

INHALTLICHER SCHLUSSBERICHT

Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen Bauen mit Holz - von der Planung bis zum Rückbau (ZukunftLaWiBau)

APRIL 2024

IMPRESSUM

Forschungsprojekt: ZukunftLaWiBau –
Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen
Bauen mit Holz – von der Planung bis zum Rückbau

Beteiligte Partner:

RUB – Lehrstuhl Ressourceneffizientes Bauen

LfL – Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Arbeitsgruppe Landwirtschaftliches Bauwesen

TUM – Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion, Holzforschung München, Lehrstuhl für Holzwissenschaft

FUB – Fachbereich Veterinärmedizin, Institut für Tier- und Umwelthygiene

FLI – Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit

Copyright Titelabbildungen:

Fotos: Ralf Rosin, Holzforschung München, außer re. oben: Ressourceneffizientes Bauen, RUB

Zeichnungen: Georgia Perdikouri, LfL

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

Projektlaufzeit: 01.03.2020 – 31.12.2023

INHALTSVERZEICHNIS

IMPRESSUM

EINLEITUNG

TEIL A: WIRTSCHAFTLICHE TRAGKONSTRUKTIONEN

TEIL B: DAUERHAFTE KONSTRUKTIONEN

TEIL C: DESIGN FOR REUSE

TEIL D: LCA GEBÄUDE

TEIL E: HYGIENE

TEIL F: HOLZPRODUKTE

TEIL G: RESSOURCENPOTENZIAL

ANHANG:

PLANUNGSLEITFADEN

EINLEITUNG

Die Verwendung von Holz im landwirtschaftlichen Bauen steht in einer sehr langen Tradition. In den letzten Jahrzehnten hat die Bedeutung von Holz in diesem Bereich gegenüber anderen Baumaterialien abgenommen. Mit dem Projekt „Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen Bauen mit Holz - von der Planung bis zum Rückbau (ZukunftLaWiBau)“ wird daher das Ziel verfolgt, technische und wirtschaftliche Informationen und Erfolgsfaktoren für das landwirtschaftliche Bauen in Holzbauweise zur Verfügung zu stellen.

Hierzu wurden Planungsgrundlagen für landwirtschaftliche Gebäude in Form eines umfassenden Typenkatalogs für landwirtschaftliche Nutzgebäude zur Tier- und Lagerhaltung erarbeitet. Darüber hinaus wurden die Wirtschaftlichkeit und Dauerhaftigkeit von landwirtschaftlichen Gebäuden betrachtet, die Datenbasis zu Klima- und Ressourcenschutz der landwirtschaftlichen Bauten aus Holz dargestellt sowie Fragestellungen der Rückbaubarkeit adressiert. Zudem wurden aktuelle Fragestellungen der Hygiene und Holzprodukte berücksichtigt, Möglichkeiten zur Nutzung des Potenzials des vorhandenen Holzes vorgeschlagen und regionale Wertschöpfungsketten in ländlichen Räumen angesprochen.

Diesem Schlussbericht sind die Ergebnisse, ausführliche Beschreibungen und Erläuterungen der einzelnen Teile zu entnehmen. Ergänzend zu diesem Schlussbericht wurde ein Planungsleitfaden erarbeitet, welcher dem Anhang zu entnehmen ist.

Das Projekt wurde durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) unter dem Förderkennzeichen 2220HV036 gefördert.

Ein Verbundprojekt von Ruhr-Universität Bochum, Technische Universität München, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft Freising, Freie Universität Berlin und Friedrich-Loeffler-Institut Insel Riems.

ANHANG

Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen Bauen mit Holz - von der Planung bis zum Rückbau (ZukunftLaWiBau)

**Schlussbericht über o.g. Forschungsvorhaben
gefördert unter dem Kennzeichen: 2220HV036
im Rahmen „Landwirtschaftliches Bauen mit Holz“ des Förderprogramms „Nachwach-
sende Rohstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)**

TEIL A: Wirtschaftliche Tragkonstruktionen

Landesanstalt für Landwirtschaft
Institut für Landtechnik und Tierhaltung
Landwirtschaftliches Bauwesen

Projektbearbeitung:

Jochen Simon (LfL)
Ferdinand Oberhardt (LfL)
Georgia Perdikouri (LfL)

Inhaltsverzeichnis

1.	Vorbemerkungen.....	5
2.	Status Quo beim Bau landwirtschaftlicher Nutzgebäude	6
3.	Funktion landwirtschaftlicher Nutzgebäude	8
4.	Wirtschaftlichkeit	16
5.	Weiterführende Literatur	23
6.	Typenkatalog.....	24
6.1.	Anwendungsbeispiel.....	24
6.2.	Rinder	26
6.3.	Schweine	56
6.4.	Kleinwiederkäuer	64
6.5.	Pferde	74
6.6.	Lager.....	76
7.	Schnittstelle CAD-CNC.....	78
8.	Verzeichnisse	86
8.1.	Abbildungsverzeichnis.....	86
8.2.	Tabellenverzeichnis.....	88
8.3.	Literaturverzeichnis	89

Bauweise	Ausrichtung Primärkonstruktion	Tragsystem	Variante	Namen	
Skelettbauweise [Sk]	quer [Q]	Stütze-Binder-System [StüB]	1 Strebe innen [1StrI]	Traufe [Tr] ----- Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-1StrI-Tr-PD7°
				First [Fi] ----- Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-1StrI-Fi-PD7°
				links [L] ----- Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-1StrI-L-SD7°
				rechts [R] ----- Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-1StrI-R-SD7°
			1 Strebe außen [1StrA]	Traufe [Tr] ----- Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-1StrA-Tr-PD7°
				First [Fi] ----- Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-1StrA-Fi-PD7°
				links [L] ----- Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-1StrA-L-SD7°
				rechts [R] ----- Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-1StrA-R-SD7°
			2 Streben innen [2StrI]	Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-2StrI-PD7°
				Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-2StrI-SD7°
			2 Streben außen [2StrA]	Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-2StrA-PD7°
				Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-2StrA-SD7°
		1 eingespannte Stütze [eSt]	Traufe [Tr] ----- Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-1eSt-Tr-PD7°	
			First [Fi] ----- Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-1eSt-Fi-PD7°	
			links [L] ----- Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-1eSt-L-SD7°	
			rechts [R] ----- Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-1eSt-R-SD7°	
		2 eingespannte Stützen [eSt]	Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-2eSt-PD7°	
			Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-2eSt-SD7°	
		Rahmen [R]	2 Gelenke [2G]	Pulldach [PD]	Sk-Q-R-2G-PD7°
				Satteldach [SD]	Sk-Q-R-2G-SD7°
			3 Gelenke einhüftig [1H]	Traufe [Tr] ----- Pulldach [PD]	Sk-Q-R-1h-Tr-PD7°
				First [Fi] ----- Satteldach [SD]	Sk-Q-R-1h-Fi-PD7°
				links [L] ----- Satteldach [SD]	Sk-Q-R-1h-L-SD7°
				rechts [R] ----- Satteldach [SD]	Sk-Q-R-1h-R-SD7°
Gelenk am First [3GF]	Satteldach [SD]		Sk-Q-R-3GF-SD7°		

1 Vorbemerkung



Abb. 1: Maschinenhalle in Holzbauweise

Holz kann im landwirtschaftlichen Bauwesen in vielfältiger Weise für Tragwerke, Wand-, Decken- und Dachkonstruktionen sowie für Einrichtungen in Stallanlagen, Lager- und Reithallen verwendet werden (Abb.1). Trotz einer langen Tradition hat die Bedeutung von Holz bei der Errichtung dieser Gebäudetypen in den letzten Jahrzehnten, gegenüber anderen Baumaterialien, abgenommen bzw. wird in manchen Regionen Deutschlands nicht mehr verwendet und durch Stahl, Blech, Ziegel, Beton und Kunststoffe ersetzt. Dabei ist Holz der einzige in großen Mengen nachwachsende und damit nachhaltig erzeugbare Baustoff, der vielen land- und forstwirtschaftlichen Betrieben als eigene Ressource zur Verfügung steht. Als Werkstoff ist es sehr leistungsfähig, besitzt hohe spezifische Biege- und Zugfestigkeiten sowie wichtige bauphysikalische Eigenschaften, die z. B. in der Tierhaltung im Zuge des Klimawandels eine immer wichtigere Rolle spielen.

Mit dem Projekt „Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen Bauen mit Holz - von der Planung bis zum Rückbau (ZukunftLaWiBau)“ wurde das Ziel verfolgt, technische und wirtschaftliche Informationen, zusammen mit Erfolgsfaktoren für Landwirte als Bauherren sowie Berater, Planer und ausführende Firmen zur Steigerung bzw. Reaktivierung des Holzbauanteils im landwirtschaftlichen Bauwesen zu erarbeiten. Durch die Projektpartner wurden hierzu die Dauerhaftigkeit sowie Fragen der Rückbaubarkeit bzw. Wiederverwendung von Holzbauteilen untersucht. Dazu werden die Möglichkeiten zur Nutzung des Potenzials örtlich verfügbaren Holzes sowie regionaler Wertschöpfungsketten in ländlichen Räumen dargestellt. Zum Klima- und Ressourcenschutz landwirtschaftlicher Nutzgebäude aus Holz konnte eine neue Datenbasis geschaffen werden. Eine zentrale Fragestellung bildete der Hygienestatus von Holz und Holzprodukten¹.

Im vorliegenden Teilprojekt wurden, ausgehend von der sogenannten kleinsten Funktionseinheit, zunächst typische Verfahren in der Tier- und Lagerhaltung, bis hin zu Reithallen, hinsichtlich des nutzungsspezifischen Flächenbedarfs bzw. der Gebäudegeometrie untersucht. Um positive Effekte für eine wirtschaftliche Planung und im Holzbund zu generieren, wurde die sich daraus ergebende Vielfalt an Abmessungen in sogenannten Spannweitengruppen harmonisiert. Da aus den spezifischen Anforderungen (Begeh- bzw. Befahrbarkeit, hygienische Aspekte) nicht alle verfügbaren Tragwerkstypen für den Oberbau geeignet sind, wurden diese auf ihre Verwendbarkeit geprüft. Spannweitengruppen und Tragwerkssystematik waren gleichzeitig Basis für eine Untersuchung der Wirtschaftlichkeit. In einem ersten Schritt wurde über eine statische Vordimensionierung der jeweilige Holzverbrauch und, darauf aufbauend, die Gestehungskosten ermittelt.

Da sich die nutzungsspezifischen Maße und Flächen der Verfahren durch neue Erkenntnisse aus Praxis, Beratung und Forschung, Anforderungen aus Tierwohl, Hygiene, Arbeitssicherheit sowie dem technischen Fortschritt laufend verändern, wurde auf spezifische Maßangaben verzichtet. Diese können allenfalls indirekt aus den sog. Spannweitengruppen (s. Kap. 3 Funktionen landwirtschaftlicher Nutzgebäude (S. 14 f.) abgeleitet werden. Damit kann dieser Leitfaden nicht die Beschäftigung mit der einschlägigen Literatur zu Stallbau und Lagerhaltungsverfahren ersetzen.

Zuletzt sind die Potenziale der computerbasierten Gebäude-, Holzbau- bzw. Abbundplanung unter dem Aspekt der digitalen Datenweiterleitung ohne Bruch dargestellt. Neben einer wirtschaftlich sinnvollen Harmonisierung der Tragwerke können damit gravierende Hemmnisse bei der Realisierung wirtschaftlicher und gleichzeitig nutzungsspezifischer Anlagen als zukunftsweisende Option abgebaut werden.

¹ Veröffentlichungen der anderen Projektpartner

2 Status Quo beim Bau landwirtschaftlicher Nutzgebäude

Ein Merkmal landwirtschaftlicher Nutzgebäude ist ein hoher Grad der Standardisierung bei den baulich umgesetzten Gebäudetypen. Sowohl in der Tier- als auch Lagerhaltung werden Satteldachhallen, die aus dem Gewerbebau entlehnt sind, für einen Großteil der Nutzungen verwendet (Abb. 3). Kriterien der Entscheidung für einen bestimmten Gebäudetyp bei den Landwirten als Bauherren sind vermeintliche Vorteile beim Investitionsbedarf und die leichte Verfügbarkeit über Generalüber- bzw. -unternehmer, die häufig von der Beratung über die Planung und Bauantragstellung bis hin zur schlüsselfertigen Übergabe der Projekte die Herstellung von Landwirtschaftlichen Nutzanlagen als Gesamtleistung anbieten.

Sowohl in der Praxis als auch in der angewandten Forschung zeigt sich, dass vor allem im Hinblick auf weiterhin steigende Gestehungskosten, aber auch auf differenzierte Nutzungsanforderungen von diesem Standard abweichende, spezifische Tragwerks- und Gebäudetypen Vorteile hinsichtlich ihrer wirtschaftlichen Umsetzung zeigen. Weitere Argumente sind eine verfahrensspezifischen Funktionsweise, Zukunftsfähigkeit durch Erweiterbarkeit bis hin zu einem anderen Erscheinungsbild in der Kulturlandschaft durch kleinere Kubaturen (Abb. 4).

Entscheidend für die Baukosten ist die überbaute Fläche je Nutzeinheit, die Bauweise der Anlage, das eingesetzte Tragwerk sowie die Standards bei der baulich technischen Ausführung. Das Einsparpotenzial einer nutzungsspezifischen baulichen Ausführung kann an zwei Planmodellen für einen Milchviehstall in unterschiedlicher Bauweise gezeigt werden (Abb. 2). Der eigentliche Stallbereich ist bei Planmodell I in einer sog. „mehrhäusigen Bauweise“ konzipiert. Hier sind die Funktionsbereiche für Liegen, Laufen und Fressen bzw. die Futtervorlage in voneinander getrennten Teilbaukörpern untergebracht. Im Unterschied dazu werden diese Funktionsbereiche bei den Planmodellen IIa und IIb von einem großen einhäusigen Gebäude überdacht.

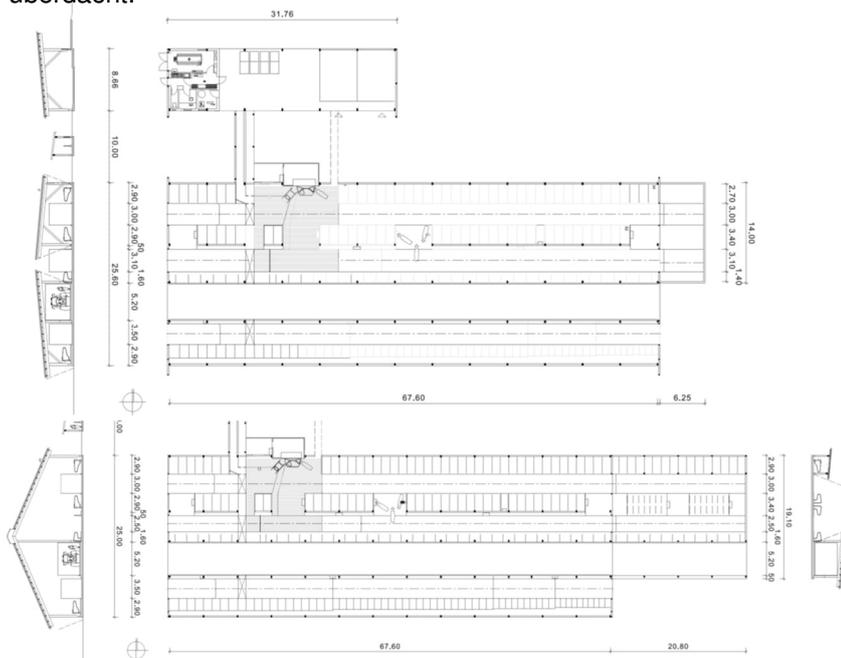


Abb. 2: Planmodelle I (mehrhäusig) und II (einhäusig) für den Vergleich des Investitionsbedarfs bei Milchviehställen

Abb. 3: Beispiele für standardisierte Stallanlagen in Holzbauweise für die Haltung von Milchvieh



2 Status Quo beim Bau landwirtschaftlicher Nutzgebäude



Abb. 4: Grafischer Vergleich der Kubatur für eine mehr- und einhäusige Stallanlage

Bei Planmodell IIa wurden Stützen im Gebäudeinnern zur Reduzierung der Spannweite, bei Planmodell IIb eine frei spannende Konstruktion angenommen. Beide Planmodelle sind mit einem separaten Technikgebäude mit Sonderbereichen (Abkalbebuchten, Kälberhaltung) ausgestattet.

Da zwischenzeitlich von Seiten des Gesetz- bzw. Verordnungsgebers (z. B. EU-Öko-Verordnung für Biobetriebe), den Vorgaben aus der staatlichen Förderung und dem Lebensmitteleinzelhandel nicht überdachte Laufhöfe gefordert werden, sind diese in den Planmodellen berücksichtigt. Bei Planmodell I befindet sich der nicht überdachte Auslauf durch die mehrhäusige Bauweise zwischen den Teilbaukörpern bzw. wird zur Erreichung der Flächenvorgaben durch einen kleinen separaten Laufhof giebelseitig ergänzt. Bei den Planmodellen II müssen zur vorhandenen Stallgrundfläche zusätzliche, nicht überdachte Laufhöfe geschaffen werden, die entsprechend der aktuellen Tierwohlempfehlungen mit Komforteinrichtungen (überdachte Liegeboxen, geschützte Standplätze, zusätzliche Fressplätze am verlängerten Futtertisch) ausgestattet werden. Dieser zusätzliche Aufwand ist bei der mehrhäusigen Bauweise nicht notwendig, da - bis auf die Verlängerung des nicht überdachten Auslaufs zur Erreichung der vorgeschriebenen nicht überdachten Flächen - sämtliche Anforderungen an zukunftsfähige Stallanlagen für die Haltung von Milchvieh durch die, im Gebäude bereits vorhandene Stalleinrichtung erfüllt sind.

Im Vergleich der schlüsselfertigen Anlagen zeigt sich, dass die mehrhäusige Anlage mit ca. 12.920 €/Kuhplatz gegenüber 16.560 €/Kuhplatz (Modell IIa) bzw. 17.880 €/Kuhplatz (Modell IIb) um 22 - 28 % günstiger ist (Tab. 1). Dieses Einsparpotenzial wird noch größer, wenn der Technikbereich - wie in vielen Anlagen nach wie vor üblich - in der teureren Liegehalle integriert ist. Das Beispiel zeigt deutlich, wie durch ein funktionsgerechtes Gebäude, im Zusammenspiel aus der Nutzung von Vollholz und einem geringerem Material-, Herstellungs-, Transport- und Gestehungsaufwand der Investitionsbedarf bei gleicher Funktionalität deutlich reduziert werden kann.

Tab. 1: Vergleich des Investitionsbedarfs der Planmodelle I (mehrhäusig) und II (einhäusig) für Milchviehställen (Kosten netto | Stand 2023)

	Stallanlage I:		Stallanlage IIa:		Stallanlage IIb:	
	Zwei-Reiher, mehrhäusig, mit Auslauf		Zwei-Reiher, einhäusig, mit Stütze, mit Auslauf		Zwei-Reiher, einhäusig, freitragend, mit Auslauf	
Fläche	911 m ²		1.066 m ²		1.066 m ²	
Tierplätze:						
Milchkühe	74		74		74	
davon Trockensteher	12		12		12	
Stallfläche:	12,3 m ² / Tier		14,4 m ² / Tier		14,4 m ² / Tier	
	Liegehalle	Technikgebäude	Liegehalle	Technikgebäude	Liegehalle	Technikgebäude
Nebenkosten	16.000	10.700	16.000	10.700	16.000	10.700
Erdarbeiten	47.700	11.600	47.900	11.600	47.900	11.600
Unterbau (Stahlbeton)	238.800	29.400	263.200	29.400	263.200	29.400
Gebäude (inkl. Wände, Tore, Ausbau)	321.000	93.500	405.300	93.500	503.400	93.500
Stalleinrichtung (inkl. Montage)	67.300	10.100	67.300	10.100	67.300	10.100
Installation Strom und Wasser, Sanitär	59.100	7.700	59.100	7.700	59.100	7.700
Schieberbahn (inkl. Montage)	26.600		26.600		26.600	
Melktechnik mit Kühlung und Fütterung	153.800	51.300	153.800	51.300	153.800	51.300
zusätzlicher Laufhof (Erdarbeiten, Unterbau, Gebäude, Stalleinrichtung, Schieberbahn)	25.800		186.500		186.500	
Summe	956.100	214.300	1.225.700	214.300	1.323.800	214.300
	1.170.400		1.440.000		1.538.100	
Euro / TP	12.920	2.900	16.560	2.900	17.880	2.900
	15.820		19.460		20.790	

3 Funktionen landwirtschaftlicher Nutzgebäude

Verfahren in der Nutztier- und Lagerhaltung

Landwirtschaftliche Nutzgebäude werden, wie andere Gebäudegattungen auch, über den Grundriss und Schnitt geplant. Beide werden aus der Zuordnung der Funktionsbereiche, deren verfahrensspezifische Flächenbedarfe, Funktionsmaße und Höhen entwickelt. Die Anforderungen an die Ausgestaltung der Funktionsbereiche ergibt sich z. B. in der Tierhaltung aus den verfahrensspezifischen Lebensabschnitten, die die im jeweiligen Funktionsbereich gehaltenen Tiere durchlaufen (s. Tab. 2).

3.1 Stallanlagen

Auf landwirtschaftlichen Betrieben werden hauptsächlich Rinder, Schweine, Schafe und Ziegen (Kleinviederkäuer), Geflügel, Wild und Pferde als Nutztiere gehalten (Abb. 5). Dabei können einzelne Tier-Arten bzw. -Rassen in bestimmten Verfahren ganzjährig im Freien gehalten werden (z. B. Mutterkühe, Zuchtsauen / Mastschweine in Hüttenhaltung), soweit sie physiologisch und anatomisch an die Außenklimabedingungen angepasst sind und die klimatischen Verhältnisse (insb. Wind, Temperaturen und Niederschläge) sowie die Bodenbeschaffenheit dies zulassen. In der überwiegenden Zahl werden Nutztiere aber saisonal bis ganzjährig in Gebäuden aufgestellt.



Abb. 5: Stallanlage für Milchvieh

Produktions- und Funktionsbereiche

Über die Abläufe und Funktionen in Stallanlagen werden Produktions- und Funktionsbereiche unterschieden. Die Produktionsbereiche ergeben sich aus den Phasen, die die Tiere im jeweiligen Haltungsverfahren durchlaufen. Am Beispiel der Milchviehhaltung kann der Beginn des Produktionszyklus im besamten weiblichen Jungvieh (Färse) und dem Abkalben oder aber im Zukauf von Jungtieren zum Aufbau eines eigenen Milchviehbestands (Remontierung) gesehen werden (Tab. 2). Mit dem Abkalben beginnt für das Muttertier die Phase der Milchproduktion (Laktation), für das Kalb die Phase des Heranwachsens

Tab.2: Beispielhafte Übersicht der Produktions- und Funktionsbereiche in einer Stallanlage für Milchvieh

Stallanlage für Milchvieh (Haltungsverfahren: Liegeboxen-Laufstall)								
Produktionsbereich - Laktierende Abkalbende Fresh-Cows								
Gebäudeunterteilung	Gebäude			Abkalbende ²	Fresh-Cows ¹	Kälber	Jungvieh	
	Abteil							
	Bucht	Laktierende ¹	Trockensteher	Transitkühe	Abkalbende ²	Fresh-Cows ¹	Kälber	Jungvieh
	Box							
Funktionsbereich - Laktierende Abkalbende Fresh-Cows								
Gebäude					Tierproduktentnahme Lagerung Verarbeitung			
					- Melkstand mit Wartebereich			
					- Technik- Tankräume			
Abteil								
Bucht	Liegen - Tiefboxen ¹ - Hochboxen ¹ - Flachstreu ² - Tiefstreu ²	Laufen - Betonplatte ¹ - Betonspalten ¹ - Flachstreu ² - Tiefstreu ²	Fressen - Betonplatte - Betonspalten - Flachstreu ² - Tiefstreu ²	Futtermontage - Betonplatte	Selektion - Tiefboxen - Hochboxen		Kranke - Flachstreu - Tiefstreu	
Box								

3 Funktionen landwirtschaftlicher Nutzgebäude

Verfahren in der Nutztier- und Lagerhaltung

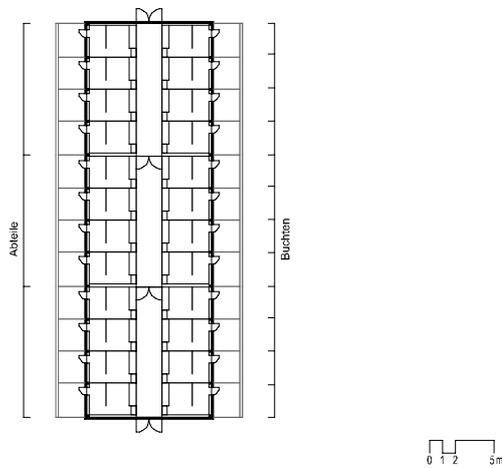


Abb. 6: Zuchtsauenstall mit Abteilen und Buchten

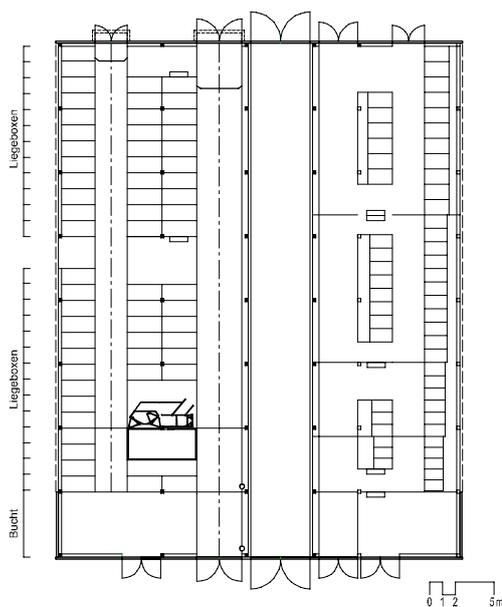


Abb. 7: Milchviehstall mit Liegeboxen und Abkalbebuchten

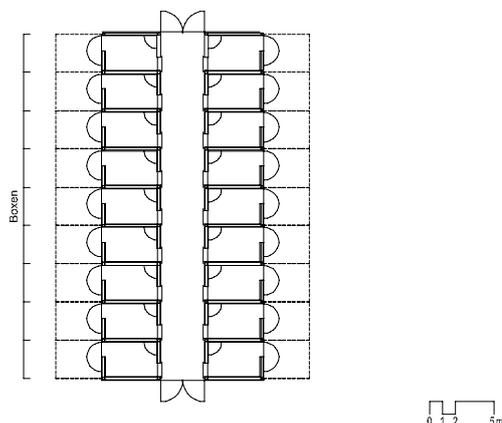


Abb. 8: Pferdestall mit Boxen (Ausschnitt)

über das Jungtier bis zur erstbesamten Färse (bzw. Kalbin). Wird das Muttertier ein zweites Mal besamt, durchläuft es vor dem Abkalben die Phase des Trockenstellens, in der nicht mehr gemolken wird und kommt von dort, ggf. über den Transitbereich, wieder in den Abkalbbereich. Insgesamt laufen dann Muttertiere und eigene Nachzucht in einer Herde gemeinsam.

Bei der Planung und baulich-technischen Umsetzung der zu den jeweiligen Produktionsbereichen zugehörigen Funktionsbereiche müssen im Tierbereich artspezifische Verhaltens- und Nutzungsansprüche berücksichtigt werden. Sie sind in der Regel nach den spezifischen Bedürfnissen der Tiere untergliedert:

- Liegen (Ruhen, Wiederkäuen)
- Laufen (Deckung artgemäßer Bewegungsbedürfnisse, Wühlen, Scharen und Picken, Erreichen anderer Funktionsbereiche (z. B. Wartebereich vor Melkstand) sowie soziale Interaktion)
- Futter- und Wasseraufnahme
- Koten und Harnen.

Räumliche Unterteilung von Stallanlagen

In den wenigsten Stallanlagen wird der Tierbestand über die gesamte Dauer des Haltungsverfahrens in einem großen, nicht untergliederten Gebäude (Einraumstall) gehalten. Die baulichen Anlagen werden vielmehr entsprechend des gewählten Haltungsverfahrens (z. B. Milchvieh-, Mastrinder- oder Mutterkuhhaltung) und der dazugehörigen Produktions- und Funktionsbereiche (s. u.) unterteilt.

Bei der räumlichen Einteilung werden zunächst Abteile für eine oder mehrere Gruppen (z. B. Mastrinder, Zuchtsauen, Mastschweine, Geflügel) unterschieden (Abb. 6). Merkmal der Abteile ist eine Abtrennung durch raumabschließende Wände, die z. B. aus hygienischen Gründen, wegen der Klimaführung oder des vorbeugenden baulichen Brandschutzes in die Stallgebäude eingebaut werden. Gleichfalls für mehrere Tiere werden Buchten (z. B. div. Produktionsphasen in der Milchviehhaltung - Abb. 7, Mastrinder, Kälber in Gruppenhaltung, Mastschweine, Zuchtsauen mit Ferkeln im Abferkelbereich - Abb. 6, Ferkelaufzucht, Pferde in Gruppenhaltung) errichtet. Kennzeichen dieser ist, dass die Unterteilung durch Trenngitter und Tore, z. T. auch durch niedrige Trennwände (Sichtschutz) erfolgt. In einem Stallgebäude oder Abteil können mehrere Buchten untergebracht sein. Werden Tiere einzeln aufgestellt, spricht man von Boxen (z. B. Pferde - Abb. 8, Kälber). Räumlich sind diese voneinander, wie bei den Buchten, durch Gitter und Sichtschutzelemente getrennt, nicht aber durch raumhoch geschlossene Wände. Aus dem Stall frei zugänglich, aber jeweils von den Abmessungen her auf ein Tier abgestimmt, sind Liegeboxen (z. B. Milchviehhaltung - Abb. 7).

3 Funktionen landwirtschaftlicher Nutzgebäude

Verfahren in der Nutztier- und Lagerhaltung

Aufstallungssysteme

Aus der Ausgestaltung der einzelnen Funktionsbereiche ergeben sich unterschiedliche Aufstallungssysteme. Beispielsweise werden in der Milchviehhaltung für die laktierenden Tiere in der Regel Liegeboxen (Tiefboxen mit Einstreu oder Hochboxen mit Gummimatten) baulich ausgeführt (Abb. 9). Dazu kommen die Lauf- und Fressgänge (planbefestigte Betonflächen mit Entmistungsschieber oder Betonspalten mit darunter liegenden Güllekanälen - beide Systeme ggf. mit Gummimatten als rutschsicherem Laufbelag) sowie der Futtertisch, der nicht von den Tieren betreten wird, sondern allein der Futtervorlage dient. Das Futter wird von den Tieren vom Fressgang aus aufgenommen. Bis auf die Futtervorlage können diese Teilfunktionen auch (teilweise) zusammengefasst sein. Als Beispiel in der Mutterkuhhaltung können dies z. B. Zweiflächenbuchten mit Fressgang und eingestreuter Strohmattatze (Liege- / Laufbereich) als Tretmist- oder Tiefstreu-Aufstallung sein (Abb. 10, 11).

Neben den Funktionsbereichen für die Tierhaltung sind bei einzelnen Verfahren zusätzliche Gebäude zur Unterbringung von technischen Anlagen zur Tierproduktentnahme (Melkhaus mit Melkstand, Tank- und Technikräumen), Lagerung von Futtermitteln am Stall, mechanischer Fütterungstechnik sowie für das Stallpersonal (Hygieneschleusen, Büro-, Aufenthalts- und Sanitärräume) notwendig. Diese Gebäude beziehungsweise Gebäudeteile können in die Stallanlagen integriert, seitlich angegliedert oder freistehend ausgeführt sein und können - je nach Funktion - gleichfalls als Holzkonstruktion ausgeführt sein.

Da sehr individuell im Raumzuschnitt, sind sie nicht Teil dieser Abhandlung, können aber in den meisten Fällen von den spezifischen Gebäudebreite und -höhen in gleichartigen Tragkonstruktionen integriert werden, wie sie auch für die Nutztier- und Lagerhaltung Verwendung finden und ihm Rahmen dieses Leitfadens vorgestellt werden.

3.2 Lager- und Maschinenhallen

Für die Lagerung von Ernteerzeugnissen (inkl. Aufbereitung und Konservierung), Düngemitteln sowie sonstigen Verbrauchsmitteln (Kraftstoffe, Material), das Abstellen von Maschinen und Gerätschaften sowie die Unterbringung von stationären Aggregaten werden überwiegend Hallenkonstruktionen errichtet (Abb. 12). Aus den funktionalen und bauphysikalischen Anforderungen der jeweiligen Nutzung ergeben sich unterschiedliche Bauweisen. In der Lagerhaltung von Ernteerzeugnissen reichen die Anforderungen von einem Schutzdach gegen direkten Niederschlagseintrag von oben (Hackschnitzzellagerung) über (teil)geschlossene Hallen bis hin zu Lagerhallen für die Kartoffellagerung, die eine konstante, ganzjährige Temperierung bzw. Kühlung des Erntegutes gewährleisten müssen. Bei Maschinenhallen reicht die Bandbreite der baulichen Ausführung gleichfalls von einfachen Remisen zum Unterstellen von Maschinen oder Geräten, die aus der Tragkonstruktion und einer reinen Eindeckung bestehen, bis hin zu Gebäuden, die in Kombination mit der Wartung von Maschinen - z. B. hinsichtlich der Temperaturhaltung - die Standards der Arbeitsstättenverordnung erfüllen.

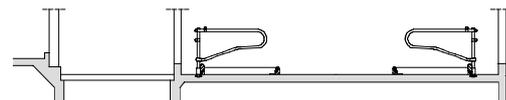


Abb. 9: Liegeboxenaufstallung (nach ALB, 2017)

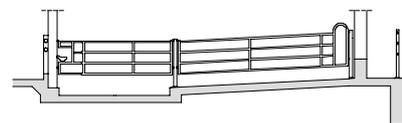


Abb. 10: Tretmistaufstallung nach ALB, 2017)

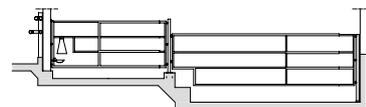


Abb. 11: Tiefstreuenaufstallung (nach ALB, 2017)



Abb. 12: Maschinenhalle (Architekt arc Architekten, Bj. 2002; Foto: Thomas Lauer, 2013)

3 Funktionen landwirtschaftlicher Nutzgebäude

Gebäudegeometrie



Liegebox

Lichtraumprofil h: 1,20 m

Abb. 13: Lichtraumprofil Liegebox



Person

Lichtraumprofil b: 0,9 - 1,5 m | h: 2,2 m

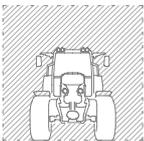
Abb. 14: Lichtraumprofil Mensch



Hoflader

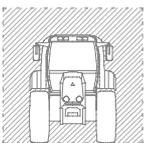
Lichtraumprofil b: 2,2 m | h: 2,8 m

Abb. 15: Lichtraumprofil Hoflader



Traktor

Lichtraumprofil b: 3,9 m | h: 3,8 m



Traktor

Lichtraumprofil b: 3,9 m | h: 3,8 m

Abb. 16: Lichtraumprofile Schlepper

Lichte Höhen in landwirtschaftlichen Nutzgebäuden

Die Verfahren in der Nutztier- und Lagerhaltung sind, beinahe ausnahmslos, ebenerdig organisiert. Einer der Gründe liegt in der Verfügbarkeit der notwendigen Bauflächen auf den landwirtschaftlichen Betrieben sowie dem überwiegenden Einsatz von Maschinen, die für vielfältige Arbeiten (z. B. Futtermittelverteilung, Einstreuen, Entmistung, Transport von Lagergütern) zum Einsatz kommen. Der bauliche Aufwand für eine vertikale Erschließung (z. B. Rampen) sowie befahrbare Deckenkonstruktionen steht, trotz der Flächeneinsparung, aktuell nicht zur Diskussion. Die, vor der Mechanisierung in Stallanlagen übliche deckenlastige Lagerung von Futtermitteln bzw. Einstreumaterial, für die entsprechende Ebenen oder Geschosse über den Tieren errichtet wurden, von denen aus das Lagergut über Luken bzw. Schlitze, häufig händisch, abgeworfen wurde, werden aus diesem Grund nur noch selten (z. B. Tretmistställe für Mastbullen- bzw. Mutterkuhhaltung) als sog. Strohbühnen eingebaut. Diese sind allenfalls mit einfachen Transporthilfen (z. B. für gelagerte Ballen) befahrbar.

In der landwirtschaftlichen Nutztierhaltung werden für alle gehaltenen Tierarten Bewegungsställe errichtet, in denen sich die Tiere frei, z. T. mit direktem Zugang in die Außenflächen, bewegen können.

Aus diesen Gründen wird die deckenlastige Lagerung im Rahmen dieser Veröffentlichung nicht berücksichtigt. Das gleiche auch für die geschossweise Haltung von Nutztieren, wie sie auf Betrieben in der Intensivtierhaltung, also in größeren Beständen (z. B. Schweine- und Geflügelhaltung), baulich realisiert wurde. Aus den Anforderungen an die konstruktiven Bauteile (insb. Decken) und dem daraus resultierenden Einsatz von massiven Bauteilen wäre der Holzbau für solche Gebäudekonstruktionen nur eingeschränkt (Gebäudehülle, Dach) umsetzbar.

Die notwendige Gebäudehöhe bzw. die Lage konstruktiver Bauteile ergibt sich zum einen aus der notwendigen Lichte für die dort gehaltenen Tiere, zum anderen durch das in den Anlagen tätige Personal sowie den eingesetzten Maschinen bzw. spezifischen Lagerhöhen. Für die im Rahmen des Typenkatalogs (Kap. 6) validierten Tragwerke wurden dabei die erforderliche Lichte für

- Liegeboxen für adulte Rinder (Abb. 13)
- Servicegänge für das Stallpersonal (Abb. 14)
- die Befahrung mit einem Hoflader (Abb. 15) und
- Schleppern mit unterschiedlicher Höhe (Abb. 16)

berücksichtigt. Der Einsatz von schienengeführten bzw. selbstfahrenden Systemen für die

- automatische Einstreu
- automatische Futtermittelverteilung

wurde im Rahmen dieses Leitfadens nicht berücksichtigt.

Bei Reithallen besteht von Seiten der Berufsgenossenschaften durch die Möglichkeit des Aufbäumens der Pferde und die Gefahr von Kopfverletzungen für die aufsitzende Reiter*in die Forderung nach einer Mindestlichte von 4,0 m unter den Bindern.

In der Lagerhaltung müssen die Hubhöhen bzw. Kipphöhen der eingesetzten Maschinen (z. B. Gabelstapler, Rad- und Teleskoplader, Kipper) für die Befüllung und Entnahme des Lagergutes berücksichtigt werden.

3 Funktionen landwirtschaftlicher Nutzgebäude

Gebäudegeometrie | Bauweisen | Tragwerke

Bauweise	Ausrichtung Primärkonstruktion	Tragsystem	Variante	Namen	Bewertung		
Skelettbauweise [Sk]	quer [Q]	Stütze-Binder-System [Stüb]	1 Strebe	Traufe [Tr] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-1StrI-Tr-PD7°		
				First [Fi] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-1StrI-Fi-PD7°		
				links [L] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-1StrI-L-SD7°		
				rechts [R] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-1StrI-R-SD7°		
			außen [1StrA]	Traufe [Tr] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-1StrA-Tr-PD7°		
				First [Fi] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-1StrA-Fi-PD7°		
				links [L] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-1StrA-L-SD7°		
				rechts [R] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-1StrA-R-SD7°		
			2 Streben	innen [2StrI]	Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-2StrI-PD7°	
					Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-2StrI-SD7°	
				außen [2StrA]	Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-2StrA-PD7°	
					Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-2StrA-SD7°	
		1 eingespannte Stütze [eSt]	Traufe [Tr] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-1eSt-Tr-PD7°			
			First [Fi] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-1eSt-Fi-PD7°			
			links [L] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-1eSt-L-SD7°			
			rechts [R] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-1eSt-R-SD7°			
		2 eingespannte Stützen [eSt]	Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-2eSt-PD7°			
			Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-2eSt-SD7°			
		Rahmen [R]	2 Gelenke [2G]	Pulldach [PD]	Sk-Q-R-2G-PD7°		
				Satteldach [SD]	Sk-Q-R-2G-SD7°		
			3 Gelenke	Traufe [Tr] Pulldach [PD]	Sk-Q-R-1h-Tr-PD7°		
				First [Fi] Pulldach [PD]	Sk-Q-R-1h-Fi-PD7°		
				links [L] Satteldach [SD]	Sk-Q-R-1h-L-SD7°		
				rechts [R] Satteldach [SD]	Sk-Q-R-1h-R-SD7°		
Gelenk am First [3GF]	Satteldach [SD]		Sk-Q-R-3GF-SD7°				

Tab. 3: Übersicht Tragwerke

Gebäudegeometrien und Bauweisen

Neben den, für die Erschließung und Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Nutzgebäude erforderlichen Höhen, spielt bei der Planung der Gebäudegeometrie das Stallklima eine entscheidende Rolle. Im Rahmen dieses Leitfadens wird die, für Rinder, Schweine, Kleinwiederkäuer und Pferde ausnahmslos realisierbare Haltung in Außenklimaställen angenommen. Zur Optimierung des Tierwohls wird in diesen Gebäuden durch offene bzw. offene bzw. offene Trauf- und Giebelwände sowie Zuluftöffnungen in den Dachflächen der natürliche Außenklimareiz (Temperatur- und Luftfeuchte im Jahresverlauf) genutzt. Über die damit einhergehenden Luftwechselraten werden gleichzeitig Schadgase und Stäube aus den Stallanlagen abtransportiert. Im günstigsten Fall setzt sich die natürliche Luftbewegung als Strömung in den Stallanlagen fort und unterstützt die Tiere bei der Wärmeregulation durch Konvektion. Vorgaben für die notwendigen Öffnungsflächen pro Quadratmeter Stallfläche oder Tierplatz finden sich in der Literatur nur Ansatzweise (z. B. 2,5 m² / Milchvieh | DLG Merkblatt 2021).

Um erhöhte Luftgeschwindigkeiten (z. B. 2,0 - 4,0 m/s bei Milchvieh) in den Stallanlagen aus der freien Anströmung zu vermeiden, werden zur Regulation Wandverschlüsse in Form von Windschutznetzen bzw. sog. Curtains eingebaut. Diese bestehen aus netzartigen Geweben bzw. geschlossenen Planen, die in der Regel über die gesamte Wandhöhe reichen. Rolleinrichtungen ermöglichen eine stufenlose Einstellung von geschlossen, teiloffen bis offen.

Für die Größe der Öffnung in den Wand- bzw. Dachflächen spielt die Bauweise eine wesentliche Rolle. Dabei wird zwischen einhäusigen Anlagen mit homogenen bzw. kombinierten Tragwerken und mehrhäusigen Anlagen unterschieden (Abb.17). Bei der einhäusigen Bauweise finden sich alle Funktionen für das jeweilige Haltungsverfahren (z. B. Milchviehhaltung: Liege- und Aktivitätsflächen, Futtevorlage bis hin zu Melkstand, Büro-, Technik- und Tankraum) unter einem Dach. Homogene Tragwerke sind reine Pult- bzw. Satteldachkonstruktionen. Bei kombinierten Tragwerken werden die Gebäude in Teiltragwerke als Pult- oder Satteldachkonstruktion untergliedert. In den Anschlussbereichen bietet sich die Möglichkeit, weitere vertikale Öffnungsflächen zu schaffen. Die Traufhöhe für einhäusige Anlagen liegt, je nach Anlagenbreite, zwischen 5,0 m bis 6,50 m.

Bei der mehrhäusigen Bauweise werden die Funktionsbereiche in mehrere Teilbaukörpern integriert. Zwischen diesen entstehen nicht überdachte Flächen, die z. T. für die Tiere als Ausläufe genutzt werden können und über die, bezogen auf die Gesamtanlagenbreite, gegenüber einhäusigen Bauweisen ein erhöhter Luftaustausch möglich ist. In Folge können mehrhäusige Anlagen, auch aus Gründen des unerwünschten Schlagregeneintrags, auf die Höhe reduziert werden, die sich aus den notwendigerweise einzuhaltenen Lichtraumprofilen ergeben.

Tragwerke

Sowohl in der Tier- als auch Lagerhaltung sind **Skelettkonstruktionen** Stand der Technik. Für Stallanlagen ergibt sich diese aus der Logik der Fortführung des Außenklimas in den Gebäuden, das durch einen maximalen Luftwechsel über die geöffneten Außenwände erreicht werden soll. Bei Reithallen werden in der Praxis sowohl offene, als auch mit Windschutznetzen bzw. geschlossenen (Holzverkleidungen) und verglasten Wandelementen ausgestaltete Gebäude realisiert. Bei Lagerhallen reicht die Bandbreite auf Grund der dargestellten bauphysikalischen Anforderungen von einer gleich-

3 Funktionen landwirtschaftlicher Nutzgebäude

Tragwerke | Spannweiten

falls offenen Bauweise (z. B. Hackschnitzel-, Strohlager, Unterstände für Landmaschinen), bei der die Tragwerke als Überdachung allein den Schutz gegen Niederschläge gewährleisten, bis zur geschlossenen Gebäudehülle, in der über entsprechende Technik ein für das Lagergut erforderliches Klima (z. B. Kartoffel- und Zwiebellagerung) eingestellt wird.

Im Rahmen dieses Leitfadens sind als Tragwerke für die Skelettkonstruktionen quer gerichtete Tragwerke als Stütze-Binder- und Rahmenkonstruktionen in Sattel- und Pultdachgeometrie zu Grunde gelegt. Die Systematik mit allen Tragwerkstypen und Bezeichnungen befindet sich in der Ausklappseite des linken Einbands. Im Typenkatalog (Kap. 6) befindet sich bei jedem Verfahren jeweils auf der linken Seite eine senkrechte Tabelle, in denen die Tragwerke hinsichtlich ihrer Eignung für das jeweilige Verfahren über eine Ampelfunktion (grün/rot) bewertet werden (Tab. 3).

Bewertungskriterien sind

- das Freihalten notwendiger Lichtraumprofile im Gebäudeinnern von störenden Bauteilen [F]
- die Biosicherheit bzw. Hygiene [H] sowie
- die Gestaltung [G]

Bei der Biosicherheit werden die Tragwerke auf Brutmöglichkeiten für Vögel (insb. Fachwerkkonstruktionen) bewertet. In die Bewertung der Gestaltung fließen insb. die Proportionen überbreiter Pult- und Satteldachkonstruktionen ein.

Die **Spannweite** ergibt sich aus der Breite des Gebäudes und, nutzungs- bzw. verfahrensabhängig, möglicher Standorte für Stützen. Sie reicht bei einhäusigen Gebäuden von Tragwerken mit Stützen im Gebäudeinnern bis hin zu stützenfreien Konstruktionen. Aus der Frage, wie viel Gebäudehüllfläche ein Verfahren tatsächlich benötigt, ergibt sich bei der mehrhäusigen Bauweise der umgekehrte Weg, bei der die Tragwerke auf das minimal erforderliche Maß reduziert werden. Diese lässt sich z. B. aus der generellen Forderung nach trockenen und weichen Liegeflächen für die Tiere ableiten, die z. B. in der Milchviehhaltung zur sog. Cuccetten-Bauweise geführt hat, bei der nur mehr die einzelnen Liegeboxenreihen sowie der Futtertisch überdacht sind.

Der **Wandbau** spielt dagegen in Außenklimaställen und Lagerhallen eine untergeordnete Rolle. Ausnahmen bilden Produktionsbereiche in der Ferkelerzeugung und Geflügelhaltung. Im Aferkelbereich bzw. der Ferkelaufzucht sind, auf Grund der Temperatursprüche der Jungtiere, Wandaufbauten mit dämmender Wirkung notwendig, um die Tiere vor Unterkühlung zu schützen. Dazu ist ein möglichst geringer Lichteinfall im Stallinnern entscheidend, um eine Verkotung des Liegebereichs zu verhindern. In der Geflügelhaltung werden abgedunkelte Stallinnenräume mit Volieren bzw. Ausläufen kombiniert. Auch wenn diese speziellen Stallgebäude als reine Wandbauten, z. T. auch in massiver Holzbauweise, ausgeführt werden, ist aus Gründen einer flexiblen und damit zukunftssicheren Nutzung eine Mischkonstruktion aus Skelettbau und einer Ausfachung mit Massivbauteilen in die planerischen Überlegungen einzubeziehen.

Über diese speziellen Haltungsverfahren hinaus, werden typischer Weise Nebenräume von Stallanlagen zur Unterbringung von Technik aus Gründen des Brandschutzes, erhöhter Feuchtebelastung durch Melktechnik, wiederkehrendem Hochdruckreinigerbetrieb o. ä. gleichfalls mit massiven Wänden (Stahlbeton, Mauerwerk) ausgeführt. Je nach Beanspruchung wäre hier ein Ersatz mineralischer Baustoffe durch Holzbauprodukte möglich.

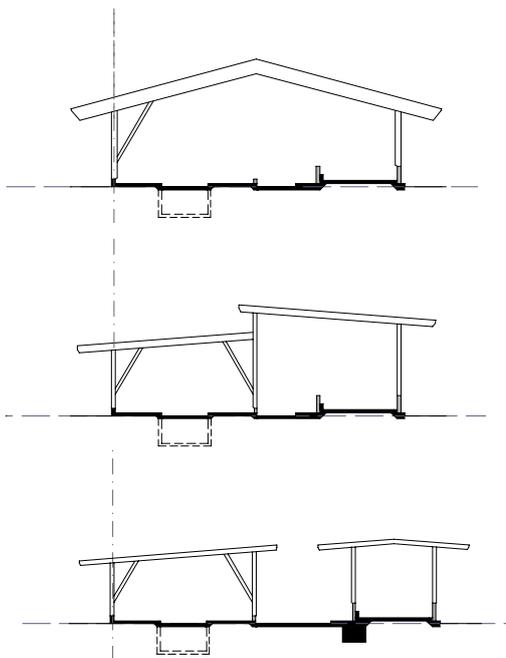


Abb. 17: Vergleich Einhäusige Bauweise
Kombinierte Tragwerke
Mehrhäusige Bauweise

3 Funktionen landwirtschaftlicher Nutzgebäude

Harmonisierung Gebäudeabmessungen

Harmonisierung der Gebäudeabmessungen

Zwischen den praxisüblichen Verfahren in der Nutztier- und Lagerhaltung sind die Flächenbedarfe und Funktionsmaße in der Regel nicht aufeinander abgestimmt. Werden Gebäude, sowohl in ein- als auch mehrhäusiger Bauweise, exakt auf die jeweiligen Verfahren hin geplant, ergibt sich, insb. in der Breite, eine große Vielfalt an Abmessungen. In der Länge ergeben sich Achsmaße für die Position der Binder aus der Stalleinrichtung (z. B. Liegeboxenbreite Milchviehhaltung, Buchtenbreite Schweine- und Pferdehaltung) oder notwendigen Einfahrtsbreiten auf der Traufseite von Maschinenhallen.

Hier werden große Optimierungspotenziale gesehen, einerseits Alternativen zu den teuren Standardhallen in Form von verfahrensspezifische Gebäudequerschnitte zu entwickeln und gleichzeitig den Abund rationeller zu organisieren. Ziel dieses Leitfadens ist, die ausgewählten Verfahren auf gleiche Spannweiten zu gruppieren bzw. anzugleichen, geeignete nutzungsspezifische Tragwerke zu filtern und innerhalb derer von einer großen Vielfalt an einhäusigen bis hin zu aufgelösten mehrhäusigen Tragwerke die Bandbreite der Möglichkeiten für die baulich-technische Ausführung von zukunftsfähigen Tragwerken aufzuweisen.

Um einen wirtschaftlichen Holzbau umzusetzen, wurde bei der Erstellung dieses Leitfadens deshalb wie folgt vorgegangen:

1. Sammlung typischer Verfahren in der Tier- und Lagerhaltung aus Literatur und Beratungsunterlagen (s. weiterführende Literatur, S. 89)
2. Reduzierung der jeweiligen Verfahren innerhalb des Produktionsbereichs auf die sog. **kleinste Funktionseinheit**. Diese besteht in der Tierhaltung aus den erforderlichen Funktionsbereichen für die Futteraufnahme, dem Aktivitäts- und Liegebereich. Das können sowohl Produktionsbereiche sein, die von einem Altersabschnitt der gehaltenen Tiere (z. B. Milchvieh-, Jungvieh-, Kälberstall), aber auch von Alt- und Jungtieren gleichzeitig (z. B. Sauen mit Ferkel im Abferkelbereich, Mutterkühe mit Kälbern) genutzt werden. In der Lagerhaltung ergibt sich die kleinste Funktionseinheit aus den praxisüblichen Abmessungen der Funktionsbereiche Lagern und Erschließung.
3. Planung der kleinsten Funktionseinheit nach den Anforderungen der guten fachlichen Praxis bzw. Vorgaben aus der staatlichen Förderung (länderspezifisch) sowie der nationalen bzw. europaweit gültigen Gesetze und Verordnungen (z. B. Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutzV), Verordnung (EU) 2018/848 (EU-Öko-VO)). Weitere Vorgaben werden in Deutschland im Rahmen von Tierwohl-Initiativen gemacht (z. B. Haltungsform: <https://www.haltungsform.de/>). Ein national einheitliches Tierwohl-Label steht zum Zeitpunkt der Veröffentlichung noch nicht zur Verfügung.
4. Sortierung der kleinsten Funktionseinheiten aller Verfahren nach Spannweitengruppen (Abb.18). Diese staffeln sich nach dem Vielfachen des im Bauwesen eingeführten Baurichtmaß von 1,25 m (Oktameter-system gem. DIN 4172) und erlauben eine erste Einsortierung des jeweiligen Verfahrens .
5. Harmonisierung bzw. Anpassung der gruppierten Grundrisse und Schnitte auf übereinstimmende und vor allem zukunftsfähige Abmessungen.
6. Abstimmung der Gebäudegeometrien auf die notwendigen Lichtraumprofile (Tiere, Personen, Hoflader, Schlepper).
7. Untersuchung der Varianten von freitragenden Tragwerken bis hin zu eingestellten Stützen zur Reduzierung der Holzquerschnitte

3 Funktionen landwirtschaftlicher Nutzgebäude

Harmonisierung Gebäudeabmessungen

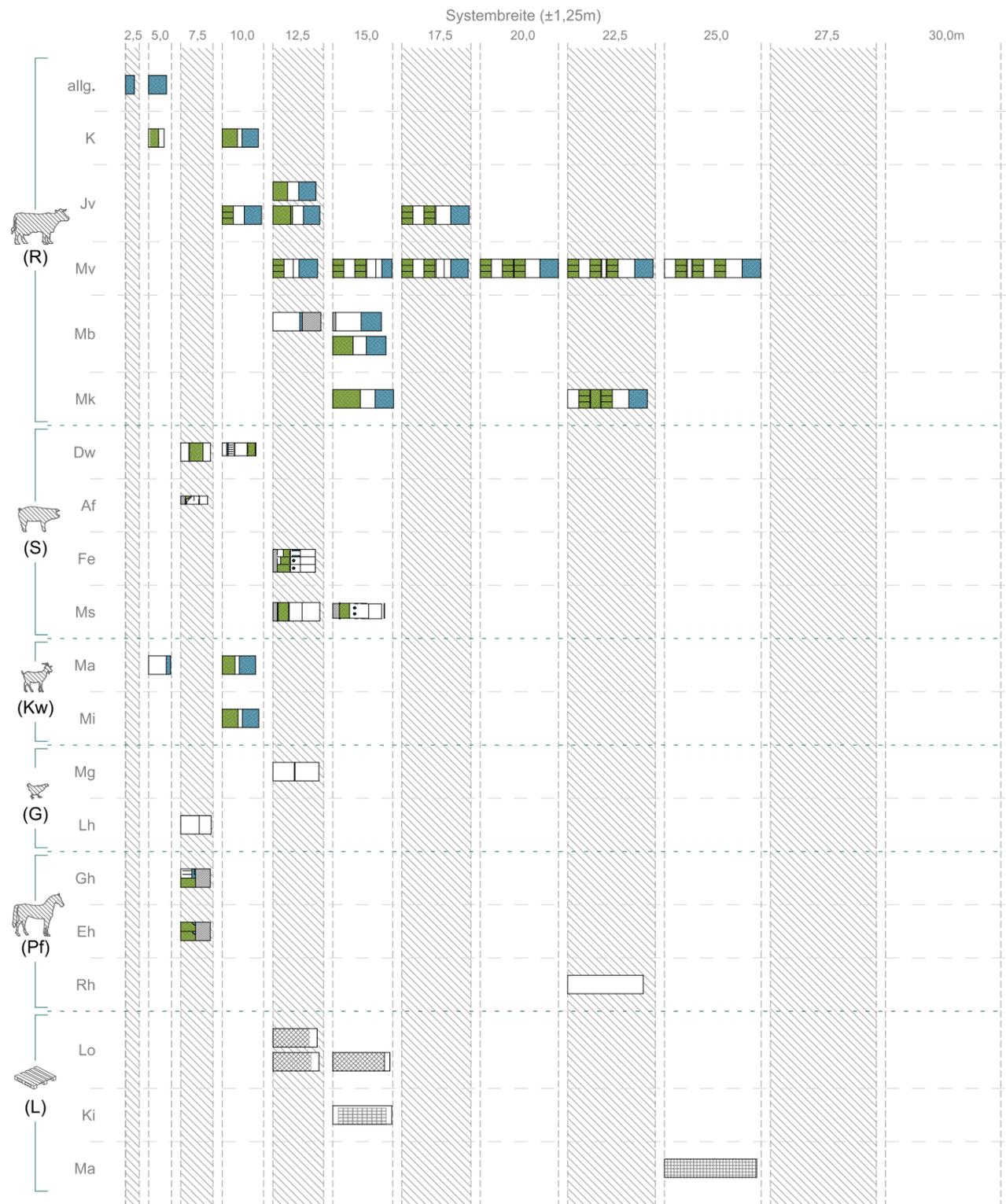


Abb. 18: Gesamtmatrix zur Zuordnung der kleinsten Funktionseinheiten für Stallanlagen, Reit-, Lager- und Maschinenhallen im Maßsystem x * 2,50 m (± 1,25 m)

Legende Tragwerke

	Einspannung		VH/ KVH Vollholz/ Konstruktionsvollholz
	Gelenk		BSH Brettschichtholz
	Gelenk	FW	Fachwerk
	Biegesteife Ecke		

Bewertung

F	Funktion
H	Hygiene ¹
G	Gestaltung

¹ Generell kein Fachwerk
 Ausnahmen in Tierhaltung: Warmställe (z.B. Schweine, Geflügel), Pferde Reithalle
 Ausnahmen in Lebensmittellagerung: Kartoffel, Zwiebel

Bedingung erfüllt Bedingung nicht erfüllt

Legende Funktionsbereiche

	Futtermulde
	Liegebereich
	Aktivitätsbereich
	Treib-/Servicegang
	Lager

Sortierung der Verfahren

Kategorie	Unterkategorie
(R)	Rinder K Kälber Jv Jungvieh Mv Milchvieh Mb Mastbullen Mk Mutterkühe
(S)	Schweine Dw Deck- und Wartesauen Af Abferkelbuch Fe Ferkelaufzucht Ms Mastschweine
(Kw)	Kleinwiederkäuer Ma Mastschafe/-ziegen Mi Milchscheffe/-ziegen
(G)	Geflügel Mg Mastgeflügel Lh Legehennen
(Pf)	Pferde Gh Gruppenhaltung Eh Einzelhaltung Rh Reithalle
(L)	Lager Hackschnitzel Getreide Düngemittel Heubelüftung Kartoffeln Zwiebel Maschinen

Fußnote zu Typenblättern

- * Mehrhäusigkeit bietet nicht die erforderliche Sicherheit gegen unerwünschte Niederschlägeinträge in die angrenzenden Funktionsbereiche.
- ** bei Getreidelagerung, aus hygienisch Gründen, kein Fachwerk.

Legende Bindervarianten

	Variante mit einfachem Binder
	Variante mit geteiltem Binder

Legende zu Tabelle Kippunkte

	Nadelvollholz [NVH]	b/h ≤ 12/38 cm bzw. 20/32 cm	alle Bauteile aus Nadelvollholz
	Brettschichtholz [BSH]	h ≤ 60 cm	mind. ein Bauteil aus Brettschichtholz
	Brettschichtholz [BSH]	h > 60 cm	mind. ein Bauteil aus Brettschichtholz

4 Wirtschaftlichkeit

Statische Annahmen

Statische Annahmen

Um für die jeweiligen Verfahren und Spannweiten spezifische Tragwerke in Holzbauweise zu etablieren, sind wirtschaftlich umsetzbare Tragkonstruktionen unabdingbar. In einem ersten Schritt sind insgesamt 50 Tragwerke, mit jeweils zwei Bindervarianten (einfach / geteilt), über die Statiksoftware FRILO vordimensioniert. Alle Tragwerke wurden freitragend berechnet.

