

Vergleichende Ökobilanz von Varianten einer Hallenkonstruktion

Zusammenfassung der Studie im Auftrag des Instituts
Feuerverzinken GmbH

Schlussfassung / Bilanzversion 5

Freiburg, 31.10.2024

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

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 **Error! Reference source not found.**

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.

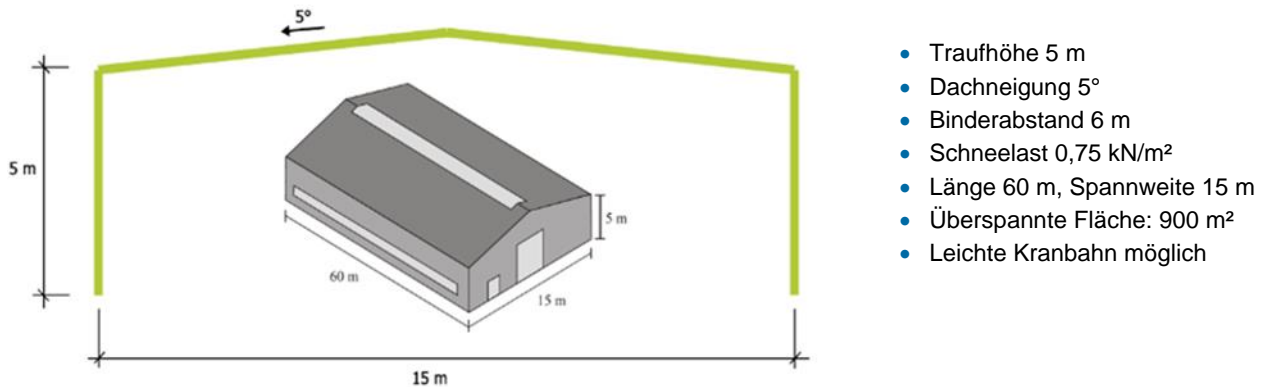
Mit der Studie soll aufgezeigt werden, welche der vier untersuchten Tragwerksvarianten einer exemplarischen Hallenkonstruktion in einer auf den Lebensweg ausgerichteten Analyse jeweils mit welchen systemspezifischen relevanten potenziellen Umweltauswirkungen verbunden ist. Aus der vergleichenden Gegenüberstellungen 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, Traufhöhe etc., siehe Abbildung 1-1) und

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.

spezifischen Nutzungsbedingungen (Nutzungsdauer, Umgebungsbedingungen, Anforderungen an den Korrosionsschutz, siehe unten).

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.

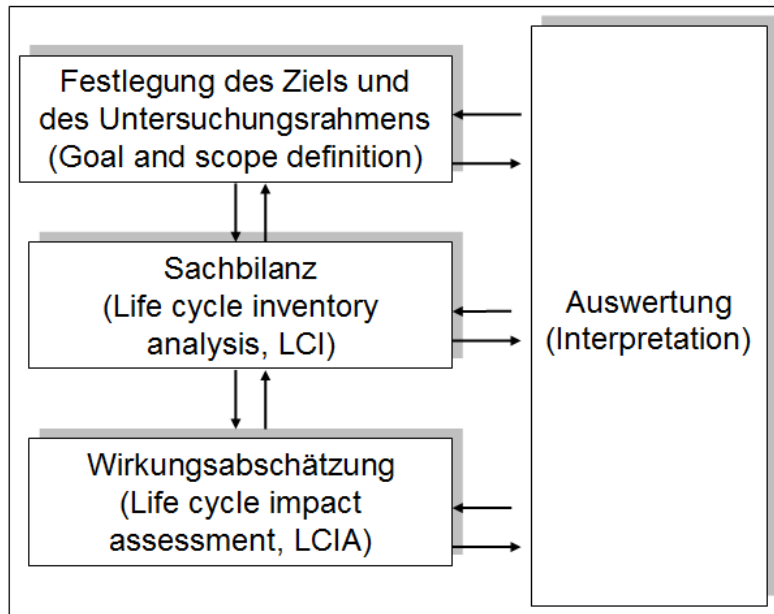
Ökobilanz als methodische Grundlage

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 der Langfassung des Berichts; diese Langfassung steht ab KW 49 als Download unter der Seite xyz.de zur Verfügung.

