die Auftraggeberin der Studie
Industrieverband Feuerverzinken e.V.

von
Birgit Grahl
Ivo Mersiowsky
Wolfram Trinius

28.11.2024

INHALT

1	Veranlassung und Ablauf der Kritischen Prüfung	2
2	Allgemeine Kommentare	3
3	Konformität mit ISO 14040 und 14044	3
3.1	Methodenkonformität	3
3.2	Wissenschaftliche Begründung und technische Gültigkeit der Methoden	4
3.3	Validität der verwendeten Daten	5
3.4	Berücksichtigung des Ziels der Studie und erkannter Einschränkungen in der Auswertung	5
3.5	Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Berichtes	6
4	Resümee	6
	Adressen der GutachterInnen	7
	Referenzen	7

1 Veranlassung und Ablauf der Kritischen Prüfung

Die Kritische Prüfung wurde am 22.5.2024 vom Industrieverband Feuerverzinken e.V. (Auftraggeber) über Herrn Göllrich, als Kritische Prüfung am Ende der Studie beauftragt. Die Ökobilanzstudie wurde durchgeführt vom Öko-Institut e.V., Freiburg (Ersteller).

Die erste Version des Abschlussberichtes wurde dem Panel am 21.05.2024 über Herrn Gensch vom Öko-Institut übersandt, von allen Panel Mitgliedern schriftlich kommentiert und die Kommentare am 05.06.2024 an Ersteller und Auftraggeber übersandt. In einer Web-Konferenz am 26.06.2024 wurden die Kommentare mit Ersteller und Auftraggeber durchgesprochen, unklare Punkte erläutert und schriftlich bis zum 02.07.2024 abgestimmt. Eine online Modellprüfung wurde am 28.06.2024 vom Panel Mitglied Ivo Mersiowsky durchgeführt.

Der auf dieser Basis erstellte Entwurf des Abschlussberichts wurde den GutachterInnen am 3.11.2024, der endgültige Abschlussbericht am 28.11.2024 über Herrn Gensch vom Öko-Institut übersandt.

Formal handelt es sich bei dieser kritischen Prüfung um eine Prüfung durch "interessierte Kreise" (Panel-Methode) gemäß ISO 14040 Abschnitt 7.3.3 und ISO 14044 Abschnitt 4.2.3.7 und 6.3, da die Studie vergleichende Aussagen zu Referenzprodukten enthält und gegenüber Dritten offengelegt werden soll.

Trotz dieses Titels ist die Einbeziehung weiterer Vertreter "interessierter Kreise" jedoch fakultativ und war in dieser Studie nicht vorgesehen. Das Gutachtergremium ist neutral und unabhängig von kommerziellen Interessen von Auftraggeberin und Ersteller. Das Panel hat die Belange anderer interessierter Kreise nach bestem Wissen berücksichtigen, da es außerhalb des Rahmens des vorliegenden Projekts lag, staatliche oder

nichtstaatliche Organisationen oder andere interessierte Kreise, z. B. Wettbewerber oder Verbraucher, einzubeziehen.

Das Panel betont die offene und konstruktive Atmosphäre des Projekts. Den GutachterInnen wurden alle erforderlichen Daten vorgelegt und alle Fragen offen diskutiert. Alle Kommentare des Panels wurden vom Ersteller der Ökobilanzstudie im Schlussbericht, auf den sich diese Ergebniszusammenfassung der Kritischen Prüfung bezieht, detailliert behandelt.

Hinweis: Die vorliegende Ergebniszusammenfassung der Kritischen Prüfung wird an den Industrieverband Feuerverzinken e.V. übersandt. Die GutachterInnen können nicht für die Verwendung der Arbeit durch Dritte verantwortlich gemacht werden. Die Schlussfolgerungen basieren auf dem vollständigen Bericht für den Industrieverband Feuerverzinken e.V. „Vergleichende Ökobilanz von Varianten einer Hallenkonstruktion“ vom 28.11.2024, und keinem anderen Bericht, Auszug oder Veröffentlichung, die eventuell durchgeführt werden könnten. Die Schlussfolgerungen der GutachterInnen wurden vor dem Hintergrund des aktuellen Stands der Technik und den vorgelegten Informationen abgeleitet, sind allein für den Kontext und den Inhalt der vorliegenden Studie gültig und dürfen nicht weiter verallgemeinert werden.

2 Allgemeine Kommentare

Die Studie untersucht potenzielle Umweltwirkungen von vier Varianten einer Tragwerkskonstruktion einschließlich der erforderlichen Fundamente für eine exemplarische Halle definierter Konstruktionsmerkmale. Die Tragwerkskonstruktionen bilden vier Materialsysteme ab: Stahlkonstruktion feuerverzinkt, Stahlkonstruktion nassbeschichtet, Stahlbetonkonstruktion und Holzkonstruktion. Diese vier Varianten werden für die Zwecke der Studie als funktional äquivalent angenommen. Die Autoren weisen ausdrücklich darauf hin, dass die Gebäudehülle nicht Gegenstand der Analyse ist und dass eine Übertragung der Ergebnisse auf andere Tragwerksvarianten sowie andere Konstruktionsmerkmale nicht ohne weiteres möglich ist.