Aus den erforderlichen Querschnitten resultieren die Kippunkte von „Vollholz C24“ zu „Brettschichtholz | beschränkte Querschnitte“ bis zu „Brettschichtholz | unbeschränkte Querschnitte“. Die Beschränkung beträgt, in Folge der Rissbreitenbegrenzung bei der Trocknung, bei „Vollholz C24“ $b / h \leq 12/38$ cm (geteilte Binder) bzw. $b / h \leq 20/32$ cm (alle anderen Bauteile). Bei „Brettschichtholz | beschränkte Querschnitte“ liegt die Beschränkung bei $b / h \leq 24/60$ cm für standardmäßig erhältliche Brettschichtholzformate, die nicht als Sonderanfertigung hergestellt werden müssen. „Brettschichtholz | unbeschränkte Querschnitte“ unterliegt keinen Beschränkungen in seinen Dimensionen. Die **Tragwerkssystematik** ist wie folgt aufgebaut (s. Ausklappseite links):

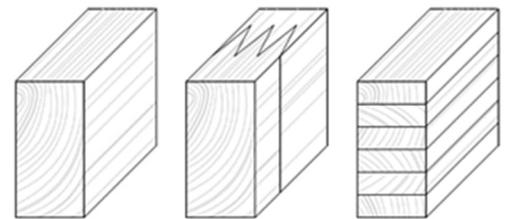


Abb. 19: Darstellung Vollholz - Konstruktion
Konstruktionsvollholz - Brettschichtholz

Bauweise: Skelettbauweise [Sk]

Ausrichtung Primärkonstruktion: Quer [Q]

Trag-Systeme & Varianten:

Stütze-Binder-System [StüB]

> 1 bzw. 2 Strebe(n) Innen [1StrI / 2StrI]
> 1 bzw. 2 Strebe(n) Aussen [1StrA / 2StrA]
> 1 bzw. 2 eingespannte Stütze(n) [1eSt / 2eSt]

Rahmen [R]

> 2 Gelenk Rahmen [2G]
> 3 Gelenk Rahmen [3GF]
> 1 hüftiger 3 Gelenk Rahmen [1H]

Dachform

Pulldach [PD]
Satteldach [SD]

Bindervarianten

Einfacher Binder [EB]
Geteilter Binder [GB]

Holzbauprodukte (s. Abb. 19):

Nadelvollholz [VH]: Güte C24
Kerngetrennter Einschnitt, Technisch getrocknet¹

Konstruktionsvollholz [KVH]: Güte C24
Querschnitte GBD: $b/h \leq 12/38$ cm
Querschnitte EBD: $b/h \leq 20/32$ cm

Brettschichtholz [BSH]: Güte GI24c / GI32c
Querschnitte beschränkt²:
 $b/h \leq 24/60$ cm
bei GBD: $b/h \leq 16/60$ cm
Querschnitte unbeschränkt³:
 $b/h \geq 24/60$ cm

Annahmen Statik (s. Abb. 20; 21 & 22):

Bodenschneelast: $s_k = 2,12$ kN/m²
Windlast: Windzone 2 – Mischkategorie Binnenland
Gebäudehülle: 3-seitig geschlossen, eine Traufseite offen
Dachaufbau: Holzschalung, Konter-, Traglattung, Wellfaserzementplatten
Achismaß: 5,20 m

4 Wirtschaftlichkeit

Statische Annahmen

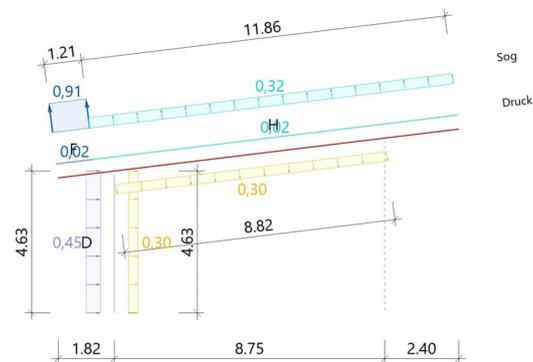


Abb. 20: Auszug Statik (FRILO) | Darstellung Windlasten bei Anströmung von links

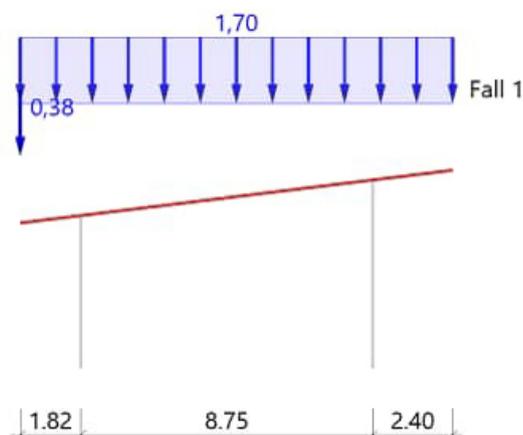


Abb. 21: Auszug Statik (FRILO) | Darstellung Schneelasten

Basiswerte

Land	Deutschland	
Schnee-Norm	DIN EN 1991-1-3/NA:2010-12	
Wind-Norm	DIN EN 1991-1-4/NA:2010-12	
Gemeinde	85586 Poing	
Geländehöhe	hNN =	519.00
Klimaregion	Alpine Region	
Schneezone	1a	
Windzone	2	
Geländekategorie	Mischkategorie Binnenland	

Beiwerte

Faktor für Schneetraufast $k = 0.40$

Lasten

Bodenschneelast	$s_k = 2.12 \text{ kN/m}^2$
Basiswindgeschwindigkeit	$v_{b0} = 25.0 \text{ m/s}$
Basisgeschwindigkeitsdruck	$q_{b0} = 0.39 \text{ kN/m}^2$
Referenzhöhe	$z_e = 6.00 \text{ m}$
Geschwindigkeitsstaudruck	$q_p(h,0) = 0.59 \text{ kN/m}^2$
Geschwindigkeitsstaudruck	$q_p(h,90) = 0.59 \text{ kN/m}^2$

Abb. 22: Auszug Statik (FRILO) | Wind- & Schneelasten

4 Wirtschaftlichkeit Holzbedarf

Bauweise	Ausrichtung Primärkonstruktion	Tragsystem	Variante	Namen	Diagramme	Spannweiten																	
						Binder	0,00	1,25	2,50	3,75	5,00	6,25	7,50	8,75	10,00	11,25	12,50	13,75	15,00	16,25			
Skelettbauweise [Sk]	quer [Q]	Stütze-Binder-System [Stüb]	1 Strebe	Traufe [Tr] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-1StrI-Tr-PD7°																		
				First [Fi] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-1StrI-Fi-PD7°																		
				links [L] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-1StrI-L-SD7°																		
				rechts [R] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-1StrI-R-SD7°																		
			außen [1StrA]	Traufe [Tr] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-1StrA-Tr-PD7°																		
				First [Fi] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-1StrA-Fi-PD7°																		
				links [L] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-1StrA-L-SD7°																		
				rechts [R] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-1StrA-R-SD7°																		
			2 Streben	innen [2StrI] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-2StrI-PD7°																		
				innen [2StrI] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-2StrI-SD7°																		
				außen [2StrA] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-2StrA-PD7°																		
				außen [2StrA] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-2StrA-SD7°																		
			1 eingespannte Stütze [eSt]	Traufe [Tr] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-1eSt-Tr-PD7°																		
				First [Fi] Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-1eSt-Fi-PD7°																		
				links [L] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-1eSt-L-SD7°																		
				rechts [R] Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-1eSt-R-SD7°																		
			2 eingespannte Stützen [eSt]	Pulldach [PD]	Sk-Q-Stüb-2eSt-PD7°																		
				Satteldach [SD]	Sk-Q-Stüb-2eSt-SD7°																		
			Rahmen [R]	2 Gelenke [2G]	Pulldach [PD]	Sk-Q-R-2G-PD7°																	
					Satteldach [SD]	Sk-Q-R-2G-SD7°																	
		3 Gelenke		Traufe [Tr] Pulldach [PD]	Sk-Q-R-1h-Tr-PD7°																		
				First [Fi] Pulldach [PD]	Sk-Q-R-1h-Fi-PD7°																		
				links [L] Satteldach [SD]	Sk-Q-R-1h-L-SD7°																		
				rechts [R] Satteldach [SD]	Sk-Q-R-1h-R-SD7°																		
		Gelenk am First [3GF]		Satteldach [SD]	Sk-Q-R-3GF-SD7°																		

Erläuterungen zur Tabelle 4: „Analyse Tragwerke auf Kippunkte“:

[Anm. d. Red.: Diese Tabelle ist eine Ergänzung der „linken Ausklappseite“. Dieser kann der Name und die Zuordnung der dargestellten Tragwerke entnommen werden.]

Die Tabelle stellt für jedes Tragwerk dar, bei welchen Spannweiten es (unter den auf S. 16 f. dargestellten statischen Annahmen) ausschließlich aus

- „Vollholz C24“
- einer Mischung aus „Vollholz C24“ und „Brettschichtholz | beschränkte Querschnitte“
- einer Mischung aus „Vollholz C24“, „Brettschichtholz | beschränkte Querschnitte“ und „Brettschichtholz | unbeschränkte Querschnitte“

errichtet werden kann.

Die Mischungen erklären sich daraus, dass auch bei großen Spannweiten einzelne Bauteile - wie z. B. Streben oder Pendelstützen - aus „Vollholz C24“ oder „Brettschichtholz | beschränkte Querschnitte“ gefertigt werden können.

4 Wirtschaftlichkeit

Holzbedarf

Ermittlung des Holzbedarfs

Die Berechnungen der erforderlichen Querschnitte für die jeweiligen Tragwerkstypen wurden für die Spannweitengruppen 5,00 m | 6,25 m | 7,50 m | 8,25 m | 10,00 m, 11,25 m | 12,50 m | 13,25 m | 15,00 m und 16,25 m durchgeführt. Jede Spannweitengruppe entspricht damit einem zusätzlichen Korridor von 1,25 m. Die Spannweitengruppen sind jeweils nach ihrer oberen Grenze benannt. Die statischen Vordimensionierungen (insg. 313 Varianten) wurden bis zu deren Grenzspannweiten gerechnet und daraus die zugehörigen Mengen- und Kostenermittlungen generiert.

Sowohl die Spannweitengruppen als auch die „Korridor“-Breite baut auf dem, im Bauwesen normativ eingeführten Oktametersystem (gem. DIN 4172) auf. Für den Ziegelbau entwickelt, ist auch in der Plattenindustrie eingeführt. Gängige Plattenbreiten (z. B. OSB, Gipskarton, zementgebundene Holzwerkstoffplatten) werden in den Breiten von 62,5 cm, 125 cm und 250 cm hergestellt. Im Landwirtschaftlichen Bauwesen ist die Abstimmung zwischen Rohbau und Ausbau beispielsweise für eine mögliche Beplankung (z. B. Wände, Decken in Schweineställen) relevant.

Im Rahmen dieser Arbeit lag der Schwerpunkt auf der Ermittlung der Kipp-Punkte von Vollholz nach BSH beschränkt und von BSH beschränkt nach BSH unbeschränkt. Bei den meisten Tragwerken findet dieser bei Spannweiten zwischen 10,00 m und 12,50 m statt. Ab der Spannweite von 16,25 m benötigen alle vordimensionierten Tragwerke mindestens ein Bauteil aus Brettschichtholz | unbeschränkt. Deshalb wurden für größere Spannweiten keine weiteren Vordimensionierungsberechnungen durchgeführt.

Der Holzbedarf der einzelnen Tragwerke wurde, unter den auf S. 16 f. dargestellten statischen Annahmen, für eine maximale Bauteilbelastung von 96 % ermittelt. Die sich aus den Berechnungen ergebenden Querschnittmaße & -längen der einzelnen Bauteile wurden dann in Volumen umgerechnet und für das jeweils betrachtete Tragwerk - in Abhängigkeit des geforderten Materials - aufaddiert.

Im Ergebnis zeigt sich, dass der Kippunkt von VH - BSH beschränkt und BSH beschränkt - BSH unbeschränkt vom angenommenen Tragwerk abhängig ist (z. B. 1Strl-PD-EBD zu 2Strl-PD-EBD). Darüber hinaus lassen sich, mit einem geteilten Binder, bei gleicher Holzgüte und gleichem Tragwerk, tendenziell höhere Spannweiten erzielen (z. B. 1Strl-PD-EBD zu 1Strl-PD-GBD) (Tab. 4).

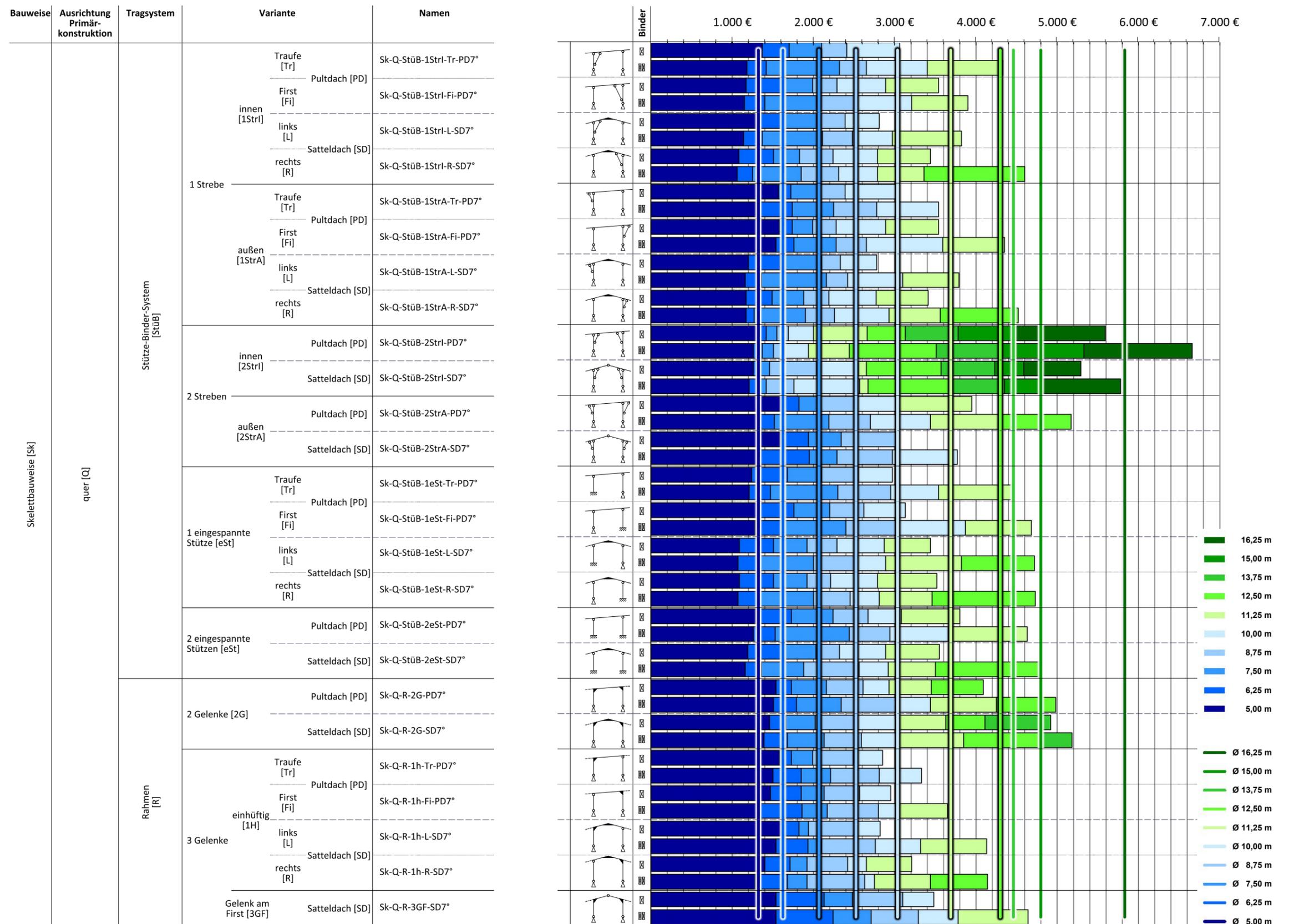
Aus den errechneten Querschnitten lässt sich der Holzbedarf ermitteln. Das Tragwerk mit dem minimalen Holzbedarf innerhalb einer Spannweitengruppe liegt bei ca. 66 % des maximalen Holzbedarfs in dieser Gruppe (Tab. 5). Der Holzbedarf, in Abhängigkeit der verwendeten Holzbauprodukte, bildet die Grundlage für die Kostenermittlung der jeweiligen Tragwerke.

Tab. 5: Auszug aus Holz mengenberechnung - Beispiel Sk-Q-StüB-2StrA bei Spannweite 8,75 m

		n	b	h	l	Material	V			V _{ges}	
PD	Stütze Traufe/links	1	0,20 m	0,24 m	3,70 m	C24	0,18 m ³	Var. 1 (□):	0,72 m ³	36%	2,02 m ³
	Stütze Frist/rechts	1	0,20 m	0,26 m	4,77 m	C24	0,25 m ³		1,30 m ³	64%	
	Binder Var. 1 (□)	1	0,20 m	0,52 m	12,46 m	GI24c	1,30 m ³		0,00 m ³	0%	
	Binder Var. 2 (□□)	2	0,12 m	0,52 m	12,46 m	GI24c	1,56 m ³	Var. 2 (□□):	0,72 m ³	32%	
	Strebe Traufe/links	1	0,20 m	0,20 m	3,02 m	C24	0,12 m ³		1,56 m ³	68%	
2StrA	Strebe Frist/rechts	1	0,20 m	0,20 m	4,40 m	C24	0,18 m ³	0,00 m ³	0%		
SD	Stütze links	1	0,20 m	0,30 m	3,70 m	C24	0,22 m ³	Var. 1 (□):	0,70 m ³	30%	2,35 m ³
	Stütze rechts	1	0,20 m	0,32 m	3,70 m	C24	0,24 m ³		0,00 m ³	0%	
	Binder Var. 1 (□)	1	0,22 m	0,60 m	12,46 m	GI32c	1,64 m ³		1,64 m ³	70%	
	Binder Var. 2 (□□)	2	0,14 m	0,52 m	12,46 m	GI24c	1,81 m ³	Var. 2 (□□):	0,70 m ³	28%	
	Strebe Traufe/links	1	0,20 m	0,20 m	3,02 m	C24	0,12 m ³		1,81 m ³	72%	
	Strebe Frist/rechts	1	0,20 m	0,20 m	3,02 m	C24	0,12 m ³	0,00 m ³	0%		

4 Wirtschaftlichkeit

Baukosten



4 Wirtschaftlichkeit

Baukosten

Tab. 6: Kosten pro Binder in Abhängigkeit von Tragwerk und Spannweite

Die **Baukosten** für ein Tragwerk ergeben sich aus den Material-, Bearbeitungs-, Transport- und Montagekosten sowie einem Gewinnzuschlag. Die **Materialkosten** beinhalten die Kosten für Holzbauprodukte und Verbindungsmittel. Deren Güte und Menge werden durch den Tragwerkstyp und die Spannweite bestimmt. Die **Bearbeitungskosten** setzen sich aus Zuschnitt, Abbund und die Vorbereitung der Holzbauteile sowie das Ein-/Anbringen der Verbindungsmittel zusammen. Bei den **Transportkosten** wurde eine Anlieferung im Radius von ca. 100 km per Sattelzug angenommen. Die **Montagekosten** bestehen aus dem Aufwand für Zusammenbau und Aufstellen auf der Baustelle.

Im Ergebnis zeigt sich, dass der Investitionsbedarf von folgenden, sich teilweise gegenseitig beeinflussenden Faktoren abhängig ist:

- Tragwerkstyp und Bindervariante
- Spannweite
- Dachform
- Holzgüte
- Holzbauprodukte
- Verbindungsmittel

Speziell im Holzbau ist es bei Tragwerken mit einfachen Bauteilgeometrien und zimmermannsmäßigen Holzverbindungen (z. B. Versätze, Zangen) möglich, einen deutlich höherer **Eigenleistungsanteil** - sowohl beim Abbund als auch bei der Montage - zu realisieren. Im Rahmen der Kostenermittlung wurde dieser nicht berücksichtigt.

Die Kosten wurden für alle Tragwerke mit beschränkten Querschnitten ermittelt.

Im Ergebnis zeigt sich, dass Stütze-Binder-Systeme. (Bezeichnung 2Strl) durch innenliegenden Streben die effektive Spannweite des Binders reduzieren. Daraus resultieren ein geringerer Holzbedarf und niedrigere Investitionskosten. Verstärkt wird dies dadurch, dass die Gründung meist über eine Bodenplatte als Flächengründung erfolgen kann. Tragwerke mit außenliegenden Streben, eingespannten Stützen oder biegesteifen Ecken (2- bzw. 3-Gelenk-Rahmen) erzeugen dagegen meist höhere Investitionskosten als der Durchschnitt der jeweiligen Spannweitengruppe.

Über diese Kostenunterschiede innerhalb der Tragwerke zeigt sich, dass von Spannweitengruppe zu Spannweitengruppe - also bei einer Spannweitensteigerung von 1,25 m - die Kosten im Mittel um ca. 18 % steigen.

Erklärungen zu Tabelle 6 „Kosten pro Binder“:

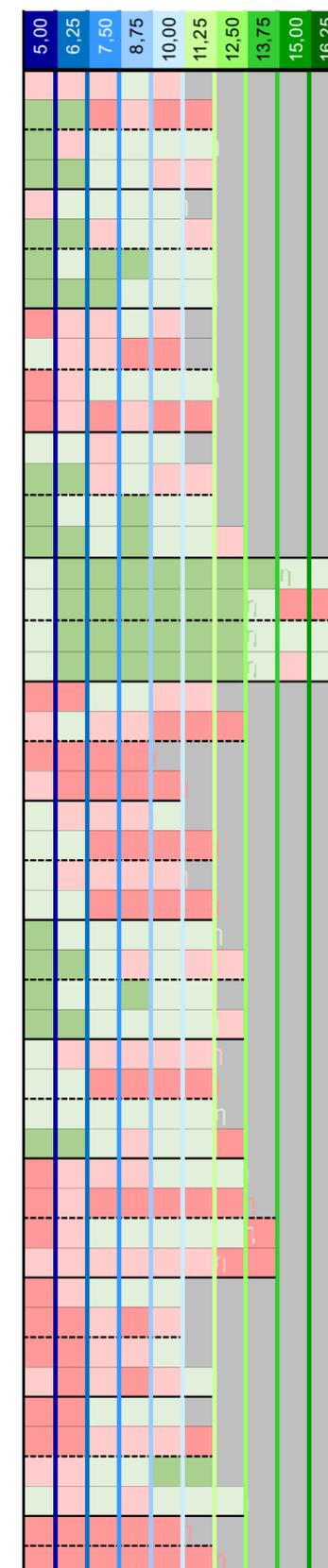
[Anm. d. Red.: Die Tabelle ist eine Ergänzung der „linken Ausklappseite“. Dieser kann der Name und die Zuordnung der dargestellten Tragwerke entnommen werden.]

Jeder Spannweite ist eine Farbe zugeteilt (siehe Legende). Das jeweils rechte Ende eines Farbbalken gibt den Preis des Tragwerks bei der, der Farbe zugehörigen Spannweite an. Die vertikalen Linien stellen die Durchschnittskosten (über alle betrachteten Tragwerke) der jeweiligen Spannweite dar. Zu jedem Tragwerk gibt es zwei Zeilen. Die obere beschreibt jeweils die Variante mit einem „Einfachen Binder“, die untere die Variante mit „Geteiltem Binder“.

4 Wirtschaftlichkeit

Baukosten

Bauweise	Ausrichtung Primärkonstruktion	Tragsystem	Variante	Namen		
Skelettbauweise [Sk]	quer [Q]	Stütze-Binder-System [StüB]	1 Strebe innen [1StrI]	Traufe [Tr]	Sk-Q-StüB-1StrI-Tr-PD7°	
				Pulldach [PD]		
				First [Fi]	Sk-Q-StüB-1StrI-Fi-PD7°	
				Satteldach [SD]		
			1 Strebe außen [1StrA]	links [L]	Sk-Q-StüB-1StrA-L-SD7°	
				Satteldach [SD]		
				rechts [R]	Sk-Q-StüB-1StrA-R-SD7°	
				Satteldach [SD]		
			2 Streben innen [2StrI]	Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-2StrI-PD7°	
				Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-2StrI-SD7°	
				2 Streben außen [2StrA]	Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-2StrA-PD7°
					Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-2StrA-SD7°
			1 eingespannte Stütze [eSt]	Traufe [Tr]	Sk-Q-StüB-1eSt-Tr-PD7°	
				Pulldach [PD]		
				First [Fi]	Sk-Q-StüB-1eSt-Fi-PD7°	
				Satteldach [SD]		
		2 eingespannte Stützen [eSt]	links [L]	Sk-Q-StüB-1eSt-L-SD7°		
			rechts [R]	Sk-Q-StüB-1eSt-R-SD7°		
			Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-2eSt-PD7°		
			Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-2eSt-SD7°		
		Rahmen [R]	2 Gelenke [2G]	Pulldach [PD]	Sk-Q-R-2G-PD7°	
				Satteldach [SD]	Sk-Q-R-2G-SD7°	
			3 Gelenke einhüftig [1H]	Traufe [Tr]	Sk-Q-R-1h-Tr-PD7°	
				Pulldach [PD]		
First [Fi]	Sk-Q-R-1h-Fi-PD7°					
Satteldach [SD]						
3 Gelenke	links [L]		Sk-Q-R-1h-L-SD7°			
	rechts [R]		Sk-Q-R-1h-R-SD7°			
Gelenk am First [3GF]	Satteldach [SD]		Sk-Q-R-3GF-SD7°			



Tab. 7: Kostenabweichung vom Durchschnittspreis pro Binder in einer Spannweitengruppe

Erklärungen zur Tabelle 7: „Kostenabweichung vom Durchschnittspreis“:

[Anm. d. Red.: Diese Tabelle basiert auf der Tragwerkseinteilung der Ausklappseite und der Farbeinteilung der Spannweiten der Tabelle „Kosten pro Binder“]. In dieser Tabelle wird dargestellt, wie die Kosten einer Tragwerksvariante bei einer gewissen Spannweite vom Durchschnittspreis der jeweiligen Spannweite abweicht.

> 10 % über Durchschnittskosten
 0 - 10 % über Durchschnittskosten
 0 - 10 % unter Durchschnittskosten
 > 10 % unter Durchschnittskosten
 keine Berechnung erfolgt

5 weiterführende Literatur

Baukosten

5.4 Weiterführende Literatur

Für eine vertiefte Beschäftigung mit einzelnen Tier- und Lagerhaltungsverfahren bzw. dem Bau von Maschinenhallen werden Veröffentlichungen folgender Wissenstransfer-Einrichtungen bzw. folgende Einzelveröffentlichungen empfohlen:

Arbeitsgemeinschaft für Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e. V. (ALB Bayern e. V.)

Arbeitsblätter mit Informationen zur Planung und Ausgestaltung landwirtschaftlicher Gebäude und weiterer baulicher Anlagen (u. a. Rinder- und Sauenhaltung)

► https://www.alb-bayern.de/De/Bauen/BauForum/bauausfuehrung-landwirtschaftliche-betriebsgebaeude_Arbeitsblaetter

Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)

Div. Publikationen zu den Themen Landwirtschaftliches Bauen (u. a. Tierhaltung, Lagerung gartenbaulicher Produkte und Maschinenhallen)

► <https://www.ktbl.de/shop/produktkatalog/>

Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung (ÖKL)

Merkblätter zu den Themen Landwirtschaftliches Bauen, Energie und Technik (u. a. Rinder-, Kleinwiederkäuer-, Sauen- und Schweinehaltung, Heutrocknung)

► <http://oekl.at/publikationen/>

Einzelpublikationen:

(s. Literaturverzeichnis S. 89)

Internet:

Bayerische Gesetzestexte:

<https://www.gesetze-bayern.de/>

Deutsche Gesetzestexte:

<https://www.gesetze-im-internet.de/>

Europäische Gesetzestexte:

<https://eur-lex.europa.eu/>

6 Typenkatalog

Anwendungsbeispiel - Erläuterung der Typenkatalogseiten

Schnitt Unterbau inkl. Lichtraumprofile der Durchgänge/-fahrten

Grundriss inkl. möglicher Stützenpositionen

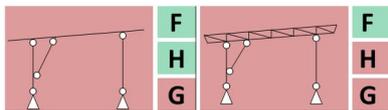
„Kleinste Funktionseinheit“:
 (≙ minimale Gebäudebreite mit allen benötigten Funktionsbereiche der dargestellten Nutzung)
 Darstellung der Funktionsbereiche

Nutzung

Darstellung der Tragwerke und deren Bewertung bezüglich

- [F] Funktion
- [H] Hygiene
- [G] Gestaltung

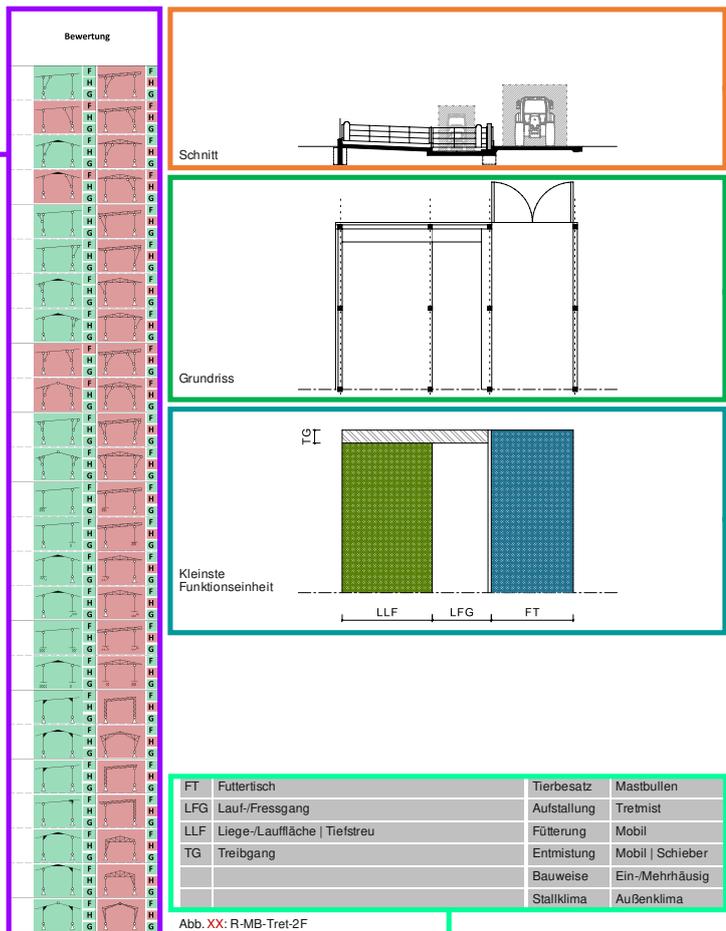
bei der dargestellten Nutzung über „Kleinster Funktionseinheit“



Für eine positive Bewertung des Tragwerks müssen alle drei Bewertungsfaktoren **[grün]** sein.

6 Typenkatalog

Rinder - Mastbullen - Tretmist-Zweiflächenbucht

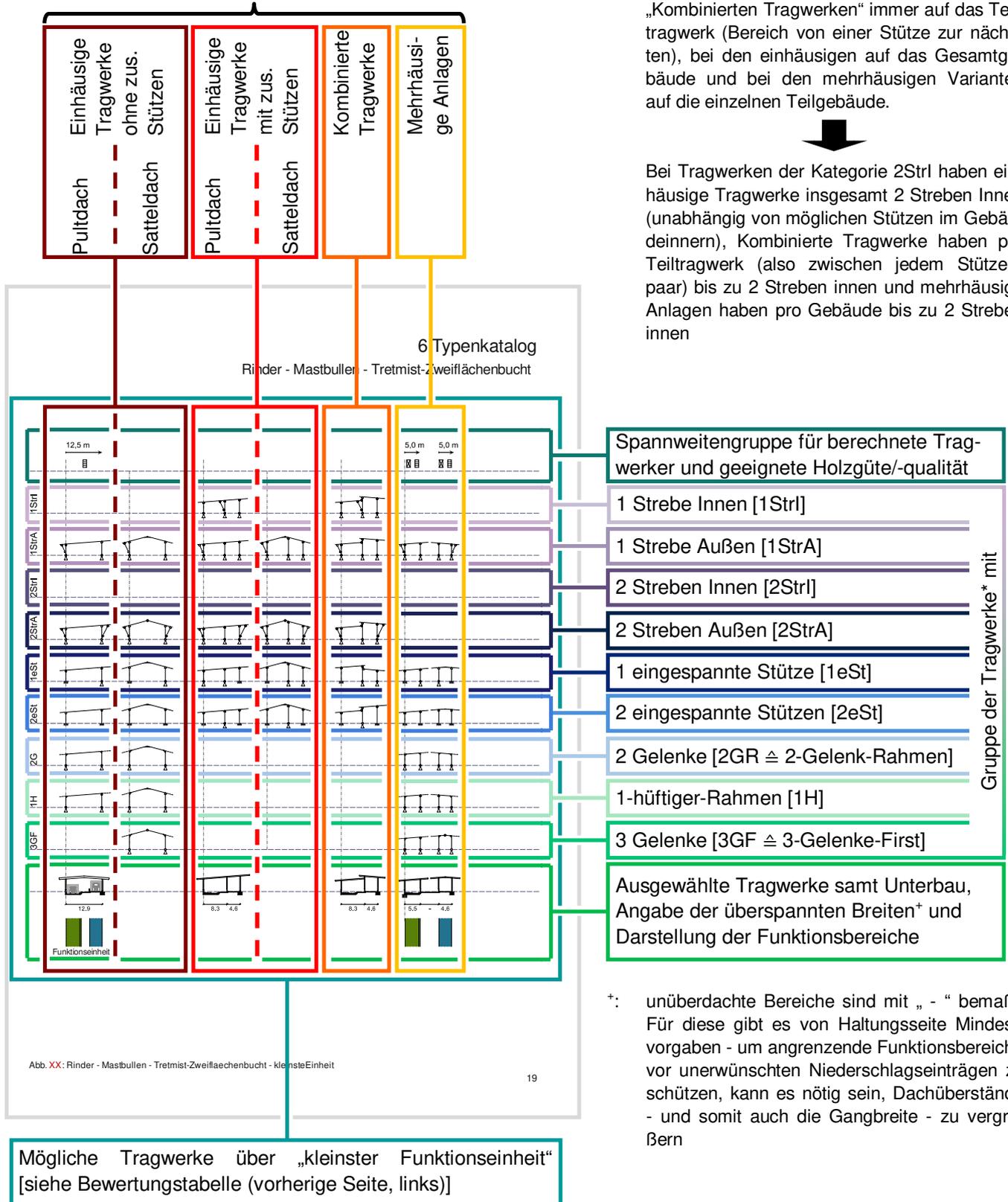


Legende zum Grundriss | Zusatzinformationen zur jeweiligen Nutzung

6 Typenkatalog

Anwendungsbeispiel - Erläuterung der Typenkatalogseiten

fehlt eine dieser Kategorie, rutschen die folgenden nach links



*: Der Tragwerksname bezieht sich bei den „Kombinierten Tragwerken“ immer auf das Teiltragwerk (Bereich von einer Stütze zur nächsten), bei den einhäusigen auf das Gesamtgebäude und bei den mehrhäusigen Varianten auf die einzelnen Teilgebäude.



Bei Tragwerken der Kategorie 2StrI haben einhäusige Tragwerke insgesamt 2 Streben Innen (unabhängig von möglichen Stützen im Gebäudeinnern), Kombinierte Tragwerke haben pro Teiltragwerk (also zwischen jedem Stützenpaar) bis zu 2 Streben innen und mehrehäusige Anlagen haben pro Gebäude bis zu 2 Streben innen

*: unüberdachte Bereiche sind mit „ - “ bemaßt. Für diese gibt es von Haltungsseite Mindestvorgaben - um angrenzende Funktionsbereiche vor unerwünschten Niederschlagseinträgen zu schützen, kann es nötig sein, Dachüberstände - und somit auch die Gangbreite - zu vergrößern

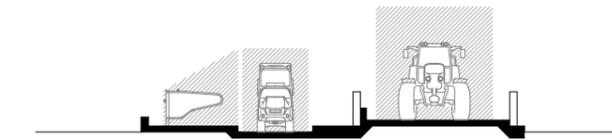
Abb. 24: Beispielseite 2

6 Typenkatalog

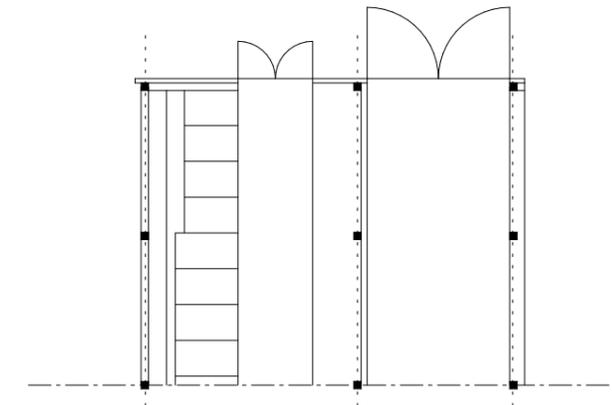
Rinder - Jungvieh

Bauweise	Ausrichtung Primärkonstruktion	Tragsystem	Variante	Namen	Bewertung			
Skelettbauweise [Sk]	quer [Q]	Stütze-Binder-System [StüB]	1 Strebe innen [1StrI]	Traufe [Tr]	Sk-Q-StüB-1StrI-Tr-PD7°			
				Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-1StrI-Fi-PD7°			
				links [L]	Sk-Q-StüB-1StrI-L-SD7°			
				rechts [R]	Sk-Q-StüB-1StrI-R-SD7°			
			1 Strebe außen [1StrA]	Traufe [Tr]	Sk-Q-StüB-1StrA-Tr-PD7°			
				Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-1StrA-Fi-PD7°			
				links [L]	Sk-Q-StüB-1StrA-L-SD7°			
				rechts [R]	Sk-Q-StüB-1StrA-R-SD7°			
			2 Streben	innen [2StrI]	Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-2StrI-PD7°		
					Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-2StrI-SD7°		
				außen [2StrA]	Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-2StrA-PD7°		
					Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-2StrA-SD7°		
		1 eingespannte Stütze [eSt]	links [L]	Traufe [Tr]	Sk-Q-StüB-1eSt-L-SD7°			
				rechts [R]	Sk-Q-StüB-1eSt-R-SD7°			
			rechts [R]	Traufe [Tr]	Sk-Q-StüB-1eSt-Tr-PD7°			
				Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-1eSt-Fi-PD7°			
		2 eingespannte Stützen [eSt]	links [L]	Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-2eSt-L-SD7°			
				rechts [R]	Sk-Q-StüB-2eSt-R-SD7°			
			rechts [R]	Pulldach [PD]	Sk-Q-StüB-2eSt-Tr-PD7°			
				Satteldach [SD]	Sk-Q-StüB-2eSt-Fi-PD7°			
		Rahmen [R]	2 Gelenke [2G]	Pulldach [PD]	Sk-Q-R-2G-PD7°			
				Satteldach [SD]	Sk-Q-R-2G-SD7°			
			3 Gelenke	einhüftig [1H]	Traufe [Tr]	Sk-Q-R-1h-Tr-PD7°		
					Pulldach [PD]	Sk-Q-R-1h-Fi-PD7°		
links [L]	Traufe [Tr]			Sk-Q-R-1h-L-SD7°				
	rechts [R]			Sk-Q-R-1h-R-SD7°				
Gelenk am First [3GF]	Satteldach [SD]		Sk-Q-R-3GF-SD7°					

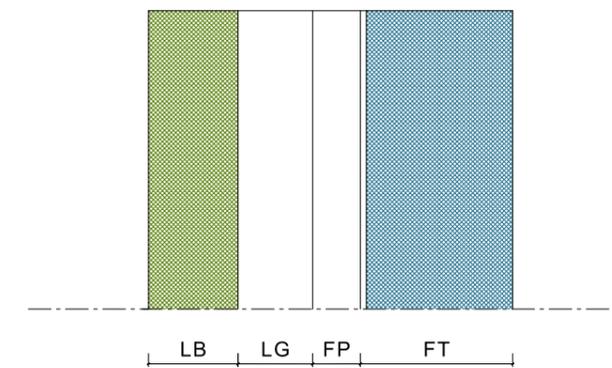
Schnitt



Grundriss



Kleinste Funktionseinheit

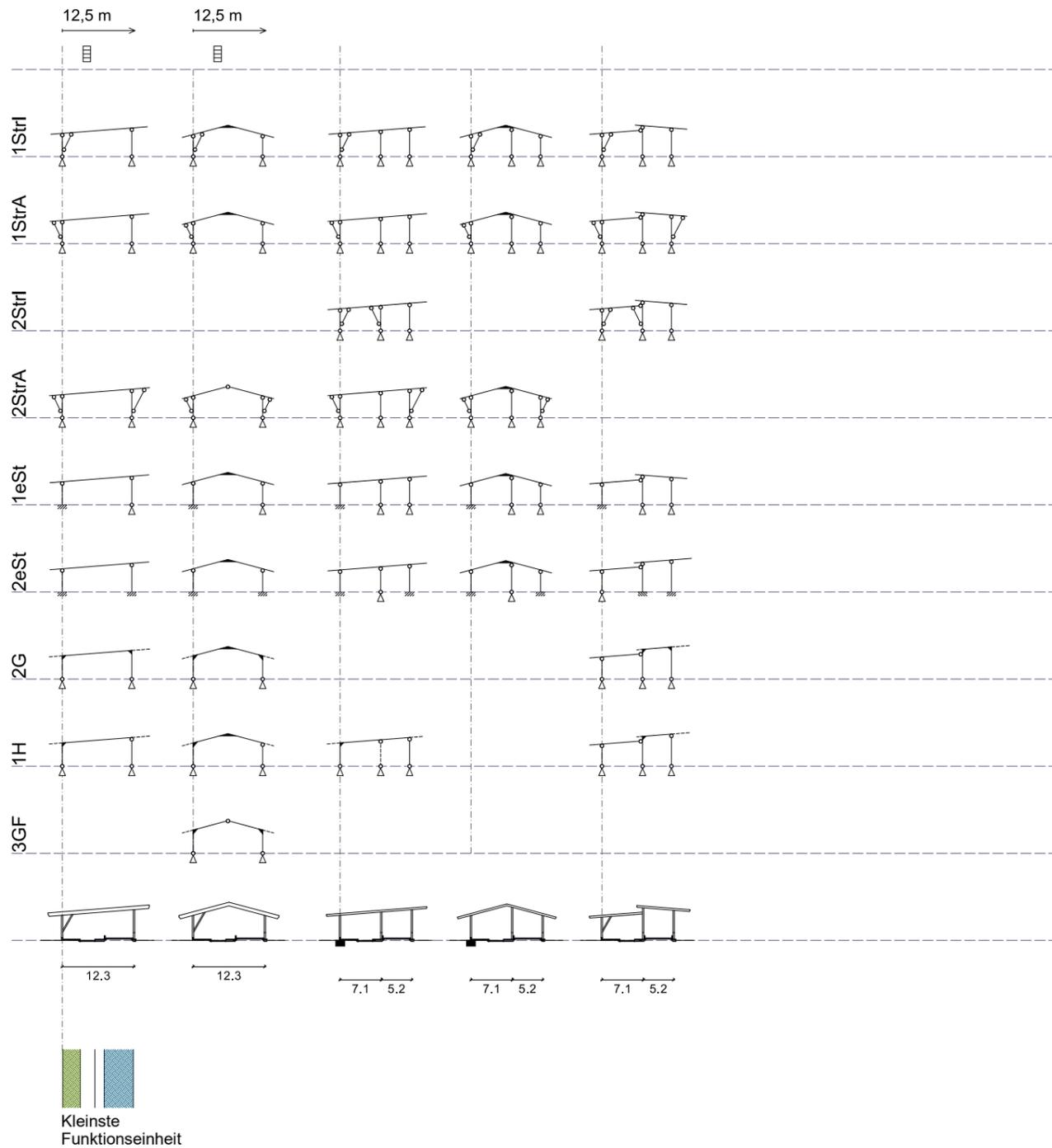


FT	Futterschale	Tierbesatz	Jungvieh
FP	Fressplatz	Aufstallung	Liegeboxen
LG	Laufgang	Fütterung	Mobil
LB	Liegeboxen	Entmistung	Mobil Spalten Schieber
		Bauweise	Einhäusig*
		Stallklima	Außenklima

Abb. 25: R-JV-1R-LB

6 Typenkatalog

Rinder - Jungvieh



Legende Tragwerke

	Einspannung		VH/ KVH	Vollholz/ Konstruktionsvollholz
	Gelenk		BSH	Brettschichtholz
	Gelenk	FW	FW	Fachwerk
	Biegesteife Ecke			

Bewertung

F	Funktion
H	Hygiene ¹
G	Gestaltung

¹ Generell kein Fachwerk
 Ausnahmen in Tierhaltung: Warmställe (z.B. Schweine, Geflügel), Pferde Reithalle
 Ausnahmen in Lebensmittellagerung: Kartoffel, Zwiebel

	Bedingung erfüllt		Bedingung nicht erfüllt
--	-------------------	--	-------------------------

Legende Funktionsbereiche

	Futtervorlage
	Liegebereich
	Aktivitätsbereich
	Treib-/Servicegang
	Lager

Sortierung der Verfahren

Kategorie	Unterkategorie
(R)	Rinder K Kälber Jv Jungvieh Mv Milchvieh Mb Mastbullen Mk Mutterkühe
(S)	Schweine Dw Deck- und Wartesauen Af Abferkelbuch Fe Ferkelaufzucht Ms Mastschweine
(Kw)	Kleinwiederkäuer Ma Mastschafe/-ziegen Mi Milchscheffe/-ziegen
(G)	Geflügel Mg Mastgeflügel Lh Legehennen
(Pf)	Pferde Gh Gruppenhaltung Eh Einzelhaltung Rh Reithalle
(L)	Lager Hackschnitzel Getreide Düngemittel Heubelüftung Kartoffeln Zwiebel Maschinen

Fußnote zu Typenblättern

- * Mehrhäusigkeit bietet nicht die erforderliche Sicherheit gegen unerwünschte Niederschlägeinträge in die angrenzenden Funktionsbereiche.
- ** bei Getreidelagerung, aus hygienisch Gründen, kein Fachwerk.

Legende Bindervarianten

	Variante mit einfachem Binder
	Variante mit geteiltem Binder

Legende zu Tabelle Kippunkte

	Nadelvollholz [NVH]	b/h ≤ 12/38 cm bzw. 20/32 cm	alle Bauteile aus Nadelvollholz
	Brettschichtholz [BSH]	h ≤ 60 cm	mind. ein Bauteil aus Brettschichtholz
	Brettschichtholz [BSH]	h > 60 cm	mind. ein Bauteil aus Brettschichtholz

Abb. 26: R-JV-1R-LB Tragwerkvarianten A

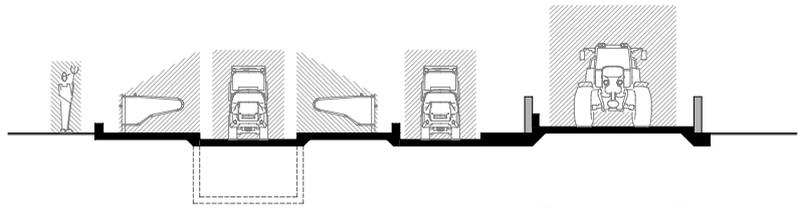
6 Typenkatalog

Rinder - Jungvieh

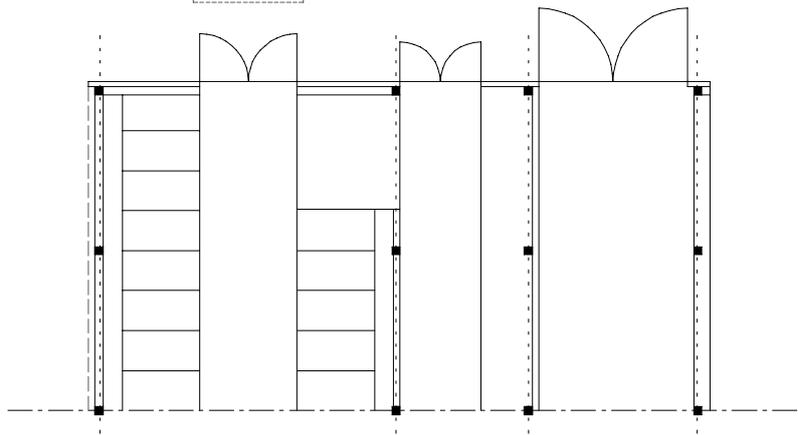
Bewertung

	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G

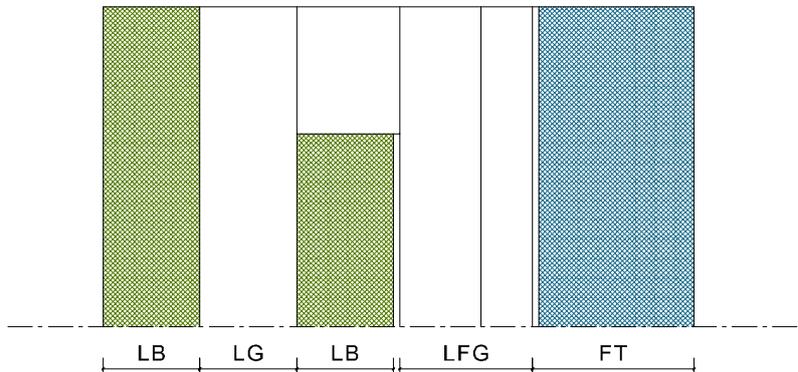
Schnitt



Grundriss



Kleinste Funktionseinheit



FT	Futtertisch	Tierbesatz	Jungvieh
LFG	Lauf-/Fressgang	Aufstallung	Liegeboxen
LB	Liegeboxen	Fütterung	Mobil
LG	Laufgang	Entmistung	Mobil Spalten Schieber
		Bauweise	Ein-/Mehrhäusig
		Stallklima	Außenklima

Abb. 27: R-JV-2R-LB

6 Typenkatalog

Rinder - Jungvieh

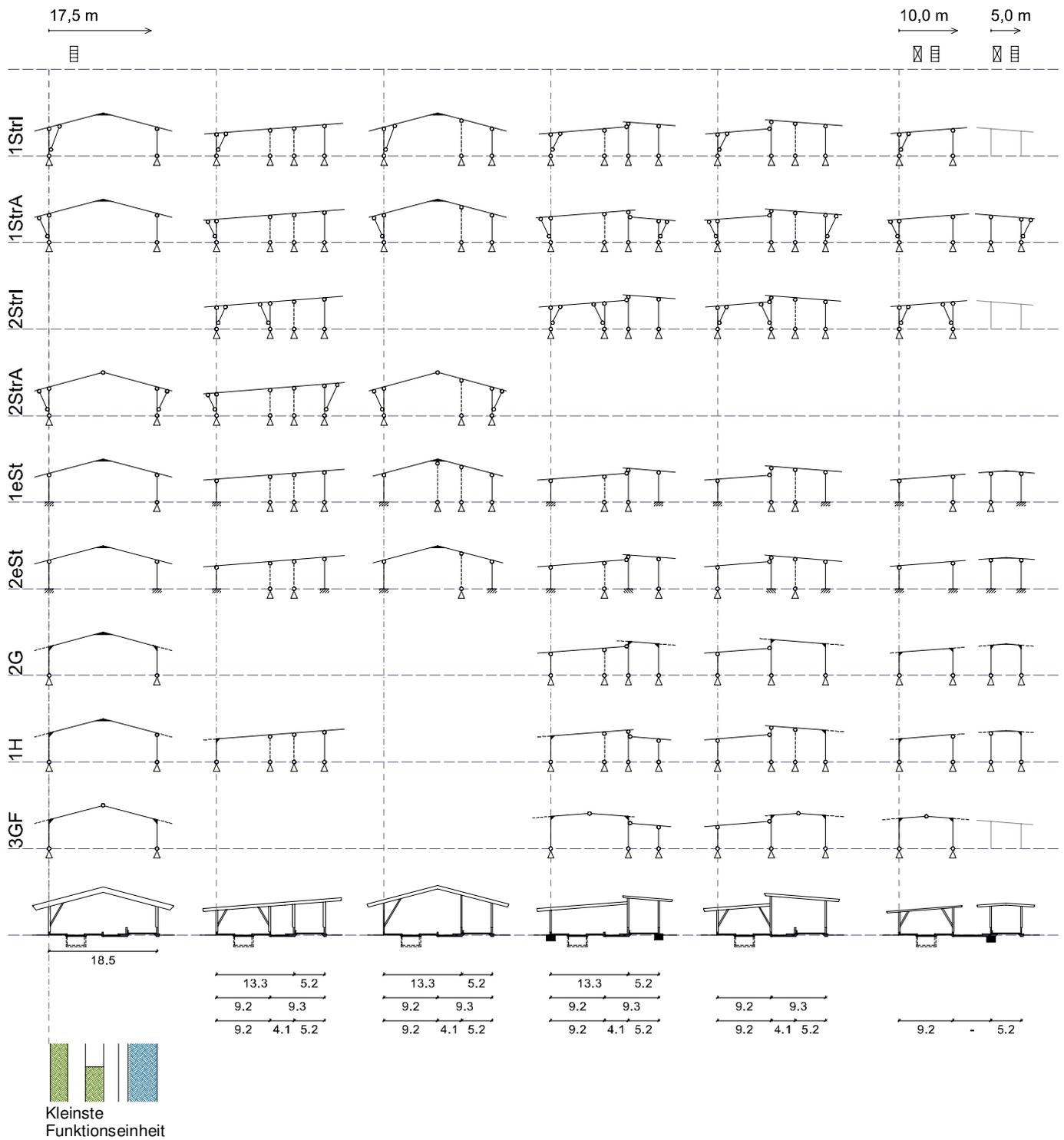


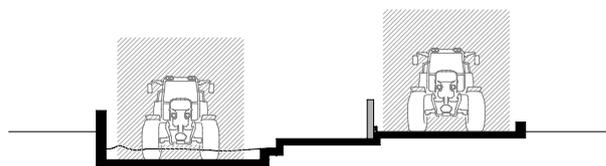
Abb. 28: R-JV-2R-LB Tragwerkvarianten A

6 Typenkatalog

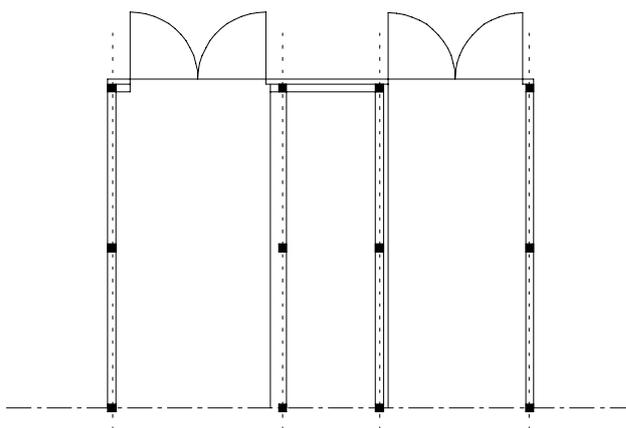
Rinder - Jungvieh

Bewertung

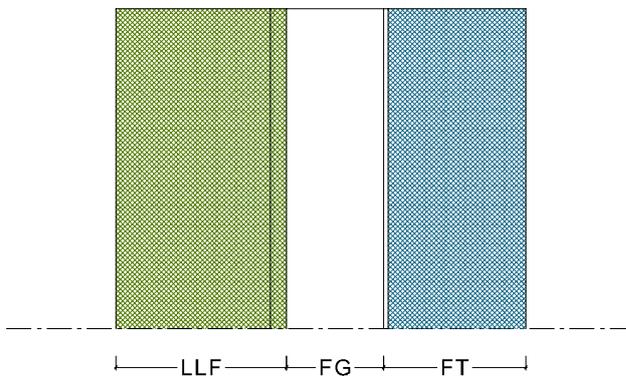
Schnitt



Grundriss



Kleinste Funktionseinheit



FT	Futtertisch	Tierbesatz	Jungvieh
FG	Fressgang	Aufstallung	Tiefstreu
LLF	Liege-/Lauffläche	Fütterung	Mobil
		Entmistung	Mobil Schieber
		Bauweise	Ein-/Mehrhäusig
		Stallklima	Außenklima