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 Teile 1-8 (DIN EN ISO) („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, 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.

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 **Error! Reference source not found.**

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 **Error! Reference source not found.**).
- 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 konsistente und geprüfte 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-indikator	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 %

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

Wirkungsindikator	In diesem Bericht verwendete Bezeichnung	Einheit	Kurzbeschreibung ²	Signifikanzschwelle
Water use	Inanspruchnahme von knappen Wasserressourcen	m ³ depriv.	Wirkungsbasierte Inanspruchnahme von Wasserressourcen basierend auf dem AWARE-Model 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

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 Studiersteller 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

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

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 gegebenen 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:

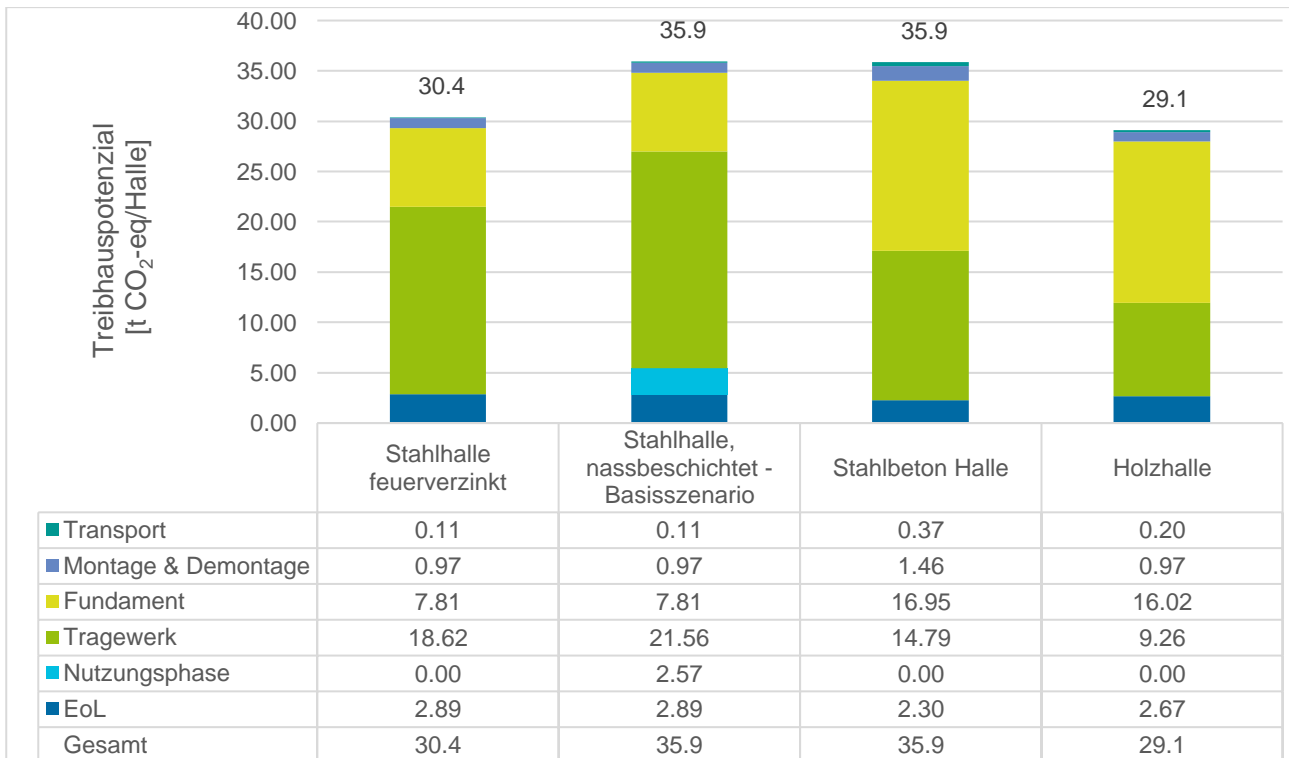
- Die Herstellung der für die untersuchte Konstruktionsvarianten eingesetzten Baumaterialien dominiert alle Indikatorergebnisse mit Beitragsanteilen zwischen 70 % bis rund 95 %. Wenn die Baumaterialien funktionell eingeteilt werden, sind es die Tragwerke und die Fundamente, welche besonders signifikant 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 **Error! Reference source not found.** 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 **Error! Reference source not found.**);
- dass bei der feuerverzinkten Stahlvariante alternative Datensätze zur Modellierung der Vorkette Zink die Ergebnisse beim THG-Potenzial nur marginal verändern (Abschnitt **Error! Reference source not found.**);
- dass der geographisch abweichende Datensatz für Transportbeton als Materialinput zur Herstellung der Fundamente als belastbar angesehen werden kann (Abschnitt **Error! Reference source not found.**).