Als Ziel der Studie wird formuliert herauszuarbeiten, mit welchen systemspezifischen relevanten potenziellen Umweltauswirkungen die untersuchten Tragwerksvarianten der ausgewählten Konstruktionsmerkmale verbunden sind. Die Studie richtet sich damit in erster Linie an FachplanerInnen und andere EntscheidungsträgerInnen.

Die GutachterInnen möchten betonen, dass ein direkter Vergleich mit anderen Tragwerkskonstruktionen und/oder anderen Konstruktionsmerkmalen spezifischer Hersteller nicht zulässig ist.

3 Konformität mit ISO 14040 und 14044

Für die kritische Prüfung wurden die aktuell gültigen Normen ISO 14040 und ISO 14044 zugrunde gelegt. Geprüft wurde nach den in ISO 14044 Ziffer 6.1 vorgegebenen fünf Kriterien:

Das kritische Prüfungsverfahren muss sicherstellen, dass:

- die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden mit dieser Internationalen Norm übereinstimmen,
- die bei der Durchführung der Ökobilanz angewendeten Methoden wissenschaftlich begründet und technisch gültig sind,
- die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie hinreichend und zweckmäßig sind,

- die Auswertungen die erkannten Einschränkungen und das Ziel der Studie berücksichtigen und
- der Bericht transparent und in sich stimmig ist.

In den folgenden Abschnitten 3.1 bis 3.5 ist die Umsetzung dieser Aspekte in der Studie zusammengefasst.

3.1 Methodenkonformität

Die Studie wurde gemäß der in ISO 14040 beschriebenen allgemeinen Struktur der Ökobilanz und den in ISO 14044 genannten Anforderungen durchgeführt. Einige Aspekte werden im Folgenden hervorgehoben:

- Der Bericht folgt der allgemeinen Struktur der Ökobilanzberichterstattung und berücksichtigt die erweiterten Anforderungen an die Berichterstattung an Dritte nach ISO 14044 (5.2). Die wesentlichen Informationen, die für die benannten Zielgruppen relevant sind, werden adressiert.
- Die funktionale Äquivalenz der vier untersuchten Tragwerkssysteme ist plausibel dargelegt, die funktionelle Einheit sachgerecht definiert und die Referenzflüsse daraus nachvollziehbar abgeleitet.
- Die Systemgrenzen, Abschneidekriterien und Allokationsverfahren sind im Kontext des Ziels der Studie sinnvoll gewählt und nachvollziehbar beschrieben. Die in den betrachteten Systemen nicht berücksichtigten Prozesse werden gelistet und plausibel begründet.
- Im Basisszenario werden keine Gutschriften für Sekundärrohstoffe aus dem End-of-Life ausgewiesen. Dieser Ansatz wird nachvollziehbar begründet. In einer Sensitivitätsanalyse unter der Annahme von Gutschriften für Sekundärrohstoffe am Beispiel der Wirkungskategorie Treibhausgaspotenzial werden Konsequenzen differenziert diskutiert. Dieser Punkt erhält besondere Bedeutung durch die Einbeziehung einer Holzkonstruktion: Während der Werkstoff Holz für die Zwecke dieser Studie als CO₂-neutral betrachtet wird, können bei einer energetischen Verwertung am Lebensende Gutschriften für substituierte fossile Energieträger angesetzt werden. Dies gilt allerdings nur, sofern dies bei dem Zeithorizont von fünfzig Jahren eine solche Substitution noch sachgerecht erscheint.
- Die Auswahl der Wirkungskategorien ist vor dem Hintergrund des Ziels angemessen, wird klar erklärt und kritisch diskutiert (siehe auch 3.2).
- Die berücksichtigten fünf Sensitivitätsanalysen sind relevant und aussagekräftig zur Einschätzung der Belastbarkeit der Ergebnisse.
- Die Ergebnisse werden klar dargestellt, Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen in verständlicher Weise abgeleitet und unter Bezugnahme auf die zugrunde liegenden Rahmenbedingungen und die damit verbundenen Einschränkungen diskutiert.
- Die Auswertung reflektiert die Ergebnisse der Studie kritisch unter Berücksichtigung der Einschränkungen und leitet daraus nachvollziehbar Schlussfolgerungen ab.

Die GutachterInnen kommen zu dem Schluss, dass die verwendeten Methoden mit den internationalen Normen konform sind.

3.2 Wissenschaftliche Begründung und technische Gültigkeit der Methoden

Die verwendeten Methoden entsprechen dem wissenschaftlichen und technischen Standard für derartige Analysen. Einige Aspekte werden im Folgenden hervorgehoben:

- Die am 28.06.2024 durchgeführte Prüfung des Modells und der Datenbasis zeigte die Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Modellierung. Fragen und Anmerkungen zu einzelnen Aspekten wurden von den Erstellern aufgegriffen und im Abschlussbericht adressiert. Die oben erwähnte CO₂-Neutralität von Holz wird angemessen berücksichtigt, indem weder eine CO₂-Senke in der Wachstumsphase berücksichtigt und noch eine biogene CO₂-Emission bei der Verbrennung angesetzt wird. Das fossile CO₂ bei Verbrennung stammt aus Klebstoff- bzw. Binderrückständen. Während Stahl von der bereits bestehenden Sekundärrohstoffquote profitiert, stellt sich der Werkstoff Beton aufgrund der derzeit noch unzureichend absehbaren Wertstoffkreisläufe in dieser Studie eher ungünstig dar.