Abb. 29: R-JV-TS

6 Typenkatalog

Rinder - Jungvieh

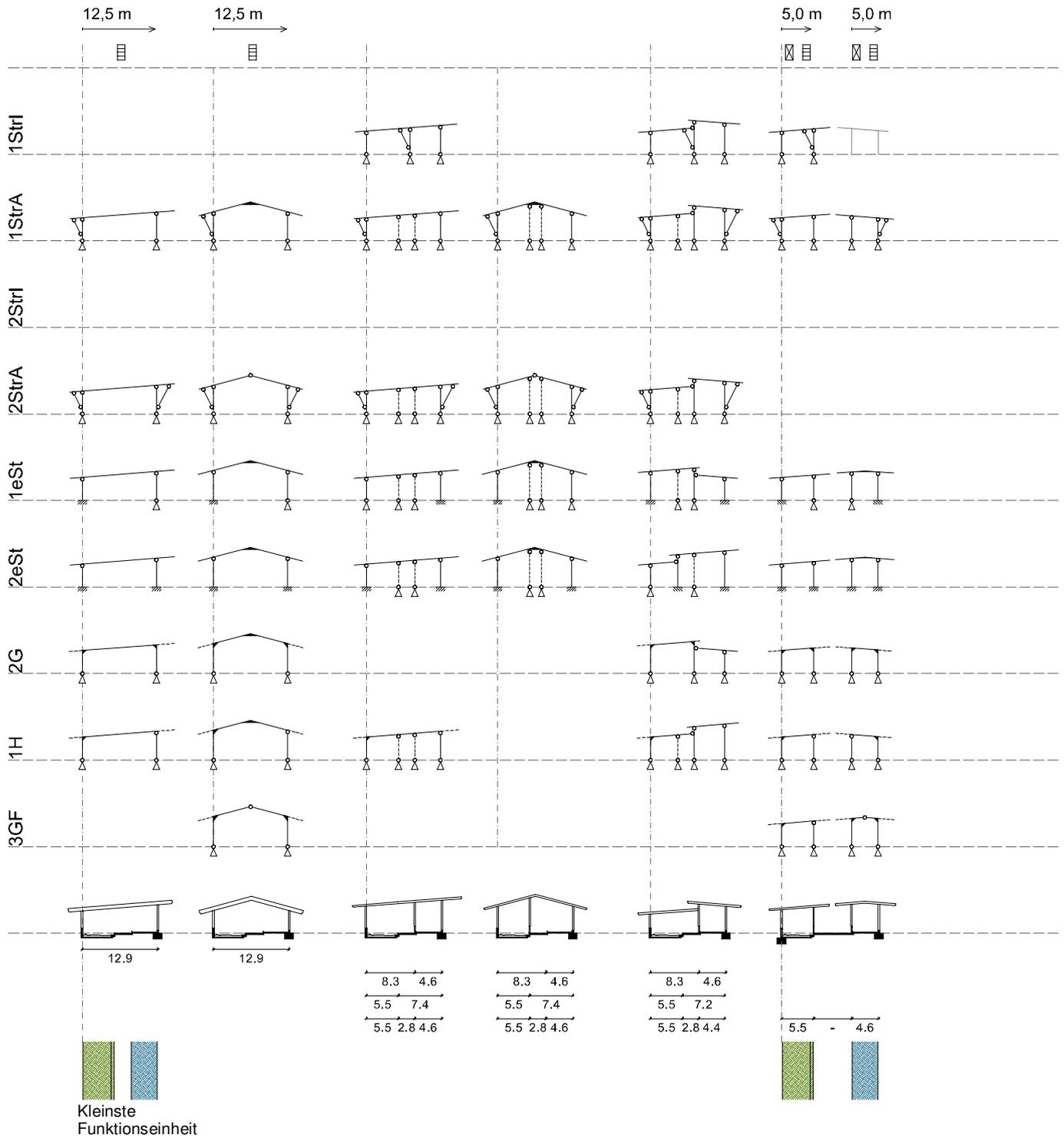


Abb. 30: R-JV-TS Tragwerkvarianten

6 Typenkatalog

Rinder - Milchvieh

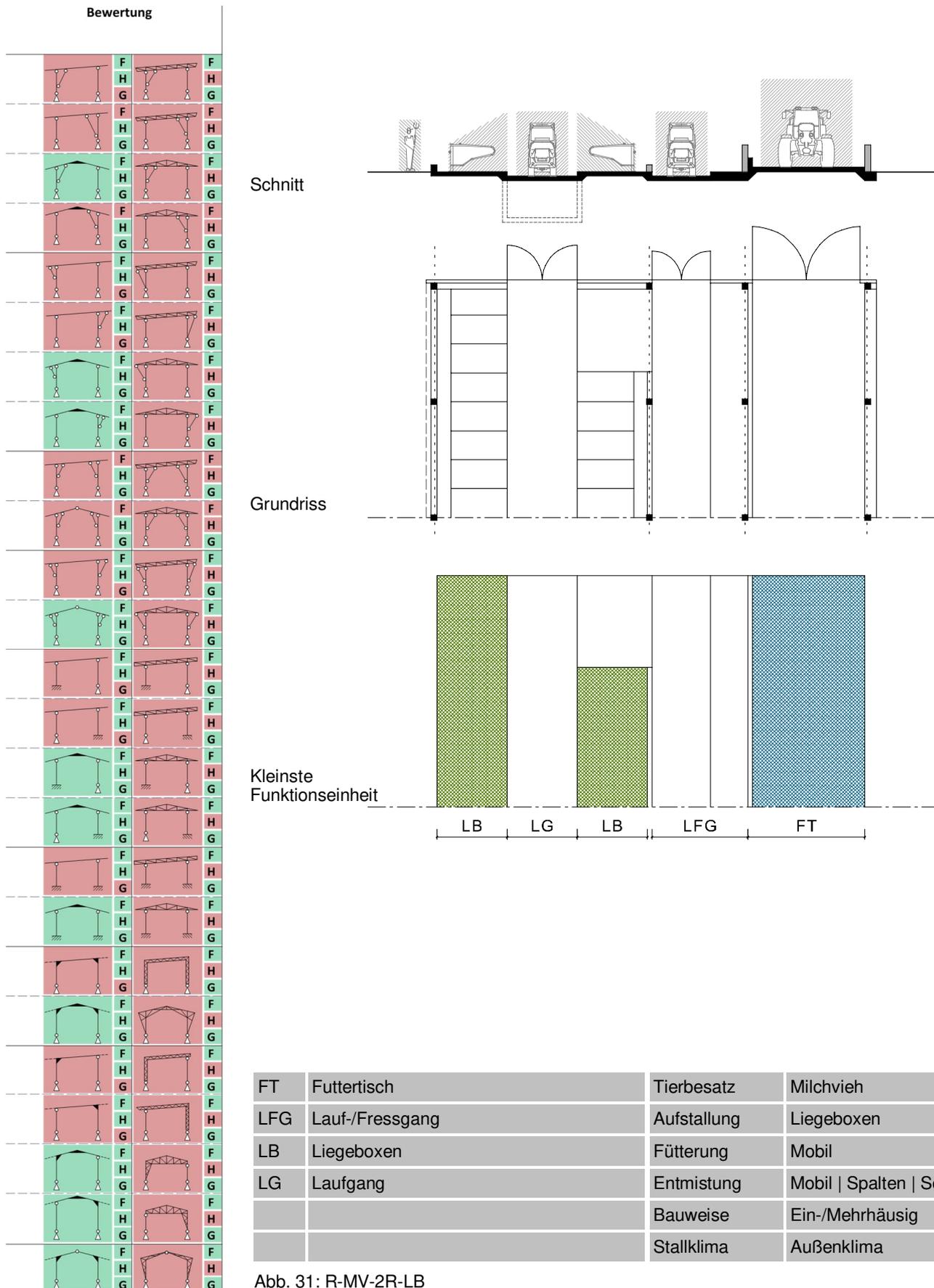


Abb. 31: R-MV-2R-LB

6 Typenkatalog

Rinder - Milchvieh

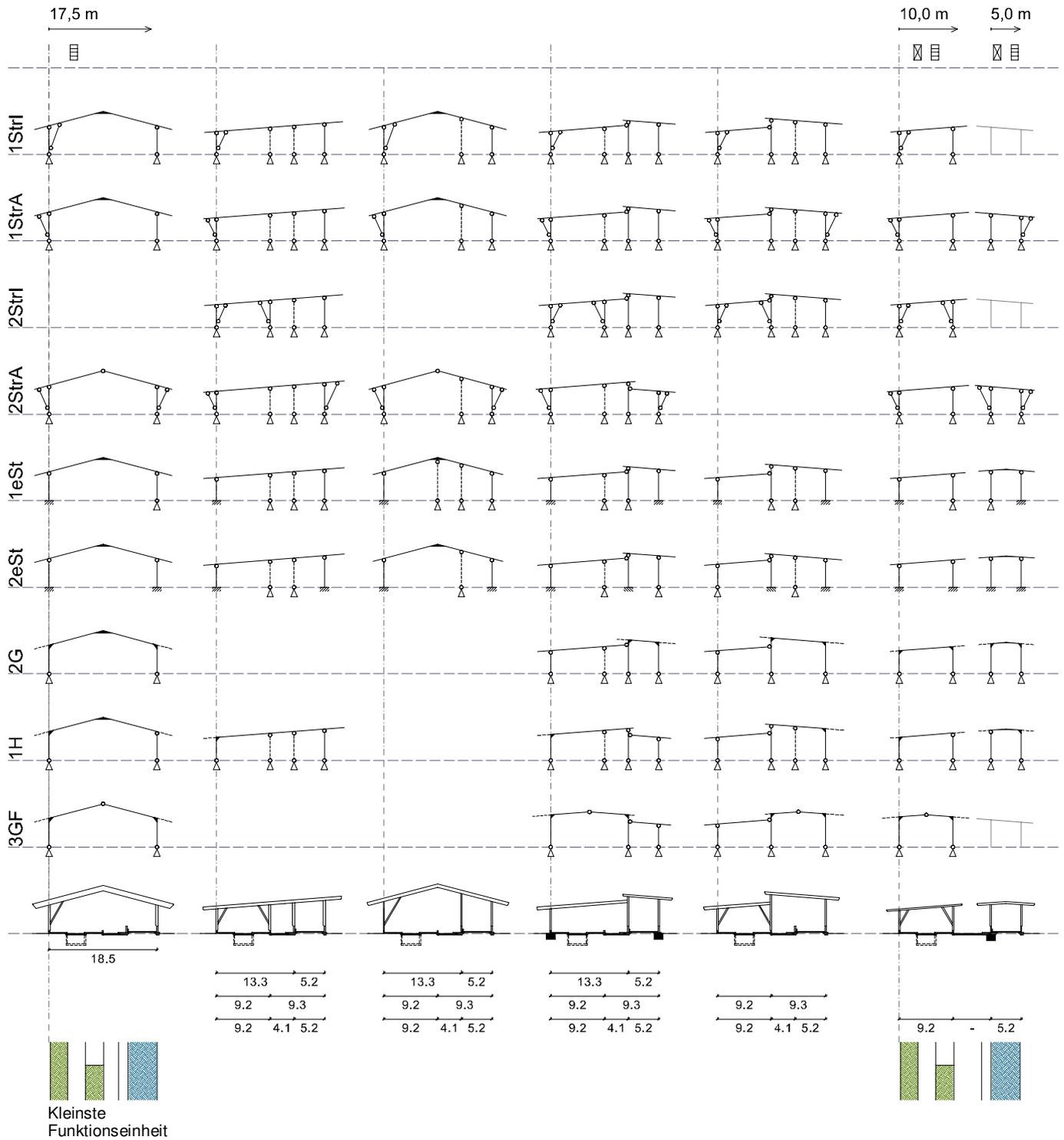


Abb. 32: R-MV-2R-LB Tragwerkvarianten A

6 Typenkatalog

Rinder - Milchvieh

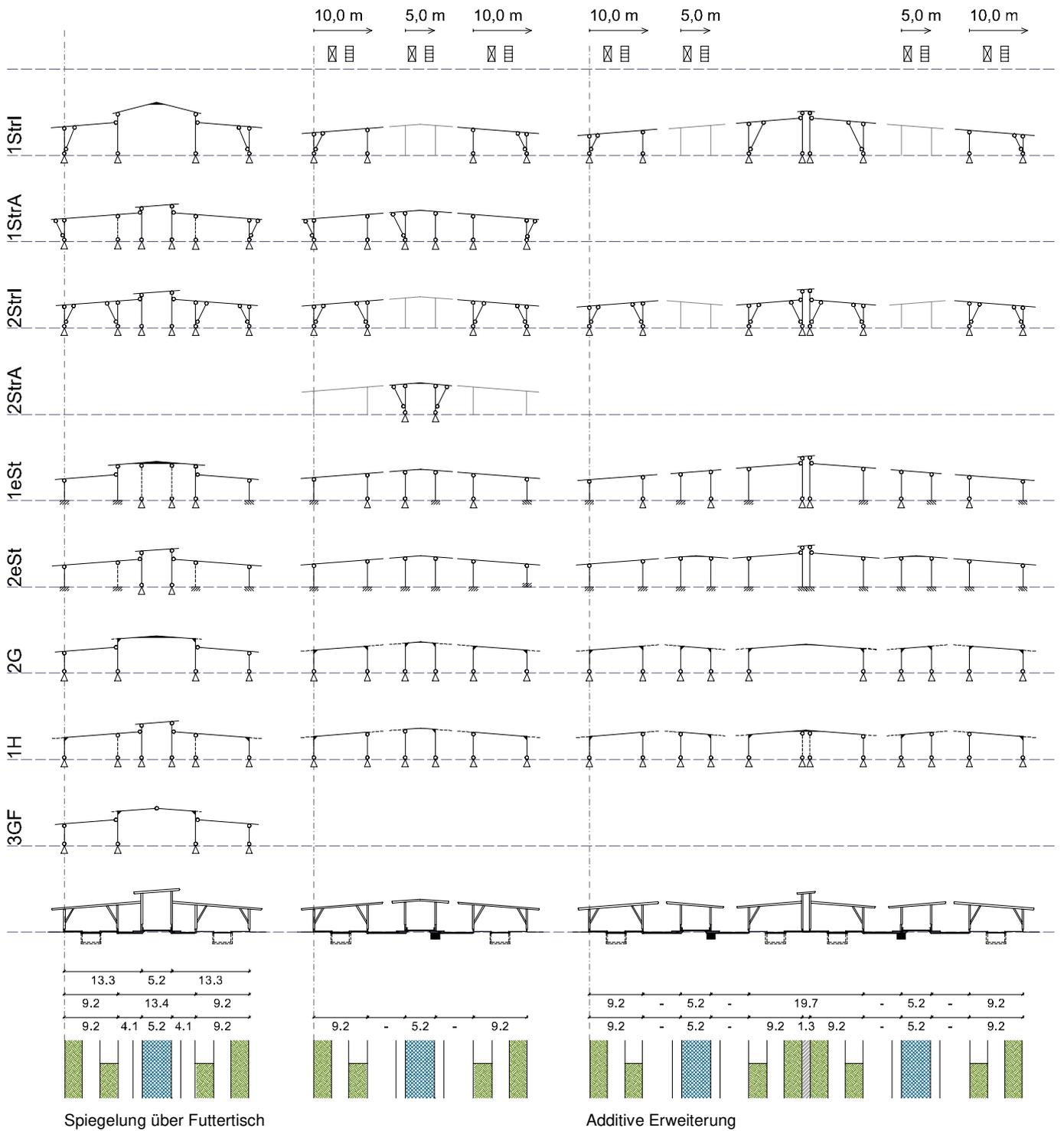


Abb. 33: R-MV-2R-LB Tragwerkvarianten B

6 Typenkatalog

Rinder - Milchvieh

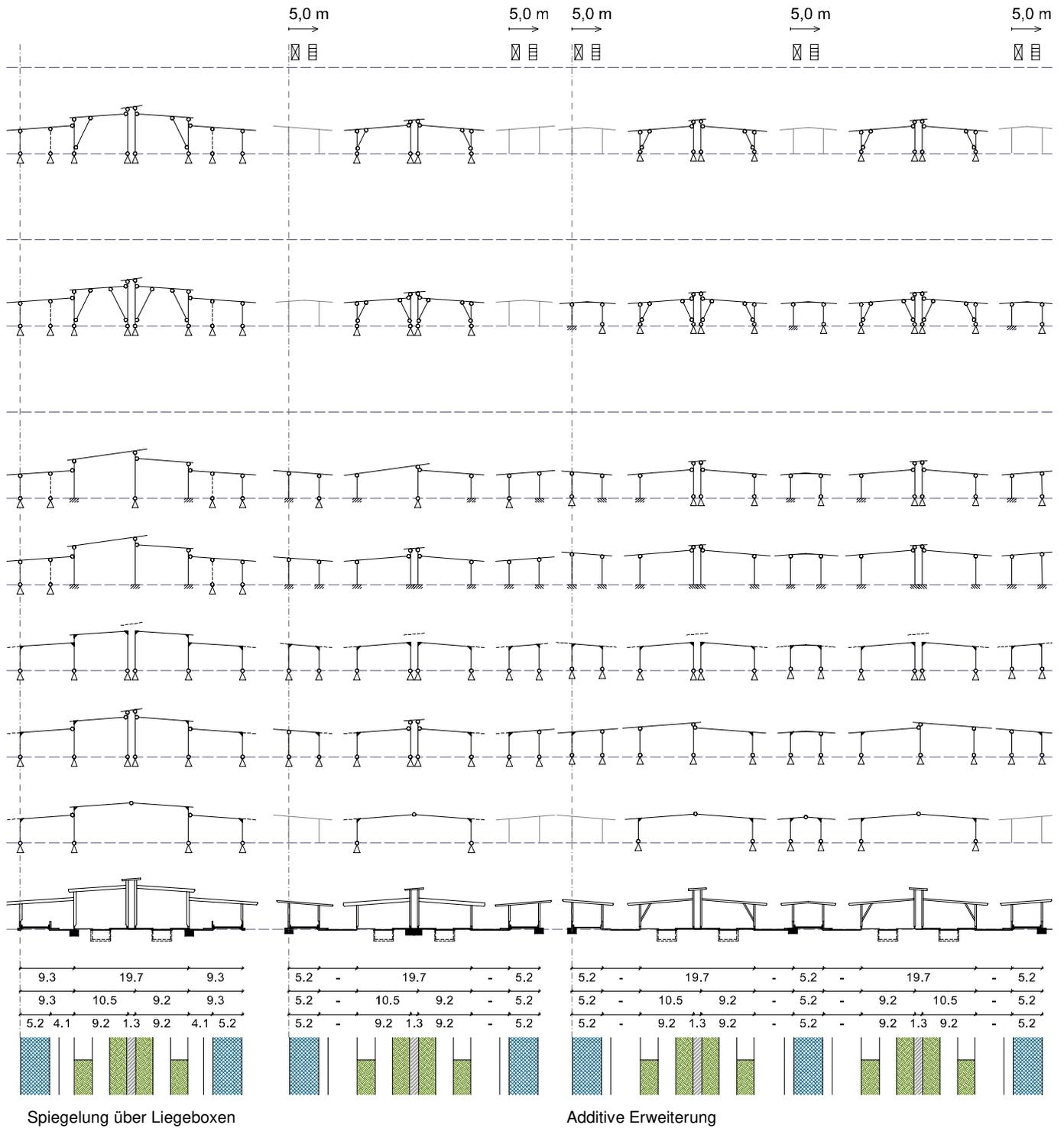


Abb. 34: R-MV-2R-LB Tragwerkvarianten C

6 Typenkatalog

Rinder - Milchvieh

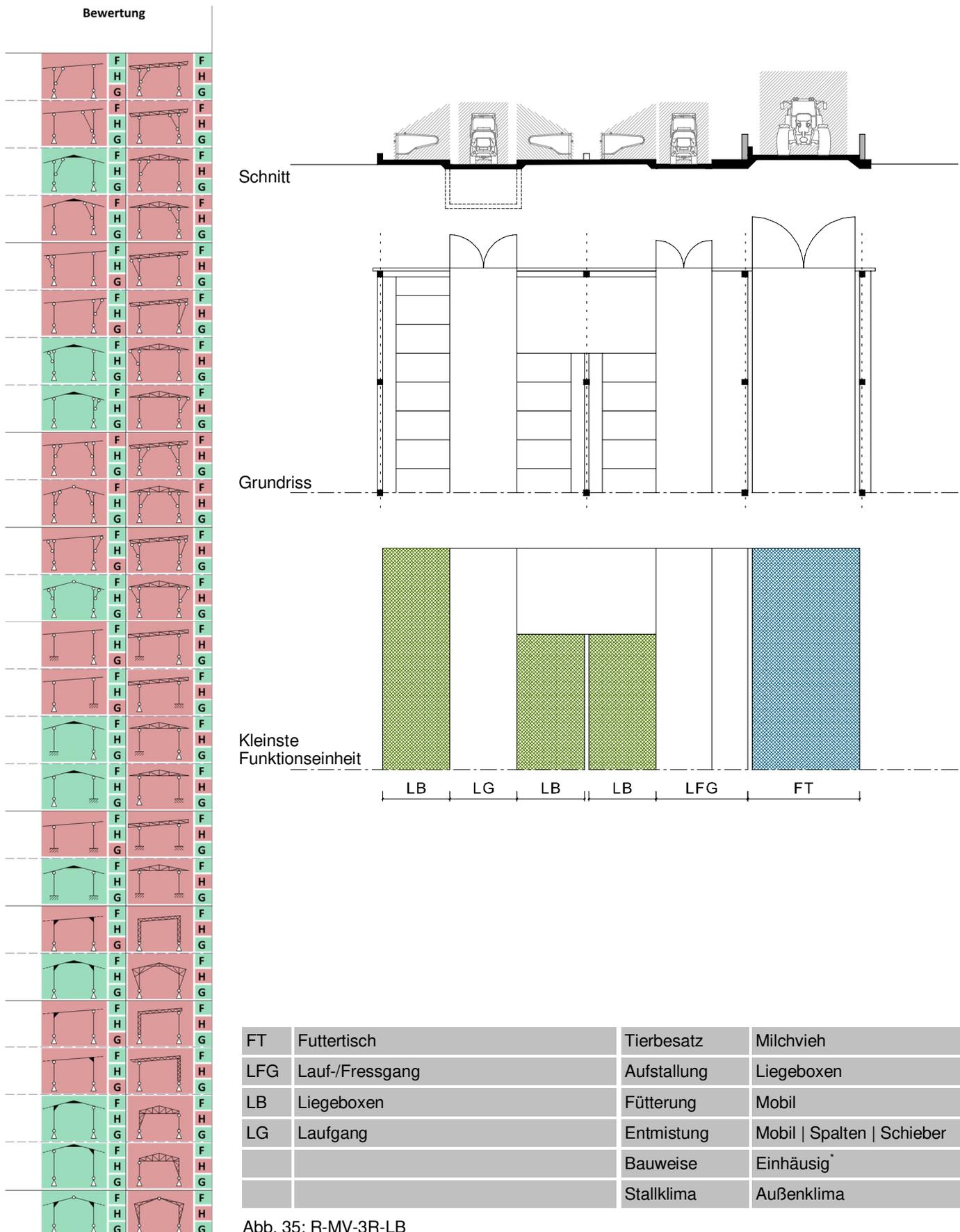


Abb. 35: R-MV-3R-LB

6 Typenkatalog

Rinder - Milchvieh

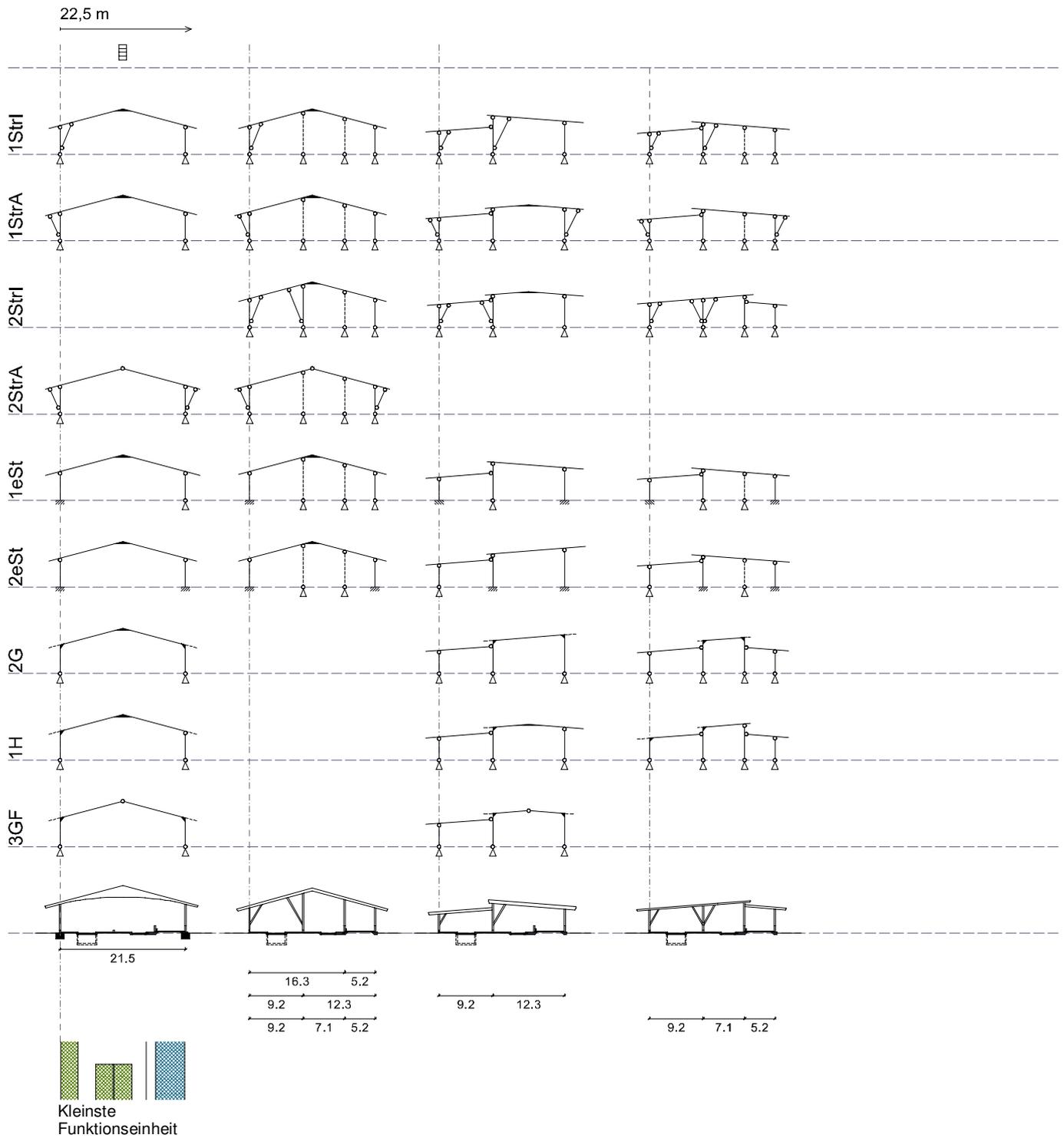


Abb. 36: R-MV-3R-LB Tragwerkvarianten A

6 Typenkatalog

Rinder - Milchvieh

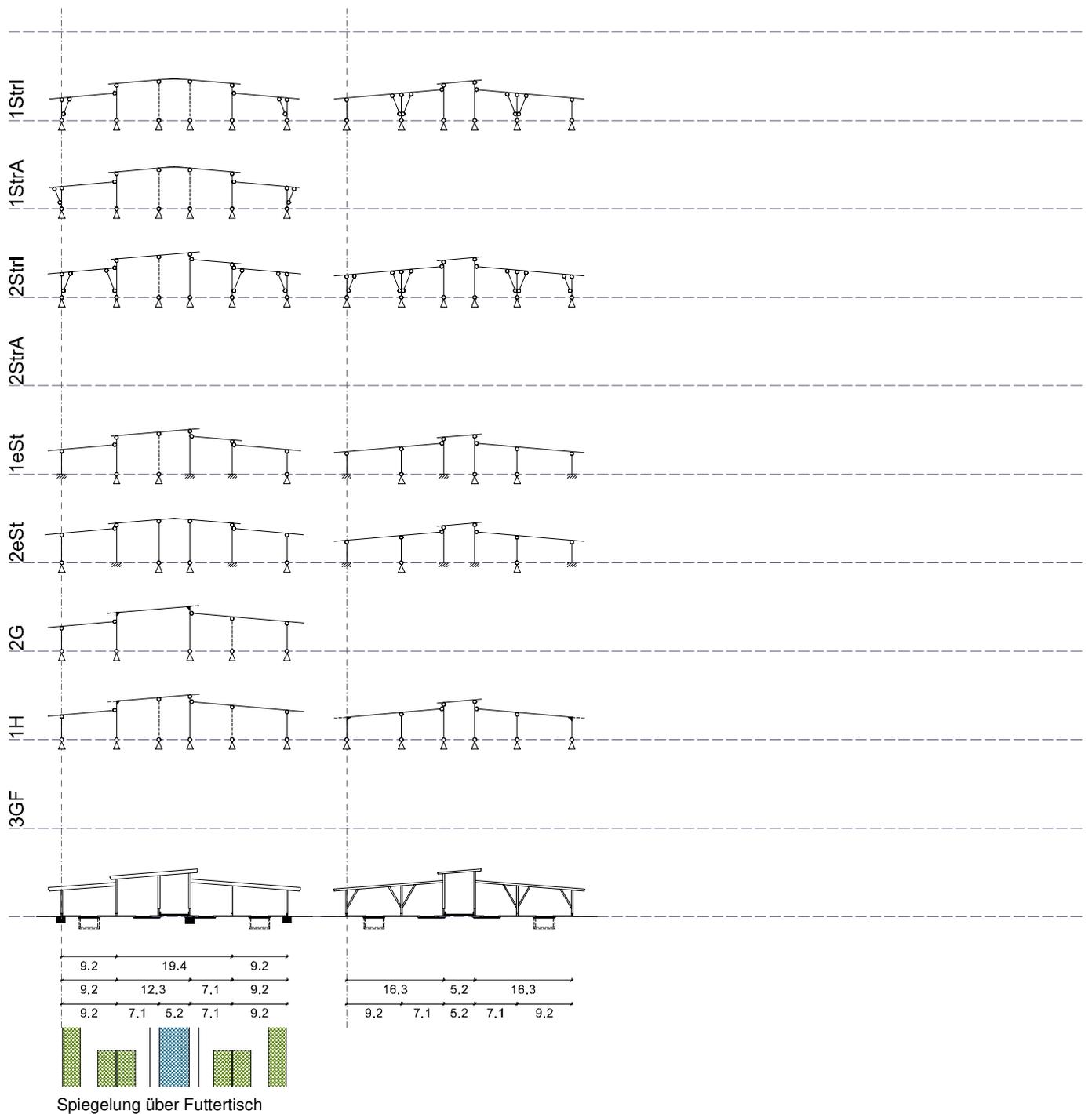


Abb. 37: R-MV-3R-LB Tragwerkvarianten B

6 Typenkatalog

Rinder - Milchvieh

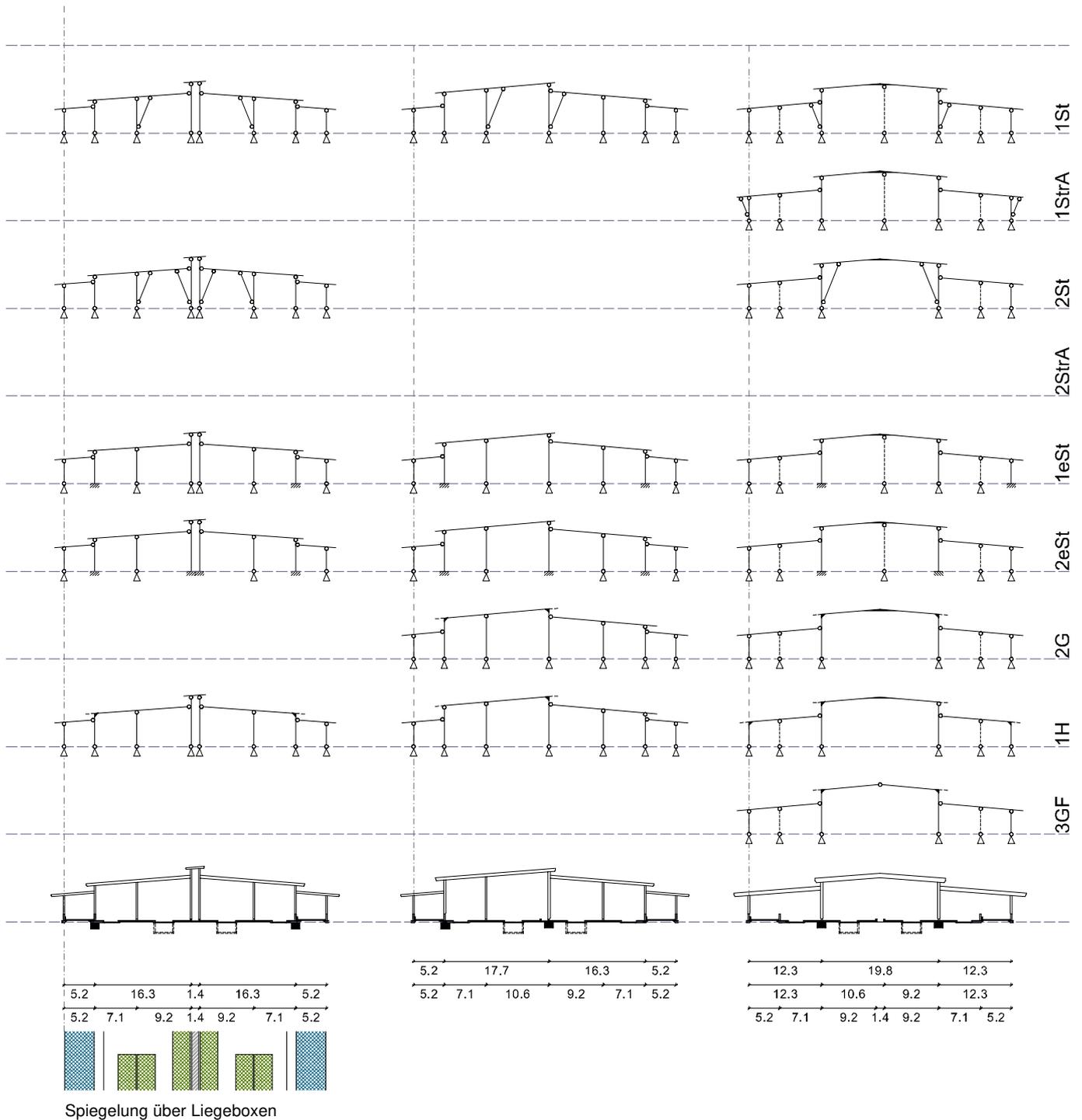


Abb. 38: R-MV-3R-LB Tragwerkvarianten C

6 Typenkatalog

Rinder - Milchvieh

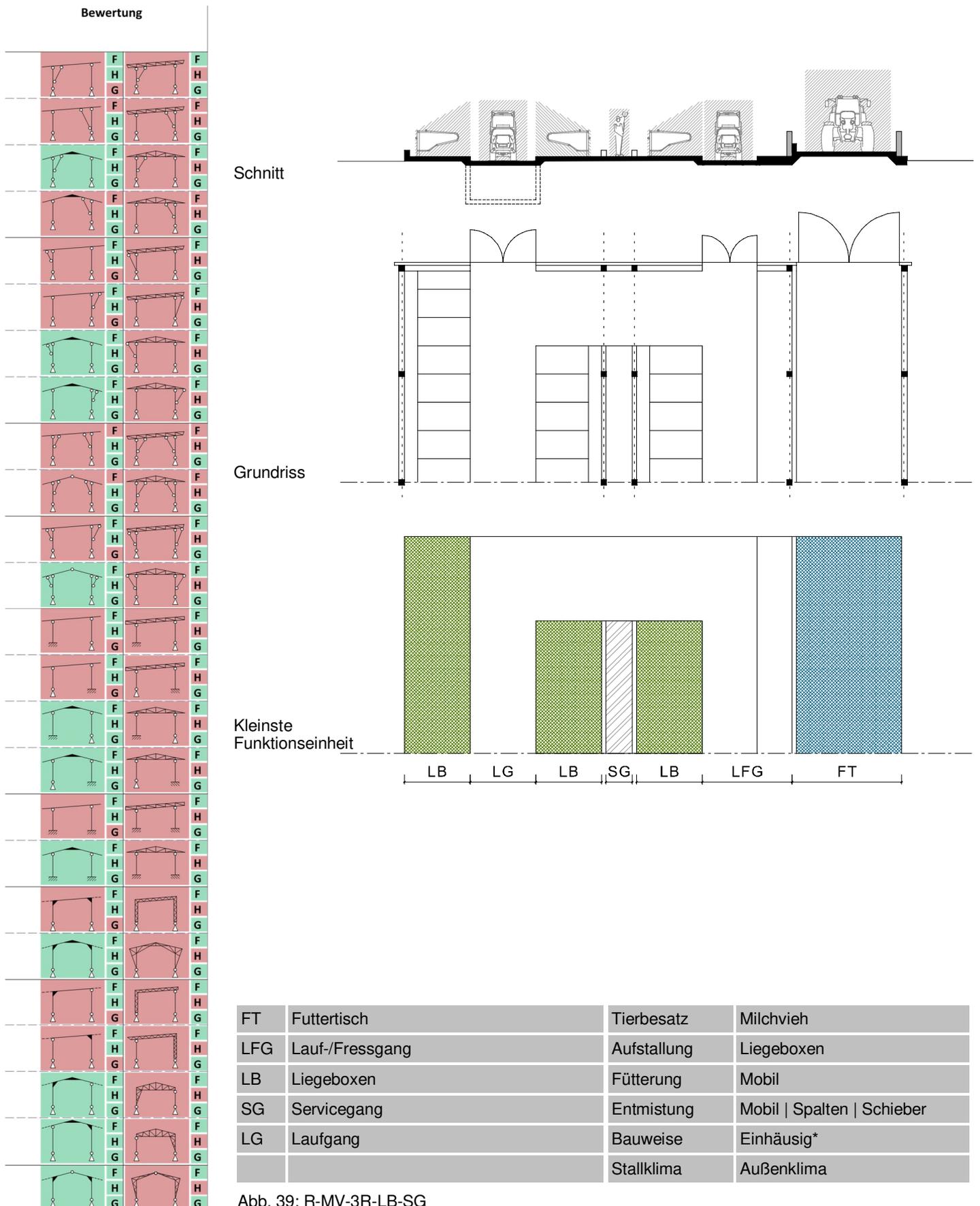


Abb. 39: R-MV-3R-LB-SG

6 Typenkatalog

Rinder - Milchvieh

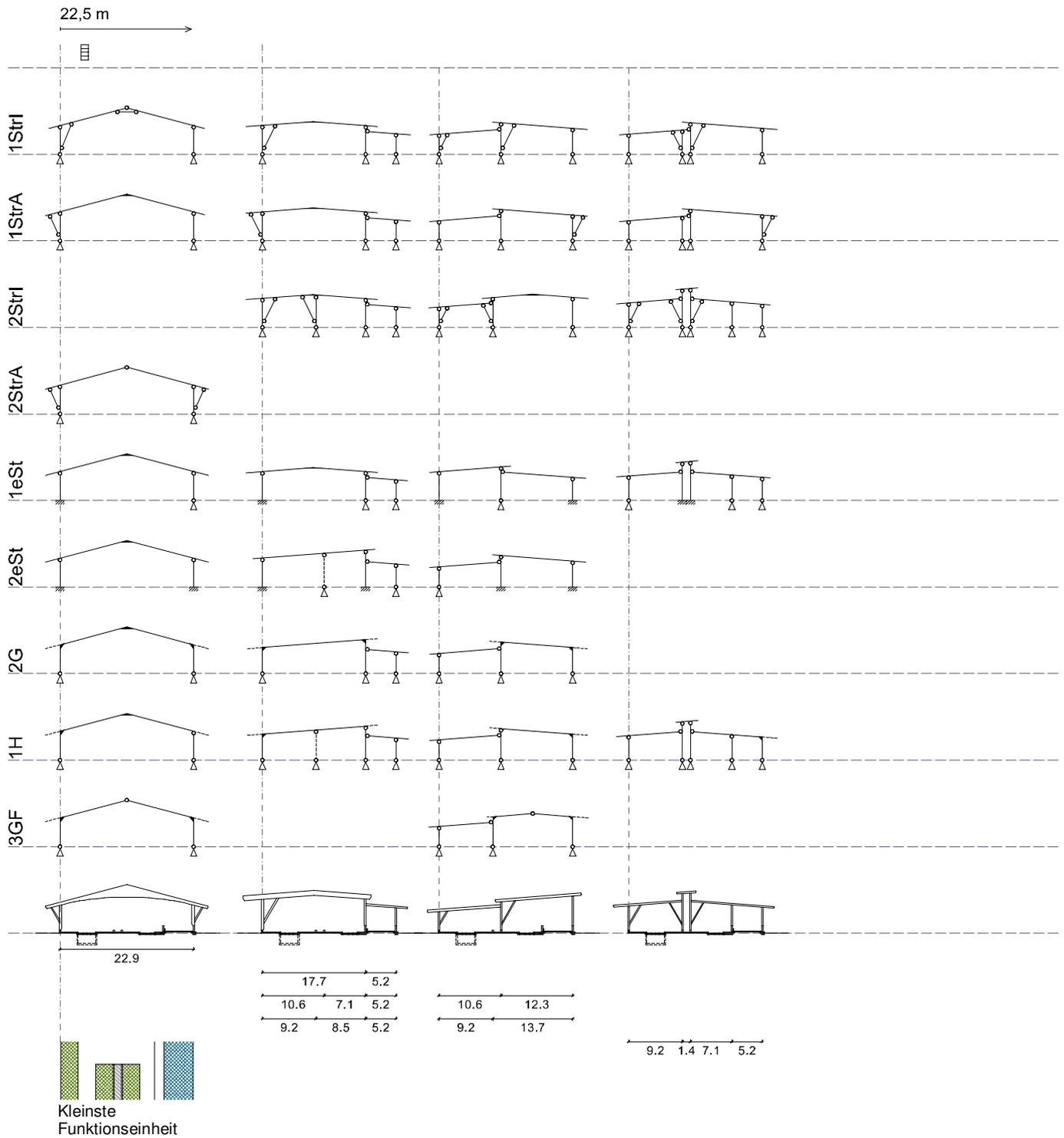


Abb. 40: R-MV-3R-LB-SG Tragwerkvarianten A

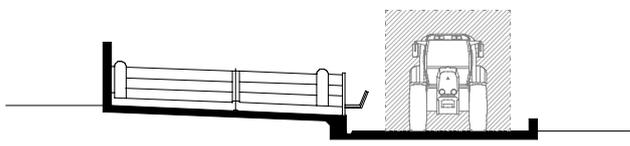
6 Typenkatalog

Rinder - Mastbullen

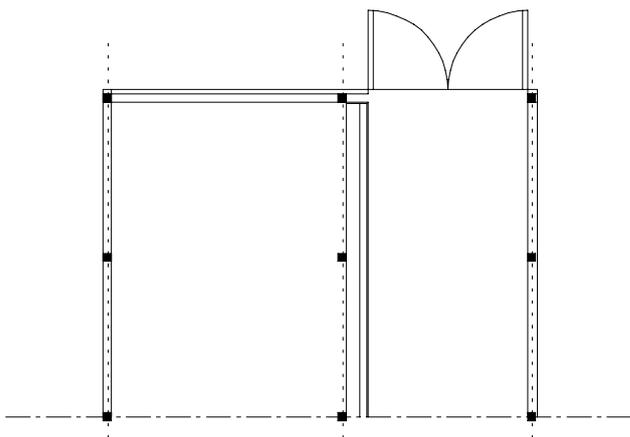
Bewertung

	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G

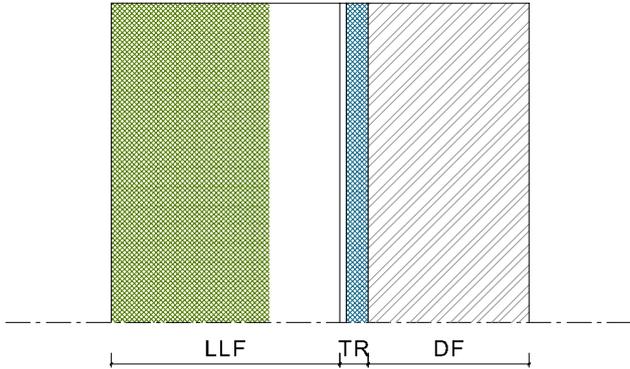
Schnitt



Grundriss



Kleinste Funktionseinheit



DF	Durchfahrt	Tierbesatz	Mastbullen
TR	Trog	Aufstallung	Tretmist Einflächenbucht
LLF	Liege-/Lauffläche	Fütterung	Mobil
		Entmistung	Mobil Schieber
		Bauweise	Einhäusig*
		Stallklima	Außenklima

Abb. 41: R-MB-TM-1F

6 Typenkatalog

Rinder - Mastbullen

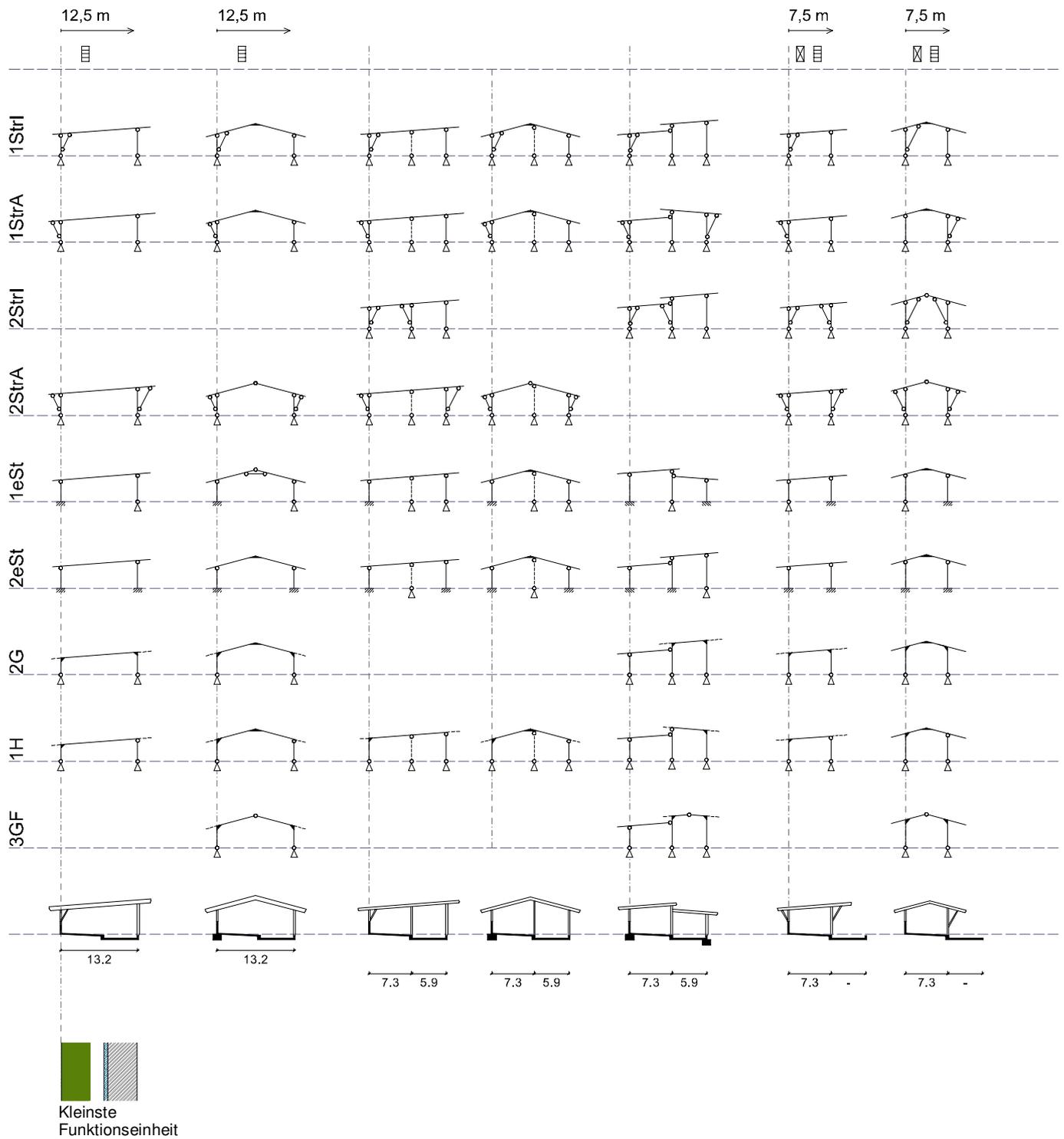


Abb. 42: R-MB-TM-1F Tragwerkvarianten A

6 Typenkatalog

Rinder - Mastbullen

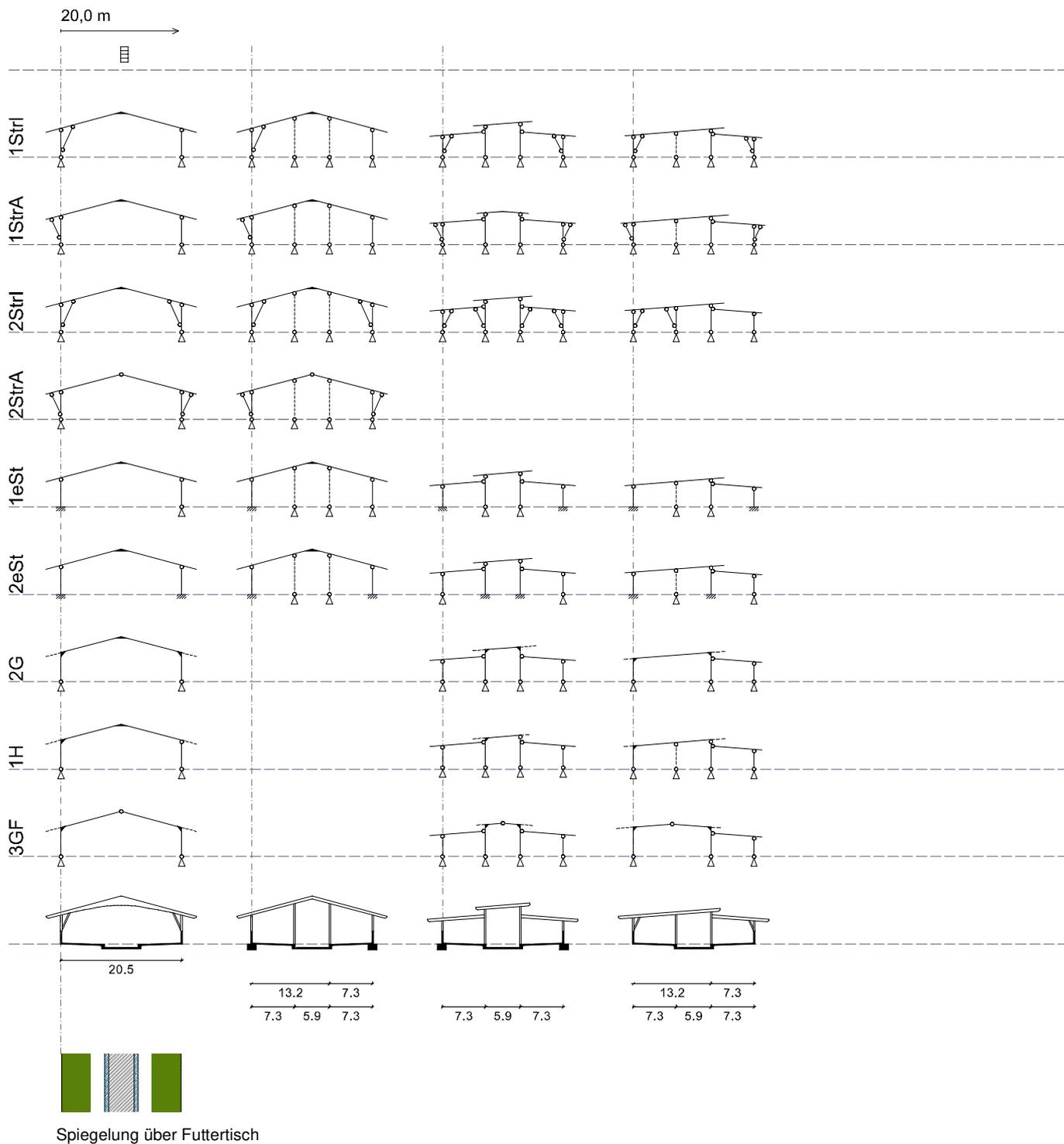


Abb. 43: R-MB-TM-1F Tragwerkvarianten B

6 Typenkatalog

Rinder - Mastbullen

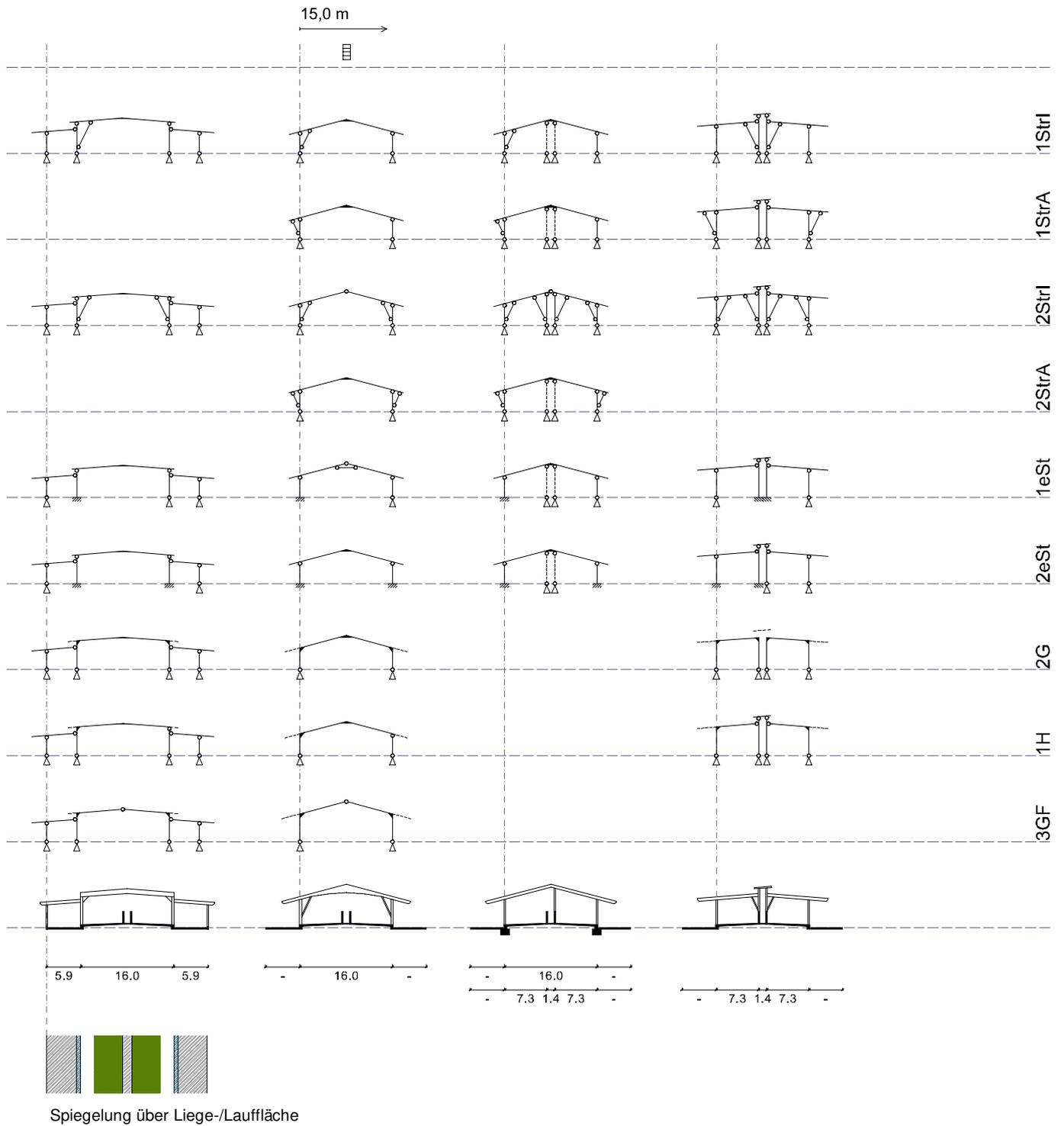


Abb. 44: R-MB-TM-1F Tragwerkvarianten C

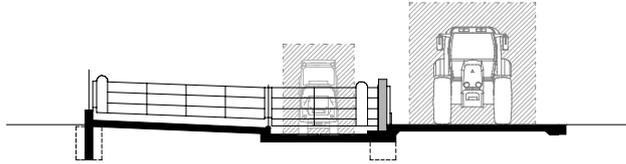
6 Typenkatalog

Rinder - Mastbullen

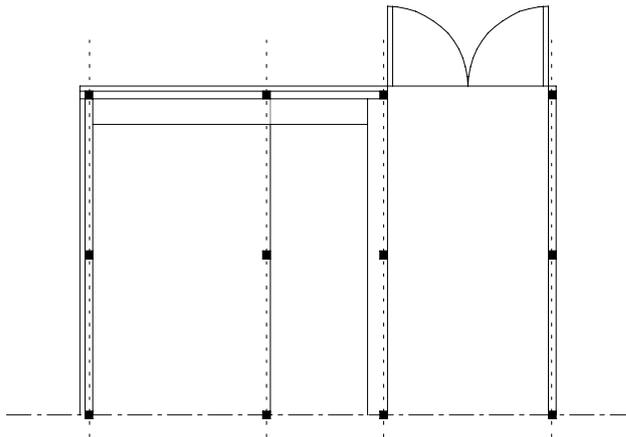
Bewertung

	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G

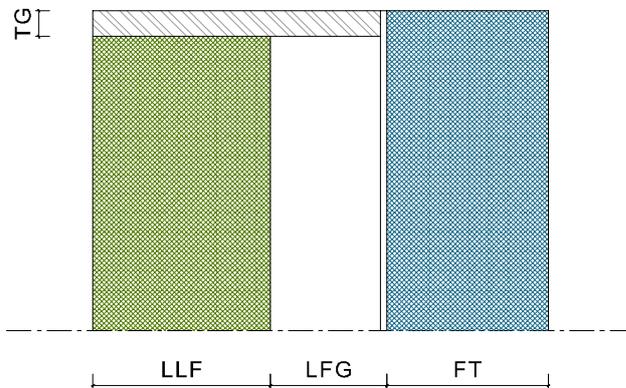
Schnitt



Grundriss



Kleinste Funktionseinheit



FT	Futtertisch	Tierbesatz	Mastbullen
LFG	Lauf-/Fressgang	Aufstallung	Tretmist Zweiflächenbucht
LLF	Liege-/Lauffläche	Fütterung	Mobil
TG	Treibgang	Entmistung	Mobil Schieber
		Bauweise	Ein-/Mehrhäusig
		Stallklima	Außenklima