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.

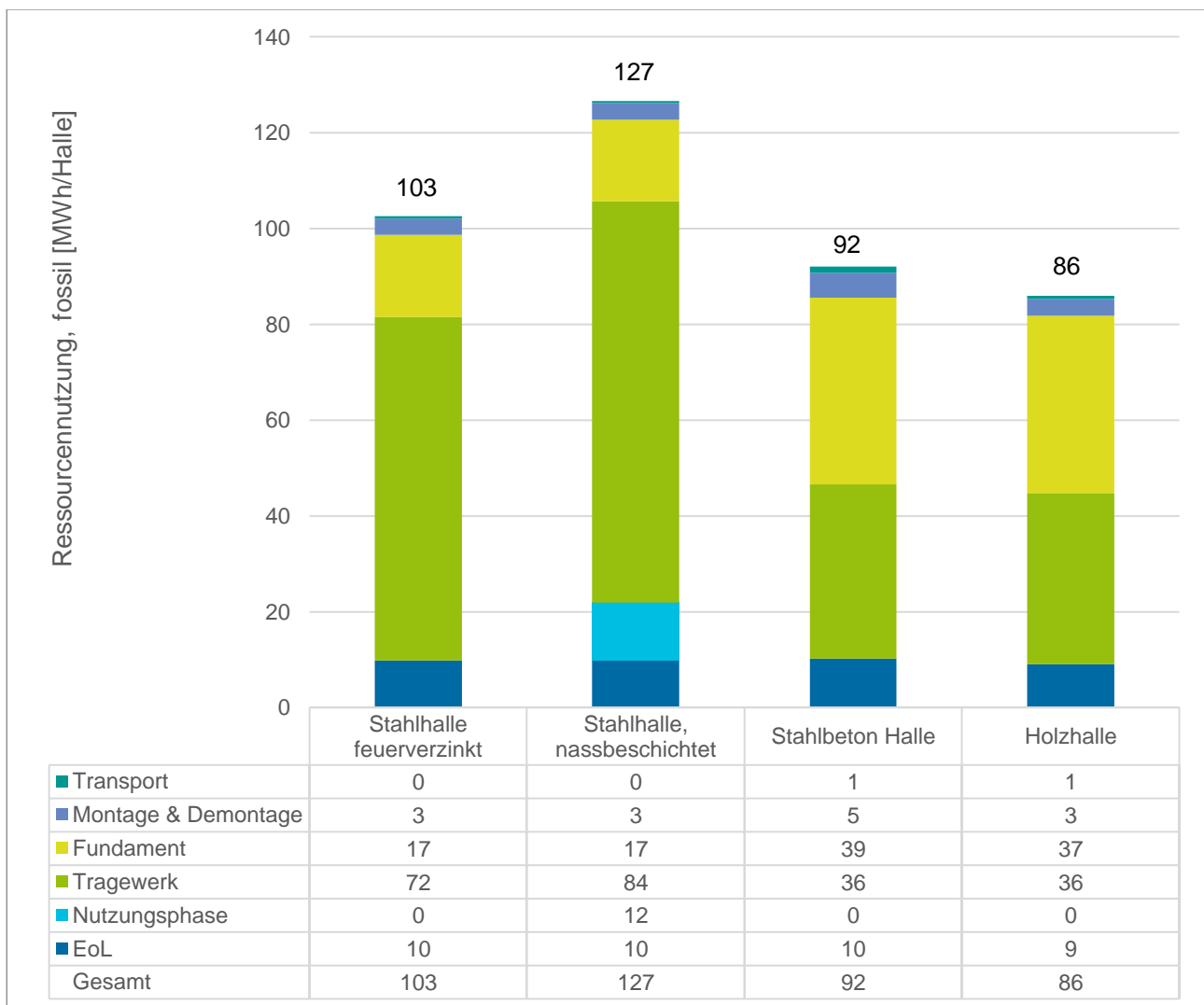
Wie bereits in Abschnitt oben ausgeführt wurde, kann nach neueren Untersuchungen nicht mehr a priori angenommen werden, dass Holz ein klimaneutraler Werkstoff ist, da bei stark bewirtschaften Wäldern die Senkenfunktion des Waldes mit Blick auf die CO₂-Bindung aus der Atmosphäre