Die Sitzung wurde in voller Offenheit und Transparenz durchgeführt, und die Ersteller gingen auf alle Fragen kompetent und umfassend ein.

- ISO 14040/44 verlangen keine bestimmten Wirkungskategorien sondern diese müssen entsprechend dem untersuchten Produktsystem sinnvoll gewählt sein. Weiterhin wird in ISO 14040/44 darauf hingewiesen, dass geeignete Charakterisierungsmodelle für die ausgewählten Wirkungskategorien verwendet werden sollen. Diesbezüglich folgt die Studie der vom Joint Research Centre (JRC) im Rahmen der Entwicklung des PEF-Methodik zusammengestellten Sets Environmental Footprint (EF)3.0 und begründet diese Wahl nachvollziehbar. Die Auswahl der berücksichtigten Wirkungskategorien und Sachbilanzparameter wird auf Basis dokumentierter Voruntersuchungen sachgerecht begründet und die Charakterisierungsmodelle entsprechen dem Stand der Ökobilanztechnik.
- Die Charakterisierungsmodelle einzelner Wirkungsindikatoren werden einer kritischen Diskussion unterzogen und die Relevanz von Ergebnissen nachvollziehbar eingeordnet. Einige Aspekte werden im Folgenden hervorgehoben:
 - Die Wirkungskategorie Landnutzung wird über den Bodenqualitätsindex basierend auf der LANCA-Methodik abgebildet, der nicht geeignet ist hinreichend qualifiziert potenziell biodiversitätsrelevante Umweltwirkungen abzubilden. Insofern trifft die Studie keine Aussagen zu biodiversitätsrelevanten Vor- oder Nachteilen der betrachteten Produktsysteme. Das Panel begrüßt diese Klarstellung.
 - Ergänzend zu den ausgewählten Wirkungskategorien werden die Sachbilanzindikatoren KEAbiogen, KEAregenerativ und KEAnicht-regenerativ ausgewertet und die Ergebnisse sachgerecht eingeordnet.
 - Die Ergebnisse der ausgewählten Wirkungsindikatoren und Sachbilanzparameter werden in aussagekräftigen Diagrammen präsentiert, in einer Beitragsanalyse gründlich analysiert und somit für die Auswertung transparent aufbereitet. Die Wesentlichkeitsschwellen zur Bewertung von Wirkungsindikatorergebnissen sind klar und sinnvoll definiert und somit sind Aussagen in der Auswertung zum Unterschied der untersuchten Produktvarianten nachvollziehbar. Die Daten werden nicht überinterpretiert.
 - Wie derzeit in der Ökobilanzpraxis üblich wird Holz in der Studie vereinfachend als CO₂-neutral bilanziert (siehe oben). Die Studie weist allerdings darauf hin, dass neuere Forschungsergebnisse dazu führen können, dass dieser Ansatz modifiziert werden muss.

- Die Karbonatisierung von Beton und verzinkten Bauteilen wird differenziert diskutiert und nachvollziehbar begründet, warum diese Prozesse in der Studie nicht berücksichtigt wurden.

Die GutachterInnen kommen zu dem Schluss, dass die verwendeten Methoden wissenschaftlich und technisch valide sind.

3.3 Validität der verwendeten Daten

Wie bei Kritischen Prüfungen üblich, war es nicht möglich, die Korrektheit aller Primär- und anderen Daten sowie der Hintergrunddatenbank zu überprüfen, allerdings wurden in der Studie verwendete Daten auf Angemessenheit und Plausibilität überprüft. Der Einsatz der Ökobilanzsoftware OpenLCA V 2.0.3 und die Verwendung konsistenter Datensätze aus der Datenbank ecoinvent V.3.9 ermöglicht eine angemessene Modellierung der untersuchten Systeme.

Einige Aspekte werden im Folgenden hervorgehoben:

- Die Sichtung des Datenmaterials und -managements ergab, dass die Daten sorgfältig und nachvollziehbar gehandhabt wurden. Hinweise auf systematische Fehler bei den durchgeführten Berechnungen wurden nicht identifiziert.
- Die Wahl der APOS (Allocation at the point of Substitution) Datensätze aus ecoinvent V 3.9 für Hintergrundsysteme wird nachvollziehbar begründet.
- Die Datengrundlagen der Materialspezifikationen und Konstruktionsmerkmale der vier untersuchten Systeme werden nachvollziehbar und plausibel erläutert.
- Die Datenqualität wird seitens der Ersteller der Studie als insgesamt belastbar beurteilt. Neben den verwendeten Sekundärdaten kommt dabei den primären Aktivitätsdaten infolge Bemessung (Dimensionierung) des Tragwerks und der hiermit verbundenen Materialverbräuche eine besondere Bedeutung zu: Die diesbezügliche Genauigkeit wird ebenfalls als hinreichend im Sinne der Zielsetzung eingeschätzt.

Die GutachterInnen kommen zu dem Schluss, dass die verwendeten Daten in Bezug auf das Ziel der Studie angemessen und sinnvoll sind.