Abb. 45: R-MB-TM-2F

6 Typenkatalog

Rinder - Mastbullen

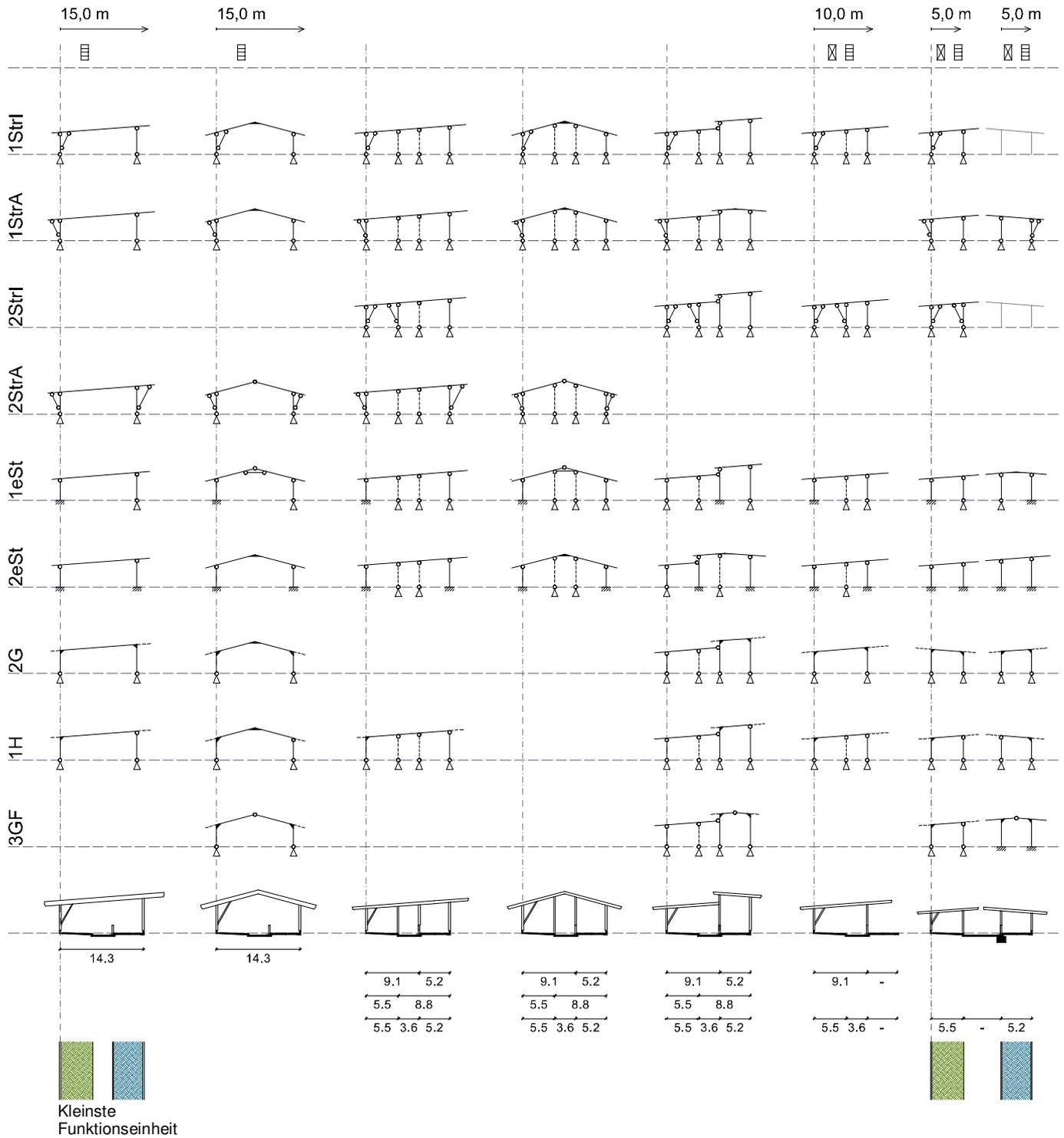


Abb. 46: R-MB-TM-2F Tragwerkvarianten A

6 Typenkatalog

Rinder - Mastbullen

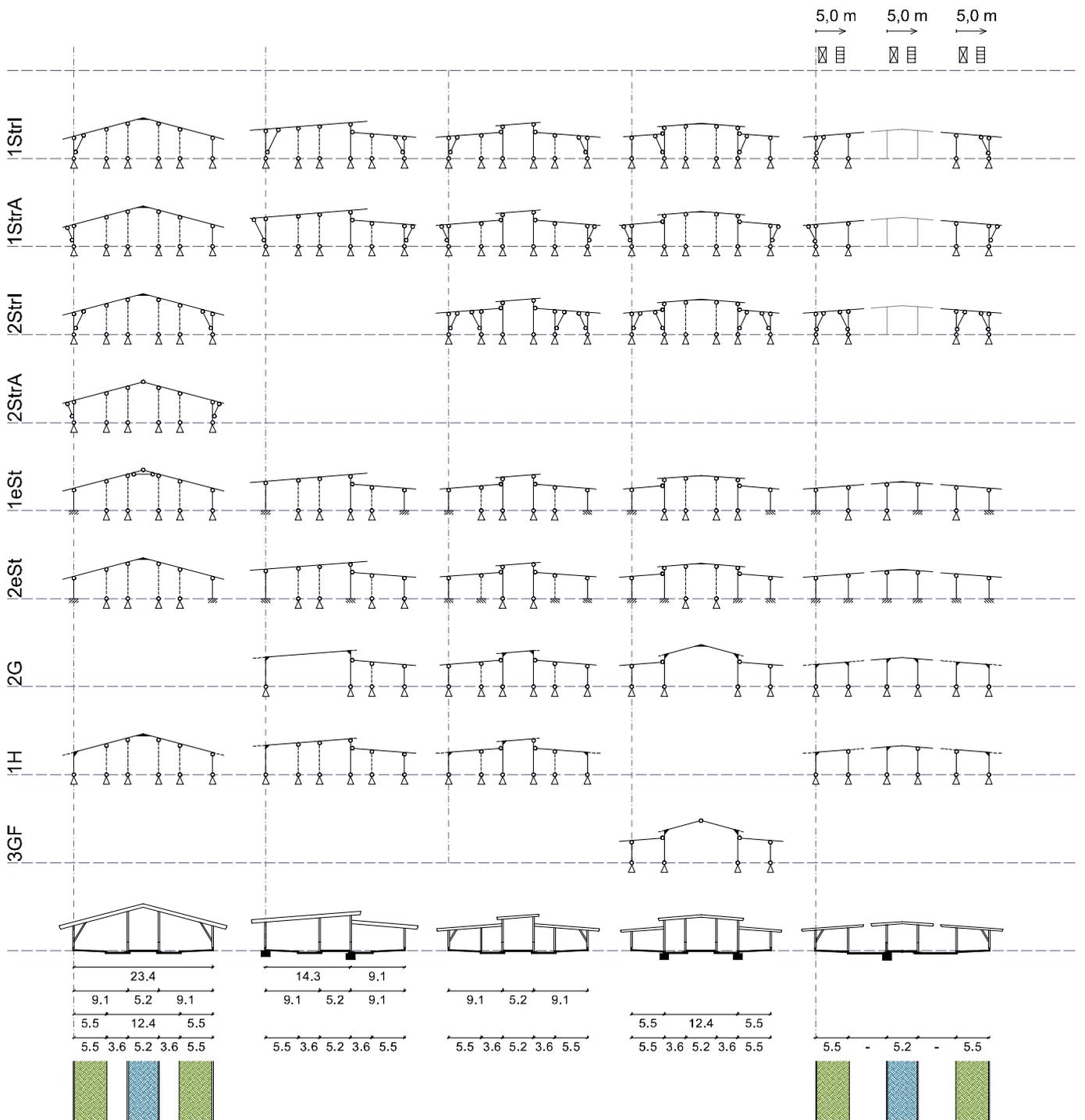


Abb. 47: R-MB-TM-2F Tragwerkvarianten B

6 Typenkatalog

Rinder - Mastbullen

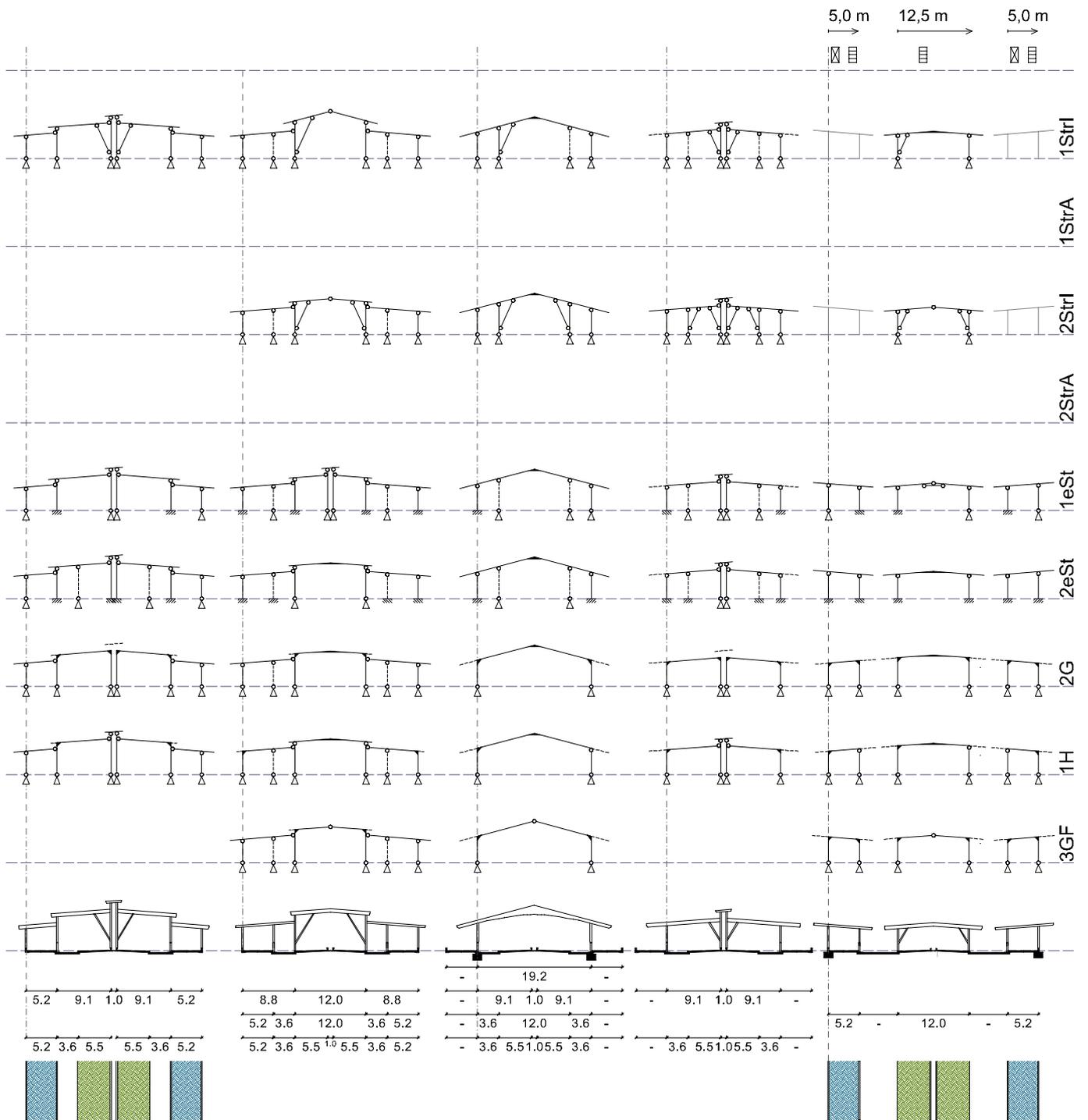


Abb. 48: R-MB-TM-2F Tragwerkvarianten C

6 Typenkatalog

Rinder - Mutterkühe

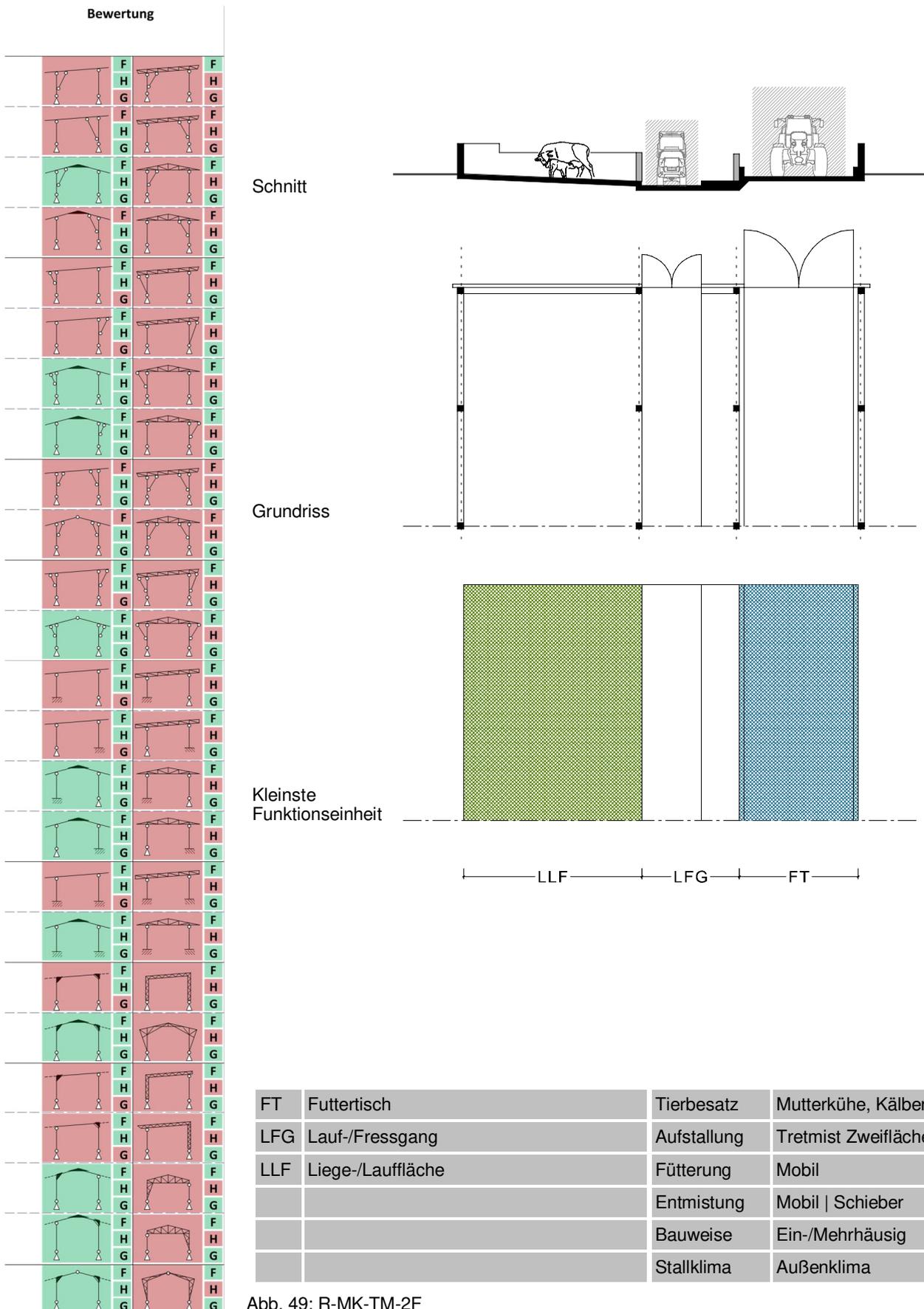


Abb. 49: R-MK-TM-2F

6 Typenkatalog

Rinder - Mutterkühe

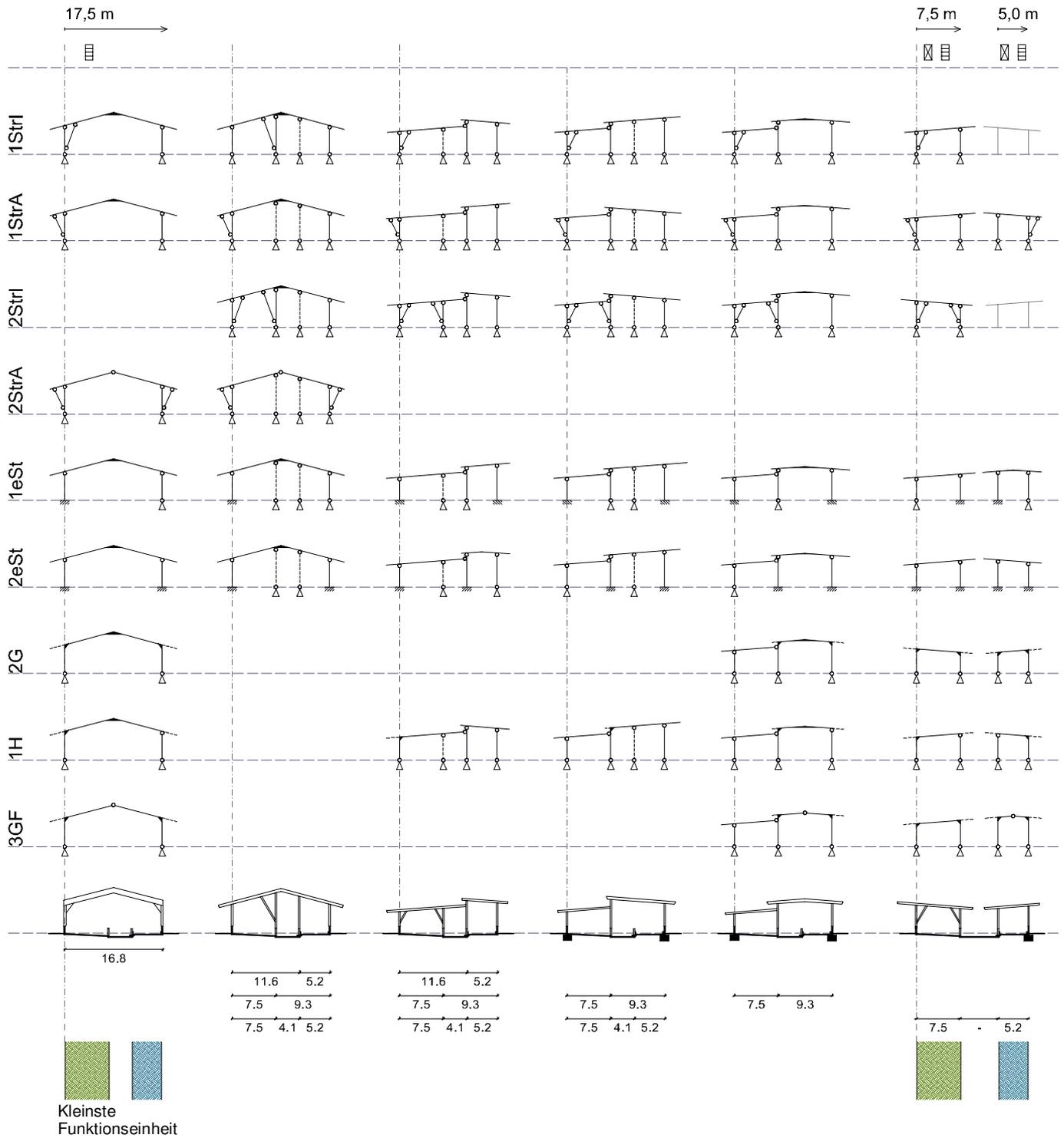


Abb. 50: R-MK-TM-2F Tragwerkvarianten A

6 Typenkatalog

Rinder - Mutterkühe

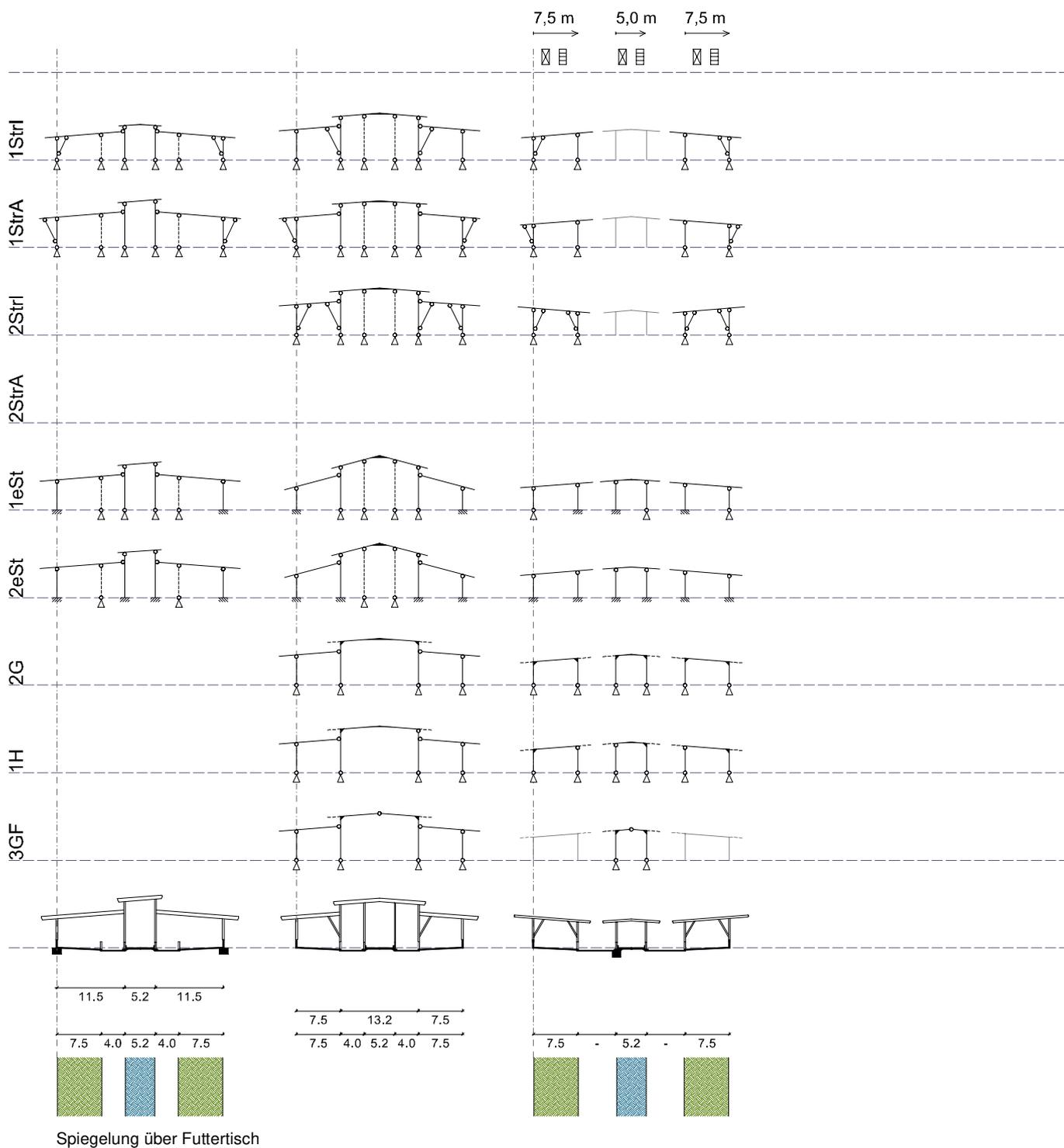
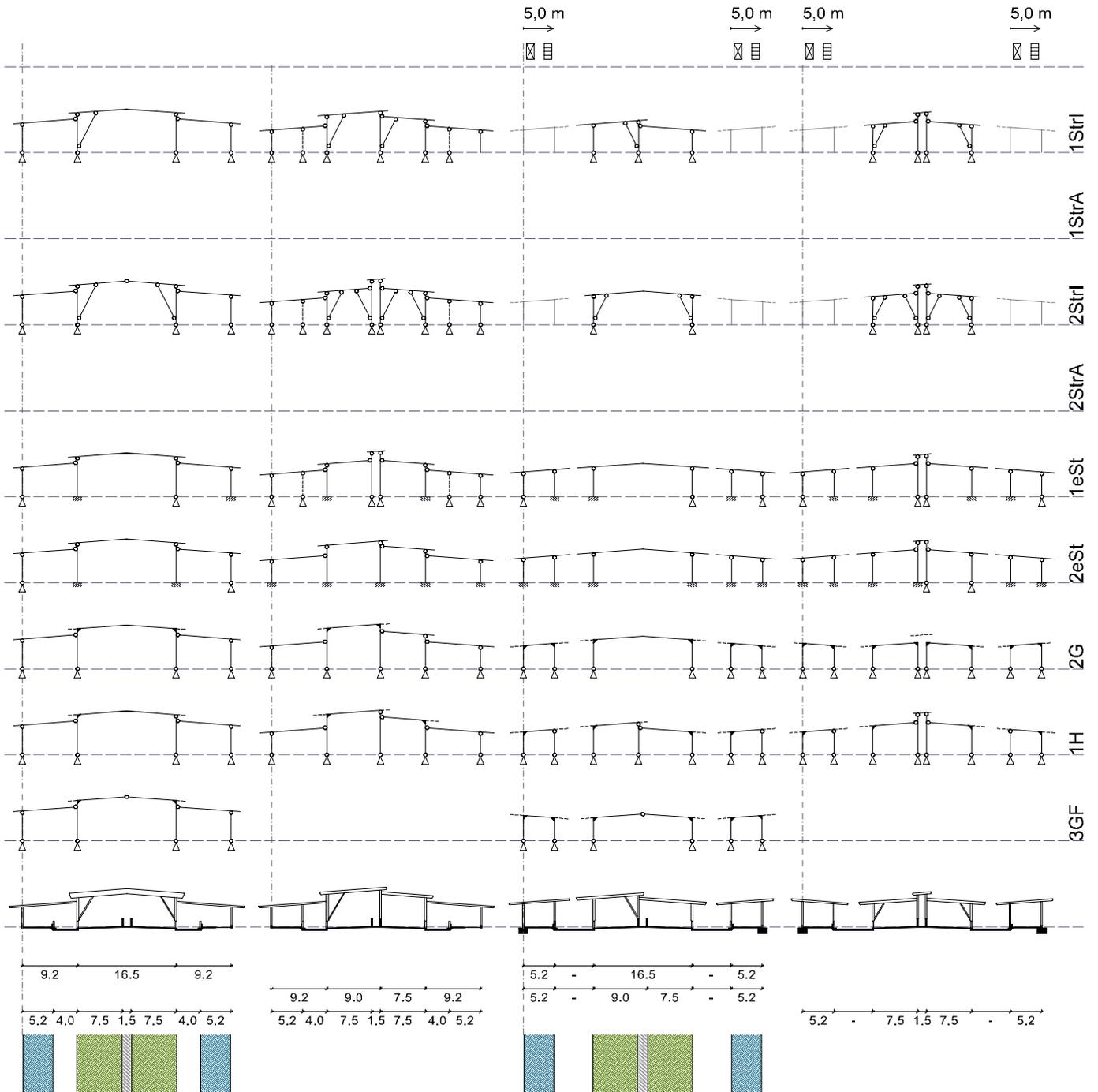


Abb. 51: R-MK-TM-2F Tragwerkvarianten B

6 Typenkatalog

Rinder - Mutterkühe



Spiegelung über Liege-/Lauffläche

Abb. 52: R-MK-TM-2F Tragwerkvarianten C

6 Typenkatalog

Rinder - Mutterkühe

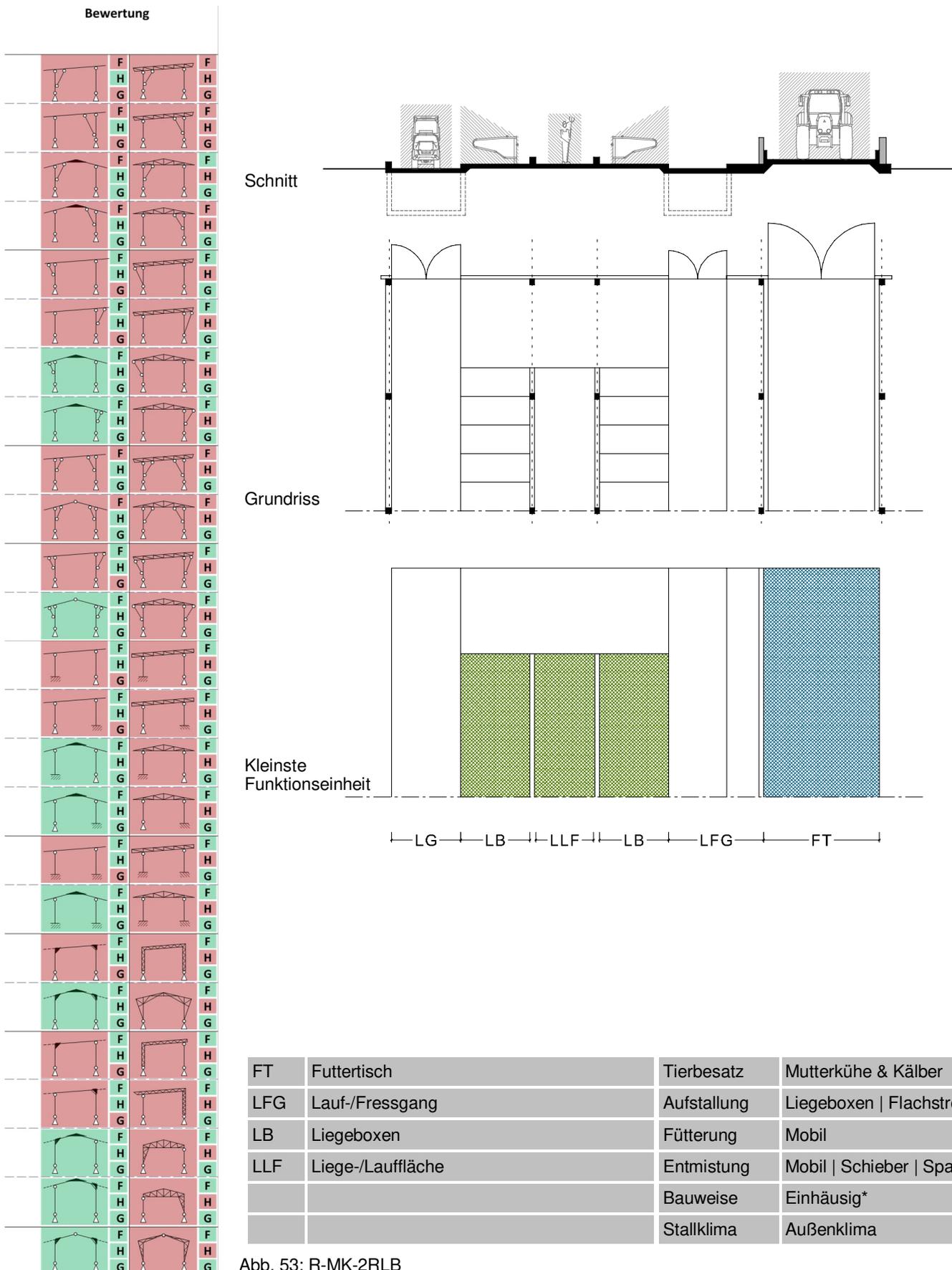


Abb. 53: R-MK-2RLB

6 Typenkatalog

Rinder - Mutterkühe

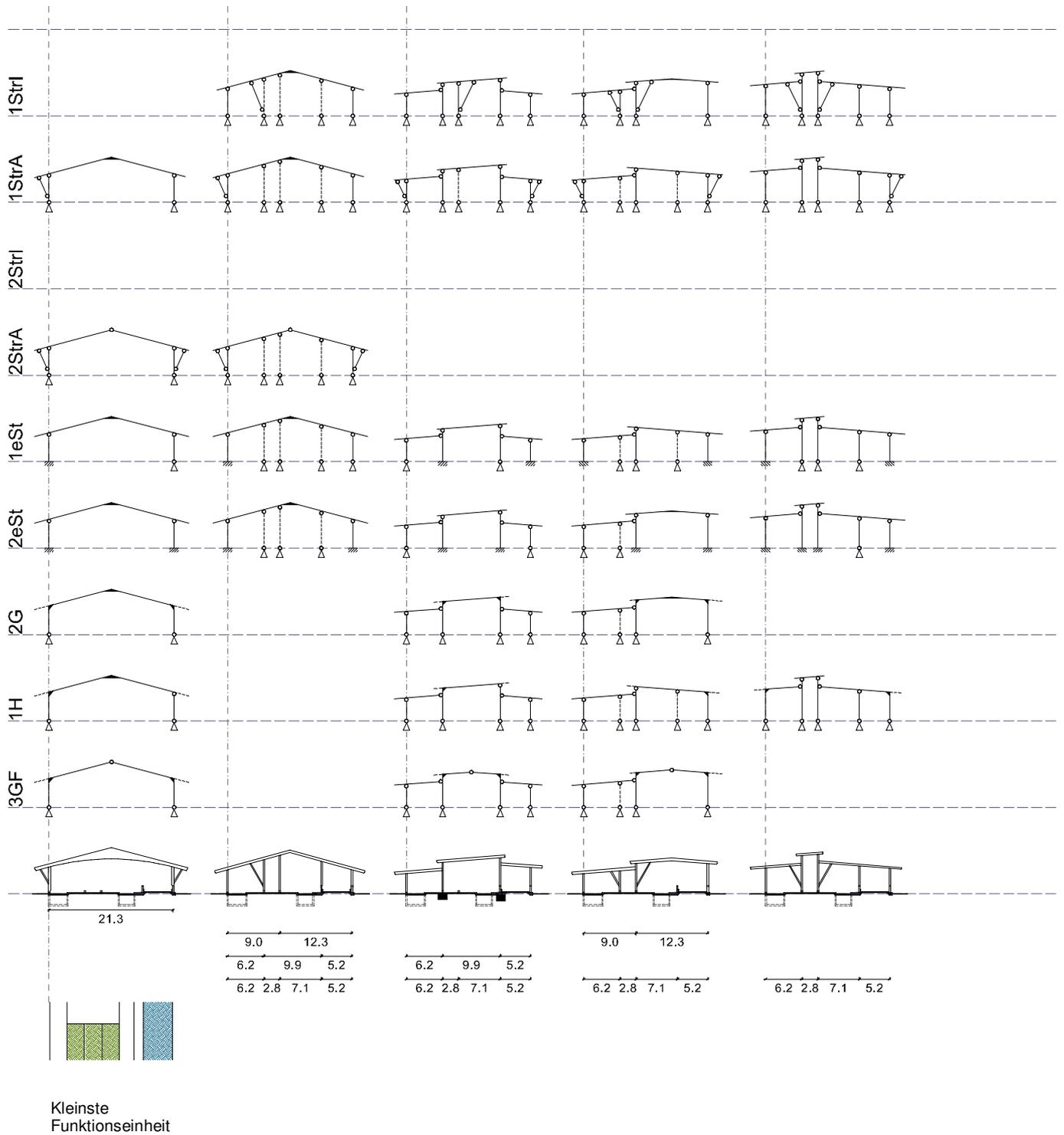


Abb. 54: R-MK-2RLB Tragwerkvariante A

6 Typenkatalog

Schweine - Abferkelbucht

Bewertung

Schnitt

Grundriss

Kleinste Funktionseinheit

↓SG↓ LB ↓AL↓SG↓

SG	Servicegang	Tierbesatz	Sauen & Ferkel
AL	Auslauf	Aufstallung	Buchten
LB	Liegebuchten	Fütterung	Mobil
		Entmistung	Mobil Schieber
		Bauweise	Ein-/Mehrhäusig
		Stallklima	Außenklima

Abb. 55: S-AF-NLflB

6 Typenkatalog

Schweine - Abferkelbucht

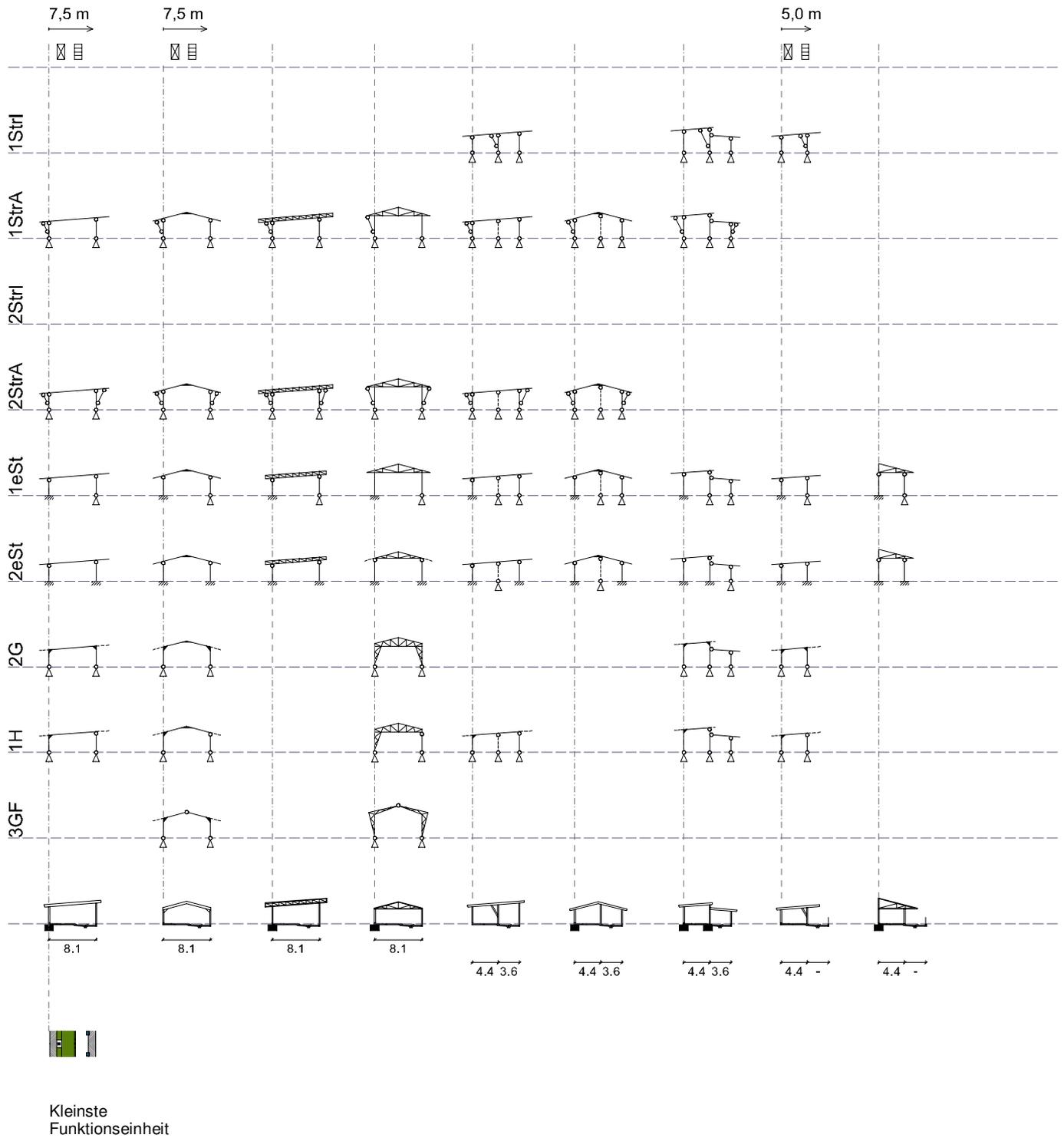


Abb. 56: S-AF-NLflB Tragwerkvarianten A

6 Typenkatalog

Schweine - Abferkelbucht - Naturland-LfL-Bucht

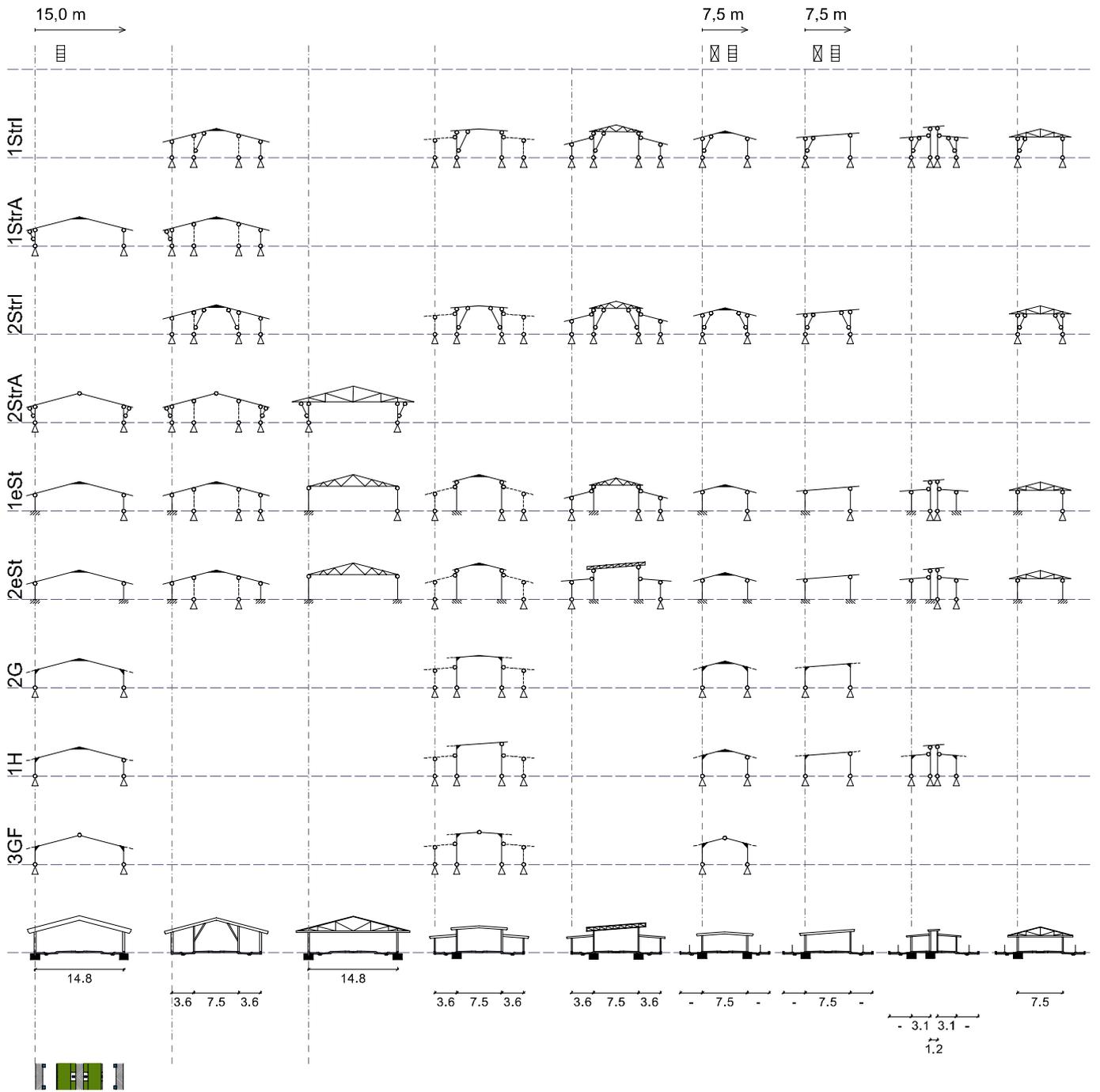
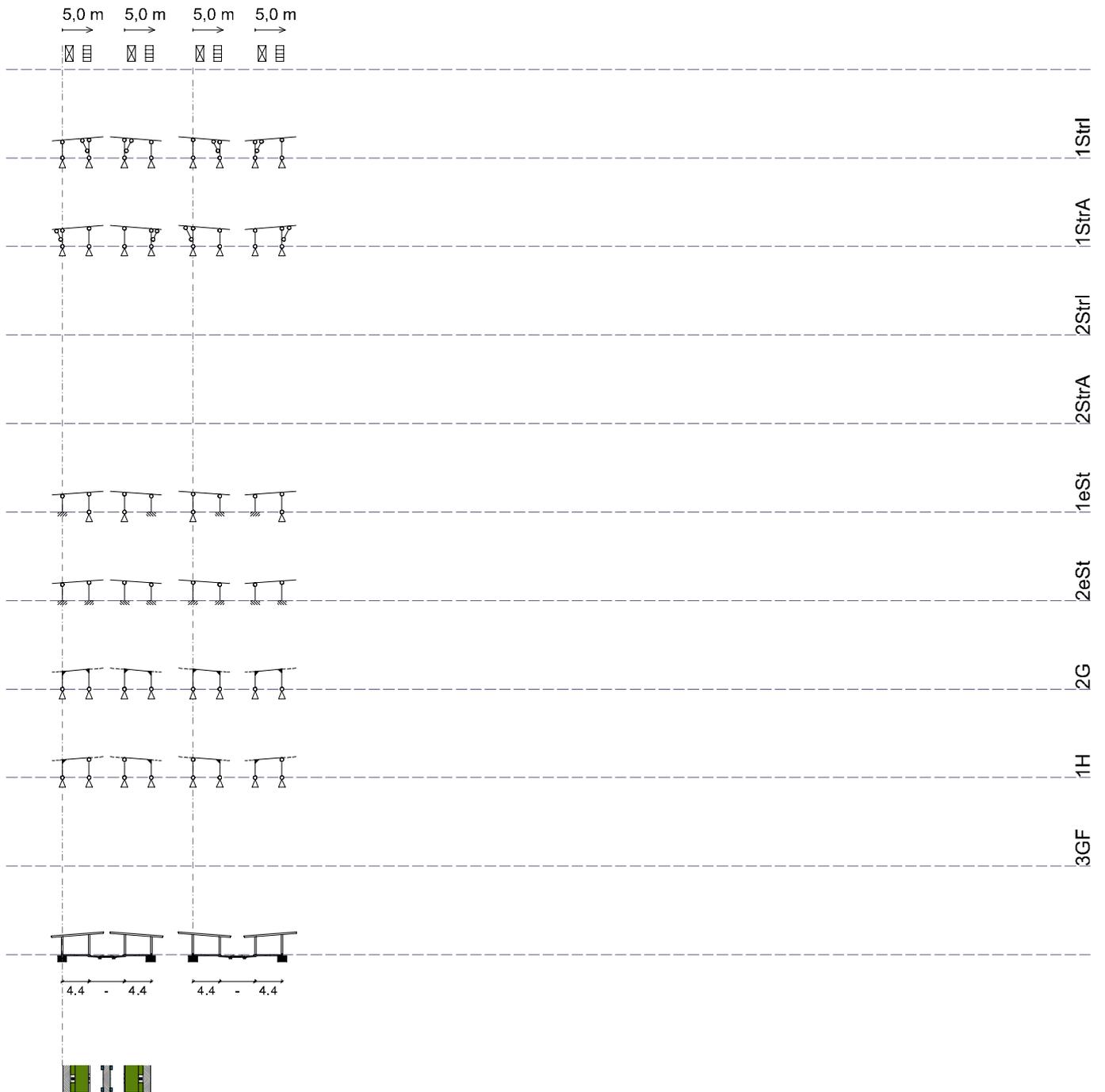


Abb. 57: S-AF-NLfLB Tragwerkvarianten B

6 Typenkatalog

Schweine - Abferkelbucht - Naturland-LfL-Bucht



Spiegelung über Auslauf

Abb. 58: S-AF-NLfLB Tragwerkvarianten C

6 Typenkatalog

Schweine - Mastschweine - BAT-Kistenstall

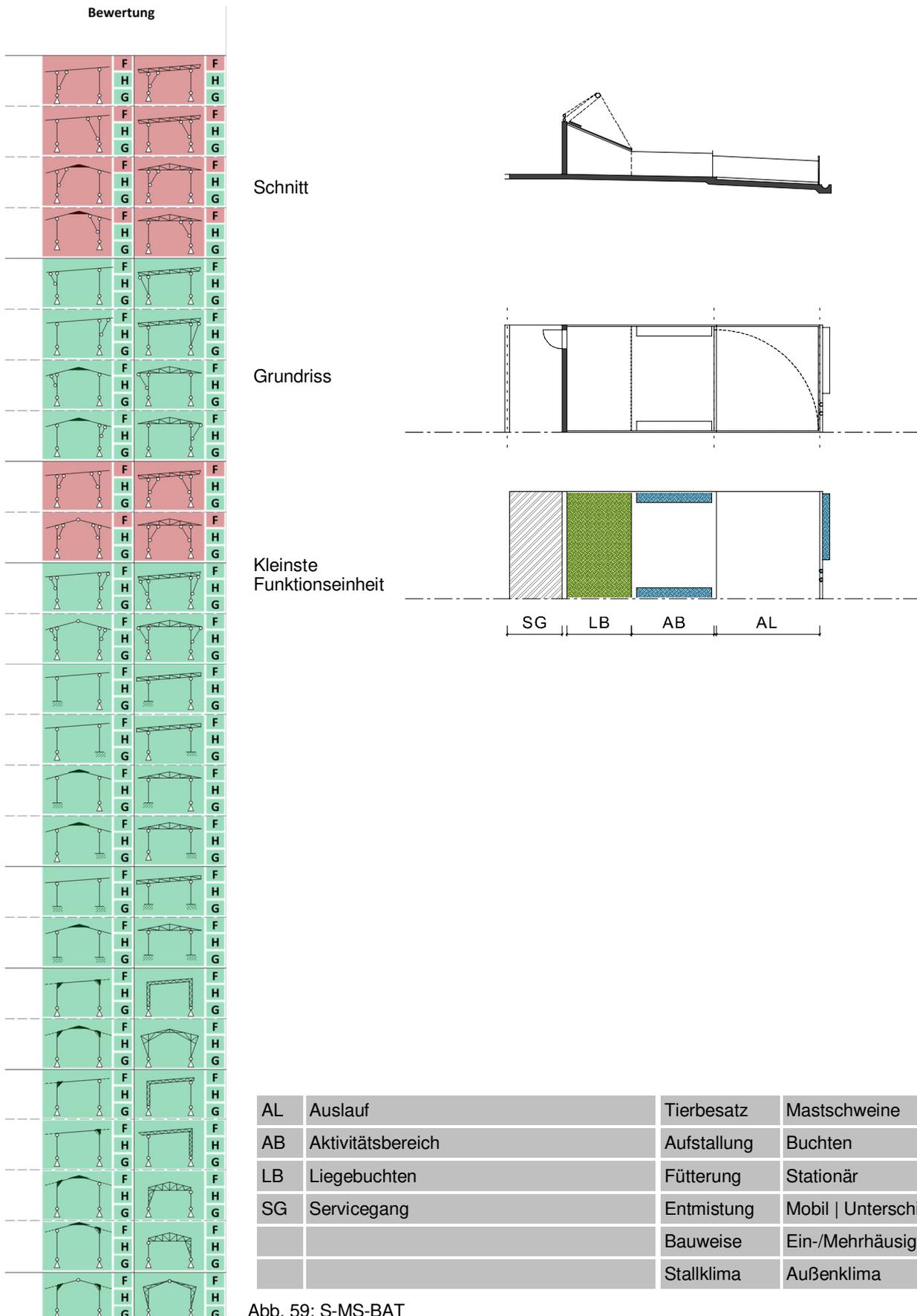


Abb. 59: S-MS-BAT

6 Typenkatalog

Schweine - Mastschweine - BAT-Kistenstall

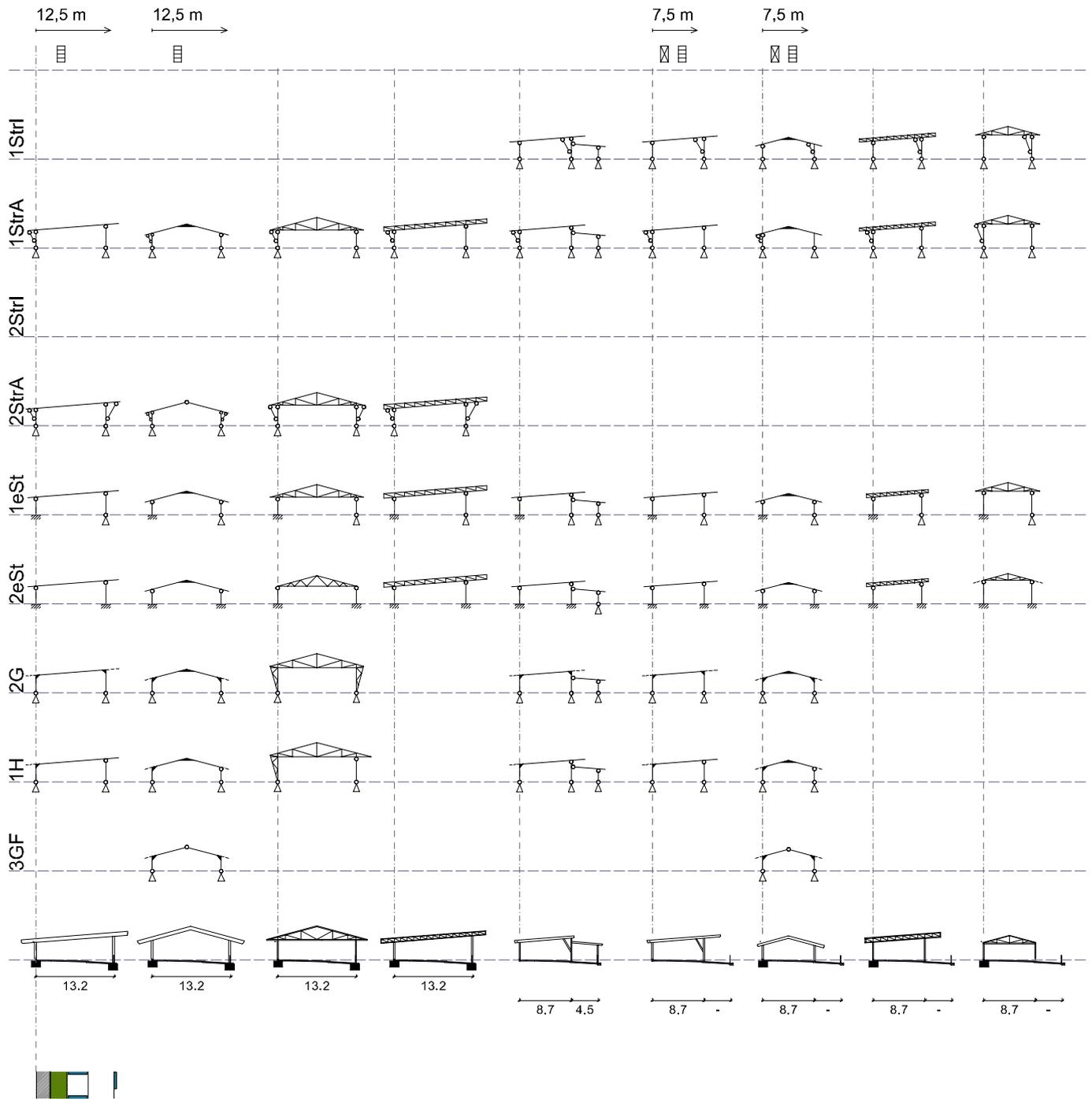


Abb. 60: S-MS-BAT Tragwerkvarianten A

6 Typenkatalog

Schweine - Mastschweine - BAT-Kistenstall

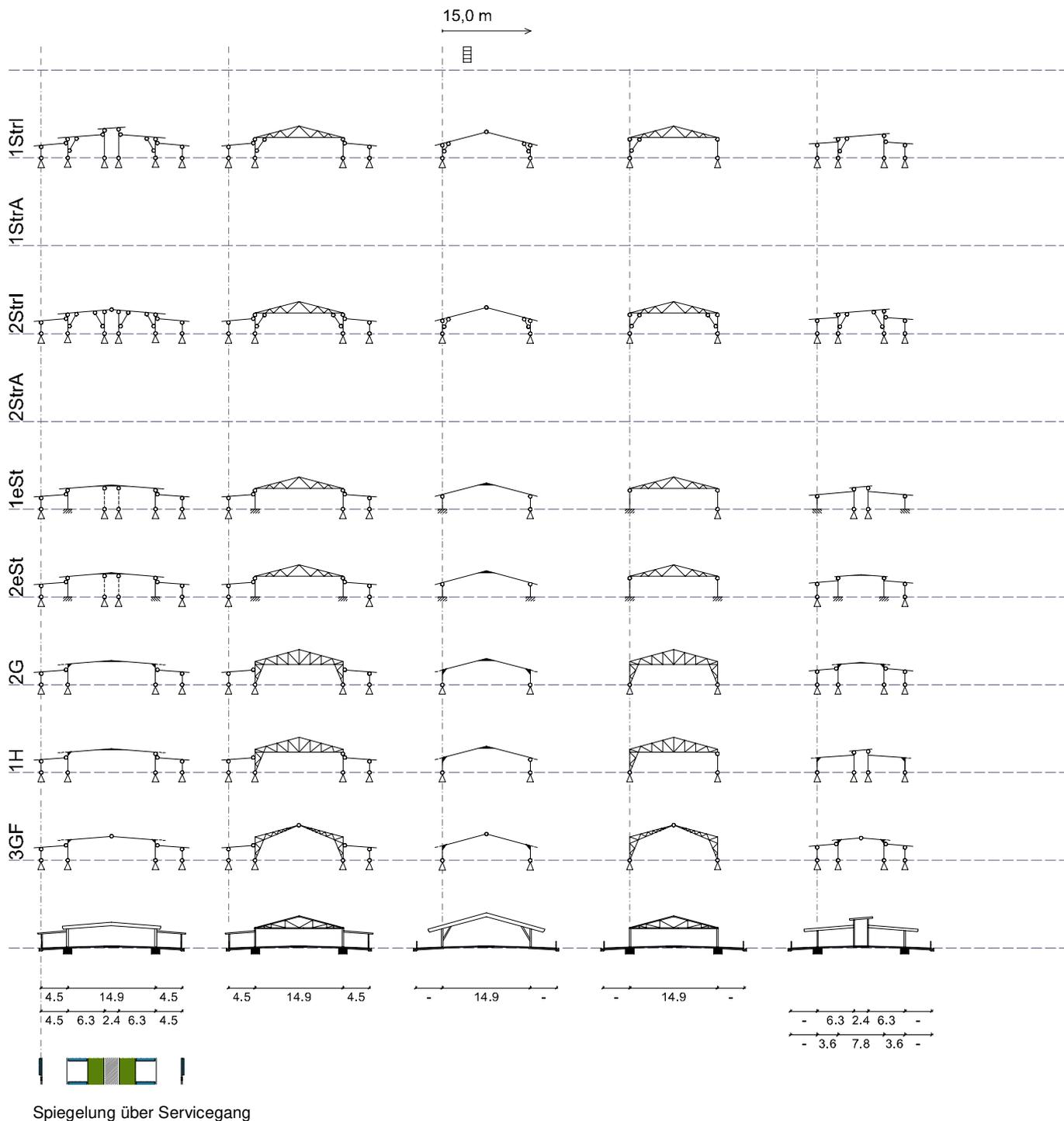


Abb. 61: S-MS-BAT Tragwerkvarianten B

6 Typenkatalog

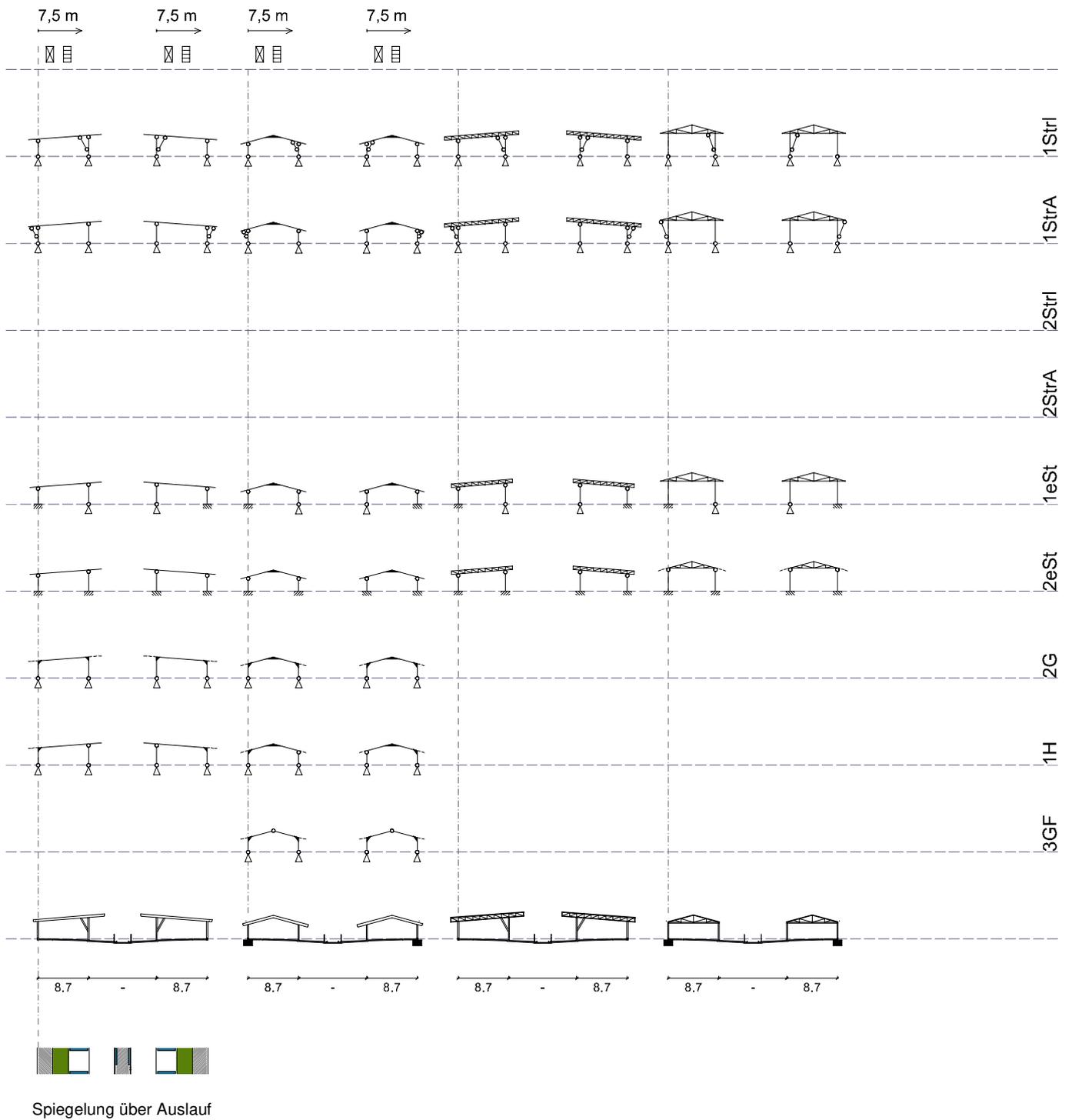


Abb. 62: S-MS-BAT Tragwerkvarianten C

6 Typenkatalog

Kleinwiederkäuer - Mastschafe-/ziegen

Bewertung

Schnitt

Grundriss

Kleinste Funktionseinheit

LLF FB

FB	Futterband	Tierbesatz	Mastschafe-/ziegen
LLF	Liege-/Lauffläche	Aufstallung	Flachstreu
		Fütterung	Stationär
		Entmistung	Mobil
		Bauweise	Einhäusig
		Stallklima	Außenklima