abnimmt (Fehrenbach et al. 2022). Im gegebenem 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

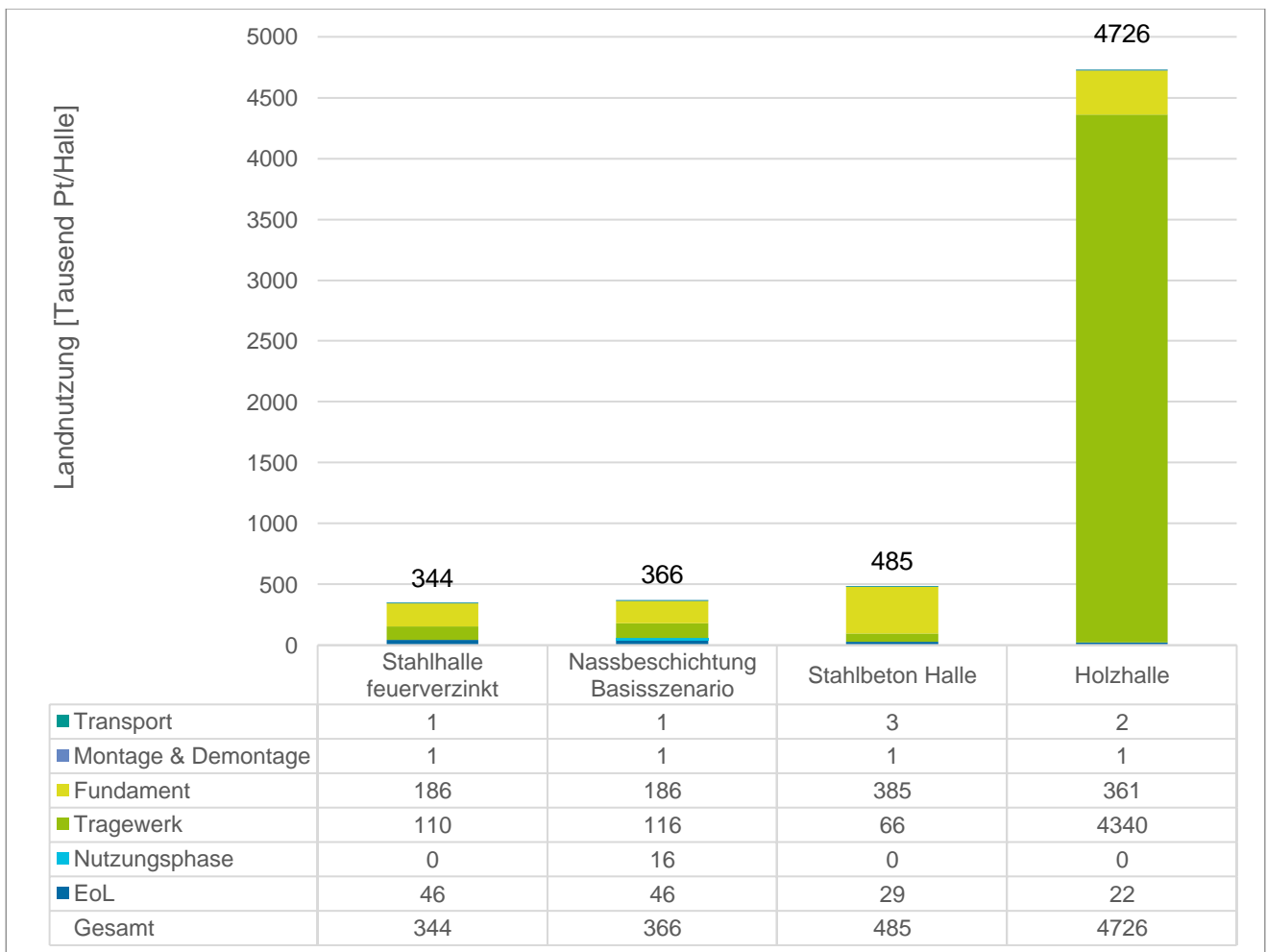


Quelle: Eigene Darstellung

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