3.4 Berücksichtigung des Ziels der Studie und erkannter Einschränkungen in der Auswertung

Das formulierte Ziel der Studie – Herausarbeitung systemspezifischer relevanter potenzieller Umweltauswirkungen der untersuchten Tragwerksvarianten - wird in der sorgfältig durchgeführten Auswertung aufgegriffen und die Ergebnisse sowie Einschränkungen sachgerecht diskutiert. Differenzierte Beitragsanalysen sorgen für transparente Aufschlüsselung der Ergebnisse.

Die abgeleiteten Schlussfolgerungen sind auf der Grundlage der Ergebnisse und der vorgenommenen Auswertung nachvollziehbar. Die sinnvoll gewählten Sensitivitätsanalysen werden ausführlich und nachvollziehbar diskutiert und zeigen die Belastbarkeit der Schlussfolgerungen.

Darüber hinaus werden Empfehlungen zur differenzierten Kommunikation der Ergebnisse ausgesprochen.

Die GutachterInnen kommen zu dem Schluss, dass die Auswertung die erkannten Einschränkungen und das Ziel der Studie widerspiegelt.

3.5 Transparenz und Nachvollziehbarkeit des Berichtes

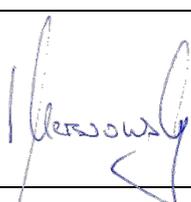
Der Bericht ist transparent strukturiert, logisch gegliedert und in sich stimmig. Aussagekräftige Systemfließbilder und Diagramme ergänzen den Text. Inkonsistenzen im Bericht konnten nicht festgestellt werden. Die Argumentationslinie ist nachvollziehbar.

Die Zielgruppen der externen Kommunikation der Studie sind benannt und der der Bericht erfüllt die Anforderungen in ISO 14044 (Abschnitt 5.2) für Berichte an Dritte.

Die GutachterInnen kommen zu dem Schluss, dass der Bericht transparent, nachvollziehbar und in sich stimmig ist.

4 Resümee

Die kritische Prüfung hat ergeben, dass die Studie den Anforderungen in ISO 14040 und ISO 14044 entspricht.

Heidekamp, 28.11.2024	Hamburg/Brixen, 28.11.2024	Hamburg, 28.11.2024
		
Prof. Dr. Birgit Grahl (Chair)	Dr.-Ing. Ivo Mersiowsky	Dr. Wolfram Trinius

Adressen der GutachterInnen

Prof. Dr. Birgit Grahl
 Industrielle Ökologie
 Schuhwiese 6
 23838 Heidekamp
 Deutschland
 VAT number: DE13 549 649 9
 Fon: +49(0)4533 - 4110
 e-Mail: integrahl@t-online.de

Dr.-Ing. Ivo Mersiowsky
 Terra Institute GmbH S.r.l.
 Albuingasse 2 | 39042 Brixen (BZ)
 Italien
 Tel.: +39 0472 970 484
 Mob.: +49 (0)170 299 02 70
 e-Mail: i.mersiowsky@terra-institute.eu
www.terra-institute.eu
 UID/P.IVA IT02688830211

Dr. Wolfram Trinius
 Ingenieurbüro Trinius GmbH
 Barmbeker Str. 9 a
 22303 Hamburg
 Deutschland
 e-Mail: trinius@trinius.de
www.trinius.de
 tel +49 40 2841 788 00
 mob +49 172 425 5657 Sitz der Gesellschaft: Hamburg Registergericht: Amtsgericht Hamburg HRB 113652
 Geschäftsführender Gesellschafter: Dr. Wolfram Trinius
 Umsatzsteuer-Identifikationsnummer: DE27 110 7324

Referenzen

- DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020
- DIN EN ISO 14044:2021-02: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020)

8 Literaturverzeichnis

Aries, E.; Gómez Benavides, J.; Mavromatis, S.; Klein, G.; Chronopoulos, G.; Roudier, S. (2022): Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Ferrous Metals Processing Industry. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control). Hg. v. Publications Office of the European Union (JRC131649).

BBSR (2023): WECOBIS. Ökologisches Baustoffinformationssystem. Hg. v. Bundesinstitut für Bau, Stadt und Raumforschung. Online verfügbar unter <https://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/oberflaechenbehandlungen-pg/farben-lacke-lasuren-pg/lacke-lasuren-pg.html>, zuletzt geprüft am 04.04.2024.

DIN EN ISO 12944-5:2019, 2020: Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme - Teil 5: Beschichtungssysteme (ISO 12944-5:2019); Deutsche Fassung EN ISO 12944-5:2019.

DIN EN ISO 12944, 2018-2020: Beschichtungsstoffe - Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme - Teile 1-9.

BMDV (Januar 2022): Bundesministerium für Digitales und Verkehr: Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für Ingenieurbauten. TL/TP-ING.

Boliden Mineral AB (Hg.): Low-carbon SHG Zinc. Online verfügbar unter <https://www.boliden.com/48e73a/globalassets/operations/products/zinc/low-carbon-shg-zinc2.pdf>, zuletzt geprüft am 23.04.2024.

Boliden Mineral AB (Hg.) (2021): Carbon footprint of Boliden Main Metals. Copper, Nickel matte, Zinc, Lead. Online verfügbar unter https://www.boliden.com/48e725/globalassets/operations/products/copper/green-copper/carbon-footprint-of-boliden-main-metals_2021_executive-summary.pdf?language=en, zuletzt geprüft am 02.04.2024.