Abb. 63: KW-MA-FS

6 Typenkatalog

Kleinwiederkäuer - Mastschafe-/ziegen

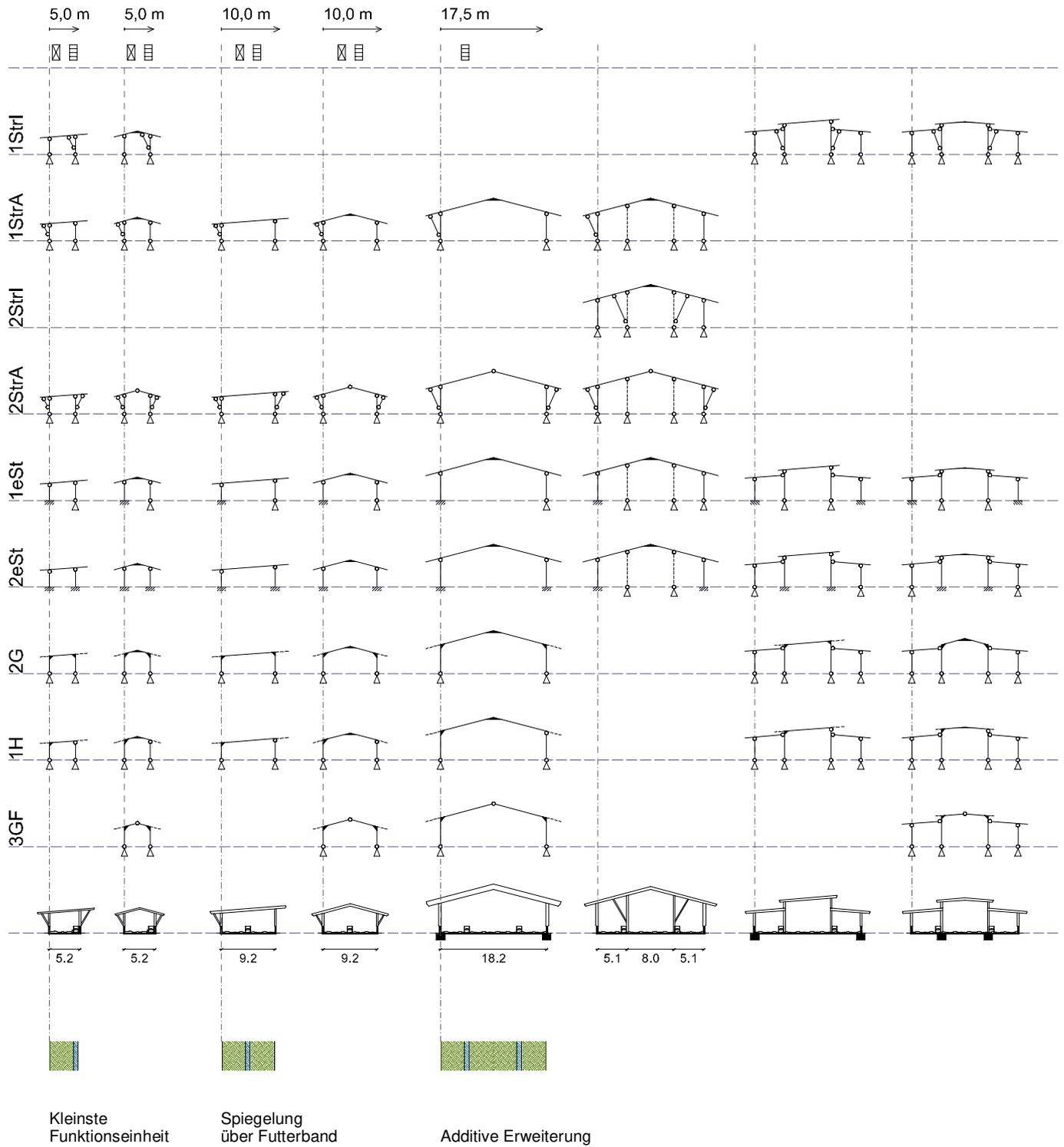


Abb. 64: KW-MA-FS Tragwerkvariante A

6 Typenkatalog

Kleinwiederkäuer - Mastschafe-/ziegen

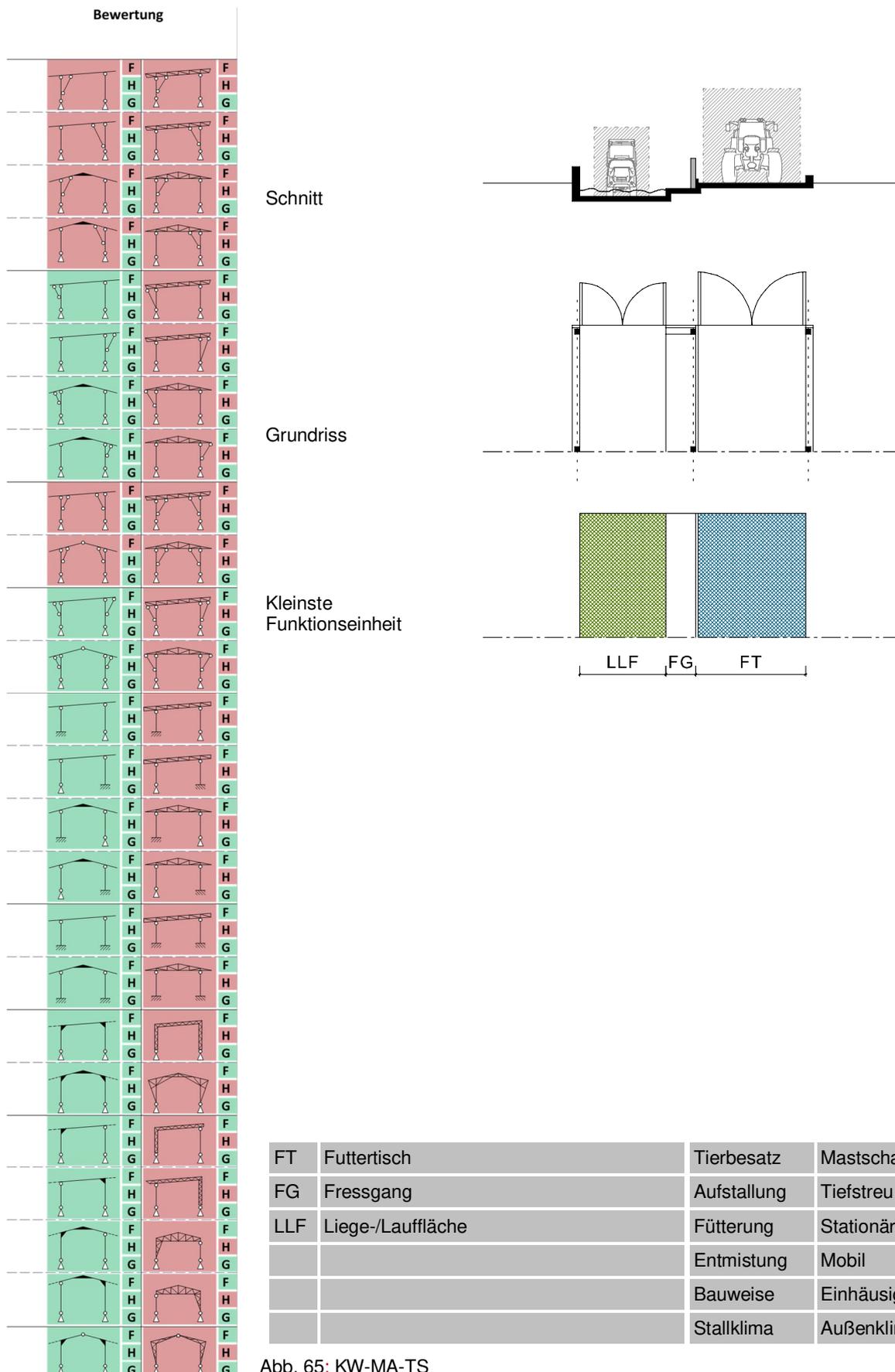


Abb. 65: KW-MA-TS

6 Typenkatalog

Kleinwiederkäuer - Mastschafe-/ziegen

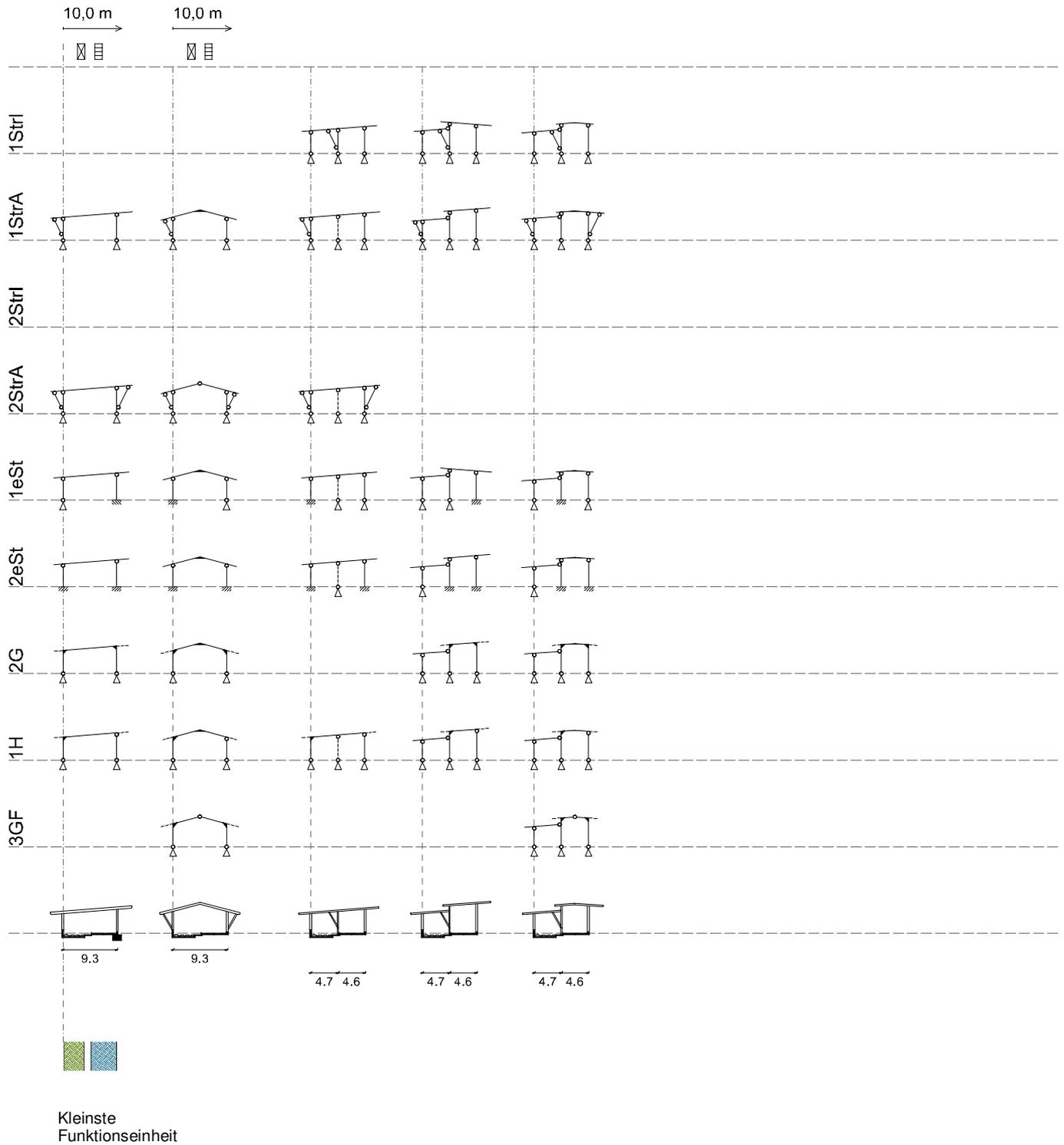


Abb. 66: KW-MA-TS Tragwerkvariante A

6 Typenkatalog

Kleinwiederkäufer - Mastschafe-/ziegen

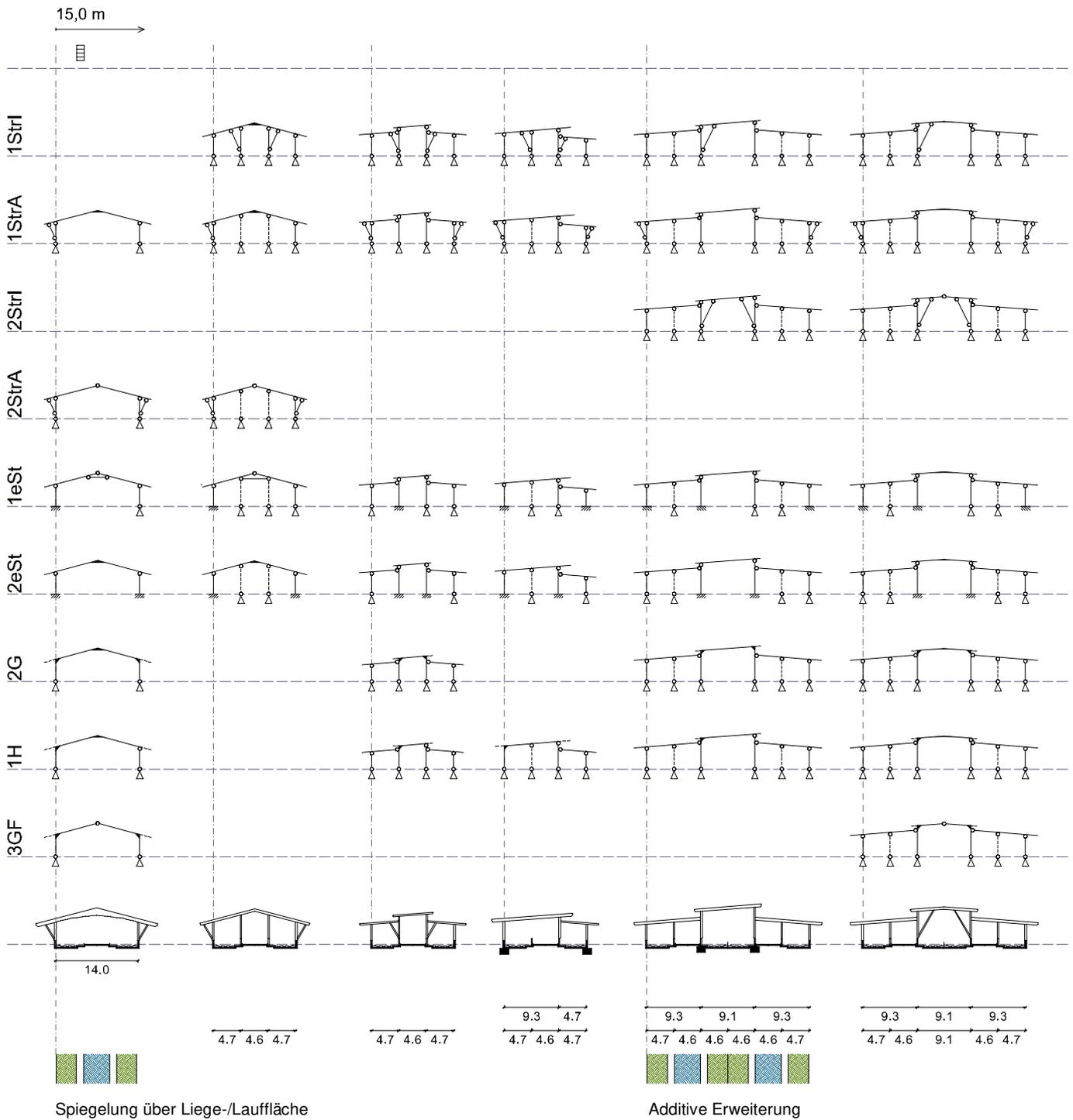


Abb. 67: KW-MA-TS Tragwerkvariante B

6 Typenkatalog

6 Typenkatalog

Kleinwiederkäuer - Milchschafe-/ziegen

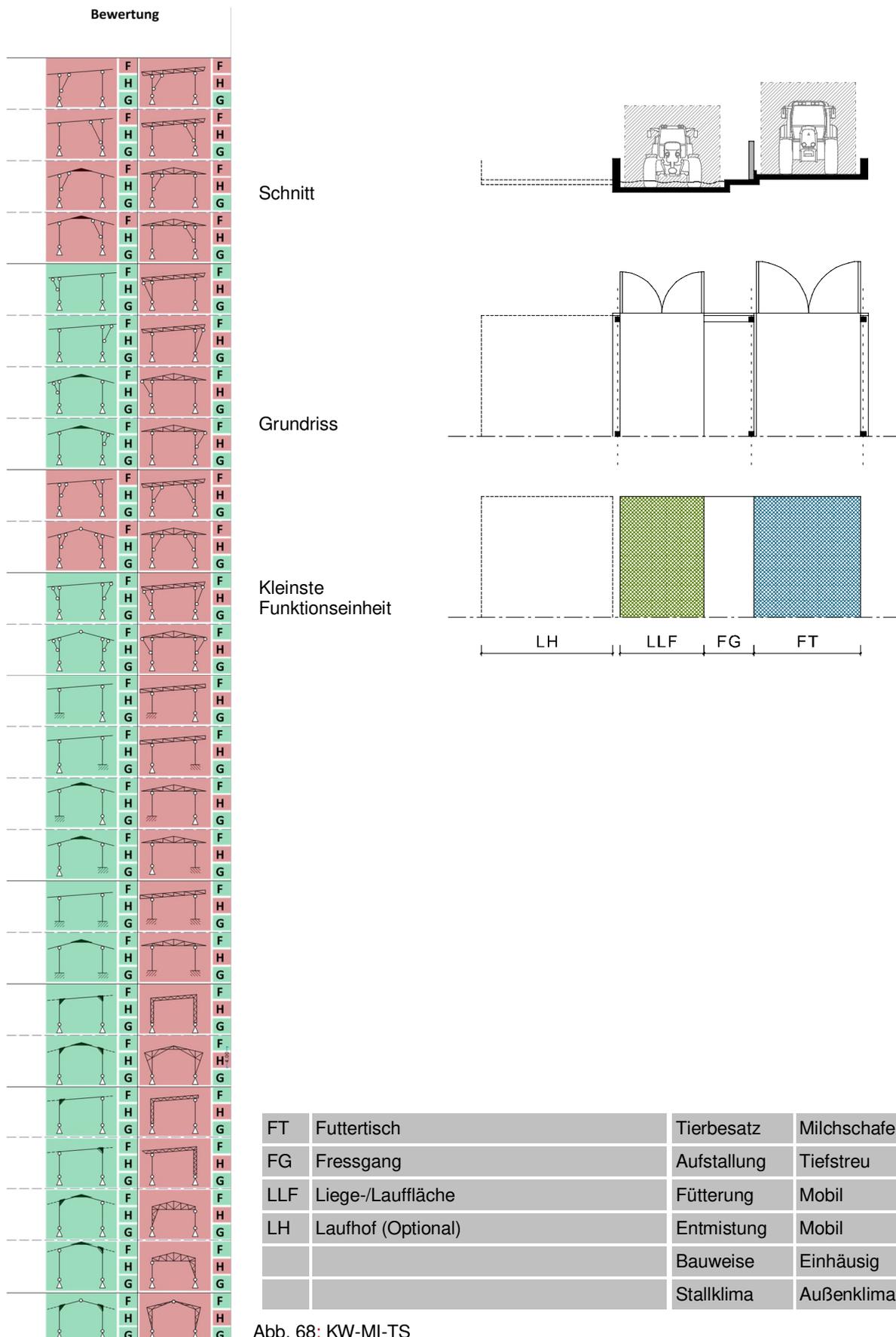


Abb. 68: KW-MI-TS

6 Typenkatalog

Kleinwiederkäuer - Milchschafe-/ziegen

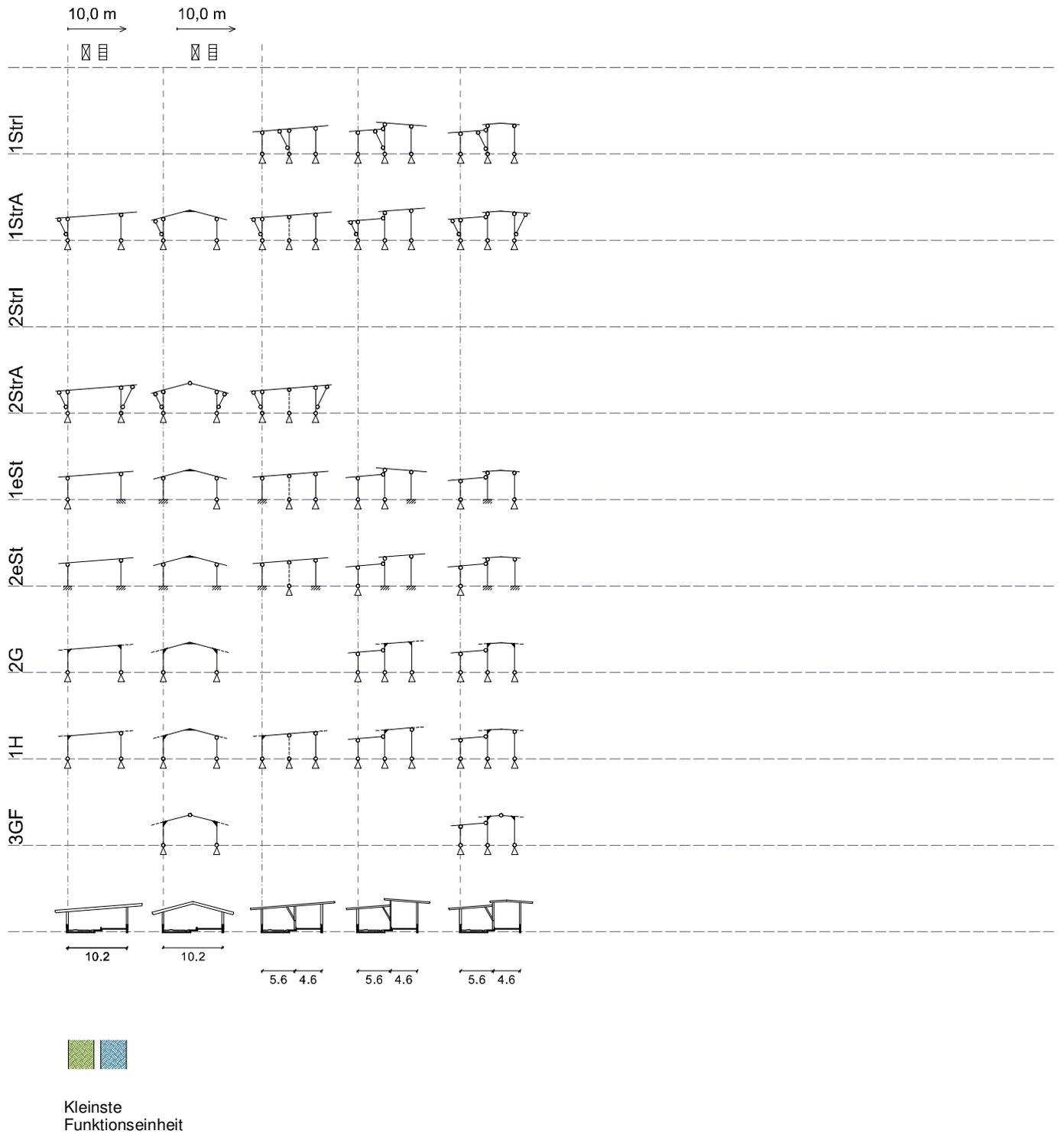


Abb. 69: KW-MI-TS Tragwerkvariante A

6 Typenkatalog

Kleinwiederkäuer - Milchschafe-/ziegen

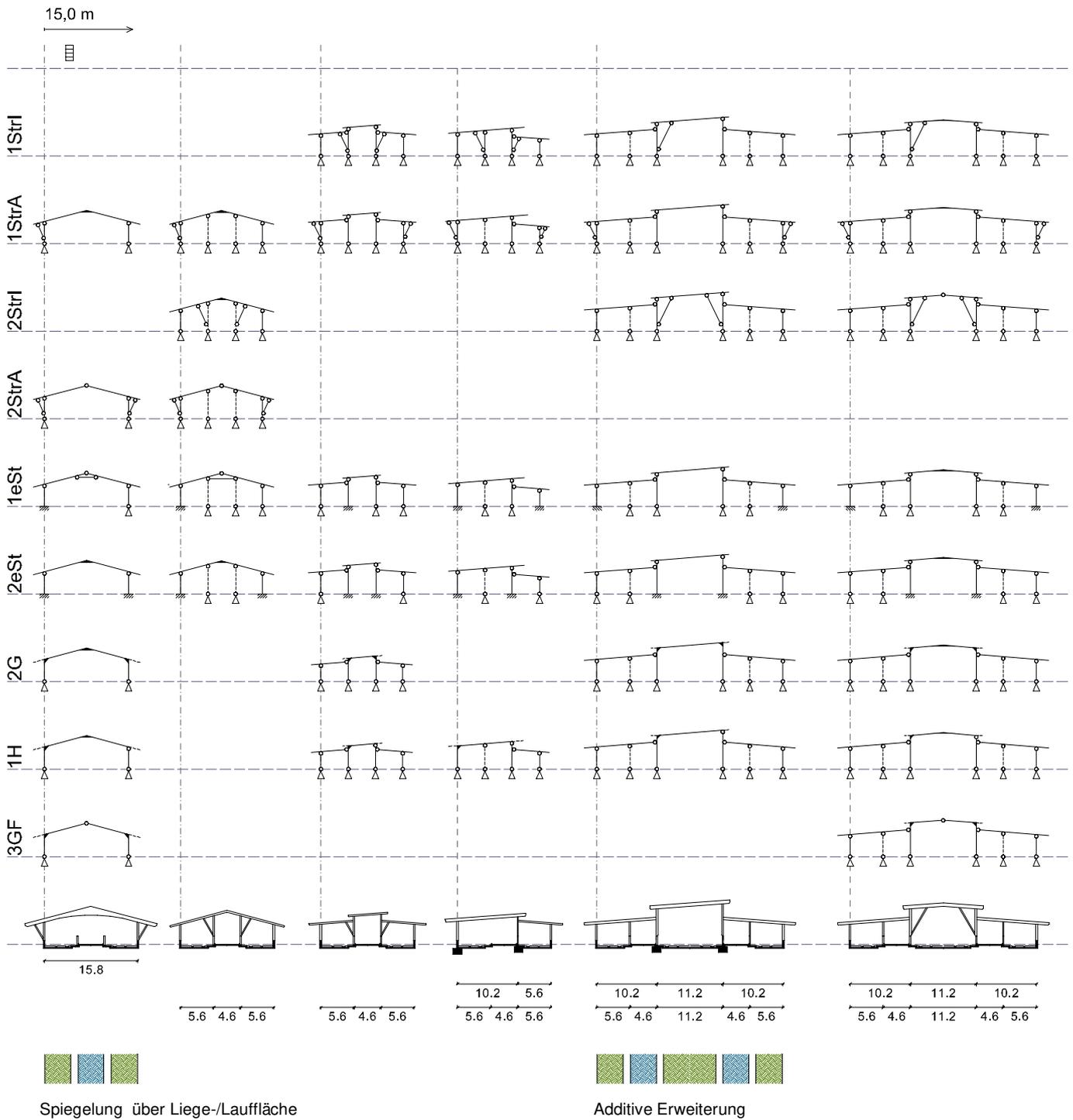


Abb. 70: KW-MI-TS Tragwerkvariante B, C

6 Typenkatalog

6 Typenkatalog

Pferde - Reithalle

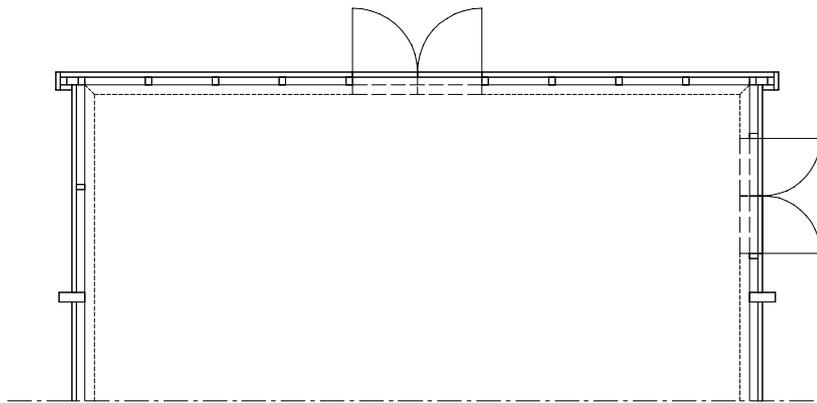
Bewertung

	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G
	F		F
	H		H
	G		G

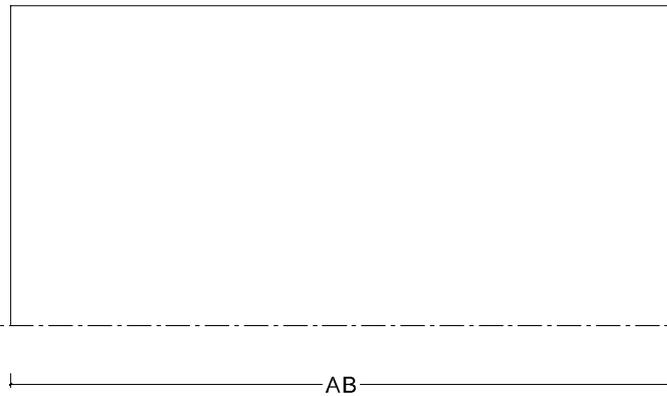
Schnitt



Grundriss



Kleinste Funktionseinheit



AB	Aktivitätsbereich	Tierbesatz	Pferde
		Aufstallung	
		Entmistung	Mobil
		Bauweise	Einhäusig*
		Gebäudeklima	Außenklima

Abb. 71: Pf-RH

6 Typenkatalog

Pferde - Reithalle

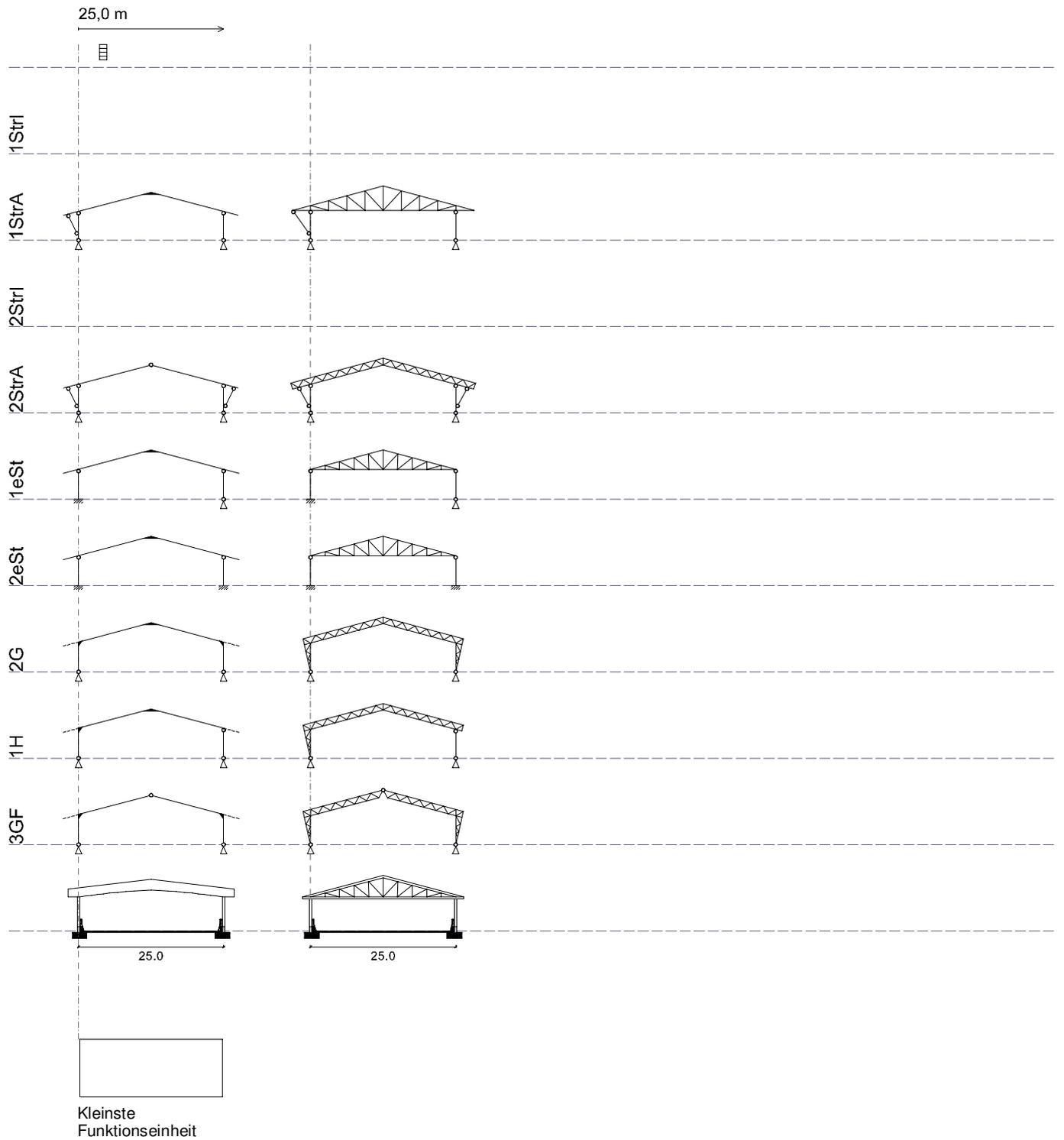


Abb. 72: Pf-RH Tragwerkvarianten A

6 Typenkatalog

Lager - Schüttgut

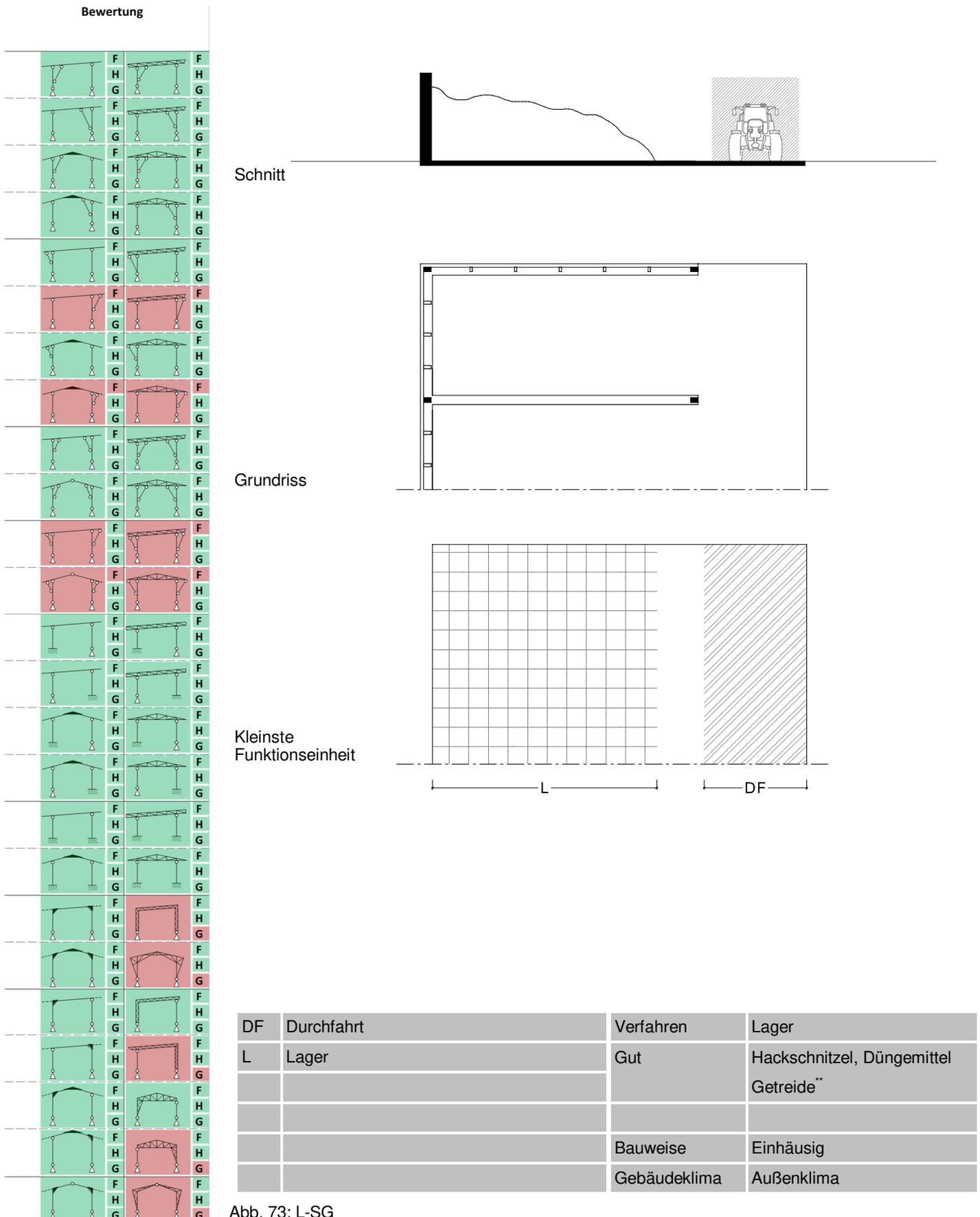


Abb. 73: L-SG

6 Typenkatalog

Lager - Schüttgut

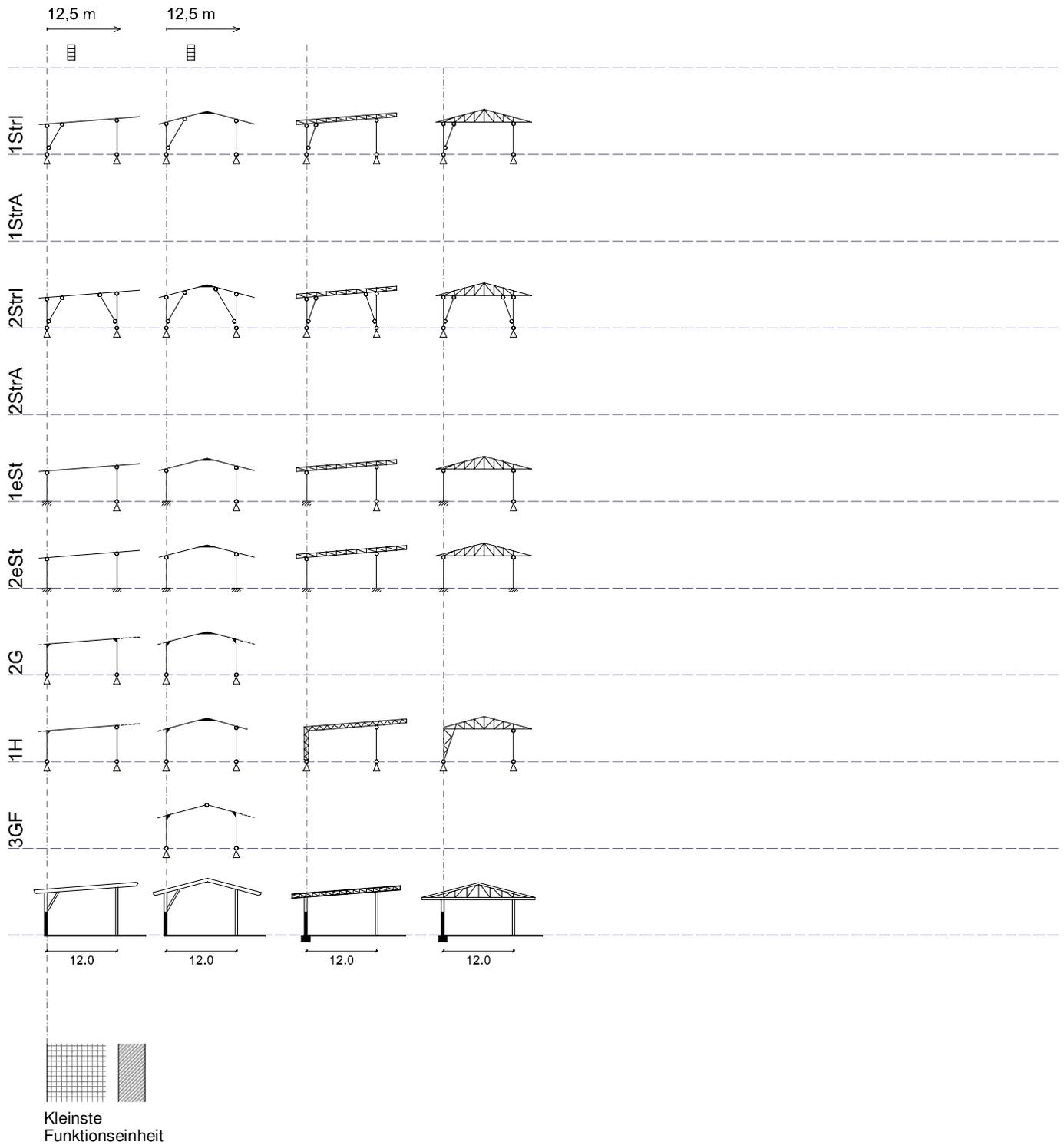


Abb. 74: L-SG Tragwerkvarianten A

7 Schnittstelle CAD-CNC

Von Handwerk zu Hochtechnologie: Die Entwicklung spezialisierter Software im Architektur- und Holzbausoftware

Die Trennung zwischen Holzbausoftware und allgemeiner Architektursoftware resultiert aus den spezifischen Anforderungen und Zielsetzungen der jeweiligen Branchen. Bei der manuellen Ausführung der Bauplanerstellung war eine intensive Kooperation zwischen den Architekten und den ausführenden Handwerkern unabdingbar. Mit der Entwicklung der Computertechnologie und der Einführung von CAD-Software in den 1980er Jahren entstanden spezialisierte Software-Lösungen für Architekten, die es ihnen ermöglichen, detaillierte und komplexe Pläne zu entwickeln. Im Gegensatz dazu waren Zimmerer und Holzbauunternehmen mehr auf die praktische Umsetzung dieser Pläne fokussiert. Daraus ergab sich eine Reihe von spezialisierten Softwarelösungen für den Holzbau, die auf die Fertigung und Konstruktion zugeschnitten waren.

Holzbausoftware konzentriert sich im Allgemeinen auf spezialisierte Aufgaben, wie die maschinelle Ansteuerung von CNC-Maschinen für den Zuschnitt von Holzelementen, die Berechnung von statischen Belastungen oder die Optimierung von Materialnutzung. Architektursoftware hingegen legt den Fokus auf die räumliche Planung und die Darstellung des gestalterischen Gesamtbilds eines Gebäudes. Diese verschiedenen Zielsetzungen führten dazu, dass beide Softwaretypen oft unterschiedliche Dateiformate, Terminologien und Benutzeroberflächen verwenden.

Die unterschiedlichen Branchen haben auch unterschiedliche finanzielle und betriebliche Anforderungen, die die Softwareentwicklung beeinflussen.

- Architektursoftware ist oft darauf ausgerichtet, so vielseitig wie möglich zu sein und eine breite Palette von Materialien und Konstruktionsmethoden zu unterstützen.
- Holzbausoftware ist in der Regel fokussierter und auf die Optimierung bestimmter Prozesse innerhalb des Holzbaus ausgerichtet.

Technischer Ablauf des Datenflusses, gängige Praktiken und Standards, die zur Anwendung kommen

Zu Beginn erstellen Architekten in der Regel ein Konzept oder einen Entwurf des Gebäudes mit Hilfe von Architektursoftware. In solchen Programmen können umfangreiche 3D-Modelle eines Gebäudes erstellt werden. Diese Modelle enthalten meist sehr viel mehr Information als die reine Geometrie des Gebäudes. So z. B. Angaben über verwendete Materialien und deren Qualitätsanforderungen, strukturelle Zusammenhänge, statische und physikalische Gegebenheiten und viele nicht-geometrische Angaben.

Zur Weitergabe an Fachplaner oder ausführende Holzbauer werden in der Architektursoftware umfangreiche 2D-Pläne erstellt, was meist sehr arbeitsaufwändig ist. Diese Pläne werden dann typischerweise in Datei-Formaten wie DXF oder DWG (beides proprietäre Dateiformate des Unternehmens AutoDesk) exportiert.

7 Schnittstelle CAD-CNC

Auf Seite der Holzbauer wird auf Basis dieser 2D- Zeichnungen wiederum ein 3D-Modell erstellt, welches dann in der Holzbausoftware weiter detailliert und produktionsfertig ausgearbeitet wird. Dabei wird eine große Anzahl von Konstruktionsdetails festgelegt, wie etwa die genaue Platzierung von Holzbauteilen, deren Bearbeitung und die Art der Verbindung der Hölzer untereinander. Je nach statischen, fertigungstechnischen oder auch ästhetischen Anforderungen kann dabei eine Vielzahl von zimmermannsmäßigen Holzverbindungen zur Anwendung kommen. Oder es werden Verbindungsmittel aus Stahl verwendet, die wiederum spezifische Bearbeitungen an den Hölzern bedingen.

Nach dieser Detailplanung ist jedes einzelne Bauteil eines Gebäudes und die Art und Weise, wie es bearbeitet wird, festgelegt. Im nächsten Schritt werden aus der Holzbausoftware heraus die Fertigungsdaten an die Produktion weitergeleitet. Dies erfolgt in standardisierten, maschinenlesbaren Formaten. Die gängigsten Formate hierbei sind BTL und BTLx. Die Produktion läuft dann meist hochgradig automatisiert ab.

Probleme des Datentransfers

Auf dem Umweg über 2D-Zeichnungen geht neben der 3D-Information auch alle nicht-geometrische Information verloren und muss vom Fachplaner oder Holzbauer wiederum aufwändig von Hand in sein verwendetes Software-System eingegeben werden oder nicht-digital weiterverarbeitet werden.

Bei dieser in der Praxis gängigen Arbeitsmethode gibt es eine gravierende systematische Lücke im Datenfluss zwischen Planung und Fertigung. Diese Lücke zu überbrücken, ist arbeits- und kostenintensiv und zudem sehr fehlerträchtig.

Bessere Integration durch BIM und IFC

Die Arbeitsmethode des Building Information Modelling (BIM) will diese Lücke schließen. Die Methode verfolgt das Ziel, alle im Laufe des Lebenszyklus eines Gebäudes (Bedarfsplanung, Entwurf, Ausführungsplanung, Ausschreibung, Bauphase, Inbetriebnahme, Nutzung, Renovierung und Abriss) relevanten Daten gewerkeübergreifend in einem einheitlichen digitalen Modell zu sammeln und allen Beteiligten zur weiteren Nutzung und Vervollständigung zur Verfügung zu stellen.

Diesem Ziel kommt man durch den Einsatz des Dateiformats IFC (Industry Foundation Classes) und der gemeinsamen Nutzung von Cloud-Diensten näher.

Die Bedeutung von IFC zur Unterstützung digitalisierter Bauprozesse

IFC ist ein international standardisiertes Datenformat zur Beschreibung von Gebäudemodellen. Es wird seit Anfang der 2000 Jahre von buildingSMART e.V. International (bSI) entwickelt und ist unter ISO 16739 registriert.

IFC bildet die computertechnische Grundlage für die konkrete Umsetzung der Arbeitsmethode des BIM. IFC bietet dazu die Möglichkeit, geometrische Information ("welche Form hat ein Bauteil") mit semantischer Information ("was ist es für ein Bauteil") und struktureller Infor-

7 Schnittstelle CAD-CNC

mation ("zu wem gehört das Bauteil") zu verknüpfen. Der umfassende Ansatz des BIM bedingt einen sehr großen Variantenreichtum an Inhalt und Form innerhalb der syntaktischen Grenzen des IFC-Formats. In vielen Softwareprodukten gibt es deshalb Möglichkeiten, den Export und Import von Daten via IFC für die fokussierte Aufgabe genauer zu spezifizieren. Im Hinblick auf einen möglichst automatisierten Datenaustausch während der Planung und Fertigung im Holzbau, ist es deshalb besonders wichtig, die genaue Spezifikation der sendenden und empfangenden Programme aufeinander abzustimmen.

Für einen effizienten BIM-Prozess in der Planungs- und Fertigungsphase eines Gebäudes ist es ebenfalls wichtig, sich möglichst früh darüber abzustimmen, wer (Architekt, Statiker, Holzbauingenieur, Zimmerer) letztlich welche Information und in welchem Detaillierungsgrad zum Modell beisteuert. Nicht jedes Detail muss vom Architekten als ausgearbeitete 3D Geometrie eingebracht werden, sondern kann mitunter auch als Text-Attribut übergeben werden. So kann vom Architekten oder Statiker ein spezifisches Verbindungsmittel vorgegeben werden, ohne dass dieser die reale 3D-Geometrie des Verbinders ins Modell einfügen muss. Es genügt, wenn die identifizierende Bezeichnung des Verbinders mit den betroffenen Bauteilen verknüpft ist. Erst in der Holzbausoftware wird die reale Geometrie des Verbinders an der passenden Stelle eingefügt und damit passende Bearbeitungen am Holz erzeugt.

Übergabe der Geometrie von Bauteilen im IFC

Für die Beschreibung von Bauteilgeometrien gibt es im IFC verschiedene mathematische Definitionen, welche durch alle gängigen Architektur- und Holzbauprogramme prinzipiell korrekt verarbeitet werden können. Ein wichtiger Punkt, welcher dennoch einer Absprache zwischen den Beteiligten bedarf, ist die gemeinsame, einheitliche Zuordnung der Bauteilabmessungen Länge, Breite, Höhe zu den Koordinatenachsen X, Y und Z. Das kann durch die Verwendung von lokalen Koordinatensystemen erreicht werden. Viele Architektur-Programme bieten entsprechende Möglichkeiten, welche vom User korrekt zu nutzen sind. Die letztliche Lage eines Bauteils im Raum wird dann durch eine Transformation der lokalen Koordinatensysteme erreicht. Abb. 75 zeigt eine typische sinnvolle Definition.

Hierarchische Beziehungen der Bauteile zueinander

Im IFC-Format ist es vorgesehen, alle Bauteile eines Projekts einander zuzuordnen und hierarchisch zu gliedern (Abb. 77, 78). Um eine effiziente Weiterverarbeitung zu gewährleisten, ist es sehr wichtig, diese Möglichkeit intensiv zu nutzen. Das kann im Architektur-CAD durch die Vorgehensweise des Planers beim grundsätzlichen Aufbau der Konstruktion und durch passende IFC-Export-Einstellungen gewährleistet werden. Im Speziellen bei der Beschreibung von Dach und Binder-Konstruktionen ist es sehr effizient, wenn die einzelnen Bauteile nicht unverbunden im Raum stehen, sondern den einzelnen Bindern bzw. den Dachflächen zugeordnet sind.

Klassifikation von Bauteilen

Ein weiterer entscheidender Punkt für eine effiziente Weiterverarbeitung des Gebäudemodells ist die korrekte Klassifizierung der Bauteile: Wände, Dachflächen, Stützen, Sparren, Verbindungsmittel etc. sollten bei der Übergabe mittels IFC auch korrekt als solche typisiert sein. In vielen Architektur-Programmen kann die richtige IFC-

7 Schnittstelle CAD-CNC

Abb. 75: Bauteile und ihre lokalen Koordinaten-Systeme, wie sie für Holzbauprogramme typisch sind. Dargestellt ist eine Bodenplatte, zwei Holzbalken und eine Gipsplatte. Grün = X-Achse, Blau = Y-Achse, Rot = Z-Achse. Die X-Achse läuft bei den Balken immer entlang der Bauteil-Länge, unabhängig davon, ob er stehend oder liegend verbaut wird.

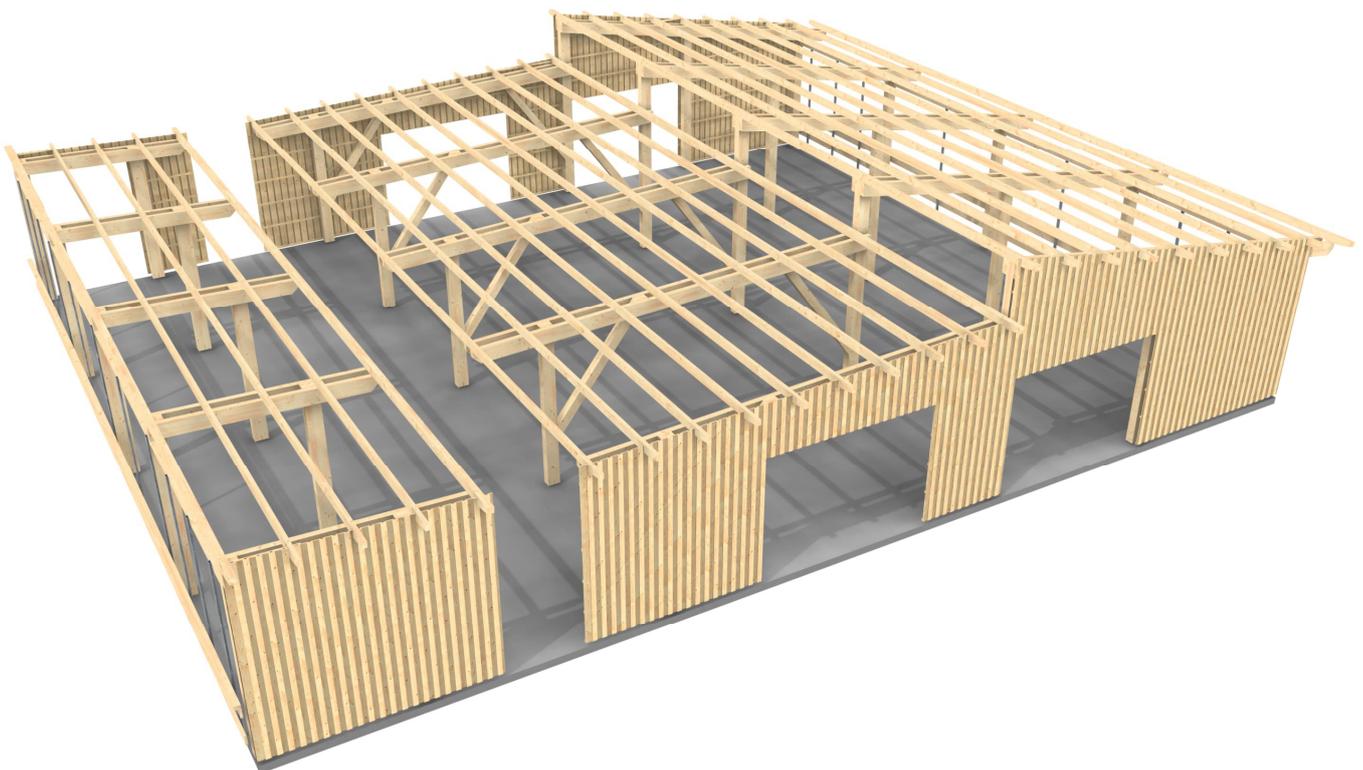
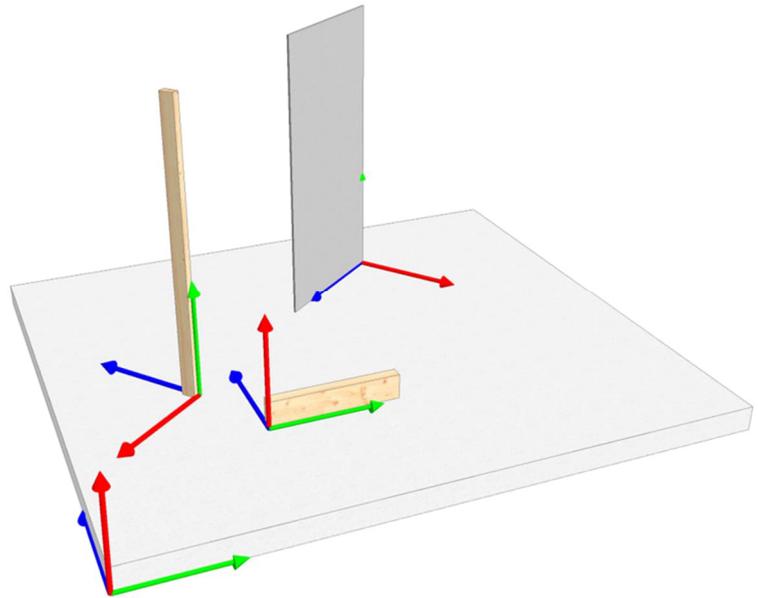


Abb. 76: Vereinfachte Darstellung der Tragkonstruktion und Fassade eines landwirtschaftlichen Nutzgebäudes (Konstruktion nach Planung LfL_Landwirtschaftliches Bauwesen (2023)).

7 Schnittstelle CAD-CNC

konforme Klassifikation für die Bauteile eingestellt werden. Darauf sollte bei der Erstellung des Modells von Anfang an geachtet werden.

Koordination und Beiträge der Fachexperten im digitalen Planungsprozess

Wie zuvor dargelegt, ist es für eine effiziente Vorgehensweise in den Phasen der Planung und Fertigung eines landwirtschaftlichen Nutzgebäudes von Bedeutung, eine präzise Abstimmung darüber zu erzielen, welcher Beteiligte (Architekt, Statiker, Holzbauingenieur, Zimmerer) welche Informationen in welcher Detailtiefe zum Modell beiträgt. In traditionellen Bauprozessen wird die Expertise im Holzbau häufig erst nach der finalen Koordination der Baupläne zwischen Architekten und Fachplanern einbezogen, üblicherweise mit dem Beginn der Ausschreibungsverfahren für Bauleistungen. Mit der Integration der bauausführenden Unternehmen werden oft neue Fachkenntnisse in das bestehende Datenmodell eingeführt, was zur Modifikation des bis zu diesem Zeitpunkt entwickelten Modells und korrespondierend dazu der assoziierten Daten führt. Es ist gängig, dass die ausführenden Unternehmen die vorhandenen IFC-Daten nur partiell oder nicht übernehmen und den Holzbau in der spezialisierten Holzbausoftware neu konstruieren.

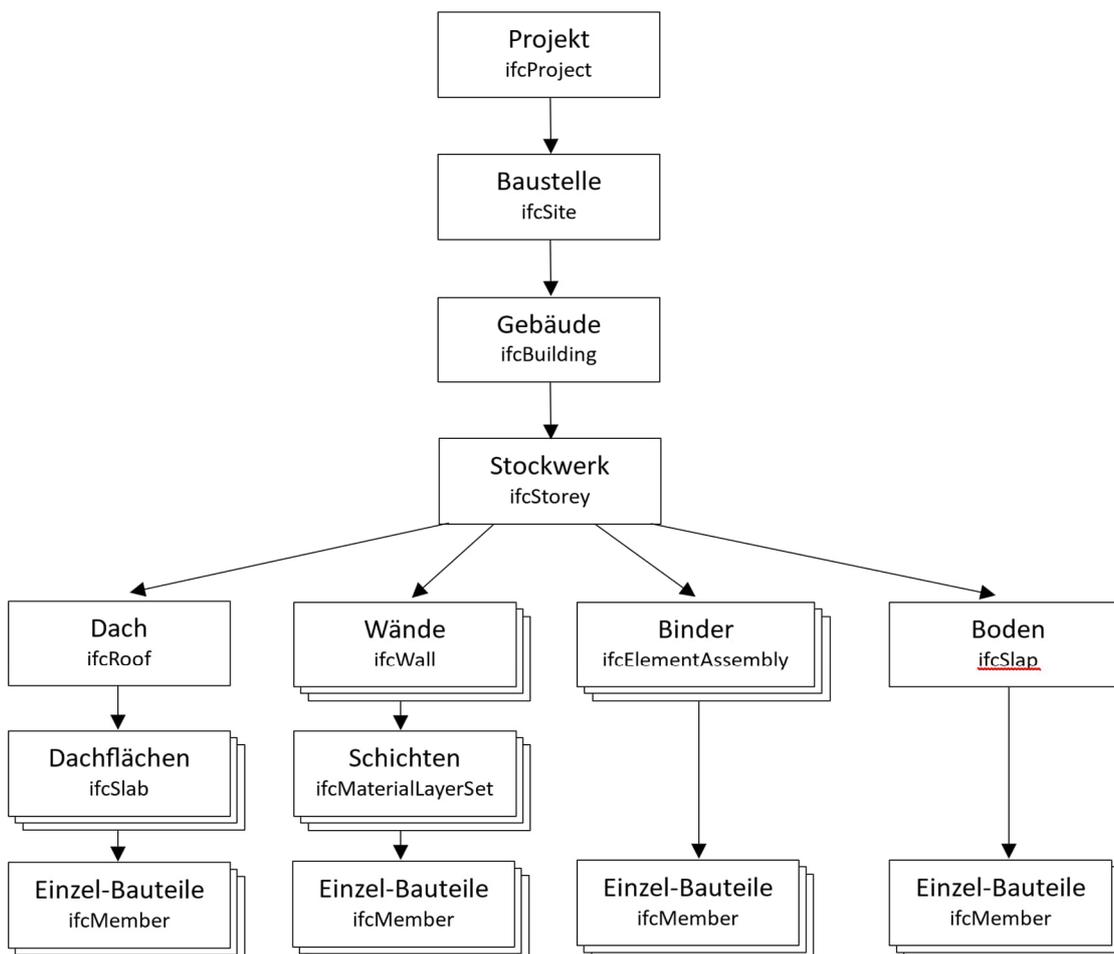


Abb. 77: Typische hierarchische Gliederung von Gebäudedaten im IFC

7 Schnittstelle CAD-CNC

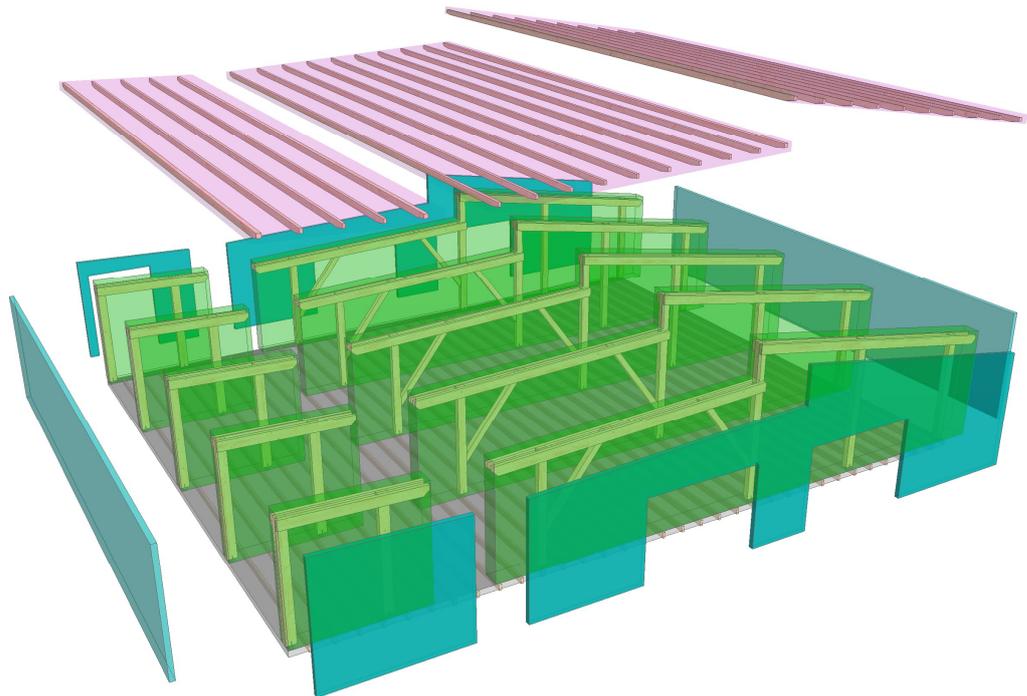


Abb. 78: Explosionszeichnung des Gebäudes von Abbildung 76. Farblich hervorgehoben ist die Zuordnung von Bauteilen zu konstruktiven Einheiten. Die Wände (ifcWall) sind türkis eingefärbt, die Binder (ifcElementAssembly) grün, die Dachflächen (ifcSlab) lila und der Boden (ifcSlab) grau.

Daher empfiehlt es sich, den Planungsprozess genau zu betrachten, um ein optimales und effizientes Vorgehen zu erwirken.

Das Projekt Leanwood hat hier einen wesentlichen Beitrag geleistet und den optimalen Planungsprozess im Holzbau mit Vorfertigung betrachtet. Hierbei lassen sich die Empfehlungen auch für den Bau eines landwirtschaftlichen Nutzgebäudes übertragen und anwenden.

Für ein erfolgreiches Holzbauprojekt ist die Optimierung des Planungsprozesses entscheidend.

Zu den Kernaspekten gehören:

- die frühzeitige und präzise Abstimmung von Zielen und Anforderungen mit dem Auftraggeber, inklusive Budget, Terminen und funktionalen sowie persönlichen Vorstellungen.
- die frühe Zusammenstellung eines kompetenten Planungsteams, dessen Fachwissen von Anfang an in die Planung einfließt.
- eine ausreichende und realistische Planungsvorlaufzeit, um Qualitätsmängel und Überschreitungen von Zeit und Kosten zu vermeiden.
- eine gut organisierte integrale Planung, die klare Vereinbarungen über Planungsphasen und Änderungsmanagement beinhaltet. Dabei ist eine enge und kontinuierliche Abstimmung mit dem Bauherrn und allen Planungsbeteiligten wichtig.
- ein besonderes Augenmerk auf die Planungszeit, die der Komplexität des Holzbaus angemessen sein sollte. Kompetenz und Erfahrung in verschiedenen Disziplinen wie Architektur, Tragwerksplanung, Brandschutz und technische Gebäudeausrüstung sind von Vorteil.

7 Schnittstelle CAD-CNC

- eine klare Schnittstellendefinitionen und frühzeitige Identifizierung kritischer Punkte, besonders an den Übergängen zwischen Baukonstruktion, Brandschutz und technischer Gebäudeausrüstung.

Insgesamt sollte das Planungsteam ein tiefes Verständnis für die jeweils anderen Fachbereiche haben, um die Zusammenarbeit zu erleichtern.

(<https://www.arc.ed.tum.de/fileadmin/w00cgv/holz/leanWood/leanWOOD-Broschuere.pdf>; Seite 10 und 11; Download 31.10.2023)

Die Einbindung Holzbau spezifischer Expertise in den Frühphasen des Planungsprozesses

Die vorausschauende Integration des ausführenden Holzbauunternehmens in den Planungsprozess repräsentiert eine strategische Möglichkeit, die potenziell die Synergie zwischen Konzeption und Realisierung maximieren kann. Gleichzeitig birgt dieser Ansatz das Risiko, den durch Marktbedingungen induzierten Kostendruck nicht wesentlich zu reduzieren.

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass die im Unternehmenskontext entwickelten spezialisierten und kostenreduzierenden Lösungen überflüssig werden, sofern sie erst in einem fortgeschrittenen Stadium der Planung Berücksichtigung finden. Alternativ kann das erforderliche Fachwissen durch die Einbindung eines unabhängigen Holzbauingenieurs oder eines fachkundigen Architekten eingeholt werden. Diese Option ermöglicht eine unparteiische Beurteilung und Implementierung von Produktions- und Montagetechniken, ohne dabei den Wettbewerb und die Kosteneffizienz aus den Augen zu verlieren.

Um die Herausforderungen zu bewältigen, die durch die getrennte Handhabung von Planung und Ausführung entstehen, werden wesentliche Ansätze aus dem Forschungsprojekt Leanwood verfolgt:

Strategie 1: Frühzeitige Integration von holzbauspezifischem Fachwissen in den konventionellen Planungsprozess: Das Planungsteam bringt die notwendige Holzbaukompetenz über die Beratung durch einen Holzbauunternehmer oder einen unabhängigen Fachmann (z. B. einen Holzbauingenieur) früh in den Planungsprozess ein.