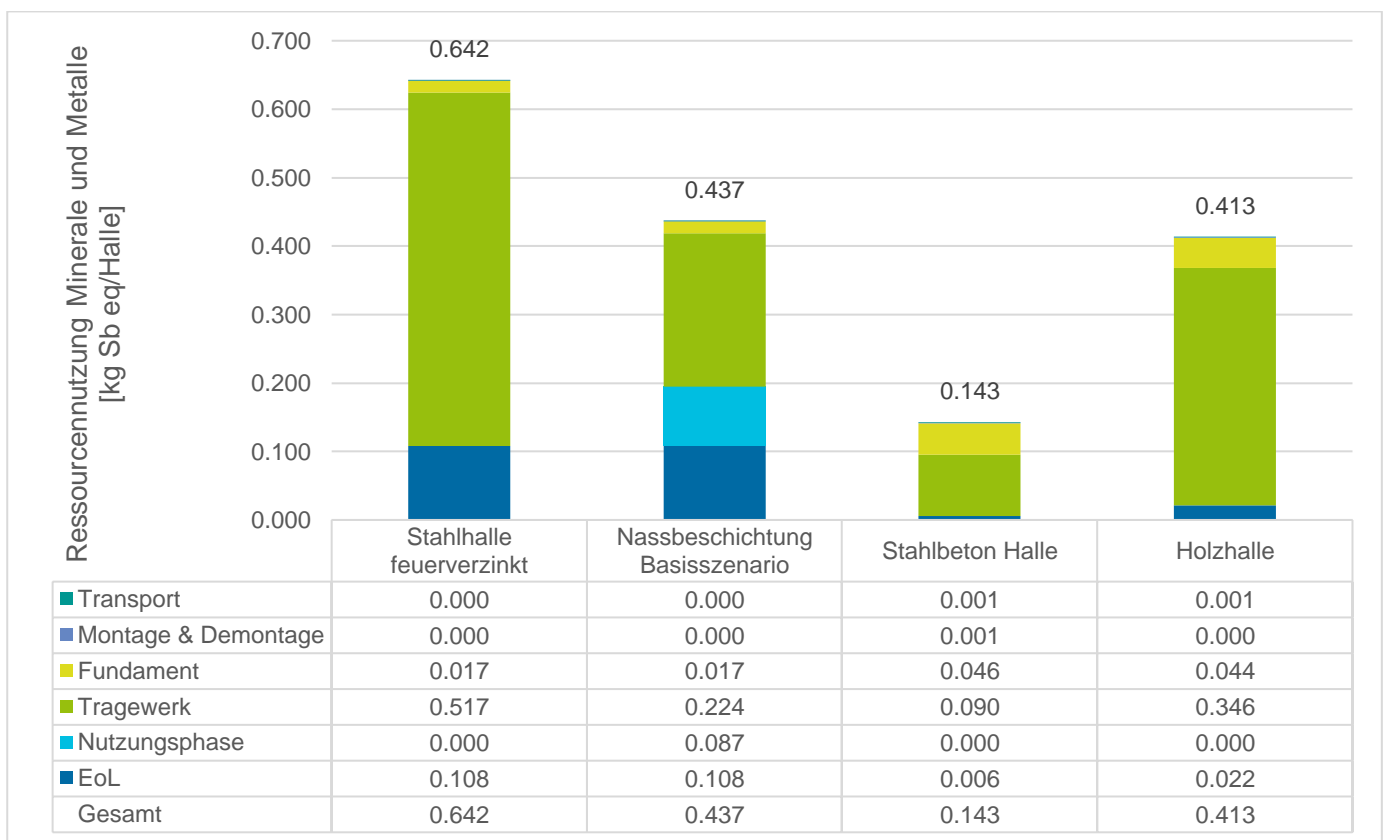


Quelle: Eigene Darstellung

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 **Error! Reference source not found.** und Abbildung 1-6).

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