Bulach, Winfried; Dehoust, Günter; Mayer, Felix; Möck, Alexandra (2022): Ökobilanz zu den Leistungen der dualen Systeme im Bereich des Verpackungsrecyclings. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/Duale_Systeme_Oekobilanz_Endbericht.pdf.

Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach (Hg.) (2024): Zusammenstellung der geprüften Beschichtungsstoffe nach den TL KOR-Stahlbauten. für die Anwendung an Bauwerken und Bauteilen der Bundesverkehrswege. Online verfügbar unter https://www.bast.de/DE/Ingenieurbau/Qualitaetsbewertung/Listen/pdf/Korrosionsschutzsysteme-nach-tl-kor.pdf;jsessionid=5E3626726CA164E2263C373197421B39.live11293?__blob=publicationFile&v=81, zuletzt geprüft am 24.04.2024.

Dechantsreiter, U.; Horst, P.; Mettke, A.; Amus, S.; Theis, S.; Knappe, F. et al. (2014): Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertiger Verwertung von Baustoffen. Hg. v. Umweltbundesamt (Texte, 23/2015).

DIN EN ISO 1461:2022, 2022: Durch Feuerverzinken auf Stahl aufgebraute Zinküberzüge (Stückverzinken) - Anforderungen und Prüfungen (ISO 1461:2022); Deutsche Fassung EN ISO 1461:2022.

EPD (2019): Brettschichtholzwerk. Binderholz GmbH. Hg. v. Institut Bauen und Umwelt e.V. (EPD-BBS-20190164-IBA1-DE). Online verfügbar unter

https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/sources/325254b6-92f1-4625-9246-1827c5639841/binderholz_Brettschichtholz_BSH_11079.pdf?version=00.03.000.

EPD (2023): Structural Steel: Sections and merchant bars. bauforumstahl e.V. Hg. v. Institut Bauen und Umwelt e.V. (EPD-BFS-20230271-IBG1-EN).

Fehrenbach, Horst; Bischoff, Mascha; Böttcher, Hannes; Reise, Judith; Hennenberg, Klaus Josef (2022): The Missing Limb: Including Impacts of Biomass Extraction on Forest Carbon Stocks in Greenhouse Gas Balances of Wood Use. In: *Forests* 13 (3), S. 365. DOI: 10.3390/f13030365.

Flamme, S.; Hanewinkel, J.; Quickler, P.; Weber, K. (2018): Energieerzeugung aus Abfällen. Stand und Potenziale in Deutschland bis 2030. Hg. v. Umweltbundesamt (51/2018). Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energieerzeugung-aus-abfaellen-stand-potenziale-in>.

Heine, Margit; van Daele, Charlotte (2021): Ökologische und ökonomische Potentiale von Korrosionsschutzbeschichtungen. Hg. v. Verband der deutschen Lack- und Druckfarbenindustrie e.V. (VdL).

Huckshold, Mark (2024): Mündliche Stellungnahme im Rahmen der Reviewsitzung zur Frage der Planungsgrundlagen, 24.06.2024.

Industrieangabe (2024a): Angabe von drei Unternehmen zum Energiebedarf bei der Nassbeschichtung auf Metallgrund, 2024.

Industrieangabe (2024b): Angabe von zwei Unternehmen zum Energiebedarf für das Auftragen der Nassbeschichtung mittels Druckluftspritzens, 2024.

Industrieangabe (2024c): Angabe eines Unternehmens zum Overspray bei der Nassbeschichtung, 20.02.2024.

Industrieangabe (2024d): Angabe eines Kranherstellers zu den benötigten Mobilkränen und deren Verbrauchswerte, 04.04.2024.

Institut Bauen und Umwelt e.V. (Hg.) (2021): Ytong(R)-Porenbeton. Xella Baustoffe GmbH. Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804+A2 (EPD-XEL-20210286-IAD2-DE).

Institut Bauen und Umwelt e.V. (Hg.) (2022): duroZINQ® hot-dip galvanized steel, ZINQ Technologie GmbH. ENVIRONMENTAL PRODUCT DECLARATION as per ISO 14025 and EN 15804+A2 (EPDZIN20210262IBG1EN).

Institut Bauen und Umwelt e.V. (Hg.) (2023): Beton C25/30 XC4 XF1 XA1 F3 32 M EcoPact produziert im Transportbetonwerk Düsseldorf-Rath. Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804+A2.

Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) (Hg.) (2024): Feuerverzinkte Baustähle: Stahlprofile und Stabstähle. UMWELT-PRODUKTDEKLARATION nach ISO 14025 und EN 15804+A2. Unter Mitarbeit von bauforumstahl e.V. & Institut Feuerverzinken (EPD-BFS-20240011-IBG1-DE).

Institut Feuerverzinken GmbH (Hg.): Korrosionsschutz durch Feuerverzinken. Online verfügbar unter https://www.feuverzinken.com/fileadmin/user_upload/Broschuere_-_Korrosionsschutz_durch_Feuerverzinken.pdf.