Quelle: (<https://www.arc.ed.tum.de/fileadmin/w00cgv/holz/leanWood/leanWOOD-Broschuere.pdf>; Seite 10 und 11; Download 31.10.2023)

Strategie 2: Frühzeitige Integration von holzbauspezifischem Fachwissen durch Vergabe in der frühen Projektphase: Die Holzbaukompetenz fließt über die frühe Vergabe der Holzbauleistung durch eine funktionale Ausschreibung in den Planungsprozess ein." (Quelle: <https://www.arc.ed.tum.de/fileadmin/w00cgv/holz/leanWood/leanWOOD-Broschuere.pdf>; Seite 10 und 11; Download 31.10.2023)

7 Schnittstelle CAD-CNC

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Maschinenhalle in Holzbauweise.....	5
Abb. 2: Planmodelle I (mehrhäusig) und II (einhäusig) für den Vergleich des Investitionsbedarfs bei Milchviehställen	6
Abb. 3: Beispiele für standardisierte Stallanlagen in Holzbauweise für die Haltung von Milchvieh	6
Abb. 4: Grafischer Vergleich der Kubatur für eine mehr- und einhäusige Stallanlage	7
Abb. 5: Stallanlage für Milchvieh	8
Abb. 6: Zuchtsauenstall mit Abteilen und Buchten	9
Abb. 7: Milchviehstall mit Liegeboxen und Abkalbebuchten	9
Abb. 8: Pferdestall mit Boxen (Ausschnitt)	9
Abb. 9: Liegeboxenaufstallung (nach ALB, 2017)	10
Abb. 10: Tretmistaufstallung nach ALB, 2017)	10
Abb. 11: Tiefstreuenaufstallung (nach ALB, 2017)	10
Abb. 12: Maschinenhalle (Architekt arc-Architekten, Bj. 2002; Foto: Thomas Lauer, 2013)	10
Abb. 13: Lichtraumprofil Liegebox	11
Abb. 14: Lichtraumprofil Mensch	11
Abb. 15: Lichtraumprofil Hoflader	11
Abb. 16: Lichtraumprofile Schlepper	11
Abb. 17: Vergleich Einhäusige Bauweise, Kombinierte Tragwerke, Mehrhäusige Bauweise	13
Abb. 18: Gesamtmatrix zur Zuordnung der kleinsten Funktionseinheiten für Stallanlagen, Reit-, Lager- und Maschinenhallen im Maßsystem $x * 2,50 \text{ m} (\pm 1,25 \text{ m})$	15
Abb. 19: Darstellung Vollholz - Konstruktionsvollholz – Brettschichtholz	16
Abb. 20: Auszug Statik (FRILO), Darstellung Windlasten bei Anströmung von links	17
Abb. 21: Auszug Statik (FRILO) Darstellung Schneelasten	17
Abb. 22: Auszug Statik (FRILO), Wind-&Schneelasten	17
Abb. 23: Beispielseite 1	24
Abb. 24: Beispielseite 2	25
Abb. 25: R-JV-1R-LB	26
Abb. 26: R-JV-1R-LB Tragwerkvarianten A	27
Abb. 27: R-JV-2R-LB	28
Abb. 28: R-JV-2R-LB Tragwerkvarianten A	29
Abb. 29: R-JV-TS	30
Abb. 30: R-JV-TS Tragwerkvarianten	31
Abb. 31: R-MV-2R-LB	32
Abb. 32: R-MV-2R-LB Tragwerkvarianten A	33
Abb. 33: R-MV-2R-LB Tragwerkvarianten B	34
Abb. 34: R-MV-2R-LB Tragwerkvarianten C	35
Abb. 35: R-MV-3R-LB	36
Abb. 36: R-MV-3R-LB Tragwerkvarianten A	37
Abb. 37: R-MV-3R-LB Tragwerkvarianten B	38
Abb. 38: R-MV-3R-LB Tragwerkvarianten C	39
Abb. 39: R-MV-3R-LB-SG	40
Abb. 40: R-MV-3R-LB-SG Tragwerkvarianten A	41
Abb. 41: R-MB-TM-1F	42
Abb. 42: R-MB-TM-1F Tragwerkvarianten A	43
Abb. 43: R-MB-TM-1F Tragwerkvarianten B	44
Abb. 44: R-MB-TM-1F Tragwerkvarianten C	45
Abb. 45: R-MB-TM-2F	46
Abb. 46: R-MB-TM-2F Tragwerkvarianten A	47
Abb. 47: R-MB-TM-2F Tragwerkvarianten B	48
Abb. 48: R-MB-TM-2F Tragwerkvarianten C	49
Abb. 49: R-MK-TM-2F	50
Abb. 50: R-MK-TM-2F Tragwerkvarianten A	51
Abb. 51: R-MK-TM-2F Tragwerkvarianten B	52
Abb. 52: R-MK-TM-2F Tragwerkvarianten C	53
Abb. 53: R-MK-2RLB	54
Abb. 54: R-MK-2RLB Tragwerkvariante A	55
Abb. 55: S-AF-NLfLB	56
Abb. 56: S-AF-NLfLB Tragwerkvarianten A	57
Abb. 57: S-AF-NLfLB Tragwerkvarianten B	58
Abb. 58: S-AF-NLfLB Tragwerkvarianten C	59
Abb. 59: S-MS-BAT	60

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abb. 60: S-MS-BAT Tragwerkvarianten A.....	61
Abb. 61: S-MS-BAT Tragwerkvarianten B.....	62
Abb. 62: S-MS-BAT Tragwerkvarianten C.....	63
Abb. 63: KW-MA-FS.....	64
Abb. 64: KW-MA-FS Tragwerkvariante A: KW-MA-FS Tragwerkvariante A.....	65
Abb. 65: KW-MA-TS.....	66
Abb. 66: KW-MA-TS Tragwerkvariante A.....	67
Abb. 67: KW-MA-TS Tragwerkvariante B.....	68
Abb. 68: KW-MI-TS.....	70
Abb. 69: KW-MI-TS Tragwerkvariante A.....	71
Abb. 70: KW-MI-TS Tragwerkvariante B, C.....	72
Abb. 71: Pf-RH.....	74
Abb. 72: Pf-RH Tragwerkvarianten A.....	75
Abb. 73: L-SG.....	76
Abb. 74: L-SG Tragwerkvarianten A.....	77
Abb. 75: Bauteile und ihre lokalen Koordinaten-Systeme, wie sie für Holzbauprogramme typisch sind. Dargestellt ist eine Bodenplatte, zwei Holzbalken und eine Gipsplatte.....	81
Abb. 76: Vereinfachte Darstellung der Tragkonstruktion und Fassade eines landwirtschaftlichen Nutzgebäudes.....	81
Abb. 77: Typische hierarchische Gliederung von Gebäudedaten im IFC.....	82
Abb. 78: Explosionszeichnung des Gebäudes von Abb. 76. Farblich hervorgehoben ist die Zuordnung von Bauteilen zu konstruktiven Einheiten. Die Wände (ifcWall) sind türkis eingefärbt, die Binder (ifcElementAssembly) grün, die Dachflächen (ifcSlab) lila und d.....	83

8 Verzeichnisse

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Vergleich des Investitionsbedarfs der Planmodelle I (mehrhäusig) und II (einhäusig) für Milchviehställen (Kosten netto Stand 2023)	7
Tab. 2: Beispielhafte Übersicht der Produktions- und Funktionsbereiche in einer Stallanlage für Milchvieh	8
Tab. 3: Übersicht Tragwerke	12
Tab. 4: Analyse von 50 Tragwerkstypen hinsichtlich des Kipp-Punktes von Vollholz (VH) zu Brettschichtholz (BSH)“	18
Tab. 5: Auszug aus Holzmengenberechnung - Beispiel Sk-Q-StüB-2StrA bei Spannweite 8,75 m	19
Tab. 6: Kosten pro Binder in Abhängigkeit von Tragwerk und Spannweite	21
Tab. 7: Kostenabweichung vom Durchschnittspreis pro Binder in einer Spannweitengruppe.....	22

8 Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

- Eberl, V.; J. Simon (2017): ALB-Arbeitsblatt 02.06.04 - Kälberhaltung. ALB Bayern e . V., Freising
- Leicher, C.; K. Reiter; J. Zahner (2017): ALB-Arbeitsblatt 02.03.15 - Liegeboxen für Kühe und tragende Kalbinnen. ALB Bayern e . V., Freising
- Moser, P.; C. Habel (2023): ALB-Arbeitsblatt 02.07.01 - Stallsysteme für Mutterkuhhaltung. ALB Bayern e . V., Freising
- Simon, J.; B. Haidn; P. Moser (2016): ALB-Arbeitsblatt 02.05.03 - Gruppenhaltung von Jungrindern im Außenklimastall. ALB Bayern e . V., Freising
- Simon, J.; B. Haidn; S. Kirsch; M. Mayr; A. Stegmeir; N. Wiedmann (2018): ALB-Arbeitsblatt 02.04.11 - Haltungsförmlichkeiten für Mastrinder I. ALB Bayern e . V., Freising
- Simon, J.; B. Haidn; S. Kirsch; M. Mayr; A. Stegmeir; N. Wiedmann (2017): ALB-Arbeitsblatt 02.04.12 - Haltungsförmlichkeiten für Mastrinder II. ALB Bayern e . V., Freising
- Zahner, J. (2022): ALB-Arbeitsblatt 02.01.01 - Planungsdaten für die Rinderhaltung. ALB Bayern e . V., Freising
- Kretzer, C.; S. Möcklinghoff-Wicke; J. Weber (2021): ALB-Praxisblatt ba6 - Kompostierungsställe, Erfahrungen und Meinungen aus der Praxis. ALB Bayern e . V., Freising

- Haidn, B.; E. Gramberg (2003): ALB-Arbeitsblatt 03.03.08 - Mastschweinehaltung in Außenklimaställen. ALB Bayern e . V., Freising
- Jais, C.; P. Moser (2015): ALB-Arbeitsblatt 03.02.05 - Zuchtsauenhaltung II. ALB Bayern e . V., Freising
- Hofinger, M.; C. Jais (2023): ALB-Arbeitsblatt baf6 - Stallsysteme mit Außenklima und Einstreubereichen in der Schweinehaltung. ALB Bayern e . V., Freising
- Hofinger, M.; C. Jais (2023): ALB-Arbeitsblatt baf7 - Schweinehaltung in Buchten mit getrennten Funktionsbereichen Schweinehaltung. ALB Bayern e . V., Freising
- Hofinger, M.; C. Jais (2023): ALB-Arbeitsblatt baf8 - Entmistungssysteme in der Schweinehaltung. ALB Bayern e . V., Freising

- Ahlers, C.; N. Ahlers; K. Damme; P. Hiller; C. Keppler; J. Menning; S. Schierhold; S. Schneider; R. Schreiter; B. Spindler (2021): Gesamtbetriebliches Haltungskonzept Geflügel - Junghenne. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Bad Oeynhausen
- Bauer, T.; J. Böhmfeld; S. Bönsch; B. Feller; B. Formowitz; G. Franke; S. Fritzsche; E. Grimm; S. Häuser; C. Jais; H. Janssen; D. Lösel; J. Menning; E. Meyer; S. Nesper; T. Paulke; W. Preißinger; A. Sandhänger; H. Schrade; T. Zacharias (2018): Gesamtbetriebliches Haltungskonzept Schwein - Mastschweine. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Bad Oeynhausen
- Bauer, T.; J. Böhmfeld; B. Feller; B. Formowitz; G. Franke; S. Fritzsche; E. Grimm; S. Häuser; C. Jais; H. Janssen; D. Lösel; C. Meyer; E. Meyer; S. Meyer-Hamme; S. Nesper; T. Paulke; W. Preißinger; A. Sandhänger; A. Scholz; H. Schrade; M. Weber; T. Zacharias (2021): Gesamtbetriebliches Haltungskonzept Schwein - Sauen und Ferkel. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Bad Oeynhausen
- Brandl, D. (2010): Österreichischer Bauwettbewerb Landwirtschaftliches Bauen 2010. Österreichisches Kuratorium für Landtechnik und Landentwicklung, Wien
- Dolby, C.-M.; A. Hammer; K.-H. Jeppssen (1988): Rural Constructions in Timber,. Swedish University of Agricultural Sciences, Lund

8 Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

- Engel, H. (2009): Tragsysteme / Structure Systems. Heino Engel und Hatje Cantz Verlag, Ostfildern
- Herzog, T.; J. Natterer; R. Schweitzer; M. Volz; W. Winter (2003): Holzbau Atlas - 4. Auflage. Institut für Internationale Architektur-Dokumentation GmbH & Co. KG, München
- Pelzer, A.; A.-L. Ahring; D. Albers; J. Assheuer; A. Boldt; C. Bühler; U. Drews; T. Engelhard; J. Groenewold; J. Harms; W. Hartmann; P. Heimberg; B. Heimberg; B. Lührmann; J. Menning; D. Mirbach; B. Möntenich; A. Rauen; K. Reiter; H.-J. Rohweder; H Schulte; J. Simon; I. Steinhöfel; O. Tober (2022): Gesamtbetriebliches Haltungskonzept Rind - Milchkühe. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE), Bad Oeynhausen
- Reichenbach-Klinke, M.; M. Lux; A. Rößler; M. Seidl (2006): INeue Hofmodelle - Verbundprojekt: artgereichte, umweltverträgliche und wettbewerbsfähige Tierhaltungsverfahren. Technische Universität München (TUM), München
- Zahner, J. (2007): Investitionsbedarf bei Stallanlagen für die Schaf- und Ziegenhaltung (Diplomarbeit). Fachhochschule Weihenstephan, Freising-Weihenstephan

Legende Tragwerke

	Einspannung		VH/ KVH	Vollholz/ Konstruktionsvollholz
	Gelenk		BSH	Brettschichtholz
	Gelenk	FW	Fachwerk	
	Biegesteife Ecke			

Bewertung

F	Funktion
H	Hygiene ¹
G	Gestaltung

¹ Generell kein Fachwerk
 Ausnahmen in Tierhaltung: Warmställe (z.B. Schweine, Geflügel), Pferde Reithalle
 Ausnahmen in Lebensmittellagerung: Kartoffel, Zwiebel

 Bedingung erfüllt  Bedingung nicht erfüllt

Legende Funktionsbereiche

	Futternvorlage
	Liegebereich
	Aktivitätsbereich
	Treib-/Servicegang
	Lager

Sortierung der Verfahren

Kategorie	Unterkategorie			
	(R) Rinder	K Kälber Jv Jungvieh Mv Milchvieh Mb Mastbullen Mk Mutterkühe		
		(S) Schweine	Dw Deck- und Wartesauen Af Abferkelbuch Fe Ferkelaufzucht Ms Mastschweine	
			(Kw) Kleinwiederkäuer	Ma Mastschafe/-ziegen Mi Milchschafe/-ziegen
			(G) Geflügel	Mg Mastgeflügel Lh Legehennen
			(Pf) Pferde	Gh Gruppenhaltung Eh Einzelhaltung Rh Reithalle
	(L) Lager		Hackschnitzel Getreide Düngemittel Heubelüftung Kartoffeln Zwiebel Maschinen	

Fußnote zu Typenblättern

- * Mehrhäusigkeit bietet nicht die erforderliche Sicherheit gegen unerwünschte Niederschlägeinträge in die angrenzenden Funktionsbereiche.
- ** bei Getreidelagerung, aus hygienisch Gründen, kein Fachwerk.

Legende Bindervarianten

	Variante mit einfachem Binder
	Variante mit geteiltem Binder

Legende zu Tabelle Kippunkte

	Nadelvollholz [NVH]	b/h ≤ 12/38 cm bzw. 20/32 cm	alle Bauteile aus Nadelvollholz
	Brettschichtholz [BSH]	h ≤ 60 cm	mind. ein Bauteil aus Brettschichtholz
	Brettschichtholz [BSH]	h > 60 cm	mind. ein Bauteil aus Brettschichtholz

Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen Bauen mit Holz - von der Planung bis zum Rückbau (ZukunftLaWiBau)

**Schlussbericht über o.g. Forschungsvorhaben
gefördert unter dem Kennzeichen: 2220HV036
im Rahmen „Landwirtschaftliches Bauen mit Holz“ des Förderprogramms „Nachwach-
sende Rohstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)**

TEIL B: Dauerhafte Konstruktionen

Technische Universität München
School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Projektbearbeitung:

Stephan Ott (TUM)
Zsofia Varga (TUM)
Alex Fröhlich (TUM)
Max Hartmann (TUM)

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungsverzeichnis.....	3
TEIL B: AP 6 - Dauerhafte Konstruktionen.....	4
1 Datenanalyse	4
2 Beanspruchungssituationen	13
2.1 Kategorisierung der besonderen Beanspruchungen	15
2.1.1 Mechanischer Angriff auf die tragenden Bauteile.....	15
2.1.2 Chemischer Angriff auf die tragenden Bauteile.....	16
2.1.3 Biologisch-physikalischer Angriff auf die tragenden Bauteile	18
2.2 Verortung besonderer Beanspruchungssituationen	20
2.2.1 Lageplan mechanischer Angriff in einem Milchviehstall	21
2.2.2 Lageplan chemischer Angriff in einem Milchviehstall	22
2.2.3 Lageplan biologisch-physikalischer Angriff in einem Milchviehstall	23
3 Anwendbarkeit und Adaption	23
3.1 Anwendbarkeit aus statischer Sicht	25
3.1.1 Statisch nachgewiesene Verbindungsvarianten der kleinen Halle	25
3.1.2 Statisch nachgewiesene Verbindungsvarianten der großen Halle	28
3.2 Adaption	29
3.3 Erhöhter Betonsockel	30
3.4 Allseitige Einschalung	30
3.5 Adäquate Belüftung	31
4 Ausführung	31
5 Recyclingfähigkeit.....	36
6 Praxischeck	36
7 Musterdetails	37
Abbildungsverzeichnis.....	38
Tabellenverzeichnis.....	39
Quellenverzeichnis	40

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BSH	Brettschichtholz
RFEM	Statikprogramm

TEIL B: AP 6 - DAUERHAFTE KONSTRUKTIONEN

Alex Fröhlich, Max Hartmann, Stephan Ott

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München

1 DATENANALYSE

Im Rahmen der Datenanalyse wurden die in AP 1 gesammelten Daten strukturiert und ausgewertet. In die Analyse flossen Daten zu Konstruktionsarten und Verbindungstypen von landwirtschaftlichen Hallen ein, die bei mehreren Exkursionen zu landwirtschaftlichen Betrieben in Bayern besichtigt wurden. Zudem wurden Daten aus den Projekten «*INTERREG IV Bayern-Österreich - Bauen in regionalen Kreisläufen*» (Simon et al. 2013) und «*Landwirtschaftliche Nutzgebäude in Holzbauweise ohne vorbeugenden chemischen Holzschutz (Gebrauchsklasse 0 (GK 0)) - Besondere bauliche Maßnahmen in Anlehnung an DIN 68800*» (Simon et al. 2019) übernommen.

Insgesamt wurden 35 Hallen in die Analyse mit einbezogen. Bis auf zwei Hallen in Österreich stehen alle Hallen in Bayern. Aufgrund der begrenzten Anzahl und der engen regionalen Beschränkung sind die folgenden Ausführungen nicht allgemeingültig und bedürfen weiterer Untersuchungen.

In Abbildung 1 ist die Verteilung der diversen Konstruktionsarten der untersuchten Hallen gegeben. Es ist klar ersichtlich, dass Binderkonstruktionen mit stützenfreiem Lichtraum mit über 50 % am häufigsten zur Ausführung kommen. Die verschiedenen Fachwerk- und Nagelbinder-Konstruktionen machen einen weiteren großen Teil aus und sind gefolgt von Mehrfeldträgern (Binderkonstruktion mit nicht stützenfreiem Lichtraum). Klassische Pfettendächer kommen selten zum Einsatz.

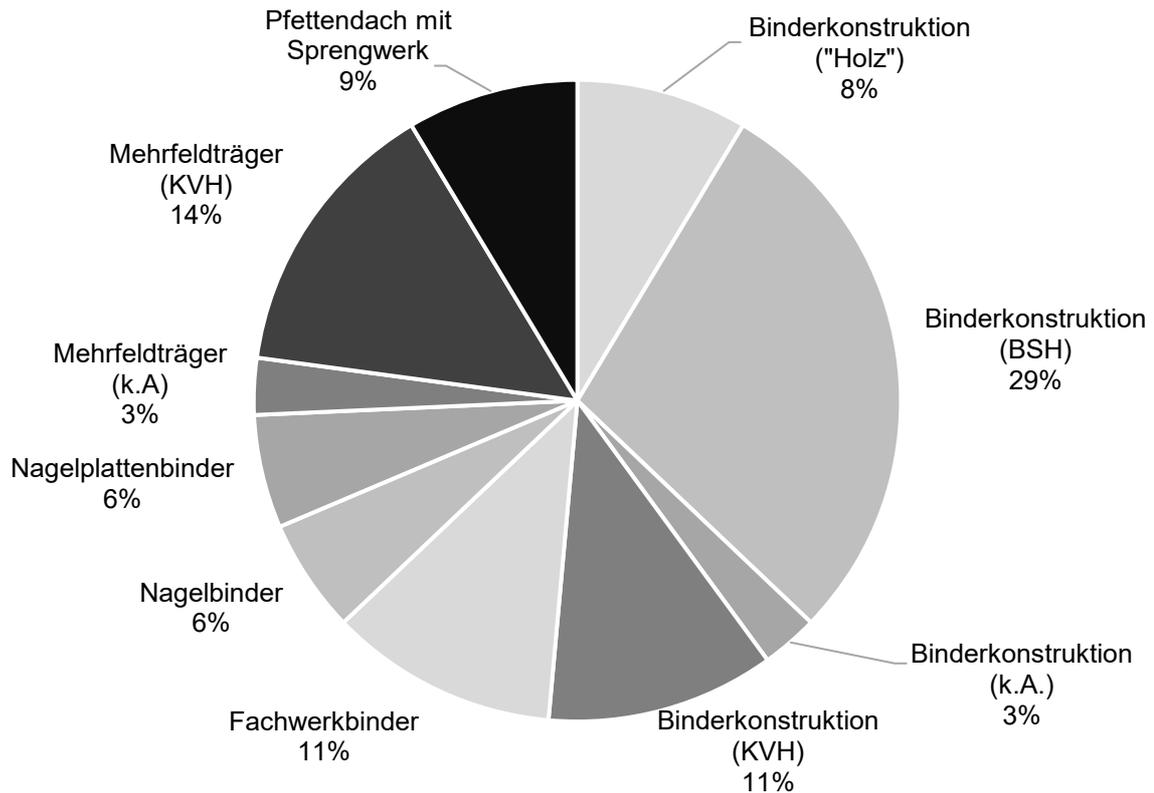


Abbildung 1: Konstruktionsarten der untersuchten Hallen

In Abbildung 2 ist ein Überblick über die diversen Nutzungen der untersuchten Hallen gegeben. Grundsätzlich können Gebäude eingeteilt werden in Stallanlagen und Lager- bzw. Maschinenhallen. Zu Stallanlagen gehören unter anderem Nutzungen der Rinder-, Schweine-, Geflügel- und Pferdehaltung aber auch die Haltung von Kleinwiederkäuern. Lager- und Maschinenhallen können genutzt werden für die Lagerung von Hackschnitzeln, Getreide oder Düngemittel und Kartoffeln. Auch Heutrocknungshallen finden Verbreitung. Alternativ dienen Gebäude dieser Art als Maschinen- oder Gerätehaus. Bei den betrachteten Gebäuden handelt es sich größtenteils um Viehställe, bei denen in der Regel die höchsten Anforderungen an das Gebäude gestellt werden. Unter anderem sind dies:

- An die Boxenmaße angepasstes Stützenraster
- Großes Lichtraumprofil der Durchfahrten
- Tragkonstruktion darf Vögeln keine Nistmöglichkeiten bieten
- Teilweise hohe Feuchtebelastung
- Sommerlicher Wärmeschutz
- Mechanischer Angriff durch das Vieh

Daher wird in den folgenden Abschnitten häufig der Fokus auf Hallen für die Viehhaltung liegen. Diese sind im Datensatz zudem am stärksten vertreten. Werkstatthallen spielen

hingegen nur eine untergeordnete Rolle und erfordern zudem meist geringere Spannweiten als andere landwirtschaftliche Hallen. Unter den betrachteten Gebäuden ist die flächenmäßig kleinste Halle mit 96 m^2 Grundfläche eine Hackschnitzelhalle, die größte ist eine Geflügelhalle mit knapp 2200 m^2 .

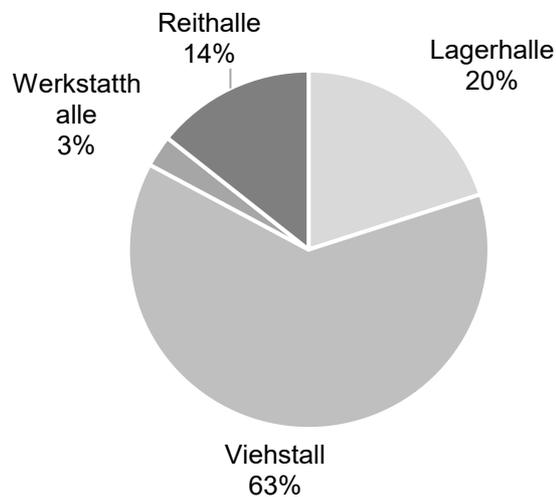


Abbildung 2: Nutzung der untersuchten Hallen

Bei den Viehhallen ist der Lichtraum in der Regel nicht stützenfrei. Im Gegensatz dazu sind sämtliche Lager-, Werkstatt- und Reithallen stützenfrei. Die Längsaussteifung erfolgt unabhängig von der Nutzung meist über Wind- oder Wandverbände aus Stahl oder Holz. Nur selten kommen eingespannte Stützen zum Einsatz. Kopfbänder kommen nur bei der kleinsten Halle, einer Hackschnitzelhalle vor. Die Daten zur Queraussteifung sind in Abbildung 3 dargestellt. Hier sind eingespannte Stützen am häufigsten, gefolgt von Diagonalen und Rahmen. Wind- bzw. Dachverbände sorgen bei 23 der 35 Hallen für die Aussteifung der Dächer.

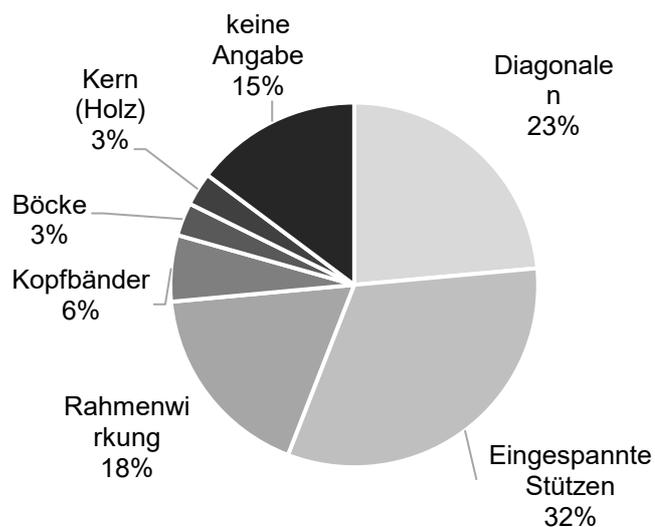


Abbildung 3: Konstruktionsarten der Queraussteifung

Es ist anzumerken, dass mit zunehmender (stützenfreier) Breite der Hallen eher Binderkonstruktionen und Rahmen realisiert wurden. Gleichzeitig werden zunehmend eingespannte Stützen bzw. die Rahmentragwirkung zur Queraussteifung und Verbände zur Längsaussteifung eingesetzt. Je länger die Hallen sind, desto häufiger werden massive Wandverbände aus Holz errichtet.

In Abbildung 4 ist die Häufigkeit der verschiedenen Dachformen gegeben. Satteldächer kommen bei fast zwei Dritteln aller Hallen vor. Pultdächer bei knapp jeder vierten Halle. Andere Dachformen spielen eine untergeordnete Rolle. Hierbei werden Traufhöhen von 3 bis 9 m und Firsthöhen von 6 bis 13 m erreicht.

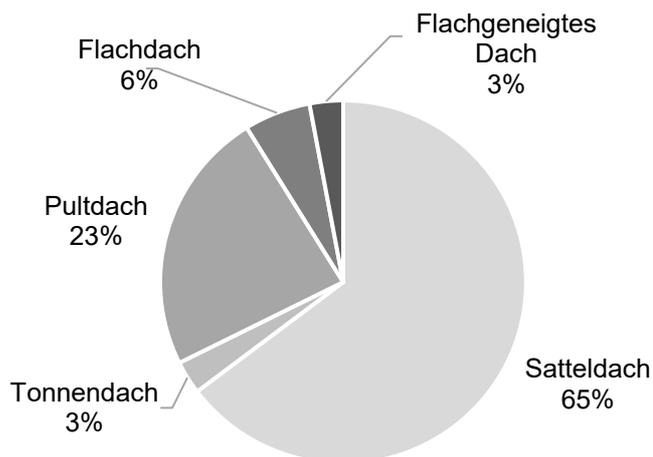


Abbildung 4: Dachformen der untersuchten Hallen

Bei den Haupttragwerken kommen verschiedenste Verbindungsmittel, häufig auch in Kombination, vor. Diese sind in Abbildung 5 abgebildet. Hierbei waren Mehrfachnennungen je Halle möglich. Bolzen kommen in fast der Hälfte aller Hallen zum Einsatz und sind gefolgt von Stabdübeln. Schrauben wurden nur in einem Sonderfall verwendet. Die Verbindungsmittel der Nebentragwerke und weitere Anschlüsse werden hier nicht weiter betrachtet.

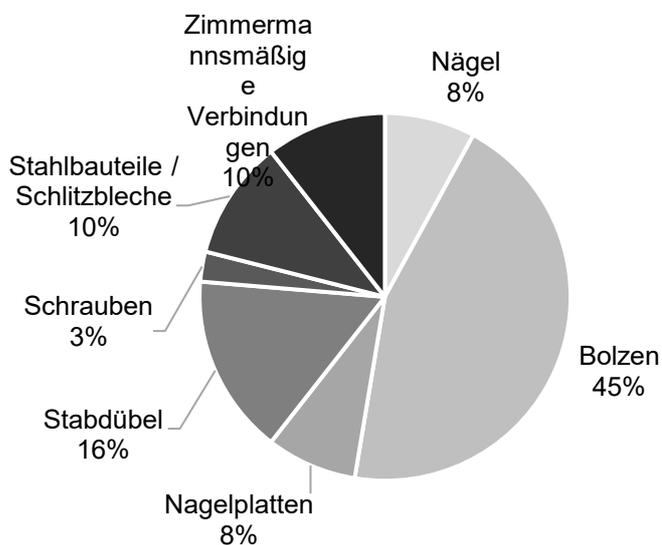


Abbildung 5: Verbindungsmittel des Haupttragwerks

Die vorhandenen Verbindungen und ihre Häufigkeit sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Katalog der vorhandenen Verbindungen und deren Häufigkeit bei den betrachteten Gebäuden

Knotenpunkt	Bezeichnung	Häufigkeit
Stützenfuß	Einbetonierte außenliegende Stahllaschen mit Stabdübeln und Bolzen	7
	Zapfenverbindung	2
	Schlitzblech Passbolzen	6
Haupt-/Nebenträger	Zangenverbindung mit Dübeln besonderer Bauart.	12
	Balkenschuh	4
	Zimmermannsmäßige Verbindung mittels Stirnversatz	2
	Zimmermannsmäßige Verbindung mittels Fersenversatz	2
	Zimmermannsmäßige Verbindung mittels doppelten Versatzes	2
	Schlitzblech mit Passbolzen	3
	Knagge	1
Stoß (biegesteif)	Koppelstoß	5
	Laschenstoß	2
	Sparrenpfettenanker	1
	Winkelverbinder	5
Fachwerkknoten	Nagelplatten	4
	Genagelte Verbindung	2

Ergänzend dazu sind in Tabelle 2 die üblichen Konstruktionsarten in Abhängigkeit der Nutzung gegeben und um Angaben zum Lichtraum und den Verbindungsmitteln ergänzt. Dies soll Auftraggebern bei bekannter Nutzung einen kompakten Überblick über die häufigsten und die möglichen Gebäudevarianten geben. Es ist anzumerken, dass hier nur die beobachteten Angaben vermerkt sind. Darüber hinaus sind auch weitere Konstruktionsarten, Ausprägungen des Lichtraums und Verbindungsmittel für die Nutzungen möglich. Dies gilt besonders für Werkstatthallen, da von dieser Nutzungsform nur eine Halle betrachtet wurde. Zahlreiche weitere Tragwerks- und Verbindungsvarianten finden sich beispielsweise in Herzog et al. (2003).

Tabelle 2: Konstruktionsarten, Lichtraum und Verbindungsmittel je nach Nutzung

Nutzung	Konstruktionsart	Lichtraum	Häufige Verbindungsmittel	Mögliche Verbindungsmittel
Viehstall (n=22)	Binderkonstruktion (13), Mehrfeldträger (6), Nagelbinder (2), Sprengwerk (1)	Nicht stützenfrei (18), stützenfrei (3)	Bolzen, Bolzen + zimmermannsmäßig kombiniert	Stabdübel, Schlitzbleche, Nagelplatten, Nägel
Lagerhalle (n=7)	Binderkonstruktion (2), Fachwerkbinder (2), Nagelbinder (2), Sprengwerk (1)	stützenfrei	Bolzen	Nägel, Stabdübel, zimmermannsmäßig, Nagelplatten
Reitstall (n=5)	Binderkonstruktion (3), Fachwerkbinder (1), Sprengwerk (1)	stützenfrei	Bolzen, Bolzen + Stabdübel kombiniert	Stahlbauteile, Holznägel
Werkstatthalle (n=1)	Fachwerkbinder (1)	stützenfrei	Wie oben	Wie oben

Aufgrund der begrenzten Anzahl der untersuchten Hallen muss davon ausgegangen werden, dass in diesen nicht alle möglichen Verbindungsmittel vorkommen. Daher wurden in einer umfassenden Literatur- und Marktrecherche weitere Varianten ermittelt. Diese sind in Tabelle 3 dargestellt. Der Vollständigkeit halber werden auch Knoten angegeben, die in den beiden Hallenvarianten, die in den folgenden Abschnitten untersucht werden, nicht vorkommen. Weitere Informationen finden sich in Herzog et al. (2003).

Tabelle 3: Weitere mögliche Verbindungsvarianten

Knotenpunkt	Bezeichnung	Verbindungsmittel	Anmerkung
Stützenfuß eingespannt	Eingespannte Stütze mit Stahllaschen	Stabdübel, Bolzen	
		Stabdübel, Bolzen	
		Vollgewindeschrauben	

	Eingespannte Stütze mit eingeschlitzten Stahlteilen	Eingeklebte Gewindestangen	Komplexe Ausführung aufgrund hoher Genauigkeitsanforderungen	
Stützenfuß gelenkig	Zapfenverbindung	-		
	Stahllaschen	Stabdübel, Bolzen		
		Dübel besonderer Bauart		
	Gussteil	Stabdübel, Bolzen		
	Stahlteil	Nägel		
Stabdübel, Bolzen				
Rahmeneck	Doppelt keilgezinkt	Keilzinkung	Komplexe Ausführung	
	Einfach keilgezinkt	Keilzinkung	Komplexe Ausführung	
	Dübelkreis	Stabdübel, Dübel besonderer Bauart	Stütze oder Riegel aufgelöst	
	Vollgewindeschrauben	Vollgewindeschrauben	Komplexe Ausführung	
	Eingeklebte Gewindestangen	Eingeklebte Gewindestangen	Komplexe Ausführung	
	Aufgelöste Ecke	Stabdübel, Bolzen		Komplexe Ausführung
		Dübel besonderer Bauart, Bolzen		
Vollgewindeschrauben				
Anschluss Haupt-/ Nebenträger	Zangenverbindung	Bolzen	Komplexe Ausführung	
	Knagge	Vollgewindeschrauben	Komplexe Ausführung	
	Systemverbinder	Vollgewindeschrauben, Stahlformteile	Komplexe Ausführung	
	Balkenschuh	Vollgewindeschrauben, Nägel, Stahlformteile		
Anschluss Stütze-Strebe / Strebe-Riegel	Stirnversatz	Schrauben nur zur Lagesicherung	Mit Lasche kombinierbar	
	Brustversatz			
	Fersenversatz			
	Doppelter Versatz			
	Eingeschlitztes Stahlteil	Stabdübel		
	Stahl-Formteil	Vollgewindeschrauben		
	Vernageltes Kopfblech	Nägel		
	Lasche	Stabdübel, Bolzen		
	Aufgelöste/r Stütze/Riegel	Stabdübel, Bolzen		
	Aufgelöste Strebe	Stabdübel, Bolzen		
Stoß (Normalkraft)	Gerades Blatt	-	Gute Lösbarkeit	
	Zapfenstoß	-	Gute Lösbarkeit	
	Gerades Hakenblatt	-	Gute Lösbarkeit	
	Schräges Hakenblatt	-	Gute Lösbarkeit	
	Gerberstoß	-	Gute Lösbarkeit	
	Schlitzblech	Stabdübel	Komplexe Ausführung	
	Zugstoß	Vollgewindeschrauben		
Stoß (Pfetten, biegesteif)	Koppelstoß	Bolzen, Dübel besonderer Bauart	Einfache Ausführung	
	Laschenstoß	Bolzen, Dübel besonderer Bauart	Einfache Ausführung	
	Momentenstoß	Vollgewindeschrauben		

	Sparrenpfettenanker	Nägel, Vollgewindeschrauben	Einfache Ausführung
Fachwerkknoten	Nagelplatten		
	Genagelt	Nägel	
Stützenkopf	Gabellager	Stahllaschen, Bolzen, Dübel besonderer Bauart	
		Ausnehmung Holzstütze, Bolzen	
		Holzlaschen, Bolzen	
		Stahlbeton-Fertigteilstütze	
	Aufgelöste Stütze	Stabdübel, Bolzen	Großer Füllholzbedarf
	Dreiteilige Stütze als Zange	Stabdübel, Bolzen	
	Dreiteilige Stütze und Träger als Zange	Stabdübel, Bolzen	
	Oben eingespannte Stütze	Diverse	
	Aufgelöster Riegel	Bolzen, Dübel besonderer Bauart	
	Schlitzblech	Stabdübel	Kippnachweis problematisch
Zapfen	-		

Um für Planer und Bauherren eine handhabbare Datengrundlage zu schaffen, war die Bewertung dieser Verbindungsmittelvarianten anhand mehrerer Kategorien hinsichtlich Konstruktion und Wirtschaftlichkeit vorgesehen. Zusammenfassend sind die Kriterien mit ihren jeweiligen Kategorien in Tabelle 4 gegeben.

Tabelle 4: Übersicht der Bewertungskriterien und ihrer Kategorien

Konstruktiver Widerstand gegen Kriterien der jeweiligen besonderen Beanspruchung	Chemisch	Physisch
	<u>Kategorie 1</u> Schutz vor korrosiven Desinfektionsmitteln	<u>Kategorie 1</u> Schutz vor Abnutzung durch Vieh
	<u>Kategorie 2</u> Schutz vor Salzen	<u>Kategorie 2</u> Schutz vor Abnutzung durch Geräte
	<u>Kategorie 3</u> Schutz vor Ammoniak gasförmig	
	<u>Kategorie 4</u> Schutz vor Kot (Ammoniak...)	
Bewertung jeder Kategorie jedes Details mit drei Abstufungen: + (erfüllt), - (nicht erfüllt), 0 (neutral)		

Kriterien zur Konstruktion zur Wirtschaftlichkeit und zur Recyclingfähigkeit			
Konstruktion	Wirtschaftlichkeit	Recyclingfähigkeit	Biologisch
<u>Tragfähigkeit ist Voraussetzung</u> <u>Kategorie 1:</u> Lastfluss (Laienverständlichkeit) Montage (Laie?) <u>Kategorie 2</u> Abund (Laie?) <u>Kategorie 3</u> VBM-Zahl	<u>Kategorie 1</u> Materialkosten <u>Kategorie 2</u> Arbeitszeit/Anzahl Arbeiter	<u>Kategorie 1</u> Demontierbarkeit Wiederverwendbarkeit/Recyclingfähigkeit <u>Kategorie 2</u> Querschnittsschwächung	<u>Kategorie 1</u> Schutz vor direkter Bewitterung <u>Kategorie 2</u> Schutz vor anderweitigem Feuchteintrag

Nachteil dieses Vorgehens ist die Subjektivität der Bewertungen. Es lassen sich kein gemeinsamer Maßstab und keine scharfen, vergleichbaren Kriterien festlegen. Zudem erfolgt die Kategorisierung meist anhand von Erfahrungswerten der Autoren. Der Bewertung fehlt somit die wissenschaftliche Aussagekraft.

Darüber hinaus ist aufgrund universal anwendbarer Schutzvorrichtungen eine Unterscheidung in Bezug auf die besondere Beanspruchung nicht notwendig (siehe Abschnitt 3). Die Varianten sollen daher allein aufgrund ihrer Umsetzbarkeit und Wirtschaftlichkeit eingegrenzt werden. Dies erfolgt durch statische Nachweise und im Zuge des vom LfL organisierten Zimmerer-Workshops (Abschnitt 6).

Da eine Berechnung aller Varianten für alle möglichen Spannweiten und Tragwerke nicht zielführend ist, wurden in Zusammenarbeit mit dem LfL zwei repräsentative Beispielkonstruktionen ausgewählt. Dies ist einerseits das «System Grub» des LfL. Hierbei handelt es sich um eine besonders kostengünstige und eigenleistungsfreundliche Konstruktion mit einer Spannweite von 9 m. Diese wird im Folgenden als «kleine Halle» bezeichnet. Auf der anderen Seite steht ein Hallentragwerk mit einer eingespannten und einer Pendelstütze, welche einen Brettschichtholzbinder tragen und somit eine Spannweite von

25 m erzielen. Diese «große Halle» liegt somit am oberen Ende der in der Landwirtschaft üblichen Spannweiten und deckt viele kleinere Konstruktionen mit ab.

Die statischen Nachweise wurden für die untersuchten Verbindungsvarianten bei der Halle mit 9 m Spannweite jeweils für die Dachaufbauten 2 und 3 geführt. Bei der Halle mit 25 m Spannweite wurde nur der Dachaufbau 2 kalkuliert (siehe folgender Abschnitt). Die zwei betrachteten Gebäude sollen als repräsentative Beispiele für landwirtschaftliche Nutzgebäude dienen, um daran die weiteren Untersuchungen aufzubauen.

2 BEANSPRUCHUNGSSITUATIONEN

Die Dauerhaftigkeit von Konstruktionen oder Materialien wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Hierbei kann nach ISO 15686-1:2011-05 unterschieden werden in materielle Einflussfaktoren, wie beispielsweise der natürliche Alterungsprozess, und immaterielle Einflussfaktoren, der Obsoleszenz. Unter Obsoleszenz wird die Unfähigkeit verstanden, sich an veränderte Anforderungen anzupassen. Dauerhaftigkeit beschreibt hierbei die Widerstandsfähigkeit gegenüber diesen Einflussfaktoren.



Abbildung 6: Einflussfaktoren Dauerhaftigkeit nach ISO 15686-1:2011-05

Die immaterielle Dauerhaftigkeit kann sich, je nach gesetzlichen Beschlüssen oder wirtschaftlicher Lage ständig ändern. Dementsprechend ist es schwer, eine verlässliche Datenbasis zur Abschätzung der potenziellen Auswirkungen zu finden.

Es wurden alle für die Dauerhaftigkeit relevanten Einwirkungen analysiert und deren Relevanz für das Projekt bewertet. Dabei wurde der Fokus auf die materielle Dauerhaftigkeit gelegt. Die immaterielle Dauerhaftigkeit wird zu Teilen bereits in anderen Arbeitspaketen bewertet, beispielsweise die Recyclingfähigkeit in AP7.

Zusätzlich zur Unterteilung in Abbildung 6 lassen sich die Belastungen auf landwirtschaftliche Hallen in übliche und besondere Beanspruchungen unterteilen. Zu den üblichen Beanspruchungen zählen das Eigengewicht (variiert je nach Dachaufbau), Windlast und Schneelast. Die 35 im Rahmen des Projekts untersuchten Hallen befinden sich in den Schneelastzonen 1a, 2 oder 3 und Windzonen 1 und 2. Tabelle 5 fasst die Werte zur Höhenlage und den einwirkenden Schnee- und Windlasten zusammen.

Tabelle 5: Höhenlage und Kennwerte zu Schnee- und Windlast der untersuchten Hallen

	Minimum	Maximum	Mittelwert	Variationskoeffizient
Höhe [m ü. NN]	360	816	553,6	21 %
Schneelast s_k [kN/m ²]	0,81	4,05	1,87	49 %
Basisgeschwindigkeitsdruck q_b [kN/m ²]	0,32	0,39	0,36	10 %

Zusätzlich zu diesen äußeren Lasten wird das Hallentragwerk durch das Eigengewicht des Dachaufbaus belastet. Im Rahmen des Projekts wurden vier Dachaufbauten betrachtet (siehe Tabelle 6 und AP 8). Die üblichen Lasten variieren je nach Bauweise und Standort und sind projektspezifisch zu berücksichtigen.

Tabelle 6: Dachaufbauten aus AP 8 und entsprechende ständige Lasten aus Eigengewicht

Nr.	Dachaufbau	Schichtgewicht [kN/m ²]	Summe [kN/m ²]
1	Trapezblech/Faserzementwellplatte mit Dichtband	0,16	0,20
	Traglattung	0,02	
	Konterlattung	0,02	
2	Trapezblech/Faserzementwellplatte mit Dichtband	0,16	0,36
	Lattung in Achse der Pfetten	0,02	
	Konterlattung	0,02	
	Unterspannbahn, diffusionsoffen	0,05	
	Holzschalung, 22 mm, besäumt	0,11	
3	Extensive Dachbegrünung (wassergesättigt, 120 mm)	1,50	2,60
	Unterbau Dachbegrünung (Filtervlies, Dränmatte, Schutzvlies für Abdichtung)	0,35	
	Wurzelfeste Dachabdichtung	0,15	
	Brettstapeldecke, d = 120 mm	0,60	
4	Trapezblech/Faserzementwellplatte	0,16	0,85
	Traglattung	0,02	
	Konterlattung	0,02	
	Unterspannbahn	0,05	
	Brettstapeldecke, d = 120 mm	0,60	

Die besonderen Belastungen lassen sich in lokale und globale Extrembelastungen unterteilen.

Im Zuge der Aufbereitung der in AP1 gesammelten Daten zeigte sich, dass die lokalen besonderen Beanspruchungssituationen in der Regel nur auf spezifische Bereiche beschränkt sind. Es ist also nicht von einer generell höheren Beanspruchung aller Bauteile auszugehen, sondern jeweils nur an einigen kritischen Punkten. Somit lassen sich mögliche negative Auswirkungen durch eine sorgfältige Planung und meist mit geringem Aufwand vermeiden. Ist eine Trennung der lokalen Belastung von den tragenden

Bauteilen nicht möglich, sind lokal zusätzliche Maßnahmen notwendig (siehe Abschnitt 3).

Die globalen besonderen Beanspruchungen wirken hingegen auf den Großteil der internen Bauteiloberflächen. Hier sind weitreichendere Maßnahmen notwendig, um die Dauerhaftigkeit des Tragwerks zu gewährleisten. Aus der Datenanalyse hat sich ergeben, dass Hallen mit Nutzungen, welche globale Beanspruchungen verursachen, meist stützenfrei ausgeführt werden. Dies dient – neben der besseren Befahrbarkeit der Lichtraums – der Reduzierung der feuchte-exponierten tragenden Bauteile und Oberflächen. Dies minimiert den Aufwand für die notwendigen Schutzmaßnahmen.

Im Folgenden sind die verschiedenen Angriffe zunächst nach ihrer Wirkweise kategorisiert. Anschließend soll auf jede besondere Beanspruchung und deren Risikobereich eingegangen werden.

2.1 Kategorisierung der besonderen Beanspruchungen

Es sei angemerkt, dass sich dieser Abschnitt, wie auch alle anderen Teile des AP6, auf die tragenden Bauteile beschränkt. Angriffe auf Fassadenbauteile, Innenausbau oder sonstige Verschleißteile kommen zwar nach demselben Muster vor, sind aufgrund der leichteren Austauschbarkeit etwaiger geschädigter Elemente aber weniger relevant für die Dauerhaftigkeit des Gesamtgebäudes. Damit spielen sie für die Entscheidung von Landwirten für oder gegen Holz als Baustoff eine untergeordnete Rolle (siehe TEIL G, Kap. 2 Methodik, Kap. 2.3.2 Onlineumfrage bei Landwirten und Landwirtinnen).

Die besonderen Beanspruchungen wurden in Anlehnung an Niemz und Sonderegger (2017) nach ihrer Wirkweise in

- Mechanisch
- Chemisch
- Biologisch-physikalisch

kategorisiert und jeweils in einer übersichtlichen Themenkarte zusammengefasst (siehe Abbildungen Abbildung 7 Abbildung 9).

2.1.1 Mechanischer Angriff auf die tragenden Bauteile

Mechanische Angriffe in landwirtschaftlichen Hallen variieren je nach Nutzung, lassen sich jedoch wie folgt zusammenfassen:

- **Verbiss und Scheuern** durch Vieh: Dieser Angriff kommt ausschließlich bei der Haltung großer Nutztiere wie Rinder, Pferde und Schweine vor. Er beschränkt sich flächenmäßig auf Bewegungs-, Liege- und Futterbereiche und reicht je nach Nutztier vom Boden bis 1,00-2,00 m Höhe.
- **Anprall** in Verkehrswegen: Mit dem Anprall durch Fahrzeuge und landwirtschaftliche Maschinen ist nur auf den inneren und äußeren Verkehrs- und Rangierflächen zu rechnen. Dies in einer Höhe bis ca. 5,00 m.
- **Abnutzung**: Tritt neben den Verkehrswegen auch in anderen Bereichen mit starker mechanischer Beanspruchung wie etwa an Böden und Trennwänden in Lagerhallen auf.
- Unvorhergesehene Lasteinwirkung: Kann überall auftreten; beispielsweise durch Quellen, Schwinden oder thermische Ausdehnung.

Mechanischer Angriff

Zielsetzung:

→ Dauerhafter Schutz vor mechanischen Schäden durch baulich/konstruktive Maßnahmen

Grundsätzliche Gefährdungen:

1. Verbiss und Scheuern durch Vieh
2. Anprall in Verkehrswegen
3. Abnutzung (bspw. in Verkehrswegen)
4. Unvorhergesehene Lasteinwirkungen (Bewuchs, etc.)

Grundsätzliche (bauliche) Maßnahmen:

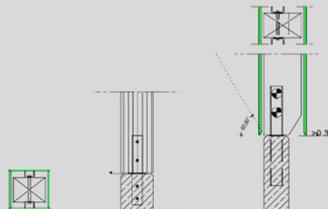
1. Aufstellung außerhalb der Gefahrenbereiche *Vieh* und *Verkehr*

Besondere (bauliche) Maßnahmen:

- Konstruktionsprinzipien aus Simon et al. (2019) und DIN 68800-2:2022-02
- Opferbretter oder Blechverkleidungen zur Vermeidung von direktem Kontakt
→ Anprallschutz, Verbisschutz
- Betonsockel erhöhen

Details:

Opferbretter und erhöhter Betonsockel



Alternative Maßnahmen

Holzarten mit erhöhter Widerstandsfähigkeit

Abbildung 7: Themenkarte zum mechanischen Angriff auf die tragenden Bauteile

2.1.2 Chemischer Angriff auf die tragenden Bauteile

Einen **chemischen Angriff** verursachen alle Stoffe, welche eine chemische Reaktion mit den Materialbestandteilen der Konstruktion bzw. den Verbindungsmitteln hervorrufen. Die Belastung wird dabei vornehmlich durch die Nutzung bestimmt. Durch die Tier-

haltung wird beispielsweise Ammoniak, Schwefeltrioxid und Methan aus Fäkalien eingetragen, welche eine korrosive Wirkung auf die Bauteile haben können. Auch die chemischen Angriffe in landwirtschaftlichen Hallen variieren je nach Nutzung und lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Reaktion mit **Ammoniak**: Die Reaktion mit Ammoniak hat eine sehr geringe Eindringtiefe und ist daher für die Tragfähigkeit nicht von Bedeutung (siehe TEIL F). In der Literatur finden sich zudem Hinweise, dass der resultierende hohe pH-Wert das Wachstum holzerstörender Pilze verhindert (Belie et al. 2000a, Arbeitsgemeinschaft Holz e.V. 1989). Grundsätzlich konzentriert sich die Ammoniak-Einwirkung auf die Sockelbereiche, kann aber auch bis zur Widerristhöhe von 1,50 m reichen.
- **Desinfektion**: Schäden durch Desinfektionsmittel wurden in der Literatur bislang nur wenig untersucht. Ähnlich der Ammoniak-Einwirkung beschränkt sich dieser Angriff jedoch auf oberflächennahe Bereiche. Desinfektionsversuche wurden im Rahmen dieses Forschungsprojekts durchgeführt. Die Ergebnisse werden in TEIL E erläutert.
- **Tausalz**: Angriffe durch Tausalz sind vor allem an Ein- und Ausfahrten und entlang der Verkehrswege zu erwarten. Schäden sind aber vorrangig an metallischen Verbindungsmitteln zu erwarten, da Holz gegen Angriffe durch neutrale Salze unempfindlich ist (Rug und Lißner 2011). Der Korrosionsschutz der Stahlteile ist nach DIN EN 1995-1-1:2010-12 und dem dazugehörigen nationalen Anhang zu planen.

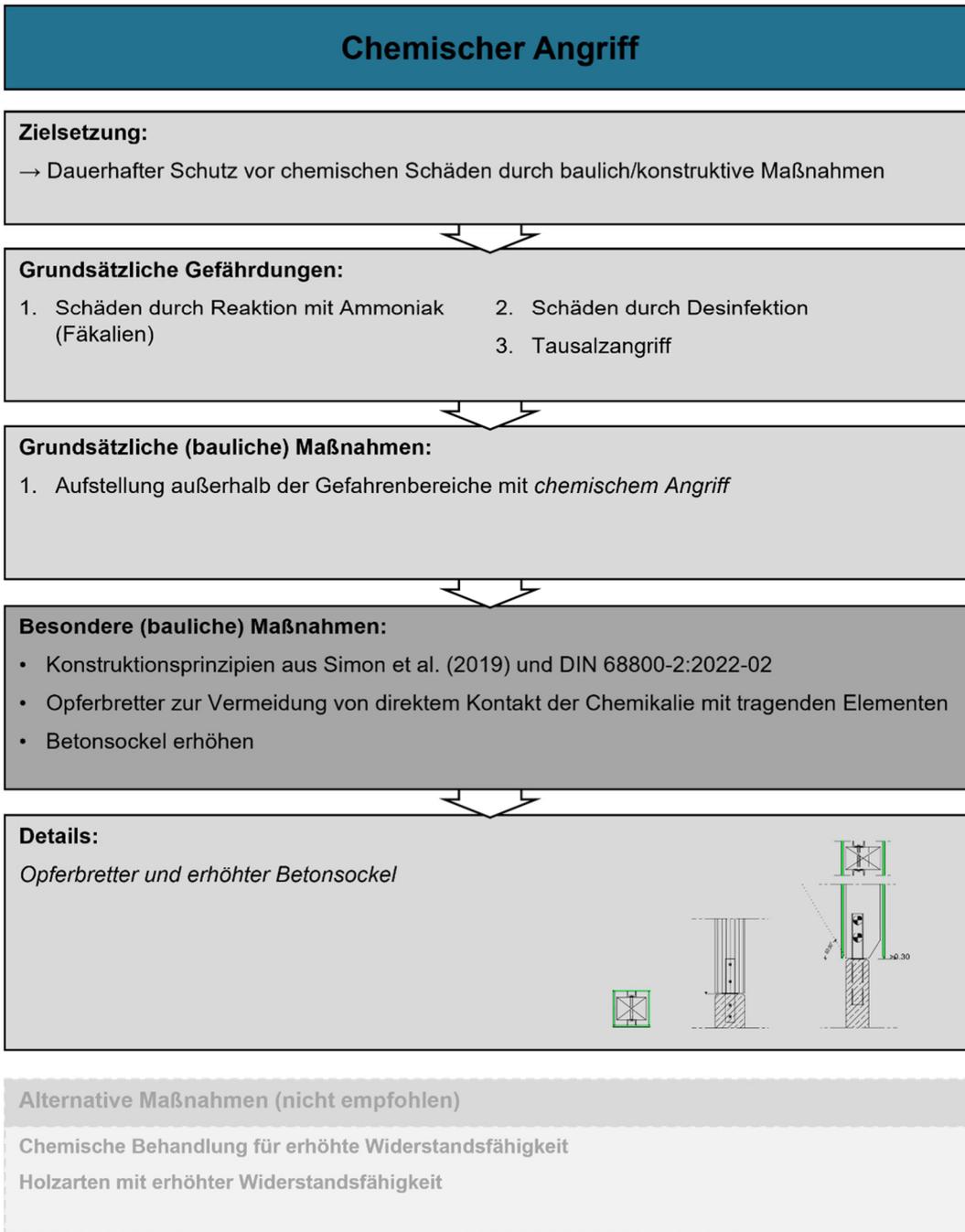


Abbildung 8: Themenkarte zum chemischen Angriff auf die tragenden Bauteile

2.1.3 Biologisch-physikalischer Angriff auf die tragenden Bauteile

Die biologisch-physikalischen Angriffe sind unabhängig von der Nutzung, können aber je nach Standort in ihrer Intensität variieren. Sie lassen sich wie folgt unterteilen:

- **Feuchtigkeit:** Die Wirkungspfade, über die Feuchte und Feuchtigkeitsänderungen zu Schäden führen, sind vielfältig. Dementsprechend entstehen durch Feuchtigkeit die meisten Beeinträchtigungen der Dauerhaftigkeit (siehe TEIL G,

Kap. 2 Methodik, Kap. 2.3.2 Onlineumfrage bei Landwirten und Landwirtinnen). Direkt können Schäden durch häufige und abrupte Änderungen der Holzfeuchte entstehen. Feuchte führt darüber hinaus auch indirekt zu Schäden. Dazu gehören auch einige der chemischen Angriffe in Abschnitt 2.1.2. Auch Schädlinge wie Insekten und holzerstörende Pilze sind auf einen ausreichenden Feuchtegehalt angewiesen. Prinzipiell können alle Teile des Gebäudes betroffen sein. Kritische Feuchtequellen sind Niederschlag und nutzungsbedingte Feuchtequellen. Beim Eintrag von Niederschlag wird dabei nach DIN 68800-2 ein Winkel von etwa 60° zur Horizontalen angenommen (DIN 68800-2:2022-02). Auch Spritzwasser vom Boden sollte Beachtung geschenkt werden. Dieses kann, je nach Bodenbeschaffenheit, das Bauteil zusätzlich von unten befeuchten. Eine mangelhafte Planung und Ausführung von Details können zu verstärkten Schäden führen.

- **Bewuchs:** Bewuchs kann durch Verdrängung von Erdreich und Bauteilen zu Verformungen führen, welche wiederum das Eindringen von Feuchte ermöglichen. Indirekt kann er aber auch zu Schäden führen, indem ein kühles und feuchtes Mikroklima geschaffen (Büsche, Bäume) oder gespeichertes Wasser langsam abgegeben wird (Moose, Flechten). Beides führt zu einer verstärkten Feuchtebelastung der betroffenen Bauteile. In der Regel sind Sockelbereiche der Außenwände und weitere Teile der Gebäudehülle betroffen.
- **Sonneneinstrahlung:** Sonneneinstrahlung degradiert an exponierten Stellen das Lignin und die Hemicellulose. Dies führt zum charakteristischen Nachdunkeln der Holzoberfläche. Sind solche Oberflächen zudem Niederschlägen ausgesetzt, wäscht dieser die verbleibenden Zellulosefasern aus und ein fortschreitender Verwitterungsprozess wird in Gang gesetzt. Dieser betrifft jedoch nur Teile der Fassade.