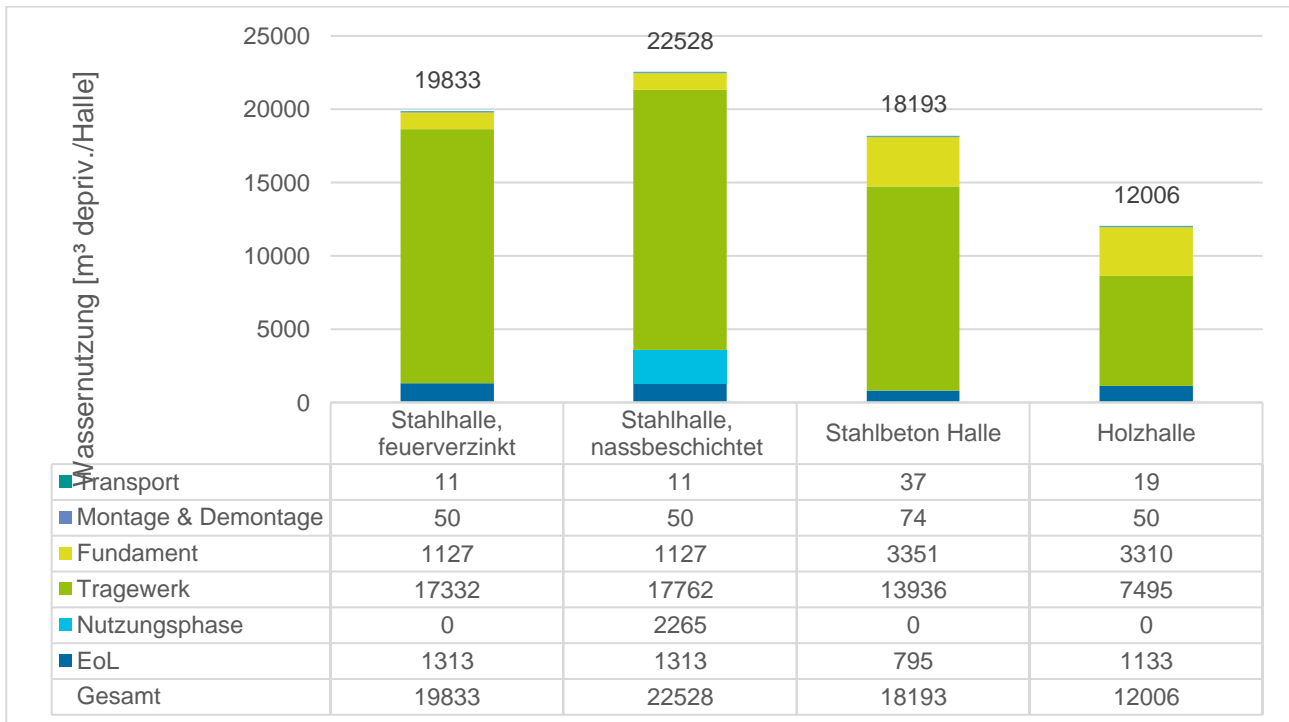
Quelle: Eigene Darstellung

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 **Error! Reference source not found.** 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