International Zinc Association (Hg.) (2023): Zinc environmental profile. Life cycle assessment 2023 update based on 2021 industry data. Online verfügbar unter https://www.zinc.org/wp-content/uploads/sites/30/2023/09/2023-Update-Zinc-LifeCycle-Assessment_VF.pdf.

International Zinc Association (Hg.) (2024): Technical Guidance on Carbon Footprint Calculation for Zinc Ore Concentrate, Special High-Grade (SHG) Zinc, and Primary Zinc Alloys. Version 2.0. Online verfügbar unter https://www.zinc.org/wp-content/uploads/sites/30/2024/05/CF-Guidance-for-Zinc-V2.0-WS_VF.pdf, zuletzt geprüft am 26.08.2024.

IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Hg. v. T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, et al. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA,. Online verfügbar unter http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_ALL_FINAL.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2018.

Joas, F.; Witecka, W.; Lenck, T.; Peter, F.; Seiler, F.; Samadi, S. et al. (2019): Klimaneutrale Industrie: Schlüsseltechnologien und Politikoptionen für Stahl, Chemie und Zement. Hg. v. Agora Energiewende und Wuppertal Institut. Berlin (164/04-S-2019/DE). Online verfügbar unter <https://www.agora-industrie.de/publikationen/klimaneutrale-industrie-hauptstudie>, zuletzt geprüft am 05.10.2024.

Kiess GmbH & Co. KG (Hg.) (2024): Handbuch Grundlagen Strahltechnik. Online verfügbar unter <https://www.kiess.de/media/grundlagen-strahltechnik/3-strahlmittel/32-korund>, zuletzt aktualisiert am 24.04.2024.

Kocker, R. (2024): Hintergrundinformationen und Erläuterungen zur Publikation „Ökobilanzieller Vergleich von Hallen unterschiedlicher Bauweisen“, Januar 2015 bauforumstahl e.V., 04.07.2024. Brief (als Anhang per Email) an Öko-Institut e.V.

Kocker, R.; Möller, R. (2016): Typenhallen aus Stahl - Musterstatik. Hg. v. bauforumstahl e.V. (Nr. B 501).

Krüger, J. (2001): Sachbilanz Zink. Aachen: Mainz.

DIN EN 15643:2021-12: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken.

DIN EN 15804:2012-04: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte.

Nordby, Anne Sigrid; Shea, Andrew David (2013): Building Materials in the Operational Phase. In: *J of Industrial Ecology* 17 (5), S. 763–776. DOI: 10.1111/jiec.12046.

Oberhaidinger, F. (2023): Ökobilanzieller Vergleich von Hallen unterschiedlicher Bauweisen: Berechnung einer Kragstütze in Holzbauweise. Hg. v. Industrieverband Feuerverzinken e.V.

Peißker, Peter; Huckshold, Mark (2016): Handbuch Feuerverzinken 4e. 4. Auflage. Weinheim: John Wiley & Sons, Inc.

Rüter, Sebastian; Diederichs, Stefan (2012): Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz. Arbeitsbericht aus dem Institut für Holztechnologie und Holzbiologie. Hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Institut für Holztechnologie und Holzbiologie (HTB). Hamburg (2012/1). Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn050490.pdf, zuletzt geprüft am 22.04.2024.

Schmidt Sandstrahltechnik GmbH (Hg.): Hintergrundwissen. -Strahldüsen -Strahlmittel und -verbrauch -Schonstrahl- bzw. TPT-Strahlkopf (Anwendung/Verbrauch/Flächenleistung). Online verfügbar unter <https://www.schmidt->

sandstrahltechnik.de/fileadmin/6_downloads/Hintergrundwissen.pdf, zuletzt geprüft am 23.04.2024.

Siebers, Raban; Hauke, Bernhard (2015): Ökobilanzieller Vergleich von Hallen unterschiedlicher Bauweisen. Hg. v. bauforumstahl e.V.

DIN 18202:2019-07: Toleranzen im Hochbau.

DIN 1045-1:2023-08, 2023: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 1: Planung, Bemessung und Konstruktion.

Treibacher Schleifmittel GmbH (Hg.) (2012): Strahlmittel. Online verfügbar unter <https://www.zieglerag.ch/uploads/files/Produkte/Sanstrahlen/datenblaetter/D4%20Strahlmittel.pdf>, zuletzt geprüft am 23.04.2024.

DIN EN ISO 14044:2021-02, 2018: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2021-02, zuletzt geprüft am 24.05.2019.

DIN EN ISO 14044:2021-02, 2021: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2021-02.

DIN EN ISO 14040:2021-02, 2021: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2021-02.

DIN EN ISO 8501-1:2007-12: Vorbereitung von Stahloberflächen vor dem Auftragen von Beschichtungsmitteln - Visuelle Beurteilung der Oberflächenreinheit - Teil 1: Rostgrade und Oberflächenvorbereitungsgrade von unbeschichteten Stahloberflächen und Stahloberflächen nach ganzflächigem Entfernen vorhandener Beschichtungen (ISO 8501-1:2007).

DIN 1025-5:1994-03, 1994: Warmgewalzte I-Träger; Mittelbreite I-Träger, IPE-Reihe; Maße, Masse, statische Werte.

Wehmann, K.; Schultz, K. (2024): Treibhausgas-Projektionen 2024 – Ergebnisse kompakt. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau (Treibhausgas-Projektionen für Deutschland). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/thg-projektionen_2024_ergebnisse_kompakt.pdf, zuletzt geprüft am 14.10.2024.