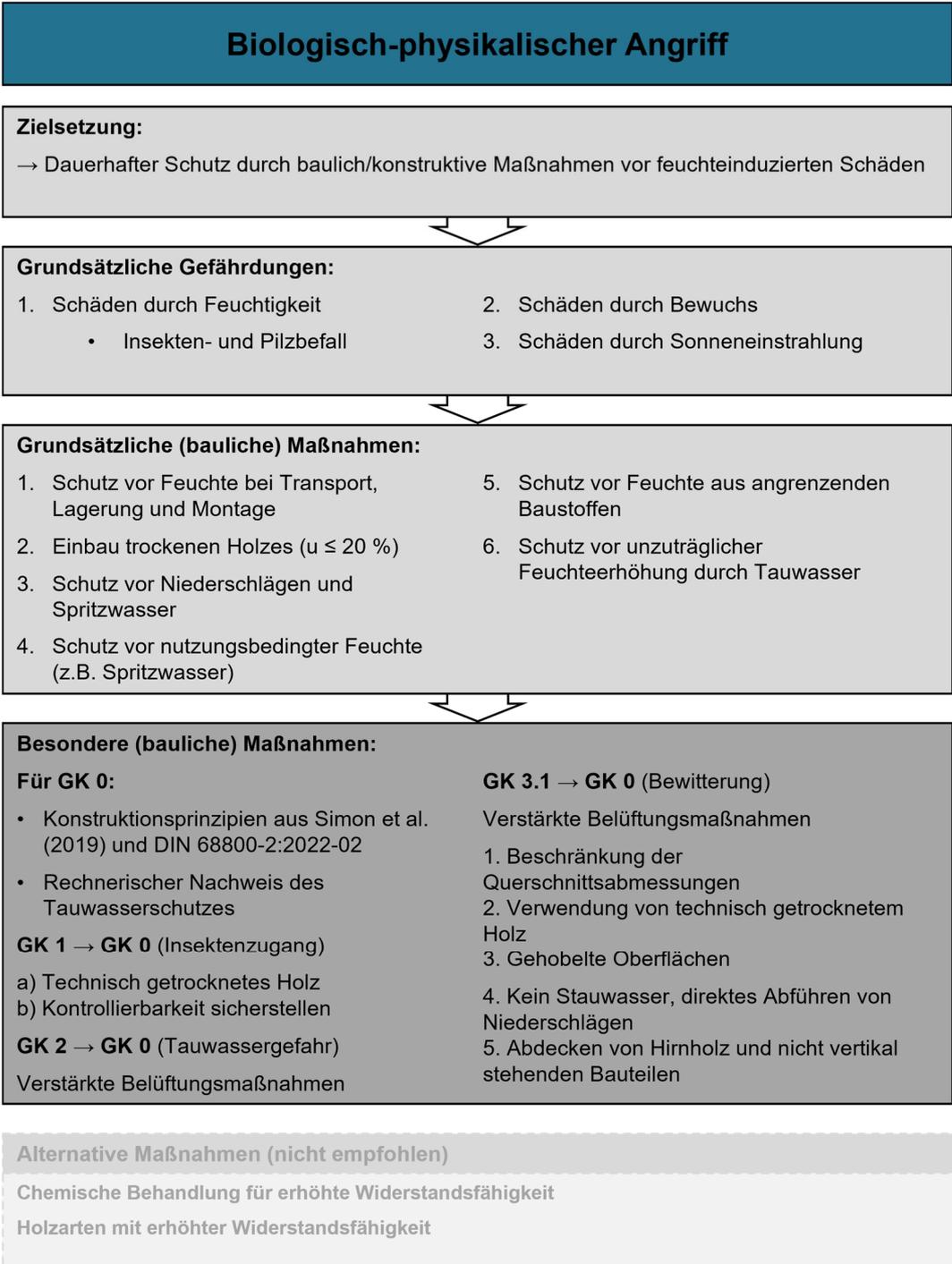


Abbildung 9: Themenkarte zum biologisch-physikalischen Angriff auf die tragenden Bauteile

2.2 Verortung besonderer Beanspruchungssituationen

Bei den verschiedenen Nutzungen von landwirtschaftlichen Gebäuden kommt es zu diversen Auswirkungen in unterschiedlicher Intensität. Da der Aufbau der Nutzgebäude

bei jedem Betrieb stark variieren kann, um an die individuelle Situation des Betriebs und die örtlichen Gegebenheiten angepasst zu sein, können keine konkreten Gefährdungen verortet werden. Vielmehr soll ein Überblick über potenzielle Gefahrenstellen an einem Beispiel gegeben werden, um diese auf das jeweilige Bauwerk anzuwenden.

2.2.1 Lageplan mechanischer Angriff in einem Milchviehstall

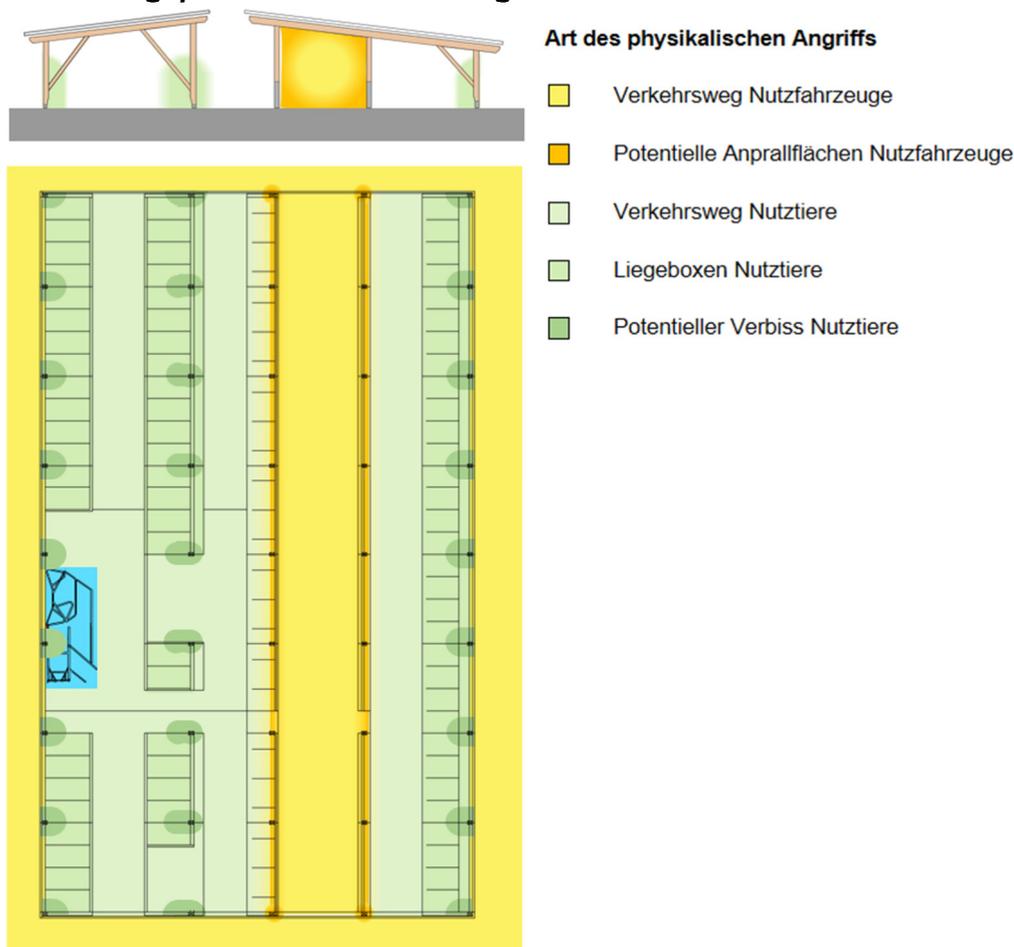


Abbildung 10: Beispiellageplan des mechanischen Angriffs in einem Milchviehstall (nach Simon et al. (2019))

Durch den Einsatz von großen landwirtschaftlichen Maschinen und hoher Frequentierung kann es zu Schäden und Querschnittsminderungen durch Anprall der Maschinen an den Bauteilen kommen. Besonders gefährdet sind dabei Einfahrts- und Rangierbereiche.

Auch ein Anprall durch die Nutztiere kann zu Schäden führen, beispielsweise an horizontalen Querbalken in den Außenwänden oder zugänglichen Holzbauteilen, die zum Kratzen verwendet werden. Einen weiteren Aspekt stellt der Verbiss durch die Tiere dar. In zugänglichen Bereichen werden Querschnitte der Holzbauteile durch Knabbern, Scheuern und Lecken der Tiere reduziert. Die Intensität des Angriffs hängt hier auch mit

der Haltungsform zusammen, da durch einen überwiegenden Aufenthalt der Tiere im Freien weniger Verbiss stattfinden kann.

2.2.2 Lageplan chemischer Angriff in einem Milchviehstall

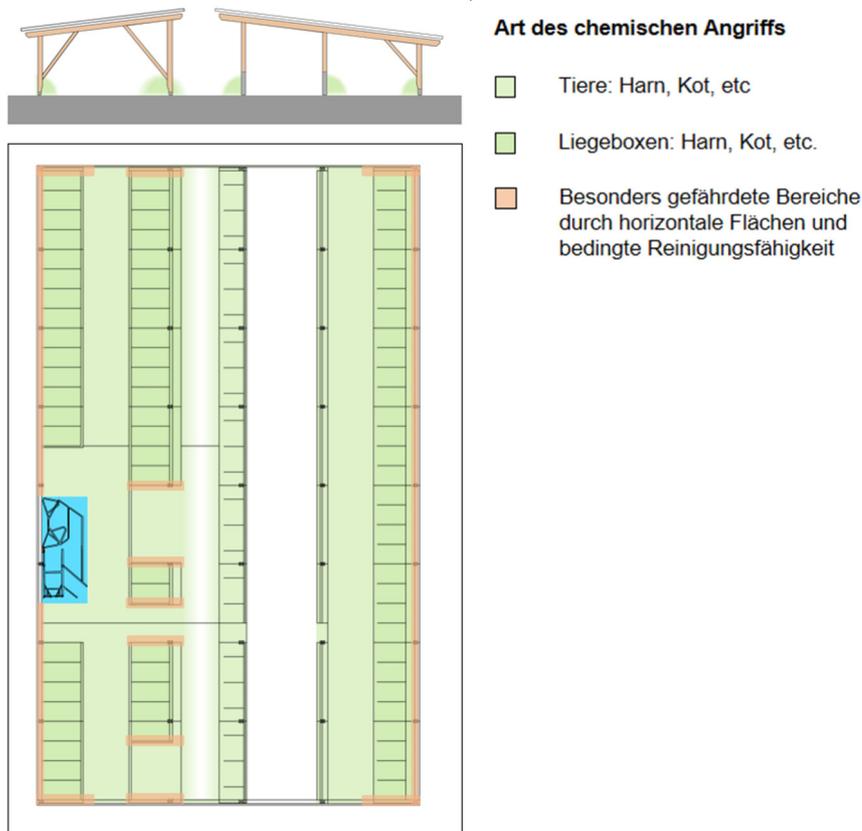


Abbildung 11: Beispiellageplan des chemischen Angriffs in einem Milchviehstall (nach Simon et al. (2019))

Die besonderen Gefährdungsbereiche der chemischen Angriffe sind durch die konstruktiven und geometrischen Gegebenheiten sowie den Reinigungsvorgang bedingt.

Die Systeme zur Kot- und Harnbeseitigung können unterschiedlicher Beschaffenheit sein. Die gängigsten Methoden sind dabei die Ausbildung von Spaltenböden mit darunterliegendem Güllekeller auf den Verkehrsflächen des Nutztieres, oder eine geschlossene Oberfläche mit Gülleschiebern oder ähnlichem Gerät.

Die überwiegend gummierten Spaltenböden befördern Kot und Harnstoffe der Tiere, gefördert durch den Vertritt und Bewegungen der Milchkühe, in die darunterliegenden Güllekeller. Dieser Prozess kann durch den Einsatz von Reinigungsrobotern oder Schiebern unterstützt werden.

Die geschlossenen Böden sind ebenfalls gummiert oder profiliert, um den Tieren den nötigen Halt zu geben. Die in Gebäudeachse verlaufenden Hauptverkehrswege der Nutztiere können durch einen bodennahen Schieber gereinigt werden, der die Fäkalien in eine am Eingang der Halle angeordnete Güllegrube befördert. Diese Aufgabe kann

auch ein Reinigungsroboter übernehmen. Durch den Einsatz des Schiebers konzentriert sich die Reinigungswirkung vor allem auf die Hauptachsen des Gebäudes, während die Nebenwege vernachlässigt werden. Hier kommt es daher zu einer zeitlich längeren Exposition der Bauteile mit den Fäkalstoffen.

Die Reinigungsmethoden konzentrieren sich alle auf die Bodenfläche. Aufsteigende Wände und etwaige tiefliegende horizontale Flächen müssen per Hand gereinigt werden und sind deswegen längere Zeit mit höherer Fäkalienlast belegt.

Auch kommt es in schwer zugänglichen Bereichen, wie etwa dem schmalen Gang zwischen Liegeboxen und Außenwand, zu einer erhöhten Kot- und Harnkonzentration durch eine erschwerte und dadurch zeitlich verzögerte Reinigung.

Einfallender Regen kann die Reinigungswirkung teilweise fördern.

2.2.3 Lageplan biologisch-physikalischer Angriff in einem Milchviehstall

Lagepläne zur Feuchtebeanspruchung und damit zum biologisch-physikalischen Angriff wurden bereits für verschiedene Viehställe und Lagerhallen in Simon et al. (2019) dargestellt und erläutert.

3 ANWENDBARKEIT UND ADAPTION

Der erste Ansatz für die Bewertung der Verbindungsarten im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit war eine Matrix der Einwirkungen und Faktoren, die Auswirkungen darauf haben (siehe Tabelle 7). Hierbei sollte zwischen Regelbereichen typischer landwirtschaftlicher Nutzgebäude und Bereichen besonderer Beanspruchung unterschieden werden. Anschließend sollten die Verbindungen hinsichtlich ihrer Adaptierbarkeit in Bereichen besonderer Beanspruchungen untersucht werden.

Tabelle 7: Beispielmatrix des ersten Lösungsansatzes

		Nutzung/ Instandhaltung	Klima/ Bauphysik	Lage	Verbindungsart/ Detailausformung	Bauteilqualität	Ausführungsqualität
Chemischer Angriff	Ammoniak	++		++	+		
	Kot	++		++	+		
	Saurer Regen			++	+		
	Tausalz	++		++			
Physikalischer Angriff	Feuchtigkeit	++	++	++			
	Frost		++		+		+
	Sonneneinstrahlung			++			
Physischer Angriff	Verbiss	++		++	+	+	
	Scheuern	++		++	+	+	
Biolo-	Schädlinge		++			++	

	Pilzbefall		++			++	
--	------------	--	----	--	--	----	--

Problematisch war die Festlegung der einwirkenden Faktoren, da es hier teilweise Überschneidungen in den Bedeutungen gibt. Die mehrdimensionalen Abhängigkeiten der Verbindungen und der Dauerhaftigkeit von Nutzung, Lage, Ausführung, etc. erzeugen eine Komplexität, die die Verständlichkeit durch den Nutzer stark einschränkt. Die entstehenden Matrizen sind aufgrund der zahlreichen Abhängigkeiten schwierig nachzuziehen. Auch die Bewertung kann in diesem Maßstab nicht konsistent und objektiv getroffen werden. Die dreistufige Bewertung mittels „+“ wird vom Ersteller getroffen und beruht nur auf vermeintlichem „Expertenwissen“.

Materielle Dauerhaftigkeit – LfL Stall

		Klima/Bauphysik	Nutzung/Instandhaltung	Lage	Verbindungsart/Detailausformung	Bauteilqualität	Ausführungsqualität
Chemischer Angriff	Zusammenfassung	1	3	3	2	1	1
	Ammoniak	0	1	2	1	0	0
	Kot	0	0	2	1	0	0
	Saurer Regen	0	0	1	0	0	0
	Tausalz	0	2	2	1	0	0
Physikalischer Angriff	Zusammenfassung	2	2	3	2	3	3
	Feuchtigkeit	1	1	2	1	2	2
	Sonneneinstrahlung	0	0	0	0	0	0
Physiologischer Angriff	Frost	0	0	1	1	0	0
	Zusammenfassung	1	3	3	2	1	1
	Verbleib	0	2	2	1	0	0
Biologischer Angriff	Abnutzung	0	2	2	1	0	0
	Zusammenfassung	2	1	1	1	3	3
	Schädlinge	1	0	0	0	2	2
	Pilzbefall	1	0	0	0	2	2

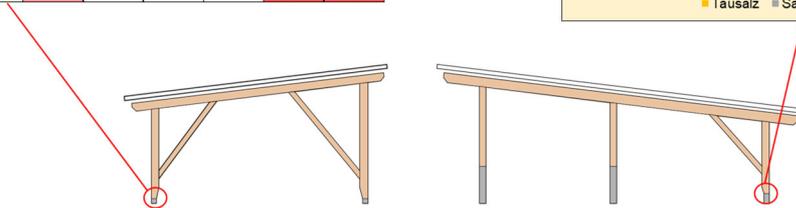
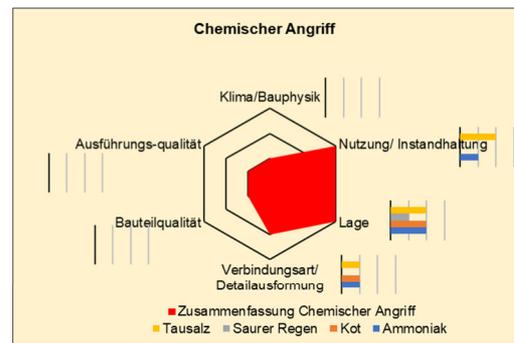


Abbildung 12: Übersicht Bottom-Up-Ansatz

Ein allgemeineres Verfahren ist zur Bewertung nötig, aus diesem Grund wurde ein zweiter Ansatz betrachtet.

Mit dem Bottom-Up-Ansatz (von der Einwirkung zum Detail) wurde von den konkreten Einwirkungen in den Bereichen besonderen Beanspruchung eine Methode zur allgemeinen Bewertung der Gefährdung von Verbindungen erarbeitet. Dabei wurden auch die Untersuchungsergebnisse der Projektpartner (siehe Teil E) einbezogen, um beispielsweise die Einflüsse der *chemischen Einwirkung*, in diesem Fall durch Desinfektion, abbilden und potenzielle Lösungsansätze entwickeln zu können.

Der zweite Ansatz basierte auf der Idee der Themenkarten (siehe Abbildungen oben). Die Themenkarten sollen es dem Nutzer ermöglichen, einen kurzen kompakten Überblick über die relevanten Themen, Problemstellungen und Lösungsansätze des Projektes zu erhalten.

Die Schwierigkeit besteht darin, die verschiedenen Problemfelder (Ökobilanzierung, Recyclingfähigkeit, Dauerhaftigkeit, Wirtschaftlichkeit, Hygiene) innerhalb der unterschiedlichen Nutzungsfelder der Landwirtschaft in einen konkreten Vorschlag für den Nutzer zu vereinen. Auch persönliche Präferenzen oder lokale Besonderheiten bilden einen Faktor, der so schwer abzubilden ist.

Die Idee ist, dem Nutzer selbst die Entscheidung zu überlassen. Die jeweiligen Problemstellungen sollen ihm präsentiert werden und eine individuelle Lösungsmöglichkeit dargestellt werden. Eine Abhängigkeit mit anderen Feldern kann erkenntlich gemacht werden aber es erfolgt keine Wertung darüber hinaus.

Welche Lösungskombination der Nutzer wählt, wird ihm überlassen.

3.1 Anwendbarkeit aus statischer Sicht

Für die Untersuchung der Anwendbarkeit der Verbindungsvarianten wurden zunächst in Abstimmung mit dem LfL Schnee- und Windlasten festgelegt, welche etwa 80 % der Fläche Deutschlands abdecken. Dies sind die Schneelastzone 2 in Höhenlagen unter 1000 m ü. NN und die Windzone 2 außerhalb des Küstenstreifens. Für die weitere Kalkulation wurde ein Sattel- bzw. Pultdach mit einer Dachneigung von 7° angenommen. Für die Eigenlasten wurden die Angaben des LfL übernommen (siehe Tabelle 6). Von diesen vier Dachaufbauten wurden bei der Berechnung der kleinen Halle die Dachaufbauten 2 und 3 berücksichtigt. Bei der großen Halle wurde lediglich die Variante 2 betrachtet.

Dieses Vorgehen wurde gewählt, da die Variante 2 durch ihre höheren Lasten die Variante 1 in Bezug auf die Dimensionierung einschließt. Gleiches gilt für Variante 3 in Bezug auf Variante 4. Bei der großen Halle wurde zudem die Variante 3 vernachlässigt, da bei großen Spannweiten die hohen Lasten des Gründachs zu unwirtschaftlichen Tragwerken führen würden.

Dachaufbau 4 ermöglicht durch seine erhöhte Masse einen besseren sommerlichen Wärmeschutz und könnte damit in Zukunft vor allem bei Milchviehställen an Bedeutung gewinnen. Somit sind bei der *kleinen Halle* insgesamt vier der acht Variationen der Dach- und Tragwerksform, zuzüglich einer Variation bei der *großen Halle*, statisch nachzuweisen.

Zur Ermittlung der Auflagerlasten wurden diese Lasten in das Statikprogramm *RFEM* der Firma *Dlubal* übernommen.

3.1.1 Statisch nachgewiesene Verbindungsvarianten der kleinen Halle

Die *kleine Halle* des Modulbausystems Grub steht in zwei Ausführungen zur Verfügung. Es gibt einen «2-Reiher» (siehe Abbildung 13), bei dem für einen vollwertigen Stall zwei Reihen des Systems nebeneinander angeordnet werden, und einen «1-Reiher» (siehe Abbildung 14), der dank einer Mittelstütze eine ausreichende Spannweite aufweist, um eigenständig zu funktionieren. Für die *kleine Halle* wurden in Abbildung 13 markierten Knotenpunkte am 1-Reiher und 2-Reiher betrachtet.

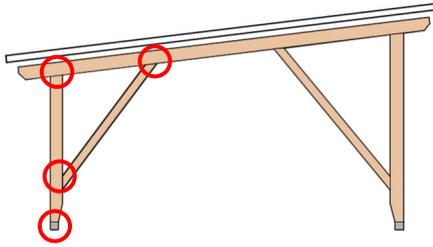


Abbildung 13: Schnitt Modulbausystem Grub «2-Reiher» mit Markierung der Punkte Stützenfuß, Verbindung Strebe zu Stütze und Strebe zu Riegel und Stützenkopf

Tabelle 8 fasst die nachgewiesenen Varianten zusammen. Diese Übersicht ermöglicht eine schnelle Auswahl und ist ein Ansatz, um projektspezifische Variantenuntersuchungen anzustellen.

Tabelle 8: Verbindungsdetails in der kleinen Halle (2-Reiher) mit Dachvariante 2

Knotenpunkt	Verbindungsvariante	Anmerkung
Stützenfuß	Querkraftsicherung mit Stahlwinkel und je 2x Hilti HST3-R	
	Stahlprofil außen mit 2x Stabdübel d = 20 mm	
	Stützenfuß mit Schlitzblech innen, dünn und 3x3 Stabdübeln d = 12 mm	
Anschluss Strebe-Stütze	Stirn-Versen-Versatz mit Lagesicherung	
	Knagge mit 2x Bolzen M20 und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 80 mm	
	Seitliche Laschen mit je 2x Bolzen M24	
Anschluss Strebe-Riegel	Stirn-Versen-Versatz mit Lagesicherung	
	Knagge mit 2x Bolzen M20 und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 80 mm	
	Seitliche Laschen mit je 2x Bolzen M24	
	Seitliche Laschen mit je 2x Bolzen M16 3.8 und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 65 mm	
	Doppelsparren mit 1x Bolzen M16 3.8 und Dübel besonderer Bauart C10 d = 65 mm	
Stützenkopf	Doppelsparren mit 2x Bolzen M12 3.8 und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 50 mm	
	Schlitzblech innenliegend mit 6x Bolzen M10 je Stab	kipppgefährdet
	Aufgelöste Stütze mit 2x Bolzen M16 3.8	

Die Verbindungsvariante Schlitzblech am Stützenkopf ist kipppgefährdet und erfordert daher zusätzliche Kippaussteifungen. Tendenziell sind durch die höheren Eigenlasten des Dachaufbaus bei Variante 3 die Ausnutzungsgrade an allen Knotenpunkten höher als bei Dachvariante 2. Trotzdem sind alle Verbindungsvarianten weiterhin umsetzbar (siehe Tabelle 9).

Tabelle 9: Verbindungsdetails in der kleinen Halle (2-Reiher) mit Dachvariante 3

Knotenpunkt	Verbindungsvariante	Anmerkung
Stützenfuß	Querkraftsicherung mit Stahlwinkel mit je 2x Hilti HST3-R und 4x Bolzen d = 12 mm	Aufgrund des schweren Dachs ist eine aufgelöste Stütze oder eine BSH-Stütze notwendig
	Stahlprofil außen mit 2x Stabdübel d=16 mm und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 65 mm	
	Stützenfuß mit Schlitzblech innen, dünn und 3x3 Stabdübeln d = 12 mm	
Anschluss Strebe-Stütze	Aufgelöste Stütze mit 2x Bolzen M16 3.8 und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 65 mm	
Anschluss Strebe-Riegel	Stirn-Versen-Versatz mit Lagesicherung	
	Knagge mit 2x Bolzen M20 und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 80 mm Seitliche Laschen mit je 2x Bolzen M24 3.8 und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 115 mm	
Stützenkopf	Aufgelöste Stütze mit 2x Bolzen M24 3.8	

Für die Variante 3 des Dachs (Gründach) und die Spannweite des «2-Reihers» ergibt sich am Knoten Strebe-Stütze ein Moment, welches durch herkömmliche KVH-Querschnitte nicht mehr aufgenommen werden kann. Wird ein Gründach gewünscht, ist also eine BSH-Stütze notwendig. Alternativ kann die Stütze aufgelöst werden.

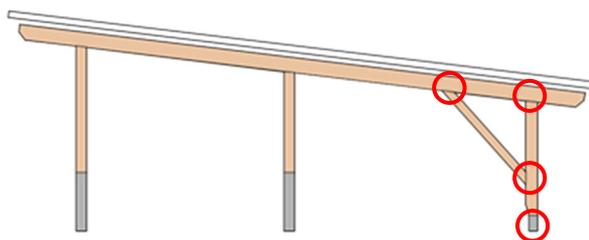


Abbildung 14: Schnitt Modulbausystem Grub «1-Reiher» mit Markierung der Punkte Stützenfuß, Verbindung Strebe zu Stütze und Strebe zu Riegel und Stützenkopf

Das Modulbausystem Grub des LfL umfasst neben dem 2-Reiher auch noch den 1-Reiher mit Futtertisch. Für diesen wurden analog die in Abbildung 14 dargestellten Knotenpunkte statisch nachgewiesen.

Tabelle 10: Nachgewiesene Verbindungsdetails in der kleinen Halle (1-Reiher mit Futtertisch) mit Dachvariante 2

Knotenpunkt	Verbindungsvariante	Anmerkungen
Stützenfuß	Querkraftsicherung mit Stahlwinkel mit je 2x Hilti HST3-R und 4x Bolzen d=12 mm	
	Stahlprofil außen mit 2x Bolzen M16 3.8 und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 65 mm	
	Stützenfuß mit Schlitzblech innen, dünn und 3x3 Stabdübeln d = 12 mm	
	Stirn-Versen-Versatz mit Lagesicherung	

Anschluss Strebe-Stütze	Knagge mit 2x Bolzen M20 3.8	
	Seitliche Laschen mit je 2x Bolzen M16	
Anschluss Strebe-Riegel	Stirn-Versen-Versatz mit Lagesicherung	
	Knagge mit 2x Bolzen M20 3.8	
Stützenkopf	Seitliche Laschen mit je 2x Bolzen M16	
	Doppelsparren mit 2x Bolzen M20 3.8 und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 80 mm	
	Schlitzblech innenliegend mit 3x4 Bolzen M12	kipppgefährdet
	Aufgelöste Stütze mit 2x Bolzen M20 3.8 und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 80 mm	

Auch hier ergibt sich bei Dachvariante 3 das kritische Moment durch die Krafteinleitung der Strebe in die Stütze und aufgelöste oder BSH-Stützen sind notwendig (Tabelle 11).

Tabelle 11: Nachgewiesene Verbindungsdetails in der kleinen Halle (1-Reiher mit Futtertisch) mit Dachvariante 3

Knotenpunkt	Verbindungsvariante	Anmerkungen
Stützenfuß	Querkraftsicherung mit Stahlwinkel mit je 2x Hilti HST3-R und 4x Bolzen M12	
	Blech außen, dünn mit 4x Bolzen M20 3.8 und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 80 mm	
	Stützenfuß mit Schlitzblech innen, dünn und 4x5 Stabdübeln d = 16 mm	
Anschluss Strebe-Stütze	Stirn-Versen-Versatz mit Lagesicherung	
	Knagge mit 2x Bolzen M20 3.8	
	Seitliche Laschen mit je 2x Bolzen M16	
	Aufgelöste Stütze mit 1x Stabdübel d = 20 mm	
Anschluss Strebe-Riegel	Stirn-Versen-Versatz mit Lagesicherung	
	Knagge mit 2x Bolzen M20 3.8	
	Seitliche Laschen mit je 2x Bolzen M16	
Stützenkopf	Doppelsparren mit 1x Stabdübel d = 20 mm	
	Doppelsparren mit 4x Bolzen M24 3.8 und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 95 mm	
	Aufgelöste Stütze mit 4x Bolzen M24 3.8 und Dübeln besonderer Bauart C10 d = 95 mm	

Auch beim 1-Reiher sind alle Verbindungsvarianten mit der schwereren Dachvariante 3 umsetzbar.

3.1.2 Statisch nachgewiesene Verbindungsvarianten der großen Halle

Neben den kleinen Hallen des Modulbausystems Grub wurde exemplarisch auch eine große Halle mit 25 m Spannweite betrachtet. Diese Spannweite stellt das obere Ende der in der Landwirtschaft üblichen Spannweiten dar und deckt somit in den statischen Anforderungen alle kleineren Hallen mit ab.

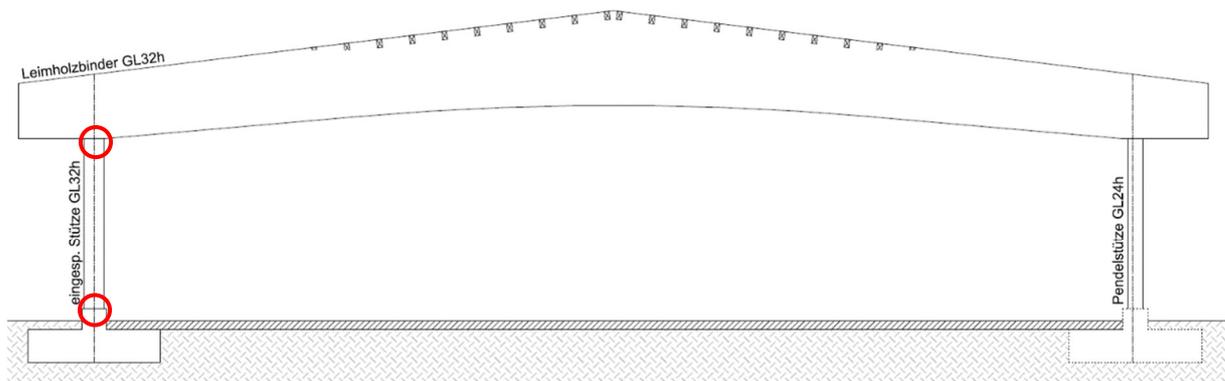


Abbildung 15: Schnitt Konstruktion mit Markierung der Punkte Stützenfußpunkt und Anschluss Stütze-Binder

Bei der großen Halle werden erneut ausschließlich die in Abbildung 15 markierten Knoten für die Dachvariante 2 berücksichtigt. Kleinere Verbindungen wie die der Lattung, Fassade oder Giebelwand werden nicht näher betrachtet.

Tabelle 12: Nachgewiesene Verbindungsdetails in der großen Halle mit Dachvariante 2

Knotenpunkt	Verbindungsvariante	Anmerkungen
Stützenfuß	Stützenfuß mit Schlitzblech innen, dünn und 3x5 Stabdübeln d = 24 mm	
	Zweigeteilte Stütze mit eingesetztem IPE 550 S355-Profil auf Stahl-Grundplatte mit 3x5 Stabdübeln d = 24 mm	
Stützenkopf	Seitliche Laschen mit 4 Bolzen M24 4.6	
	Zweigeteilte Stütze als Gabellager mit 2 Bolzen M24 4.6	

Darüber hinaus wurden auch weitere Varianten wie Nagelbleche am Stützenfuß und Schlitzbleche am Stützenkopf untersucht. Diese wurden jedoch aufgrund unwirtschaftlicher Verbindungsmittelanzen bzw. Kippgefährdung nicht in Tabelle 12 übernommen

3.2 Adaption

Zusätzlich zur Anwendbarkeit aus statischer Sicht war auch die Dauerhaftigkeit der Verbindungen zu untersuchen. Hier zeigten die Auswertung und die Bestandsaufnahmen, dass die Beanspruchung hauptsächlich von der Lage abhängt. Eine objektive Bewertung von unterschiedlichen Verbindungen ist ohne konkrete Versuche zur Dauerhaftigkeit nicht möglich. Die momentane Einstufung beruht auf Meinungen, Rückschlüssen und Erfahrungen der Autoren. Es hat nur geringe Auswirkungen für einen Knotenpunkt im Deckenbereich, ob dieser mittels beispielsweise Zarge oder Bolzenverbindung ausgeführt wird. Allgemeine Schutzmaßnahmen, wie beispielsweise ein Opferbrett, können unabhängig von den konkreten Verbindungen zu der gewünschten Dauerhaftigkeit führen.

Somit lassen sich durch einfache, allgemein einsetzbare Maßnahmen, die meisten besonderen Beanspruchungen abwehren. Diese sollen im Folgenden kurz erläutert werden. Grundsätzlich sind die entsprechenden besonderen baulichen Maßnahmen in DIN 68800-2:2022-02 umzusetzen.

3.3 Erhöhter Betonsockel

Holzstützen und andere aufgehende Bauteile sollten zur Minimierung der Feuchtebelastung durch Spritzwasser auf einen erhöhten Betonsockel gestellt werden. Für einen wirksamen Spritzwasserschutz muss die Höhe des Sockels mindestens 30 cm über den umgebenden Oberflächen sein. Um zudem aus dem Untergrund aufsteigende Feuchte zurückzuhalten, muss zwischen Sockel und Stütze bzw. Bauteil eine Abdichtung eingebaut werden (siehe Abbildung 16).

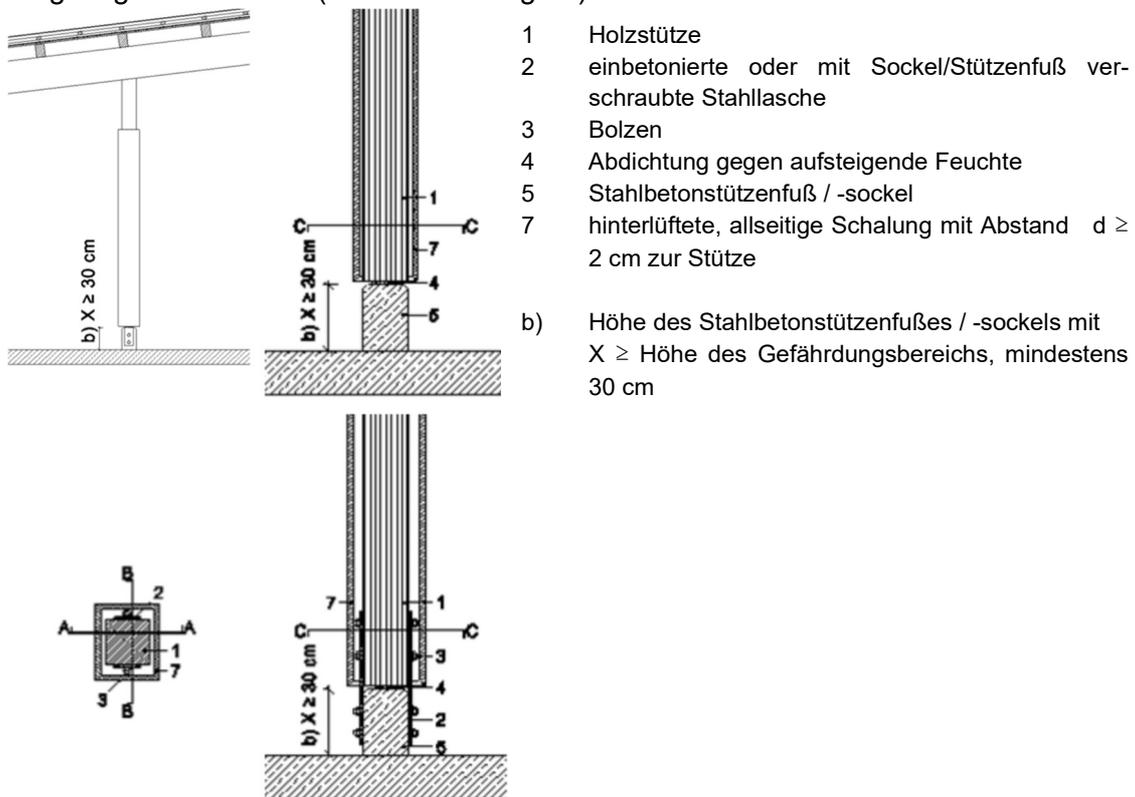


Abbildung 16: Beispieldetail des Stützenfußes auf erhöhtem Betonsockel mit allseitiger Einschalung (nach Jiang et al. (2018))

3.4 Allseitige Einschalung

Eine weitere, sehr wirkungsvolle Maßnahme sind allseitige Einschaltungen (Abbildung 16). Diese können gegen mechanische, chemische und biologisch-physikalische Angriffe schützen. Hierbei ist ein Luftspalt von mindestens 2 cm einzuplanen, um eine ausreichende Hinterlüftung zu gewährleisten. Wird diese Regel nicht eingehalten, kann der Spalt zur Feuchtefalle werden und die Verbreitung von Insekten und holzerstörenden

Pilzen begünstigen. Durch die Einwirkung der Angriffe auf den kleineren Querschnitt der Einschalung ist mit einer kürzeren Lebensdauer zu rechnen. Die Befestigung sollte daher in einer Art erfolgen, die eine leichte Austauschbarkeit der Schalungsbretter gewährleistet.

3.5 Adäquate Belüftung

Eine Beanspruchung, vor der Einschaltungen (siehe oben) nicht schützen, ist eine dauerhaft erhöhte Luftfeuchte. Hier ist eine adäquate Belüftung die wirksamste und kostengünstigste Maßnahme. Sie trägt gleichzeitig zum Korrosionsschutz bei (Belie et al. 2000b). Je nach Nutzung und Bauweise kann hier eine natürliche Belüftung ausreichen oder eine zusätzliche mechanische Belüftung notwendig sein. Es ist darauf zu achten, dass durch die Luftbewegung nicht dauerhaft ein Luftstrom mit hoher Luftfeuchte an tragende Bauteile herangetragen wird. Dies kann in ungünstigen Fällen zu einer lokal erhöhten Belastung führen (Jiang et al. 2018).

4 AUSFÜHRUNG

Schon Rittel (1979) betrachtete die wirtschaftlichsten Nagelbinder-Konstruktionen auf Basis von Holz-, Nagel- und Betonbedarf und Lohnkosten. Auch damals wurde schon die Schwierigkeit der Kalkulation bei fluktuierenden Lohnkosten bemängelt. Dieselbe Problematik stellt sich heute, gut 40 Jahre später, in Bezug auf die Holz- und Stahlpreise. Eine langfristig gültige Bewertung der Wirtschaftlichkeit ist daher schwierig. Daher soll im Folgenden das Eigenleistungspotenzial anhand technischer Gesichtspunkte untersucht werden.

Grundsätzlich ist bei größeren Spannweiten weniger Eigenleistung bei der Erstellung des Tragwerks möglich als bei kleinen, da vermehrt auf BSH-Binder zurückgegriffen werden muss (siehe Teil A) und hierfür größere Maschinen notwendig sind. Die BSH-Binder können selbst für kleine Holzbaubetriebe zum Problem werden, wenn die nötige Expertise oder die Hebezeuge nicht vorhanden sind. Der Einsatz von eigenem Holz der Landwirte für die Produktion von BSH-Elementen ist aufgrund der Kosten für den Transport zum nächsten BSH-Werk und zurück in der Regel nicht wirtschaftlich. Zudem steht die Dauer für die vor der Verarbeitung nötige Trocknung einer zügigen Projektabwicklung entgegen.

Eine Möglichkeit, dennoch Holz aus dem eigenen Wald für das Tragwerk großer Hallen zu verwenden, ist der Tausch des Holzes. Eigenes Holz wird vom Landwirt an ein Sägebeziehungsweise BSH-Werk geliefert und der Wert auf die Kosten für die an den Landwirt gelieferten und verbauten Elemente angerechnet.

Dem reduzierten Eigenleistungs-Potenzial beim Tragwerk großer Hallen steht ein vergrößertes Potenzial bei der Aussteifung gegenüber. Die mit zunehmender Länge häufiger zur Anwendung kommenden Holzverbände eignen sich eher zur Erbringung von Eigenleistung als andere Varianten. Hierbei kann zudem vermehrt eigenes Holz eingesetzt werden. Auch bei den Fassaden ist das Eigenleistungs-Potenzial hoch.

In den Abbildungen Abbildung 17 bis Abbildung 19 sind die wesentlichen Arbeitsschritte und dafür notwendigen Arbeitsmittel für die untersuchten Hallen- und Dachvarianten zusammengefasst. Hierbei gibt es Arbeitsschritte, welche bei allen Varianten vom Landwirt selbst ausgeführt werden können, beispielsweise das Freimachen des Baugrunds. Weitere Arbeiten können je nach Geschick nach Einweisung oder in Zusammenarbeit mit Fachleuten durchgeführt werden. Dazu zählen u.a. Verschrauben und Arbeiten an Schalung und Dämmung. Die Abstimmung sollte hier auf den Einzelfall bezogen im Vorfeld stattfinden. Arbeiten, welche die Standsicherheit und Verkehrssicherheit beeinflussen können, oder anderweitig erweiterte Kenntnisse und Erfahrung voraussetzen, müssen jedoch zwingend von entsprechend ausgebildeten Fachleuten durchgeführt werden. In Abhängigkeit der Komplexität des Kenntnisstands ist der Umfang der Eigenleistung individuell festzulegen. Rechtliche Rahmenbedingungen sind zu beachten. Die Auswirkungen auf die Haftung und Gewährleistung der Ausführenden sind vor Beginn der Arbeiten zu klären und vertraglich festzuhalten.

Eine Unterscheidung der adaptierten Tragkonstruktionen und Verbindungsdetails wurde aufgrund der in Abschnitt 3 erläuterten Einfachheit der Maßnahmen nicht vorgenommen. In Abbildung 17 sind die Arbeitsschritte und der Maschinenbedarf für die kleine Halle mit Dachvariante 2 dargestellt. Generell lässt sich sagen, dass Potenziale zur Erbringung von Eigenleistung sich vor allem in der frühen Bauphase und bei den Arbeiten an der Gebäudehülle bieten.

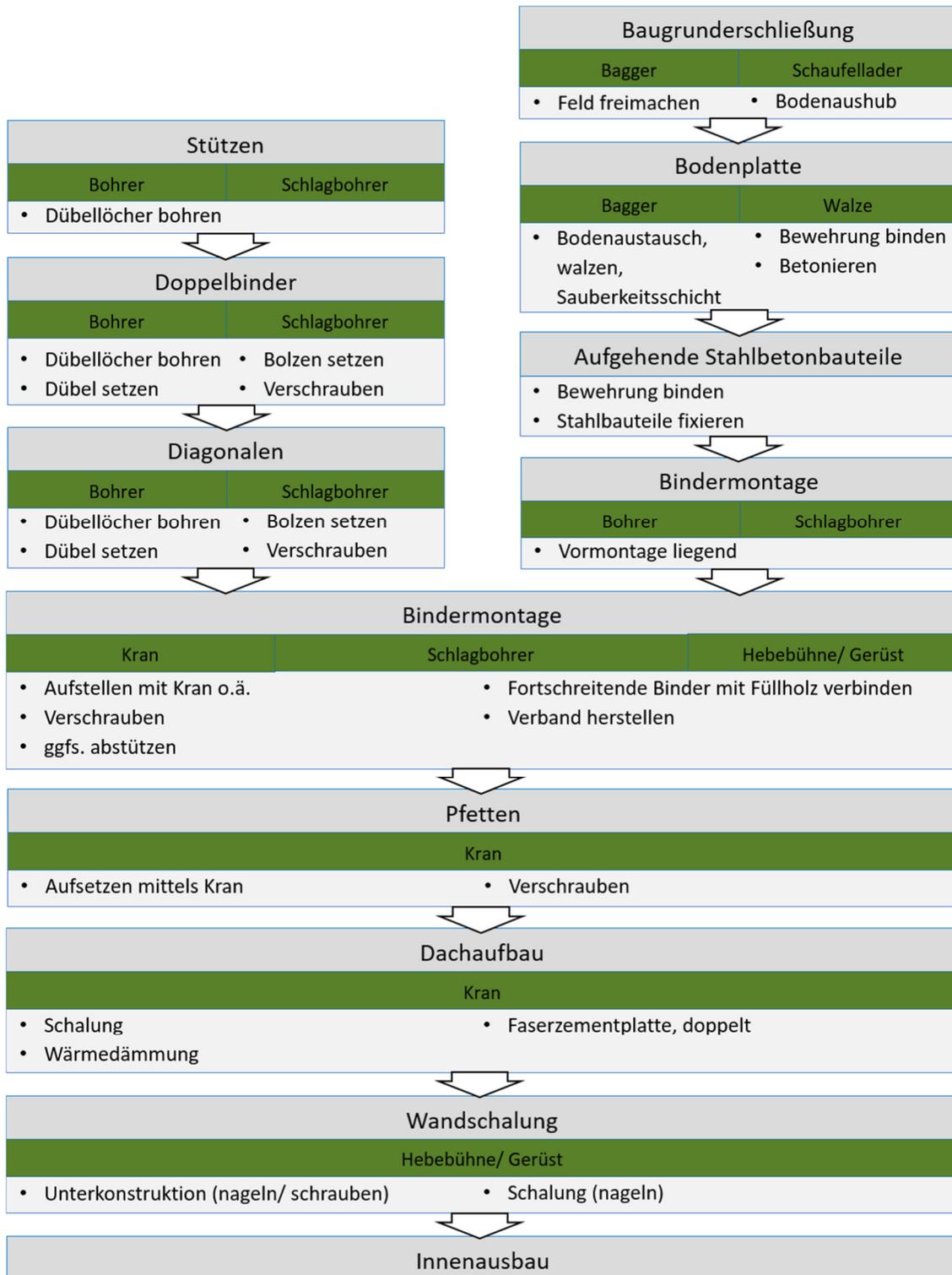


Abbildung 17: Arbeitsschritte und Maschinenbedarf der kleinen Halle mit Dachaufbau 2

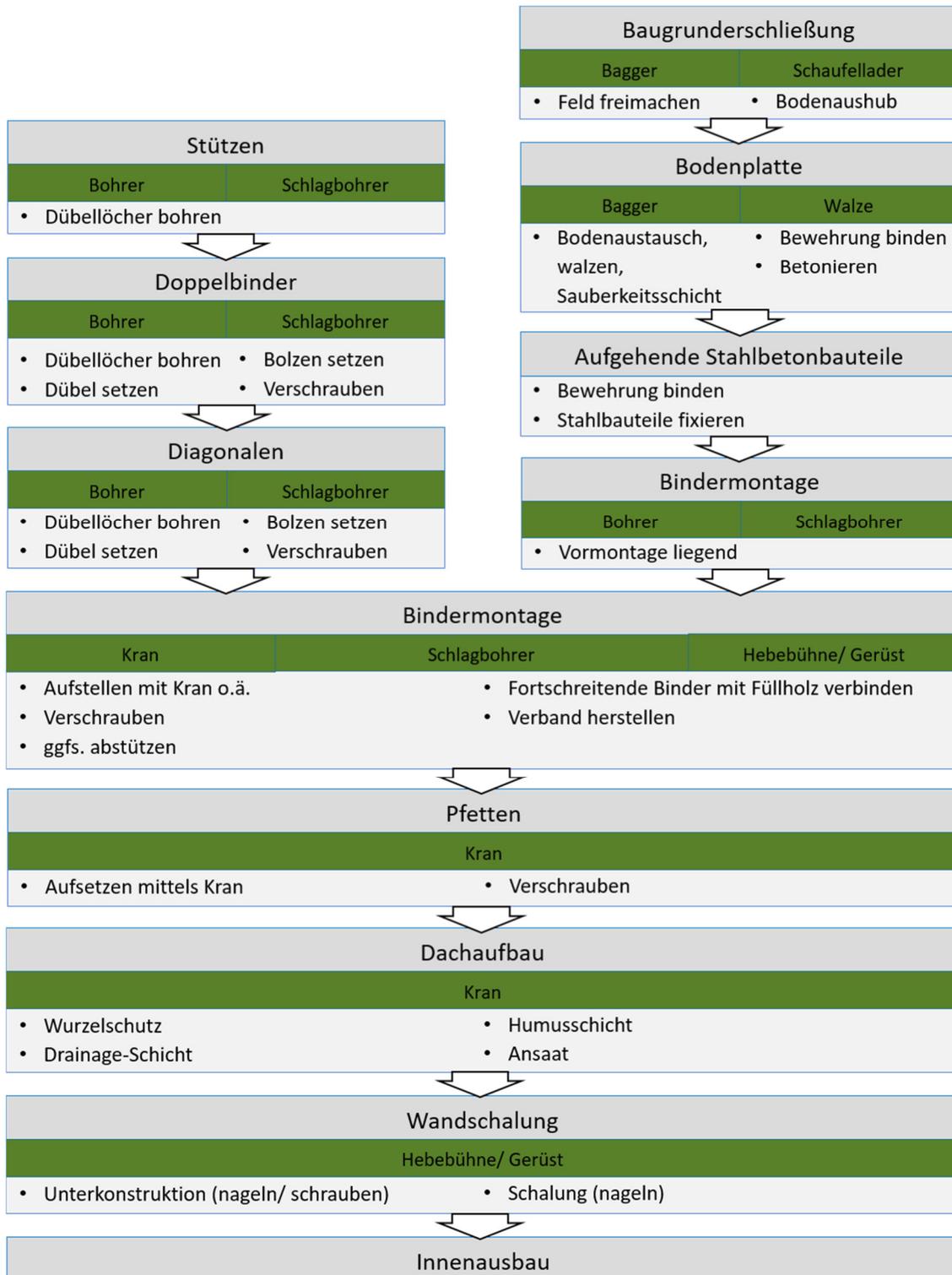


Abbildung 18: Arbeitsschritte und Maschinenbedarf der kleinen Halle mit Dachaufbau 3

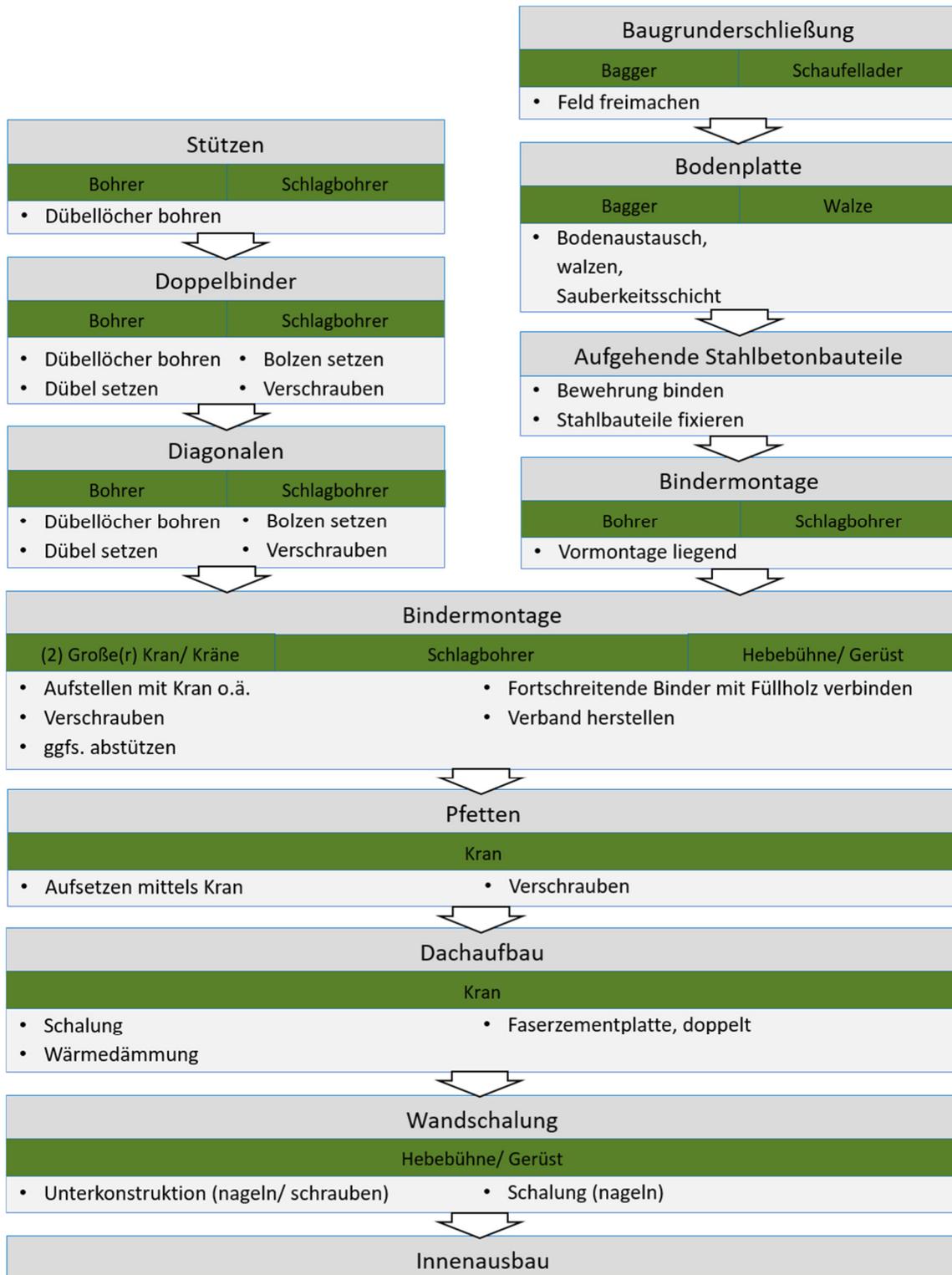


Abbildung 19: Arbeitsschritte und Maschinenbedarf der großen Halle mit Dachaufbau 2

5 RECYCLINGFÄHIGKEIT

Entspricht AP 7.2

6 PRAXISCHECK

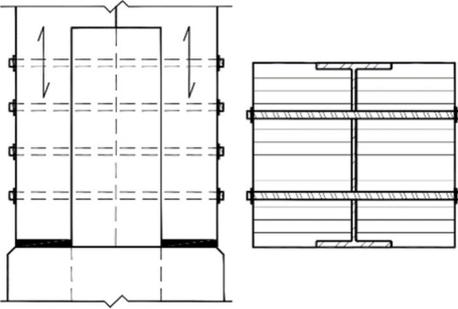
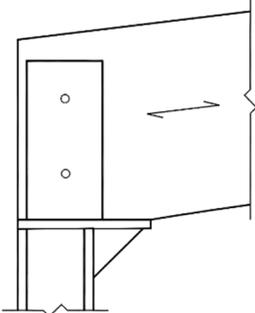
Der Praxischeck wurde durch den Projektpartner LfL organisiert und fand am 22.02.2023 bei einer Zimmerei in Oberbayern statt. Hier wurden dem Geschäftsführer die zuvor von der TUM rechnerisch nachgewiesenen Verbindungsvarianten vorgelegt und um eine Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit und Ausführbarkeit gebeten. In Tabelle 13 und Tabelle 14 werden für jeden untersuchten Knotenpunkt der kleinen (9 m Spannweite) und großen Halle (25 m Spannweite) die favorisierte Variante angegeben.

Tabelle 13: Favorisierte Verbindungsmittelvariante je Knotenpunkt in der «kleinen Halle»

Kleine Halle (Spannweite 9 m)	Favorit	Darstellung	Begründung	Anmerkung
Fußpunkt Stütze	Dünne Bleche außen		Einfache Bearbeitung der Stütze, einfache Montage	Alternativ eingeschlitztes Blech auf Grundplatte und einbetoniertem HEB-Profil
Anschluss Strebe-Stütze / Strebe-Binder	Versatz		Günstig, einfache Ausführung	Alternativ aufgelöste Strebe
Anschluss Stütze-Binder	Zweiteilige Stütze mit Gabel (Fußpunkt der Stütze mit Schlitzblech)		Effizienter Materialeinsatz, einfache Ausführung	Für kleine Betriebe ist alternativ ein aufgelöster Sparren einfacher zu realisieren

Entscheidend war hier vor allem die einfache Montage, untergeordnet auch die Material- und Arbeitskosten und die Ästhetik. Für eine verbesserte Aussagekraft sollten weitere Zimmereien, auch aus anderen Teilen Deutschlands befragt werden.