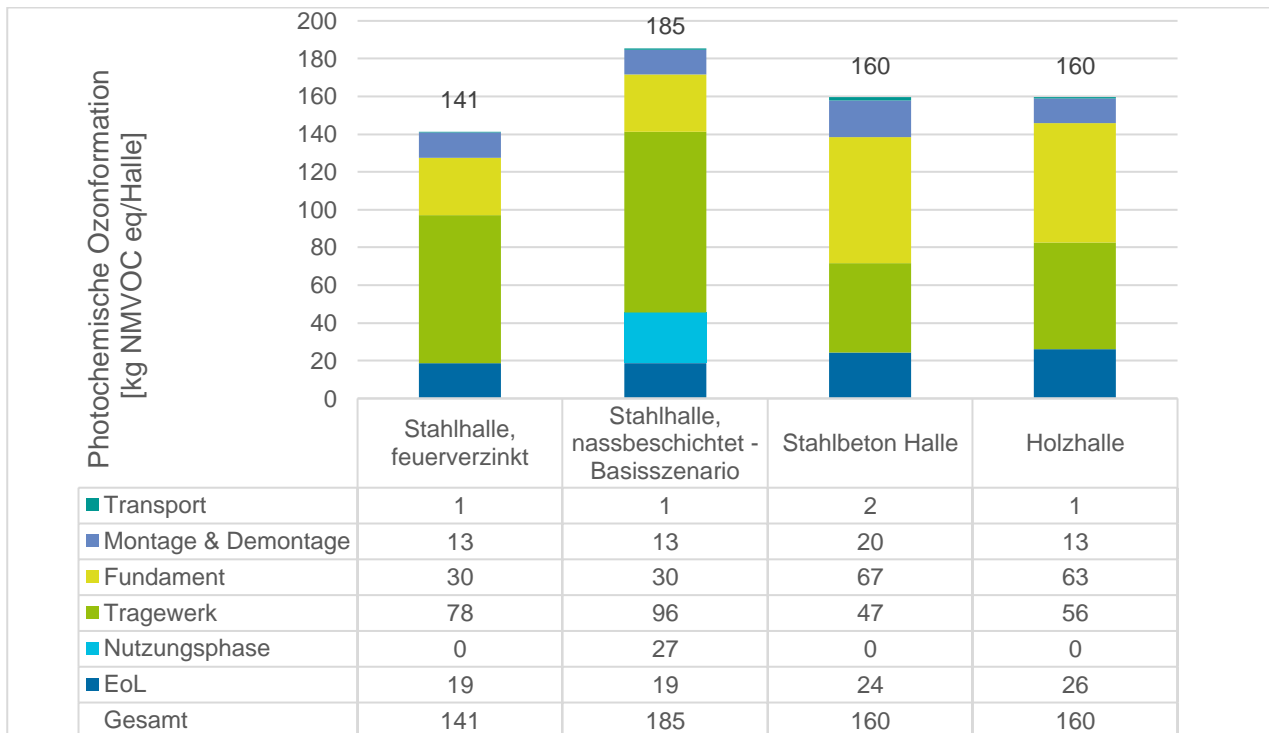


Quelle: Eigene Darstellung

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 **Error! Reference source not found.**) 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 **Error! Reference source not found.**) 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 defossiliertes 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.