DIN EN ISO 14713-1:2017-08, 2017: Zinküberzüge - Leitfäden und Empfehlungen zum Schutz von Eisen- und Stahlkonstruktionen vor Korrosion - Teil 1: Allgemeine Konstruktionsgrundsätze und Korrosionsbeständigkeit (ISO 14713-1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14713-1:2017.

9 Anhang

9.1 Ermittlung des Materialaufwands für die untersuchten Tragwerkskonstruktionen

Tabelle 9-1: Ermittlung des Materialaufwands für die untersuchten Tragwerkskonstruktionen

Stahltragwerk							
		Baustoff	Wert	Einheit	Faktor	Einheit	Masse
Fundament		Beton C25/30	0,9	m ³	2365	kg/m ³	2128,5 kg
		Bewehrungsstahl BSt 500 SA	17,63	kg			17,63 kg
		Gesamt					2146,13 kg
Tragwerk	Stütze	IPE 400	5	m	65,04	kg/m	325,2 kg
	Binder	IPE 360	15,06	m	58,23	kg/m	876,9438 kg
	Gesamt	2 Stützen und 1 Binder					1527,3438 kg
Gesamt	Rahmen	2 Fundamente, 2 Stützen, 1 Binder					5819,6038 kg
Stahlbetontragwerk							
		Baustoff	Wert	Einheit	Faktor	Einheit	Masse
Fundament		Beton C25/30	1,83	m ³	2365	kg/m ³	4327,95 kg
		Bewehrungsstahl BSt 500 SA	88	kg			88 kg
		Gesamt					8831,9 kg
Tragwerk	Stütze	Beton C30/37	0,8	m ³	2365	kg/m ³	1892 kg
		Bewehrungsstahl	86,5	kg			86,5 kg
		Gesamt					1978,5 kg
	Binder	Beton C30/37	2,4	m ³	2365	kg/m ³	5676 kg
		Bewehrungsstahl	486	kg			486 kg
		Gesamt					6162 kg
	Gesamt	2 Stützen und 1 Binder					10119 kg
Gesamt	Rahmen	2 Fundamente, 2 Stützen, 1 Binder					18950,9 kg
Holztragwerk							
		Baustoff	Wert	Einheit	Faktor	Einheit	Masse
Fundament		Beton C25/30	1,71	m ³	2365	kg/m ³	4044,15 kg
		Bewehrungsstahl BSt 500 SA	91	kg			91 kg
		Gesamt					8270,3 kg
Tragwerk	Stütze	Brettschichtholz Nadelholz	0,658	m ³	460	kg/m ³	303 kg
	Anschluss	Stahl, feuerverzinkt	0,014784	m ³	7850	kg/m ³	116 kg
		Gesamt					419 kg
	Binder	Brettschichtholz Nadelholz	1,8	m ³	515	kg/m ³	927 kg
	Gesamt	2 Stützen, 2 Anschlüsse und 1 Binder					1764 kg
Gesamt	Rahmen	2 Fundamente, 2 Stützen u. Anschlüsse, 1 Binder					10035 kg

Quelle: Eigene Darstellung nach Daten aus Kocker und Möller 2016 (Stahl- und Stahlbetontragwerk) und Oberhaidinger 2023 (Holztragwerk)

9.2 Ergebnisse für alle 16 Wirkungsindikatoren

Tabelle 9-2: Ergebnisse für alle 16 Wirkungsindikatoren

Wirkungsindikator	Einheit	Ergebnis Stahl-konstruktion, feuerverzinkt	Ergebnis Stahl-konstruktion, nass-beschichtet	Ergebnis Stahlbeton-konstruktion	Ergebnis Holz-konstruktion
Acidification	mol H+ eq	1,46E+02	1,57E+02	1,50E+02	1,48E+02
Biomass - renewable and non-renewable	MJ	1,11E+04	1,61E+04	6,20E+03	5,40E+05
Climate change	kg CO2 eq	3,04E+04	3,59E+04	3,59E+04	2,91E+04
Climate change - Biogenic	kg CO2 eq	1,39E+02	1,48E+02	7,24E+01	8,45E+01
Climate change - Fossil	kg CO2 eq	3,02E+04	3,53E+04	3,58E+04	2,90E+04
Climate change - Land use and LU change	kg CO2 eq	3,72E+01	4,17E+02	2,67E+01	4,75E+01
Ecotoxicity, freshwater	CTUe	1,01E+06	9,51E+05	6,50E+05	7,67E+05
Ecotoxicity, freshwater - inorganics	CTUe	1,37E+05	1,11E+05	7,12E+04	1,09E+05
Ecotoxicity, freshwater - metals	CTUe	8,59E+05	7,80E+05	5,68E+05	6,45E+05
Ecotoxicity, freshwater - organics	CTUe	1,83E+04	6,04E+04	1,06E+04	1,24E+04
Eutrophication, freshwater	kg P eq	1,29E+01	1,47E+01	9,10E+00	8,72E+00
Eutrophication, marine	kg N eq	4,44E+01	4,36E+01	4,76E+01	4,91E+01
Eutrophication, terrestrial	mol N eq	4,12E+02	4,30E+02	5,16E+02	5,24E+02
Human toxicity, cancer	CTUh	5,23E-04	5,26E-04	2,78E-04	1,82E-04
Human toxicity, cancer - inorganics	CTUh	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
Human toxicity, cancer - metals	CTUh	4,98E-04	4,95E-04	2,64E-04	1,39E-04
Human toxicity, cancer - organics	CTUh	2,52E-05	3,10E-05	1,39E-05	4,22E-05
Human toxicity, non-cancer	CTUh	1,06E-03	9,58E-04	5,19E-04	5,88E-04
Human toxicity, non-cancer - inorganics	CTUh	3,04E-04	2,34E-04	1,11E-04	1,57E-04
Human toxicity, non-cancer - metals	CTUh	7,44E-04	6,97E-04	3,96E-04	4,36E-04
Human toxicity, non-cancer - organics	CTUh	1,86E-05	3,13E-05	1,47E-05	1,45E-05
Ionising radiation	kBq U-235 eq	3,88E+03	4,34E+03	2,51E+03	1,94E+03
Land use	Pt	3,44E+05	3,67E+05	4,84E+05	4,73E+06
Ozone depletion	kg CFC11 eq	5,52E-04	7,72E-04	3,52E-04	3,89E-04
Particulate matter	disease inc.	2,46E-03	2,58E-03	3,71E-03	3,75E-03
Photochemical ozone formation	kg NMVOC eq	1,41E+02	1,85E+02	1,60E+02	1,60E+02
Renewables - water, wind, solar, geoth	MJ	2,81E+04	3,34E+04	2,18E+04	1,55E+04
Resource use, fossils	MJ	3,69E+05	4,56E+05	3,30E+05	3,09E+05

Wirkungsindikator	Einheit	Ergebnis Stahl- konstruktion, feuerverzinkt	Ergebnis Stahl- konstruktion, nass- beschichtet	Ergebnis Stahlbeton- konstruktion	Ergebnis Holz- konstruktion
Resource use, minerals and metals	kg Sb eq	6,43E-01	4,22E-01	1,43E-01	4,13E-01
Water use	m3 depriv.	1,98E+04	2,25E+04	1,82E+04	1,20E+04

Quelle: Eigene Darstellung

9.3 Detailergebnisse Kumulierter Energieaufwand

Tabelle 9-3: Detailergebnisse Kumulierter Energieaufwand

KEA, fossil [MJ pro Halle]	Stahlkonstruktion, feuerverzinkt		Stahlkonstruktion, nassbeschichtet		Stahlbeton-Konstruktion		Holzkonstruktion	
Herstellung Tragwerk	258424	70,0%	301573	66,1%	130950	39,6%	128373	41,5%
Herstellung Fundament	61601	16,7%	61601	13,5%	140162	42,4%	133477	43,1%
Montage u. Demontage	12409	3,4%	12409	2,7%	18613	5,6%	12409	4,0%
Transporte	1553	0,4%	1553	0,3%	5075	1,5%	2687	0,9%
Nutzungsphase (Instandhaltung)	0	0,0%	43675	9,6%	0	0,0%	0	0,0%
EoL	35201	9,5%	35201	7,7%	35521	10,8%	32508	10,5%
Summe	369188	100,0%	456012	100,0%	330321	100,0%	309455	100,0%
KEA, regenerativ [MJ pro Halle]								
KEA, regenerativ [MJ pro Halle]	Stahlkonstruktion, feuerverzinkt		Stahlkonstruktion, nassbeschichtet		Stahlbeton-Konstruktion		Holzkonstruktion	
Herstellung Tragwerk	24511	87,3%	25653	76,8%	15994	73,2%	10113	65,1%
Herstellung Fundament	1367	4,9%	1367	4,1%	4273	19,6%	4244	27,3%
Montage u. Demontage	57	0,2%	57	0,2%	86	0,4%	57	0,4%
Transporte	18	0,1%	18	0,1%	60	0,3%	32	0,2%
Nutzungsphase (Instandhaltung)	0	0,0%	4182	12,5%	0	0,0%	0	0,0%
EoL	2123	7,6%	2123	6,4%	1435	6,6%	1085	7,0%
Summe	28078	100,0%	33401	100,0%	21848	100,0%	15532	100,0%
KEA, biogen [MJ pro Halle]								
KEA, biogen [MJ pro Halle]	Stahlkonstruktion, feuerverzinkt		Stahlkonstruktion, nassbeschichtet		Stahlbeton-Konstruktion		Holzkonstruktion	
Herstellung Tragwerk	7735	69,7%	9687	60,2%	4210	67,9%	538003	99,6%
Herstellung Fundament	583	5,3%	583	3,6%	1679	27,1%	1652	0,3%
Montage u. Demontage	15	0,1%	15	0,1%	23	0,4%	15	0,0%
Transporte	6	0,1%	6	0,0%	20	0,3%	11	0,0%
Nutzungsphase (Instandhaltung)	0	0,0%	3029	18,8%	0	0,0%	0	0,0%
EoL	2761	24,9%	2761	17,2%	268	4,3%	624	0,1%
Summe	11100	100,0%	16081	100,0%	6200	100,0%	540305	100,0%

Quelle: Eigene Darstellung