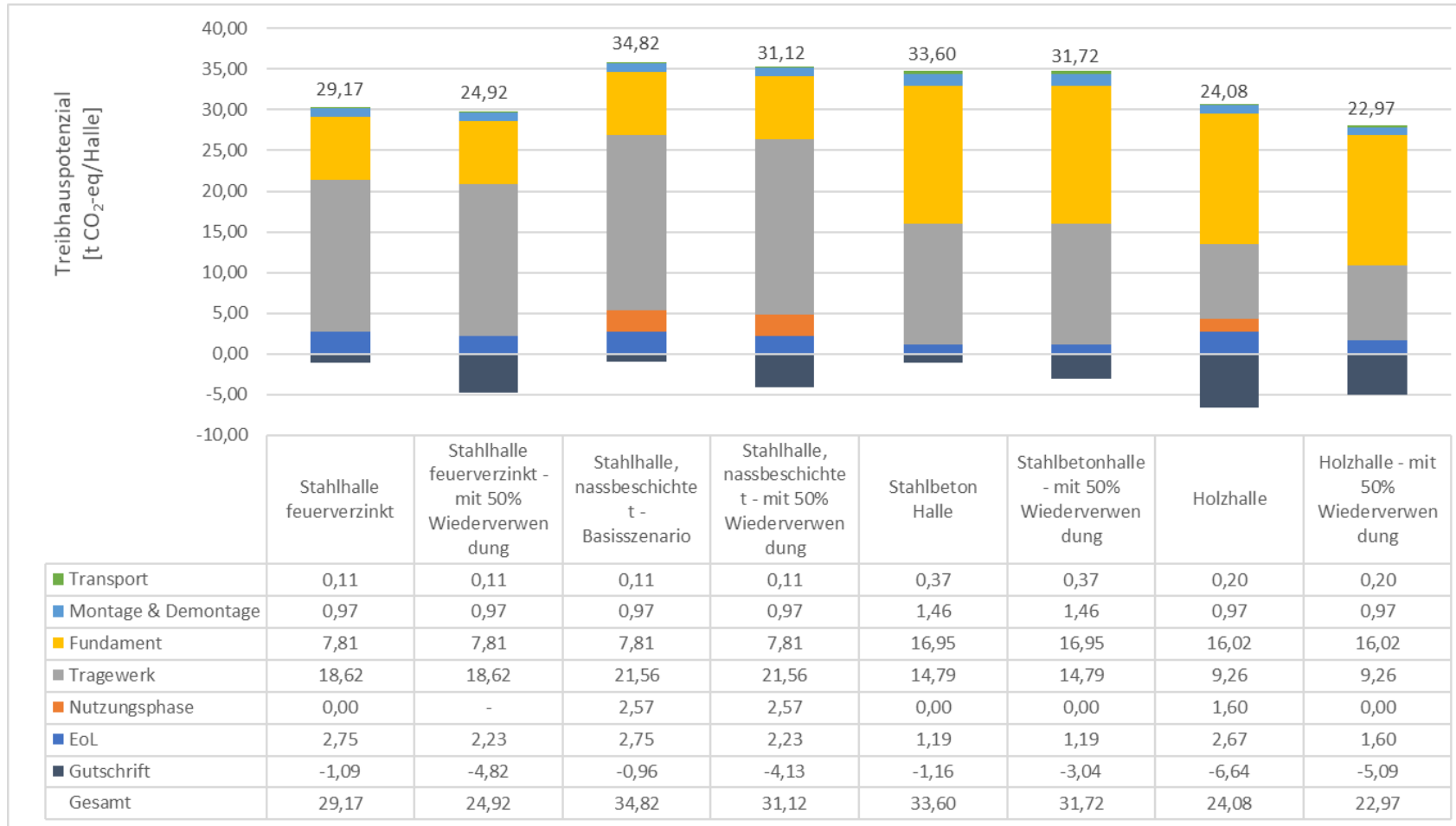
Erhöhung der Wiederverwendungsquote auf 50 %

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, da sich dadurch auch die Gutschrift für die vermiedene Energieproduktion durch die thermische Verwertung des Altholzes verringert. Da Holz so bilanziert wird, als wäre es klimaneutral, erhält es bei der thermischen Verwertung eine Gutschrift, während die Emissionen aus der Verbrennung des Holzes nicht bilanziert werden.
- 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.

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)