Tabelle 14: Favorisierte Verbindungsmittelvariante je Knotenpunkt in der «großen Halle»

Große Halle (Spannweite 25 m)	Favorit	Darstellung	Begründung	Anmerkung
Stützenfuß eingespannte Stütze	Eingeschlitztes Stahl-Profil		Tragfähiger als Schlitzblech	Eingespannte Stütze in Holz schwierig (Kosten-Nutzen für Stützenfuß); Stahl- oder StB-Stützen häufiger
Stützenkopf eingespannte Stütze	Laschen über ganze Stützhöhe mit Bolzen		Günstig, einfache Ausführung	

Musterkalkulationen zu diesen und weiteren Verbindungsvarianten finden sich in Teil A. Diese Favoriten stellen unter den wirtschaftlichen und statisch nachgewiesenen Verbindungen nach jetzigem Stand und für die untersuchten Spannweiten und Dachvarianten die

7 MUSTERDETAILS

Teil des AP 9

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Konstruktionsarten der untersuchten Hallen	5
Abbildung 2: Nutzung der untersuchten Hallen	6
Abbildung 3: Konstruktionsarten der Queraussteifung	7
Abbildung 4: Dachformen der untersuchten Hallen	7
Abbildung 5: Verbindungsmittel des Haupttragwerks	8
Abbildung 6: Einflussfaktoren Dauerhaftigkeit nach ISO 15686-1:2011-05	13
Abbildung 7: Themenkarte zum mechanischen Angriff auf die tragenden Bauteile	16
Abbildung 8: Themenkarte zum chemischen Angriff auf die tragenden Bauteile	18
Abbildung 9: Themenkarte zum biologisch-physikalischen Angriff auf die tragenden Bauteile.....	20
Abbildung 10: Beispiellageplan des mechanischen Angriffs in einem Milchviehstall (nach Simon et al. (2019))	21
Abbildung 11: Beispiellageplan des chemischen Angriffs in einem Milchviehstall (nach Simon et al. (2019))	22
Abbildung 12: Übersicht Bottom-Up-Ansatz	24
Abbildung 13: Schnitt Modulbausystem Grub «2-Reiher» mit Markierung der Punkte Stützenfuß, Verbindung Strebe zu Stütze und Strebe zu Riegel und Stützenkopf.....	26
Abbildung 14: Schnitt Modulbausystem Grub «1-Reiher» mit Markierung der Punkte Stützenfuß, Verbindung Strebe zu Stütze und Strebe zu Riegel und Stützenkopf.....	27
Abbildung 15: Schnitt Konstruktion mit Markierung der Punkte Stützenfußpunkt und Anschluss Stütze-Binder.....	29
Abbildung 16: Beispieldetail des Stützenfußes auf erhöhtem Betonsockel mit allseitiger Einschalung (nach Jiang et al. (2018)).....	30
Abbildung 17: Arbeitsschritte und Maschinenbedarf der kleinen Halle mit Dachaufbau 2	33
Abbildung 18: Arbeitsschritte und Maschinenbedarf der kleinen Halle mit Dachaufbau 3	34
Abbildung 19: Arbeitsschritte und Maschinenbedarf der großen Halle mit Dachaufbau 2	35

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Katalog der vorhandenen Verbindungen und deren Häufigkeit bei den betrachteten Gebäuden	8
Tabelle 2: Konstruktionsarten, Lichtraum und Verbindungsmittel je nach Nutzung	9
Tabelle 3: Weitere mögliche Verbindungsvarianten	9
Tabelle 4: Übersicht der Bewertungskriterien und ihrer Kategorien.....	11
Tabelle 5: Höhenlage und Kennwerte zu Schnee- und Windlast der untersuchten Hallen	14
Tabelle 6: Dachaufbauten aus AP 8 und entsprechende ständige Lasten aus Eigengewicht	14
Tabelle 7: Beispielmatrix des ersten Lösungsansatzes	23
Tabelle 8: Verbindungsdetails in der kleinen Halle (2-Reiher) mit Dachvariante 2.....	26
Tabelle 9: Verbindungsdetails in der kleinen Halle (2-Reiher) mit Dachvariante 3.....	27
Tabelle 10: Nachgewiesene Verbindungsdetails in der kleinen Halle (1-Reiher mit Futtertisch) mit Dachvariante 2	27
Tabelle 11: Nachgewiesene Verbindungsdetails in der kleinen Halle (1-Reiher mit Futtertisch) mit Dachvariante 3	28
Tabelle 12: Nachgewiesene Verbindungsdetails in der großen Halle mit Dachvariante 2	29
Tabelle 13: Favorisierte Verbindungsmittelvariante je Knotenpunkt in der «kleinen Halle»	36
Tabelle 14: Favorisierte Verbindungsmittelvariante je Knotenpunkt in der «großen Halle»	37

QUELLENVERZEICHNIS

- Arbeitsgemeinschaft Holz e.V. (1989) Dauerhafte Holzbauten bei chemisch-aggressiver Beanspruchung. Düngemittelhallen, Kläranlagen, Gerbereien. Informationsdienst Holz, 8, 1989. Arbeitsgemeinschaft Holz, Düsseldorf
- Belie N de, Richardson M, Braam CR, Svennerstedt B, Lenehan JJ, Sonck B (2000a) Durability of Building Materials and Components in the Agricultural Environment: Part I, The agricultural environment and timber structures. Journal of Agricultural Engineering Research 75(3):225–241. doi: 10.1006/jaer.1999.0505
- Belie N de, Sonck B, Braam CR, Lenehan JJ, Svennerstedt B, Richardson M (2000b) Durability of Building Materials and Components in the Agricultural Environment, Part II: Metal Structures. Journal of Agricultural Engineering Research 75(4):333–347. doi: 10.1006/jaer.1999.0521
- ISO 15686-1:2011-05 Buildings and constructed assets - Service life planning - Part 1: General principles and framework. International Organization for Standardization. <https://www.beuth.de/de/norm/iso-15686-1/142641916>. Accessed 21 Sep 2023
- DIN EN 1995-1-1:2010-12 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- Herzog, Natterer, Schweitzer, Volz, Winter (2003) Holzbau Atlas, 4. Auflage. Birkhäuser, Basel, Boston, Berlin
- DIN 68800-2:2022-02 Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- Jiang Y, Dietsch P, Oberhardt F, Simon J (2018) Landwirtschaftliche Nutzgebäude in Holzbauweise ohne vorbeugenden chemischen Holzschutz (Gebrauchsklasse 0 (GK 0)) - Besondere bauliche Maßnahmen in Anlehnung an DIN 68800. Schlussbericht, München
- Rittel L (1979) Vergleichende Untersuchungen an ausgewählten, selbsthilfefreundlichen Holztragwerken zur Kapitaleinsparung beim Bau landwirtschaftlicher Betriebsgebäude. Dissertation, Technische Universität München
- Rug W, Lißner A (2011) Untersuchungen zur Festigkeit und Tragfähigkeit von Holz unter dem Einfluss chemisch-aggressiver Medien. Bautechnik 88(3):177–188. doi: 10.1002/bate.201110018
- Simon J, Blenk M, Goblirsch G, Huene A von, Schulze A, Dietl H, Helm S, Lubenau C, Richter K, Geischer S (2013) Landwirtschaft Bauen in regionalen Kreisläufen. INTERREG IV Bayern-Österreich - Landwirtschaftliche Nutzgebäude in Holzbauweise, Freising
- Simon J, Dietsch P, Winter Stefan (2019) Landwirtschaftliches Bauen mit Holz. Leitfaden für Beispielkonstruktionen in Gebrauchsklasse 0 nach DIN 68800-2, Freising

Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen Bauen mit Holz - von der Planung bis zum Rückbau (ZukunftLaWiBau)

**Schlussbericht über o.g. Forschungsvorhaben
gefördert unter dem Kennzeichen: 2220HV036
im Rahmen „Landwirtschaftliches Bauen mit Holz“ des Förderprogramms „Nachwach-
sende Rohstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)**

TEIL C: Design for Reuse

Technische Universität München (TUM)
School of Engineering and Design
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Projektbearbeitung:

Stephan Ott (TUM)
Zsafia Varga (TUM)
Alex Fröhlich (TUM)
Max Hartmann (TUM)
Antonia Birkholz (TUM)
Leo Betz (TUM)

INHALTSVERZEICHNIS

Begriffe und Definitionen	3
Abkürzungsverzeichnis.....	5
Kurzfassung.....	6
Arbeitspaket 7: design for reuse	7
1 Arbeitspaket 7.1: Untersuchung der Verbindungsweisen und Erfassung der Montage- und Demontageeigenschaften.....	7
1.1 Gleichwertige stoffliche Verwertbarkeit	10
1.2 Rückbaubarkeit	11
1.2.1 Beispiel Rückbaubarkeit	13
2 Arbeitspaket 7.4: Stoffliche Kennwerte für Kaskadennutzung.....	14
3 Arbeitspaket 7.2 und 7.3: Untersuchung der Verbindungsmittelalternativen zur Optimierung der Rückbaubarkeit der Bauteile.....	19
3.1 Bewertung der «kleinen» Halle	19
3.2 Bewertung der «kleinen» Halle	19
3.3 Fazit	21
4 Arbeitspaket 7.5 : Wirtschaftlichkeit	21
Abbildungsverzeichnis.....	24
Tabellenverzeichnis.....	26
Quellenverzeichnis	27
Anhang A.....	28
Anhang B.....	38

BEGRIFFE UND DEFINITIONEN

Definitionen - Abfallhierarchie:

Übergeordnetes Ziel war das Material Holz möglichst lange im Kreislauf zu halten (Kaskadennutzung) und somit eine Wiederverwendung (Tabelle 1) anzustreben. Je niedriger die Stufe dieser «Abfallampel» war, desto minderwertiger wurde die Verwertung des Materials. Im schlechtesten Fall erfolgte eine Deponierung/thermische Verwertung. Dies sollte vermieden werden. Ziel war es, das Material möglichst lange im Kreislauf zu halten und einen grünen Wert der «Abfallampel» zu erreichen. Im Folgenden sollen die Begrifflichkeiten, die im Leitfaden ebenso definiert sind, wiedergegeben werden:

Tabelle 1: Zuordnung Begrifflichkeiten Recyclingpotential -Abfallampel

1	Wiederverwendung	MRU
2	gleichwertige stoffliche Verwertung	MSM
3	minderwertige stoffliche Verwertung	MMR
4	endgültige Verwertung (stofflich)	MMRf
5	endgültige Verwertung (energetisch)	MERf
6	Deponierung / therm. Beseitigung	MWD

Definitionen «Abfallampel»:

Nach der Richtlinie 2008/98/ EG war **Wiederverwendung** (Material for Reuse - MRU) so definiert, dass Erzeugnisse oder ihre Bestandteile wieder für den ursprünglichen Zweck eingesetzt werden konnten. (Europäisches Parlament und Rat 19.11.2008, S. 5) Der ursprüngliche Zweck wäre im vorliegenden Fall der Einsatz als gleichwertige landwirtschaftliche Halle gewesen. Da die Holzstützen nach dem Rückbau der Konstruktion nicht an einem anderen Standort, ohne eine weitere Bearbeitung wieder aufgestellt werden konnten, ist davon auszugehen, dass eine Wiederverwendung nicht stattfand. Die Holzbauteile konnten demnach, als nächste Stufe des Recyclings, genutzt werden. Eine Verwertung konnte, wenn sie nicht **endgültig** war, **gleichwertig weiterverwertet** (Material for Secondary Material Use - MSM) oder **minderwertig stofflich** (Material for Material Recovery - MMR) sein. Unter einer gleichwertigen stofflichen Verwertung verstand man in Anlehnung an §3(23a) KrWG die Weiterverwertung der Holzstütze in Form von beispielsweise einer gekürzten Stütze. Eine minderwertige stoffliche Verwertung wäre in Anlehnung an VDI 2243 (VDI 2243) eine Weiterverarbeitung der Holzstütze zu einem Produkt, beispielsweise einer Spanplatte gewesen. Somit hätte das Produkt nach einer Verwertung der Stütze minderwertiges Holz enthalten. Als nächsten Schritt des Downcyclings hätten die Holzbauteile **endgültig stofflich verwertet** (Material for final/one-time Material Recovery - MMRf) werden können, z.B. in Form von Sägespänen oder endgültig **energetisch verwertet** (Material for final/one-time Energy Recovery - MERf) werden können, wenn die thermische Energie bei der Verbrennung des Materials als Heizenergie genutzt worden wäre. Im schlechtesten Fall hätte das Material deponiert

(Material for Waste and Disposal – MWD) werden können. Nach der Richtlinie 2008/98/EG war Wiederverwendung (Material for Reuse - MRU) so definiert, dass Erzeugnisse oder ihre Bestandteile wieder für den ursprünglichen Zweck eingesetzt werden konnten. (Europäisches Parlament und Rat 19.11.2008, S. 5) Der ursprüngliche Zweck wäre im vorliegenden Fall der Einsatz als gleichwertige landwirtschaftliche Halle gewesen. Da die Holzstützen nach dem Rückbau der Konstruktion nicht an einem anderen Standort, ohne eine weitere Bearbeitung wieder aufgestellt werden konnten, ist davon auszugehen, dass eine Wiederverwendung nicht stattfand. Die Holzbauteile konnten demnach, als nächste Stufe des Recyclings, genutzt werden. Eine Verwertung konnte, wenn sie nicht endgültig war, gleichwertig weiterverwertet (Material for Secondary Material Use - MSM) oder minderwertig stofflich (Material for Material Recovery - MMR) sein. Unter einer gleichwertigen stofflichen Verwertung verstand man in Anlehnung an §3(23a) KrWG die Weiterverwertung der Holzstütze in Form von beispielsweise einer gekürzten Stütze. Eine minderwertige stoffliche Verwertung wäre in Anlehnung an VDI 2243 (VDI 2243) eine Weiterverarbeitung der Holzstütze zu einem Produkt, beispielsweise einer Spanplatte gewesen. Somit hätte das Produkt nach einer Verwertung der Stütze minderwertiges Holz enthalten. Als nächsten Schritt des Downcyclings hätten die Holzbauteile endgültig stofflich verwertet (Material for final/one-time Material Recovery - MMRf) werden können, z.B. in Form von Sägespänen oder endgültig energetisch verwertet (Material for final/one-time Energy Recovery - MERf) werden können, wenn die thermische Energie bei der Verbrennung des Materials als Heizenergie genutzt worden wäre. Im schlechtesten Fall hätte das Material deponiert (Material for Waste and Disposal – MWD) werden können.

Kaskadennutzung:

Als Kaskadennutzung wurde die möglichst lange Nutzung des Materials Holz bezeichnet, bevor es der endgültigen thermischen Verwertung zugeführt wird. Demnach sollte das Material Holz möglichst lange im Stoffkreislauf gehalten werden, wenn beispielsweise das Konstruktionsvollholz nach seiner Lebensdauer zunächst zu Brettsperholz, anschließend zur Spanplatte verarbeitet wurde, bevor es endgültig verbrannt und somit endgültig der energetischen Verwertung zugeführt wurde.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

B	Bolzen
DBB	Dübel besonderer Bauart
DT	Detailpunkte
E	Erkennbarkeit
FD	Firstdiagonale
FS	Firststütze
FT	Futtertrog
Hs	Holzschraube
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
L	Lösbarkeit
Ls	Lasche
Abk.	Abkürzung
Abk.	Abkürzung
Ls	Lasche
MRU	Material for Reuse
MSM	Material for Secondary Material Use
MMR	Material for Material Recovery
MMRf	Material for final/one-time Material Recovery
MERf	Material for final/one-time Energy Recovery
MWD	Material for Waste and Disposal
MS	Mittelstütze
SB	Schlitzblech
SD	Stabdübel
T	Träger
TD	Traufdiagonale
TS	Traufstütze
U	U-Profil
V	Versatz
VB	Verbindungsmittel
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

KURZFASSUNG

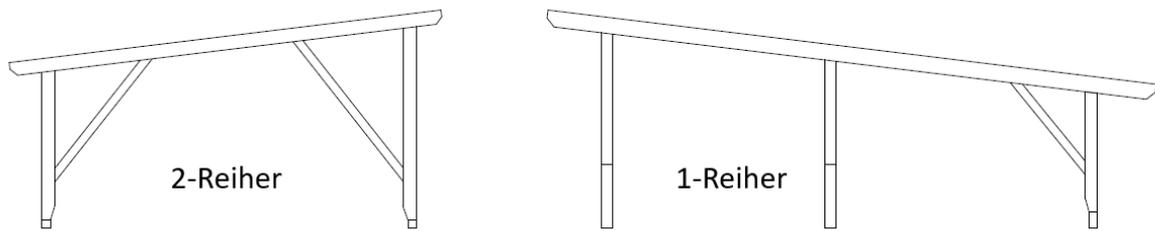


Abbildung 1: „kleine“ Halle, Modulbausystem Grub-Weihestephan (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Landtechnik und Tierhaltung, (Arbeitsgruppe Landwirtschaftliches Bauwesen, Dipl.-Ing. Architekt Jochen Simon).)



Abbildung 2: „große“ Halle, (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Landtechnik und Tierhaltung, (Arbeitsgruppe Landwirtschaftliches Bauwesen, Dipl.-Ing. Architekt Jochen Simon).)

Ziel des Arbeitspaketes 7 war die Untersuchung und anschließende Erhöhung des Recyclingpotential von zwei landwirtschaftlichen Hallen mit unterschiedlichen Spannweiten. Die «kleine» Halle bestand aus Konstruktionsvollholz und metallischen Verbindungsmitteln, die «große» Halle aus Brettschichtholz/ Konstruktionsvollholz sowie metallischen Verbindungsmitteln. Im Folgenden als «kleine» Abbildung 1 und «große» Abbildung 2 Halle bezeichnet. Es sollte Landwirten die Möglichkeit gegeben werden, nach Rückbau ihrer Hallen, das Material Holz möglichst hochwertig weiter zu nutzen. Für den Best Practice Nachweis und die Abbildung der Stand der Technik, wurden im Großraum München, verschiedene landwirtschaftliche Hallen mit ähnlichen Spannweiten der «großen» und «kleinen» Halle begangen. Hierbei wurden die Maße der Hallen, des Tragwerks sowie der Verbindungsmittel aufgenommen und dokumentiert. Die Ergebnisse sind in die Best Practice Methodenentwicklung für das Bewertungssystem des Stabtragwerks aus Holz eingeflossen.

ARBEITSPAKET 7: DESIGN FOR REUSE

1 ARBEITSPAKET 7.1: UNTERSUCHUNG DER VERBINDUNGSWEISEN UND ERFASSUNG DER MONTAGE- UND DEMONTAGEEIGENSCHAFTEN

Zsafia Varga,
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion,
Technische Universität München

Für eine erste Analyse der Verbindungsweisen wurden die «kleine» Halle sowie die «große» Halle mittels des Recyclingtools des Lehrstuhls hinsichtlich ihres Ressourcennutzungspotentials untersucht. Wie bei der Definition der Abfallampel (Tabelle 1) bereits beschrieben, war es das Ziel, bei der Abfallampel einen möglichst grünen Wert zu erreichen und somit ein möglichst hochwertige Weiternutzung des Bauteils zu ermöglichen. Das Recyclingtool wurde im Rahmen des Forschungsprojektes Ressourcennutzung Gebäude - Entwicklung eines Nachweisverfahrens zur Bewertung der nachhaltigen Nutzung natürlicher Ressourcen in Bauwerken (Ebert et al. 2020) entwickelt. Das Tool zeigte auf Materialebene das Ressourcennutzungspotential der einzelnen Materialien an. Für die Analyse der Ressourcennutzung wurden Tragkonstruktion, Dach sowie Fundament berücksichtigt.

Es wurde zunächst eine Massenermittlung durchgeführt und die Stoffströme ermittelt. Diese sind für die «kleine» Halle Abbildung 3 und für die «große» Halle Abbildung 5 zu entnehmen. Das Ressourcennutzungspotential der einzelnen Baustoffe für die «kleine» Halle ist in Abbildung 4 und für die «große» Halle in Abbildung 6 dargestellt. Die Legende zu den einzelnen Komponenten ist Tabelle 1 zu entnehmen.

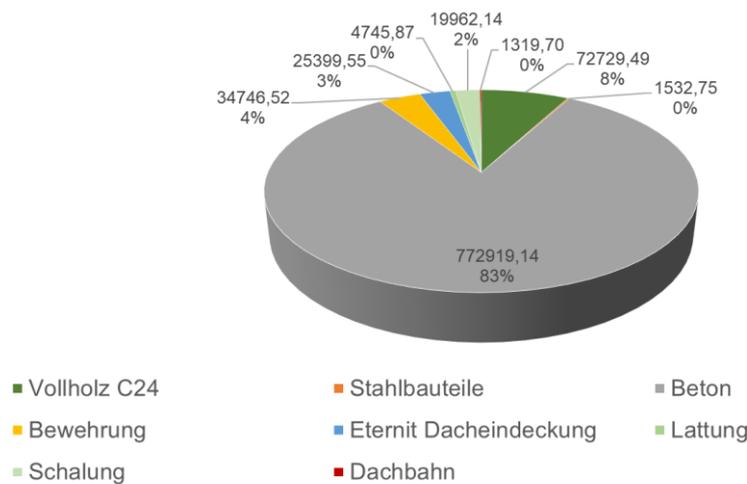


Abbildung 3: Stoffströme - kleine Modulbauhalle in kg

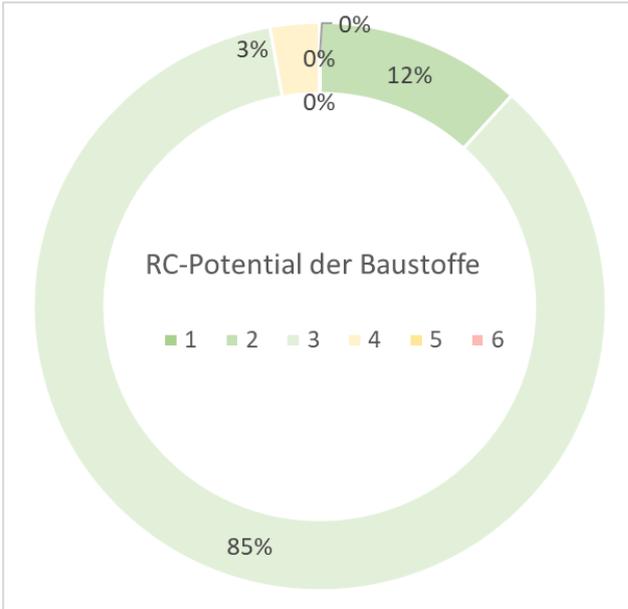


Abbildung 4: Ressourcennutzungspotential [%] der Baustoffe der «kleinen» Modulbauhalle

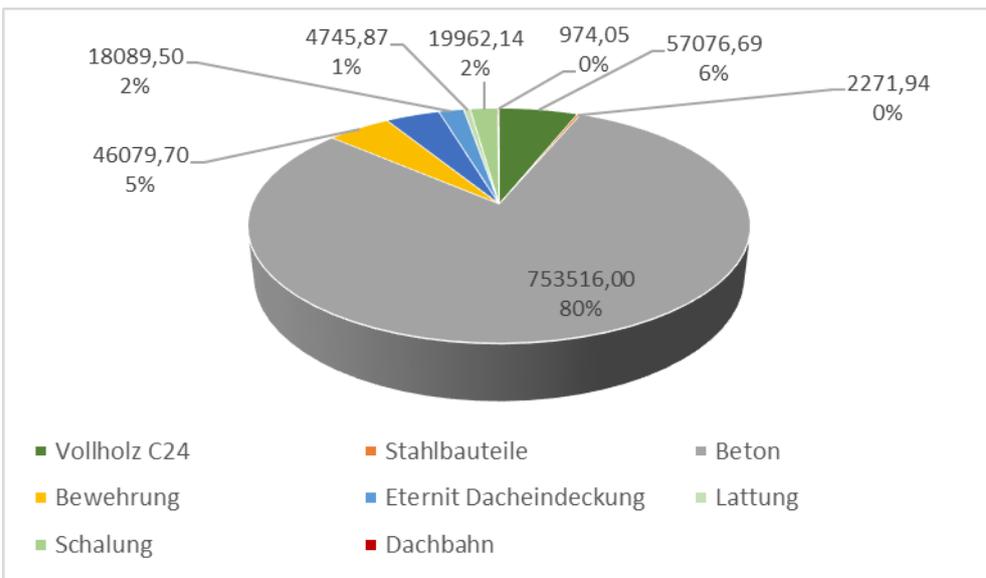


Abbildung 5: Stoffströme - große Halle in kg

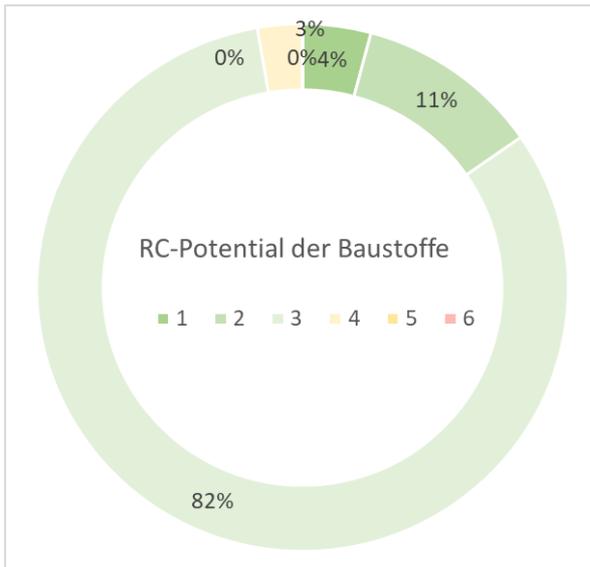


Abbildung 6: Ressourcennutzungspotential [%] der Baustoffe der «großen» Halle

Bei beiden Hallen machte der Beton, der für das Fundament verwendet wurde, mit über 80% den größten Massenanteil aus.

Für die weitere Untersuchung wurden das Dach, sowie das Fundament vernachlässigt; der Fokus lag auf der tragenden Konstruktion aus Holz. Das Tragwerk der kleinen Modulbauhalle wurde aus Vollholz konstruiert, die große Halle bestand aus einer Kombination aus Vollholzstützen sowie Bindern aus Brettschichtholz.

Um die Ressourcennutzung der Baustoffe zu erhalten, wurden die Stoffströme der Baustoffe mit der aktuellen deutschen Statistik der Verwendung der Recyclingbaustoffe (Kreislaufwirtschaft Bau 2018; Steger et al. 2018; Deilmann et al. 2017) verknüpft. Die Baustoffe beider Hallen hätten nach dem beschriebenen, aktuellen Stand der Abfallverordnung mit über 82% überwiegend minderwertig stofflich verwertet werden können. (Abbildung 4 und Abbildung 6).

Da das Ressourcennutzungstool des Lehrstuhls speziell für Flächenbauteile entwickelt wurde, dies jedoch zur Bewertung von Hallentragwerken, die hauptsächlich aus punktförmigen Bauteilen bestand, nur bedingt geeignet war, wurde eine neue Methodik für Stabtragwerke aufgestellt. Die Entwicklung dieser Methodik wurde in (Varga et al. 2023) beschrieben. Zur Bewertung des Recyclingpotentials mussten nach (Varga et al. 2023) sowohl die Rückbaubarkeit, als auch die Verwertbarkeit auf Grund der Fügung berücksichtigt werden. Rückbaubarkeit gliederte sich in Lösbarkeit, Zugänglichkeit und Erkennbarkeit der Verbindungsmittel bzw. Detailpunkte, Verwertbarkeit bezog sich darauf, in wie weit das nach dem Lösen der Verbindungsmittel übrig gebliebene Materialien nach der Abfallampel weiterverwertet werden konnten. Der Grund für die unabhängige Betrachtung ist der, dass die Rückbaubarkeit der Verbindungsmittel bewertet, die Verwertbarkeit, die Ressourcennutzung und somit sich nur die Materialebene betrachtet hat.

Dazu wurden die Detailpunkte des Stabtragwerks untersucht, da hier die Fügung zwischen den einzelnen Elementen stattfand. Auf Basis der Lösbarkeit der Fügung und der Rückbaubarkeit wurde dann das Recyclingpotential bestimmt.

Die Bewertung Recyclingfähigkeit der untersuchten Stabtragwerke in diesem Forschungsprojekt gliederte sich in **gleichwertige stoffliche Verwertbarkeit** des Holzes sowie in die **Rückbaubarkeit der Elemente**. Zunächst wurde die Methodik an der kleinen Modulhalle angewandt und erläutert. (Abbildung 1) Die untersuchten Detailpunkte des Haupttragwerks sind Abbildung 7 zu entnehmen.

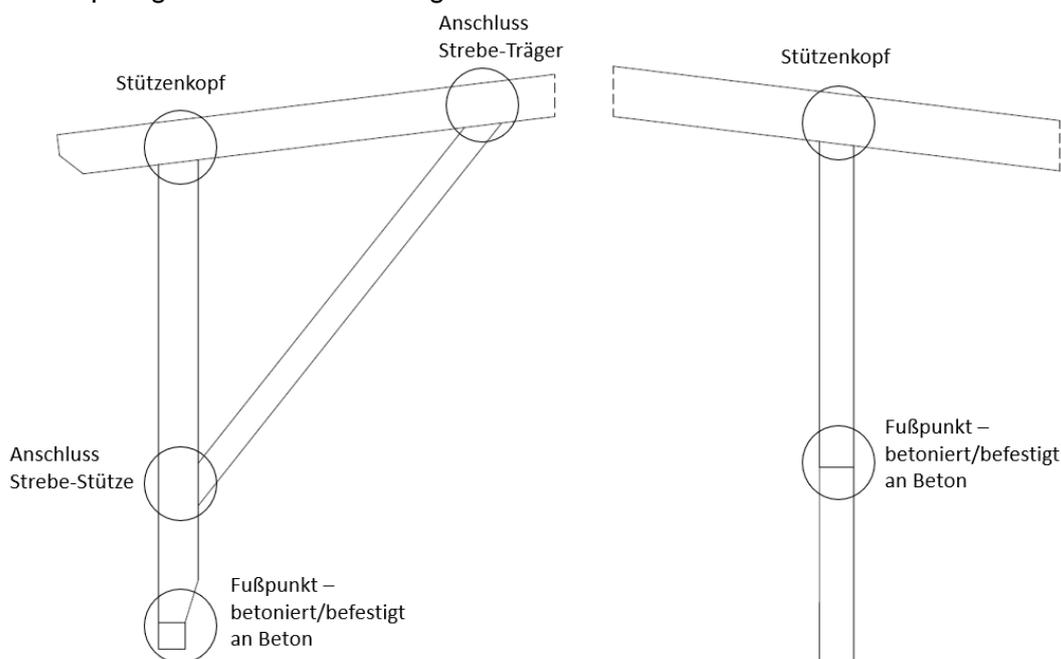


Abbildung 7: Untersuchten Detailpunkte des Haupttragwerks

1.1 Gleichwertige stoffliche Verwertbarkeit

Wie bereits beschrieben, würde nach der Abfallhierarchie die Wiederverwendung angestrebt werden. Ist dies nicht möglich, dann ist eine gleichwertige stoffliche Verwertung anzustreben.

Die **gleichwertige stoffliche Verwertbarkeit** wurde so definiert, dass das rezyklierbare Material eines Holzbalkens, welches im Einzugsbereich des Verbindungsmittels lag, qualitativ minderwertig sein konnte. Im schlechtesten Fall hätte dieser Teil mit einer Säge abgeschnitten werden müssen. Es war davon auszugehen, dass der Teil außerhalb des Einzugsbereichs des Verbindungsmittels unversehrt war und folglich nach Abschnitt des durch Verbindungsmittel möglicherweise geschwächten Bereichs, gleichwertig stofflich verwertet werden konnte. (Abbildung 8) Der geschwächte Bereich wurde durch den, in der zur statischen Bemessung einzuhaltenden, maximal notwendigen Randabstand zum Verbindungsmittel definiert. Der maximal notwendige Abstand bestimmte sich nach DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, p.45 ff. (Norm DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08); DIN EN 1995-

1, p.78ff (Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008; Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008). Das Material, welches „gleichwertig stofflich verwertet“ wurde, ist die „Restmasse“, die übrigblieb, wenn die vom Verbindungsmittel beeinflusste Masse vom Ursprungbauteile herausgesägt worden wäre. Ein hoher Anteil an gleichwertig stofflich verwertbaren Material hätte sich, aufgrund der nach der Abfallhierarchie anzustrebenden gleichwertigen stofflichen Verwertung, positiv auf die Bewertung des Recyclingpotentials ausgewirkt.

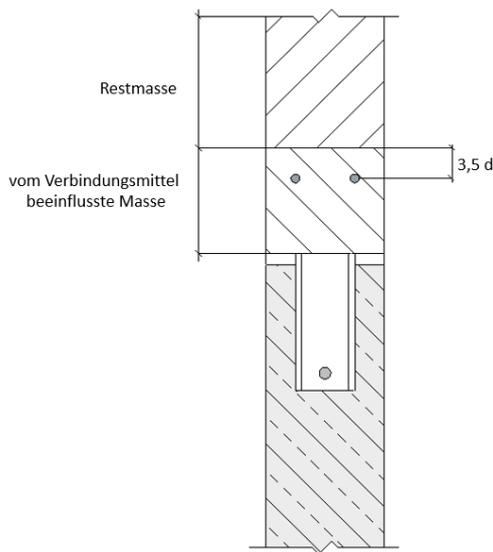


Abbildung 8: Detail Stützenfußpunkt an Stahlbetonstütze befestigt

1.2 Rückbaubarkeit

Neben der gleichwertigen stofflichen Verwertung erfolgte die Bewertung des Verbindungsmittels hinsichtlich der **Rückbaubarkeit**. Diese gliederte sich in **Lösbarkeit, Zugänglichkeit und Erkennbarkeit**. Tabelle 2 ist die Definition der Lösbarkeit der Verbindungsmittel zu entnehmen.

Tabelle 2:
Definition der Lösbarkeit nach DIN 8593-0 (Norm DIN 8593-0)

Definition der Lösbarkeit	Lösbarkeit	Bewertung
Ohne Schädigung	+	
Mit (ausreichend) geringer Schädigung	0	(3)
Mit Schädigung	-	(2)

Die Bewertung der Zugänglichkeit sowie Erkennbarkeit der Detailpunkte wurde vernachlässigt, da in einer Hallenkonstruktion alle Detailpunkte mit einer Leiter zugänglich und von außen erkennbar waren.

Die Zugänglichkeit der Verbindungsmittel (VB) wurde nach VDI 2243 bewertet (VDI 2243). (Tabelle 3)

Tabelle 3: Definition der Erreichbarkeit/ Zugänglichkeit der Verbindungsmittel (VB) nach VDI 2243, S. 15 (VDI 2243)

Verbindungsmittel (VB) Erreichbarkeit/ Zugänglichkeit		Zeichen	Verbindungsmittel	Bauteil
Direkt zugänglich	Keine Optimierung notwendig	VB +	Vollgewindeschraube	
Indirekt zugänglich	Eventuelle Demontage-tiefe verbessern	VB 0	Schlitzblech	wenn Lasche abnehmbar
Nicht zugänglich	Änderung auf axiale Zugänglichkeit prüfen	VB -	Schlitzblech verborgen, Dübel besonderer Bauart	komplett vom Bauteil verdeckt

Die dritte Bewertung wurde nach der Erkennbarkeit der Verbindungsmittel vorgenommen. Die Definition der Erkennbarkeit der Verbindungsmittel der Stabtragwerke orientiert sich an der VDI 2243 (VDI 2243) (Tabelle 4)

Tabelle 4: Definition der Erkennbarkeit (E) der Verbindungsmittel nach VDI 2243 (VDI 2243)

Verbindungsmittel (VB) Erkennbarkeit		Zeichen	Verbindungsmittel
Eindeutig sichtbar	Keine Optimierung notwendig	E +	restlichen, zimmermannsmäßige Verbindung
Nicht sichtbar, aber mit Hinweis	Kennzeichnung vorsehen	E 0	Schlitzblech
Nicht sichtbar, kein Hinweis	Hinweis und Kennzeichnung vorsehen	E -	Dübel besonderer Bauart

Das Kürzel (E) stand für Erkennbarkeit. Zum Beispiel wurde ein Schlitzblech als nicht sichtbar, aber mit Hinweis (E0) definiert, da es als innenliegendes Verbindungsmittel von der Holzkonstruktion außen verdeckt war, aber die Stabdübel von außen einen Hinweis auf das Verbindungsmittel gaben. Der Dübel besonderer Bauart wurde als nicht auffindbares Befestigungsmittel (E-) betrachtet, denn das Verbindungselement war nicht direkt

sichtbar, sondern nur nach Entfernen der Holzstruktur. Es gab auch keinen Hinweis auf das Befestigungsmittel. Alle anderen Verbindungselemente sowie die Zimmermannsverbindungen wurden als eindeutig sichtbar (E+) definiert, da die Art des Verbindungselements eindeutig sichtbar war.

1.2.1 Beispiel Rückbaubarkeit

Die Vorgehensweise zur Bewertung der Rückbaubarkeit wurde an der Fügung des Stützenkopfes und des Trägers der kleinen Halle mittels einer Tellerkopfschraube verdeutlicht (Abbildung 9).

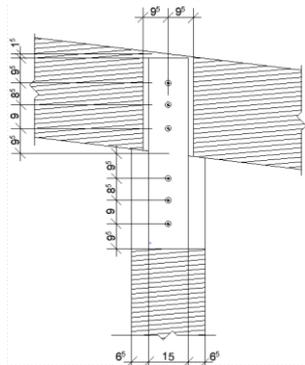


Abbildung 9: Detail Stützenkopf-Träger

Zunächst wurden die einzelnen Fügungen der Bauteile und Verbindungsmittel untereinander bezüglich der Lösbarkeit bewertet.

Baustoff (-schicht)	Tellerkopfschraube	Vollholz Träger außen	Vollholz Träger innen	Vollholz Stütze
Tellerkopfschraube		sSRA+	sSRA+	sSRA+
Vollholz Träger außen	sSRA+		-----	AUF-I
Vollholz Träger innen	sSRA+	-----		AUF-I
Vollholz Stütze	sSRA+	AUF-I	AUF-I	

Baustoff (-schicht)	Tellerkopfschraube	Vollholz Träger außen	Vollholz Träger innen	Vollholz Stütze
Tellerkopfschraube		0	0	0
Vollholz Träger außen	0		0	+
Vollholz Träger innen	0	0		+
Vollholz Stütze	0	+	+	

Abbildung 10: Fügemethodik der Schichten untereinander (links.), Lösbarkeit der Schichten (rechts)

Zur quantitativen Bewertbarkeit der Lösbarkeit der Schichten (Abbildung 9) wurde eine Gewichtung der Bewertungskriterien nach VDI (+ (3); 0 (2); - (1)) vorgenommen. So konnte eine prozentuale Bewertung der Lösbarkeit des Detailpunktes vorgenommen werden (Abbildung 11).

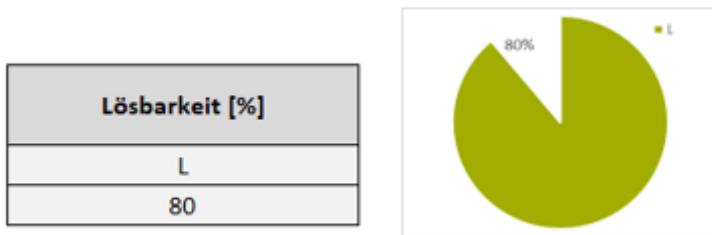


Abbildung 11: Graphische Auswertung Lösbarkeit (L)

Das Ergebnis zeigt eine Lösbarkeit von 80%. Das bedeutet, dass Verbindungsmittel und Bauteil zu 80% ohne Schädigung voneinander gelöst werden konnten und eine geringe Schädigung des Bauteils nach Lösen des Verbindungsmittels bestand. Ziel wäre eine Lösbarkeit von 100% gewesen.

2 ARBEITSPAKET 7.4: STOFFLICHE KENNWERTE FÜR KASKADEN-NUTZUNG

Zsafia Varga,
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion,
Technische Universität München

Wie nach (Varga et al. 2023) beschrieben, wurden, um die äquivalente Materialrückgewinnung des Holzes zu bestimmen, die Anzahl und die Art der Befestigungsmittel für den ungünstigsten Lastfall berechnet und dimensioniert. Es wurde eine Sensitivitätsanalyse anhand des Zweireihers und des Einreihers der «kleinen» Halle durchgeführt, um herauszufinden, inwieweit die Wahl der Verbindungsmittel eine Rolle für die **gleichwertige stoffliche Verwertung** des Holzes spielte. Abbildung 12 zeigen die untersuchten Detailpunkte.

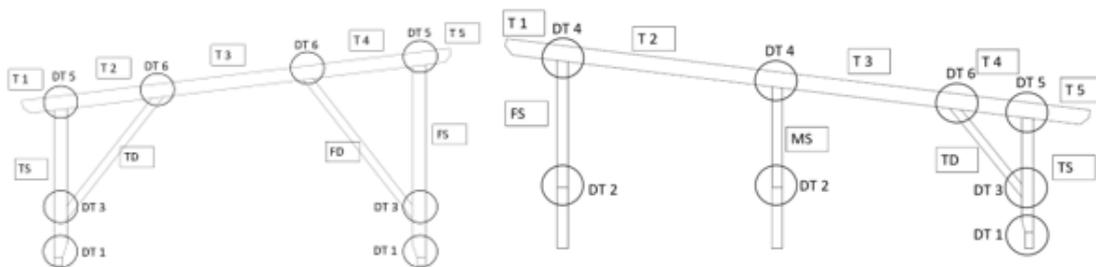


Abbildung 12: «kleine» Halle, Detailpunkte (DT) und Träger (T)

Zu diesem Zweck wurde die Hauptstruktur in verschiedene Bereiche unterteilt, die durch die jeweiligen Detailpunkte (DT) abgegrenzt waren. Die Abschnitte wurden nach ihrer Lage benannt; Traufstütze (TS), Mittelstütze (MS), Firststütze (FS), Traufdiagonale (TD),

Firstdiagonale (FD). Der Träger (T) wurde in fünf Abschnitte unterteilt (T1-T5). Abbildung 12 können die Abkürzungen sowie die Zuordnung der Verbindungsmittel zu den jeweiligen Detailpunkten entnommen werden.

Tabelle 5 können die Abkürzungen sowie die Zuordnung der Verbindungsmittel zu den jeweiligen Detailpunkten entnommen werden.

Tabelle 5: Zuordnung Verbindungsmittel zu Detailpunkten

DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	DT6
SB	DBB+B+SPa	V+B	SB+SD	DBB+B+L	L+Hs
U+DBB	SB	SB+SD	DBB+B	DBB+B	DBB+B+L
SP+SB+SD	U+DBB		DBB+B+L	L+Hs	DBB+B
			L+Hs		
SB...Schlitzblech DBB...Dübel besonderer Bauart U...U-Profil SD...Stabdübel L...Lasche V...Versatz B...Bolzen Hs...Holzschraube					

Ziel war es, herauszufinden, inwieweit die Wahl der Verbindungsmittel einen Einfluss auf die Länge der Holzbauteile nach dem Entfernen der von den Verbindungsmitteln betroffenen Bereiche hatte. Dazu wurden die Abstände zwischen den Verbindungsmitteln für die jeweiligen Bauteile nach Norm ermittelt. (Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008)

Der Querschnitt der Träger bzw. Stützen kann folgender Tabelle 6 entnommen werden.

Tabelle 6: Querschnitte 1-Reiher mit Futtertrog und 2- Reiher

	2-Reiher				1-Reiher mit Futtertrog				
	FS	TS	D	T doppelt	FS	MS	TS	D	T doppelt
Breite [m]	0,20	0,20	0,20	0,12	0,20	0,20	0,20	0,20	0,12
Höhe [m]	0,32	0,30	0,20	0,32	0,26	0,26	0,28	0,20	0,32

Aus dem Grund des vorher genannten Zieles wurden die Verbindungsmittel der Detailpunkt in allen Möglichkeiten miteinander kombiniert.

Im Folgenden sollten anhand eines Beispiels die nachfolgende Graphik (Abbildung 13) erläutert werden. Alle anderen Graphiken sind in Anhang B zu finden. Die Balken stellen die jeweiligen Längen der Träger dar. In Abbildung 13 wurde der Träger von T4 beschrieben, der ursprünglich mit den Detailpunkten DT6 und DT5 verbunden war. Diese waren bei Bestandsaufnahme für DT6 Lasche und Holzschraube, Dübel besondere Bauart, Bolzen und Lasche sowie Dübel besondere Bauart und Bolzen. Für DT5 wurden die gleichen Verbindungsmittel aufgenommen.

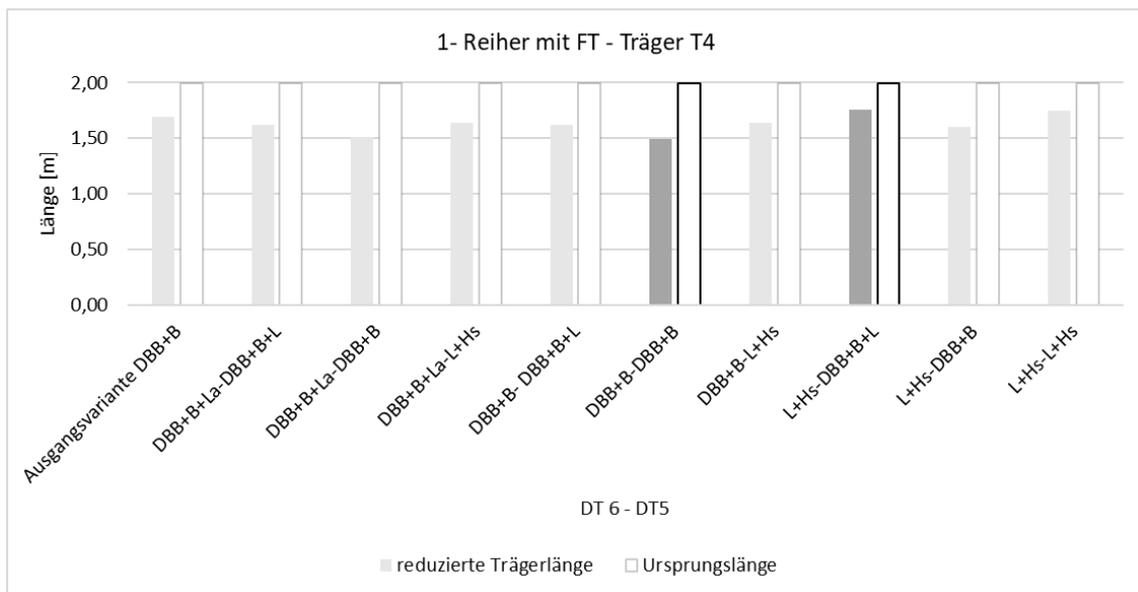


Abbildung 13: 1-Reiher mit FT- «kleine» Halle - Träger T4: reduzierte Trägerlänge (gleichwertig stofflich verwertbar)

Die hervorgehobenen dunklen Balken zeigten die maximale bzw. die minimale Länge des Trägers nach dem Ausschneiden der Verbindungsmittel an. Der leere Rahmen zeigte die ursprüngliche Länge des Trägers an. Die Querschnittswerte der Träger können Tabelle 6, die Längen der Träger den Tabellen in Anhang B entnommen werden. Somit konnten die Restvolumina zur weiteren Kaskadennutzung ermittelt werden.

Die Wahl der Verbindungsmittel hatte, wie die Übersicht in Tabelle 7 zeigt, keinen signifikanten Einfluss auf die Länge der Holzbauteile. Die Verbindungsmittelkombinationen kamen auf gleiche Weise bei dem kürzesten, als auch den längsten Trägern zwischen zwei Detailpunkten vor. Folglich spielte die Wahl der Verbindungsmittel keine ausschlaggebende Rolle bei der Bewertung der **gleichwertig stofflichen** Verwertung des Holzes.

Tabelle 7: Verbindungsmittelkombinationen mit den kürzesten und längsten Trägerlängen nach Herausschneiden der Verbindungsmittel

Bezeichnung Träger	VB-Kombination Kürzester Träger	VB-Kombination Längster Träger
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T1	L +Hs	DBB+B+L
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T2	DBB+B+(L)- SB+SD	L +Hs - L +Hs
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T3	L +Hs- DBB+B	L +Hs - L +Hs
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T4	DBB+B- DBB+B	L +Hs- DBB+B+L
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle – Traufstütze oben	L +Hs – V+B	DBB+B- V+B
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle – Traufstütze unten	V+B – U+DBB	V+B – U+DBB/SP+SB+SD
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle – Traufdiagonale	DBB+B+L- SB+SD	DBB+B- V+B
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle – Mittelstütze	DBB+B- U+DBB	DBB+B- SB
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle – Firststütze	DBB+B-SB	SB+SD- DBB+B+SPa
2-Reiher, «kleine» Halle - Träger T1	DBB+B	L +Hs
2-Reiher, «kleine» Halle - Träger T2	DBB+B- DBB+B	L +Hs - L +Hs
2-Reiher, «kleine» Halle - Träger T4	DBB+B- DBB+B	L +Hs - L +Hs
2-Reiher, «kleine» Halle - Träger T5	DBB+B	L +Hs
2-Reiher, «kleine» Halle – Traufstütze oben	DBB+B+L- V+B	L +Hs – SB+SD
2-Reiher, «kleine» Halle – Traufstütze unten	V+B – DBB+B+U	SB+SD- SB/SP+SB+SD
2-Reiher, «kleine» Halle – Traufdiagonale	DBB+B+ L- SB+SD	DBB+B-SB+SD
2-Reiher, «kleine» Halle – Firstdiagonale	DBB+B+ L- SB+SD	DBB+B-V+B
2-Reiher, «kleine» Halle – Firststütze oben	DBB+B+L- V+B	L +Hs – SB+SD
2-Reiher, «kleine» Halle – Firststütze unten	V+B - DBB+B+U	SB+SD- SB/SP+SB+SD

Tabelle 8: Volumina der Träger nach Herausschneiden der Verbindungsmittel

Bezeichnung Träger	Trägerbreite [m]	Trägerhöhe [m]	Minimales Volumen nach Heraussägen VB [m³]	ursprüngliches Volumen [m³]	Max. Volumenänderung nach Heraussägen VB [%]
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T1	0,24	0,32	0,049-0,103	0,110	6,4%
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T2	0,24	0,32	0,363-0,390	0,402	3,0%
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T3	0,24	0,32	0,297-0,308	0,327	5,8%
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T4	0,24	0,32	0,115-0,126	0,153	17,6%
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle – Traufstütze oben	0,20	0,28	0,053-0,101	0,113	10,6%
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle – Traufstütze unten	0,20	0,28	0,010-0,029	0,045	35,6%
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle – Traufdiagonale	0,20	0,2	0,069-0,109	0,120	9,2%
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle – Mittelstütze	0,20	0,26	0,107-0,137	0,181	24,3%
1-Reiher mit FT, «kleine» Halle – Firststütze	0,20	0,2	0,069-0,109	0,120	9,2%
2-Reiher, «kleine» Halle - Träger T1	0,32	0,24	0,042-0,0576	0,061	5,6%
2-Reiher, «kleine» Halle - Träger T2	0,32	0,24	0,161-0,184	0,192	4,2%
2-Reiher, «kleine» Halle - Träger T3	0,32	0,24	0,203-0,238	0,261	8,8%
2-Reiher, «kleine» Halle - Träger T4	0,32	0,24	0,177-0,200	0,215	7,0%
2-Reiher, «kleine» Halle - Träger T5	0,32	0,24	0,203-0,238	0,054	14,8%
2-Reiher, «kleine» Halle – Traufstütze oben	0,20	0,30	0,114-0,162	0,18	10,0%
2-Reiher, «kleine» Halle – Traufstütze unten	0,20	0,30	0,009-0,033	0,048	31,3%
2-Reiher, «kleine» Halle – Traufdiagonale	0,20	0,20	0,1-0,14	0,16	12,5%
2-Reiher, «kleine» Halle – Firstdiagonale	0,20	0,20	0,14-0,19	0,2	5,0%
2-Reiher, «kleine» Halle – Firststütze oben	0,20	0,32	0,205-0,25	0,256	2,3%
2-Reiher, «kleine» Halle – Firststütze unten	0,20	0,32	0,032-0,038	0,051	25,5%

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Wahl der Verbindungsmittel keine Rolle für die **gleichwertige stoffliche Verwertung** des Holzes spielte. Unabhängig davon, welches Verbindungsmittel gewählt wurde, wurden zwischen 2,3%-35,6% des Vollholzes weggeschnitten. (Tabelle 8)

Damit eine gleichwertige stoffliche Verwertung stattfinden könnte, hätte jedoch die Rückbaubarkeit der Konstruktion gegeben sein müssen. Diese wird im Folgenden untersucht.

3 ARBEITSPAKET 7.2 UND 7.3: UNTERSUCHUNG DER VERBINDUNGSMITTELALTERNATIVEN ZUR OPTIMIERUNG DER RÜCKBAUBARKEIT DER BAUTEILE

Zsafia Varga,

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion,

Technische Universität München

Um die Rückbaubarkeit der Hallenvarianten zu untersuchen, wurden die Detailvarianten nach der oben beschriebenen Methodik bewertet. Die Ergebnisse sind für die besichtigten «kleinen» und «großen» Halle Anhang A zu entnehmen. Die Bewertung wurde analog zum oben beschriebenen Vorgehen zur Bewertung der Rückbaubarkeit durchgeführt.

3.1 Bewertung der «kleinen» Halle

Prinzipiell kann gesagt werden, dass die Lösbarkeit der Verbindungsmittel immer hoch bei min 78% lag. Die Erkennbarkeit der Verbindungsmittel war entweder vollständig mit 100% oder teilweise mit 33% gegeben.

3.2 Bewertung der «kleinen» Halle

Als beispielhafte Bewertung der großen Halle wurden fünf Reithallen im Großraum München besichtigt und aufgenommen. Zwei Reithallen wurden bei der Bewertung der Verbindungsmittel ausgeschlossen, da Ihre Tragwerke bei der Herstellung als für eine breite Anwendung in der Praxis zu aufwändig eingestuft wurden. Diese waren eine historische Dachkonstruktion sowie ein Binder ausgebildet als Fachwerk.

Insgesamt wurden die Detailpunkte dreier Reithallen ausgewertet. Ihre Tragwerke wurden als Dreigelenkrahmen sowie als eingespannte Stütze identifiziert.

DREIGELENKRAHMEN

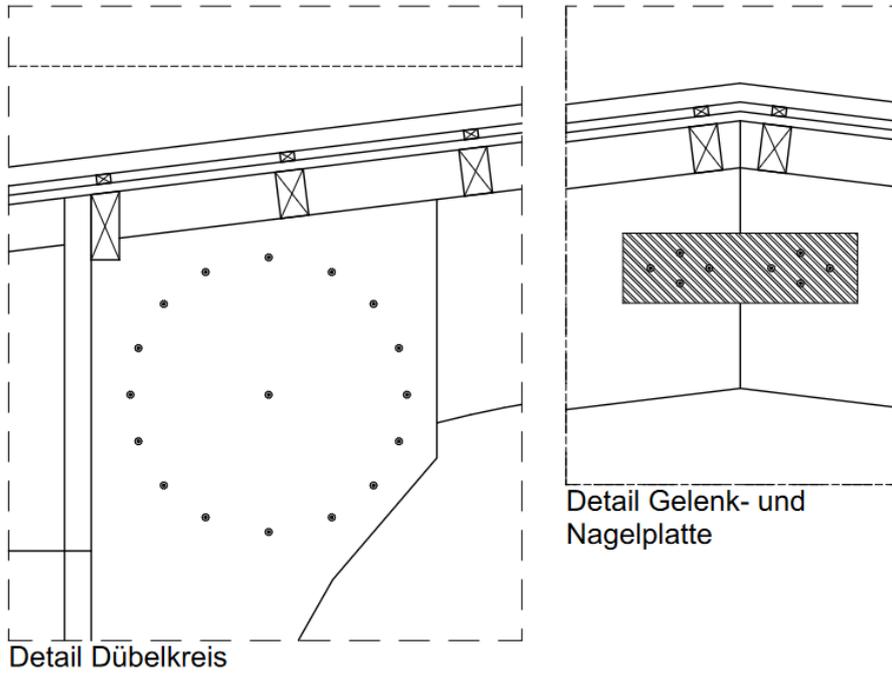


Abbildung 14: Details Dreigelenkrahmen

HOLZBINDERTRÄGER

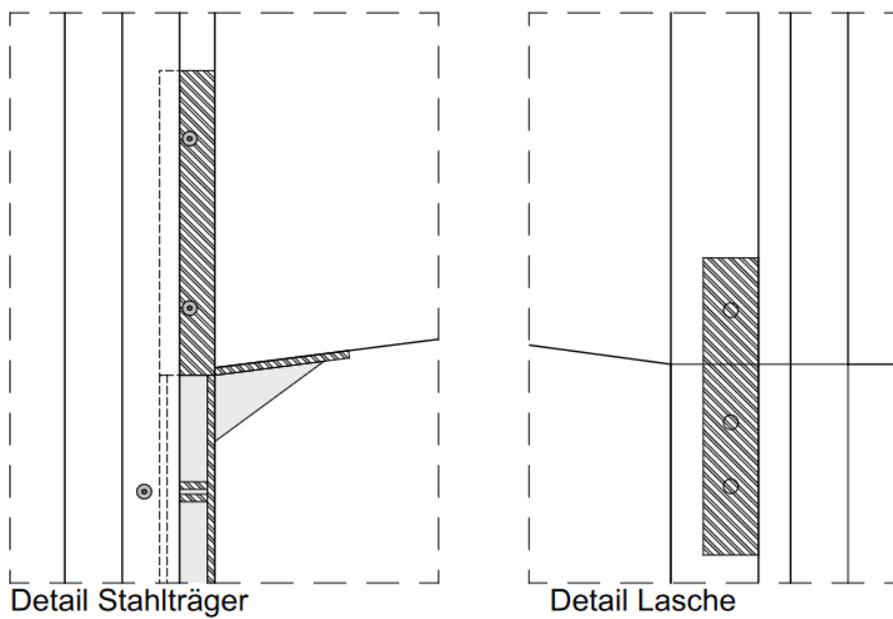


Abbildung 15: Details Holzbinderträger

Geklebten Bauteile, deren Detailpunkte als biegesteif identifiziert wurden, wurden nicht bewertet, weil sie durch die Verklebung als ein zusammenhängendes, großes Bauteil identifiziert wurden. Dazu zählten ein Leimbinder als Dachträgerkonstruktion Abbildung 14, sowie eine keilgezinkte Verbindung des Dachträgers mit der Stütze. Abbildung 15 Anhand A sind die Bewertungen der Verbindungsmittel der Tragwerke hinsichtlich Lösbarkeit, Erreichbarkeit/ Zugänglichkeit sowie Erkennbarkeit zu entnehmen. Die Lösbarkeit war bei allen Detailpunkten, bis auf den Anschluss Träger-Träger des «Dreigelenkrahmens» mit 83%, zu 100% gegeben. Alle Verbindungsmittel waren sehr gut 100%-ig zugänglich. Die Verbindungsmittel waren bis auf die Bolzenverbindung im Anschluss Binder -Stahlstütze mit 66%, maximal gut erkennbar.

3.3 Fazit

Insgesamt haben die Verbindungsmittel der «großen» Hallen im Hinblick auf die Rückbaubarkeit gut und sogar besser abgeschnitten, als die Verbindungsmittel der «kleinen» Halle. Dies lang vor allem daran, dass die «große» Halle weniger Detailpunkte besaß als die «kleine» Halle und der Abstand der Träger untereinander höher, somit die Erkennbarkeit sowie Zugänglichkeit besser gegeben war. Bei der «großen» Halle wurden überwiegend Bolzen verwendet, die gut erkennbar und lösbar waren.

4 ARBEITSPAKET 7.5 : WIRTSCHAFTLICHKEIT

Für die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit der beiden Hallen wurden die Massen der Bauteile der kleinen und großen Halle mit den Baukostentabellen BKI – Positionen Neubau 2019 (Fetzer et al. 2019) verknüpft. Diese Abbildung 16 und **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu entnehmen.

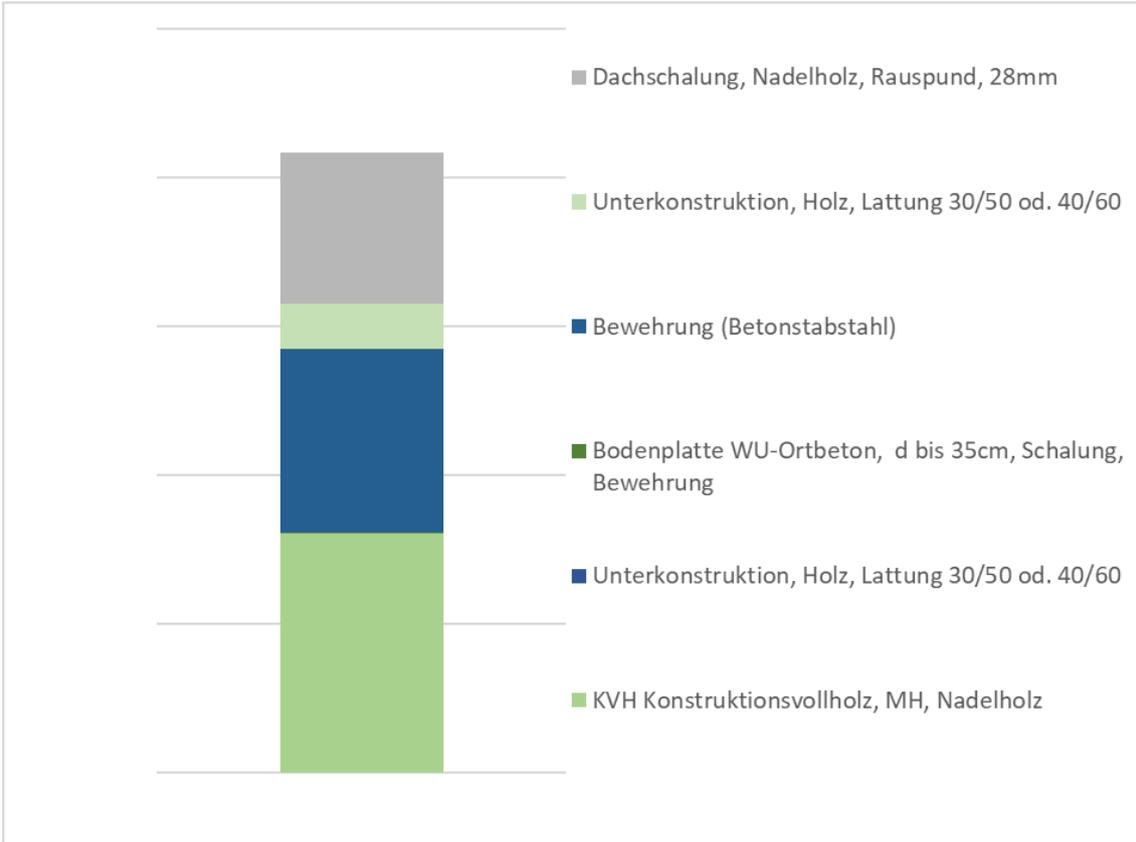


Abbildung 16: Herstellungskosten «kleine» Halle

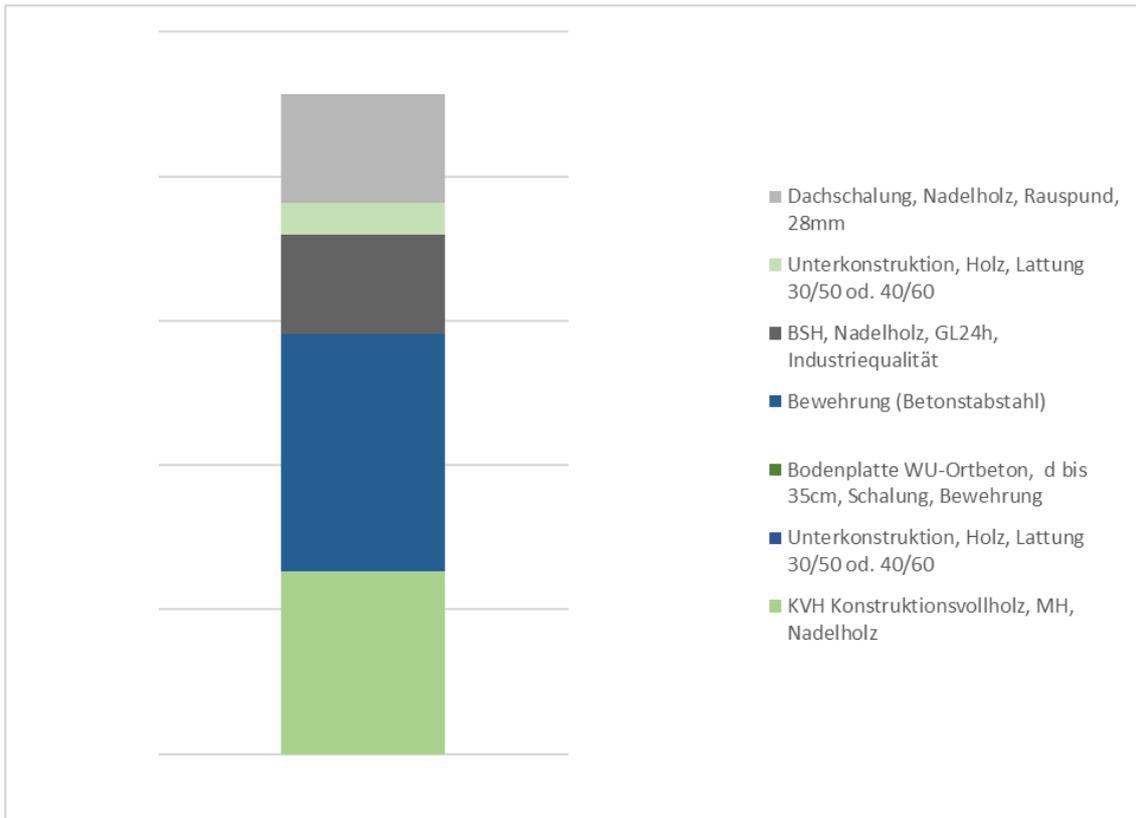


Abbildung 17: Herstellungskosten «große» Halle

Die Gesamtkosten der großen Halle überstiegen die Gesamtkosten der kleinen Halle um ca. 10%. Bei beiden Hallen verursachte den größten Anteil der Kosten, die Kosten für Holz sowie für die Bewehrung.

Auch wenn in den Herstellungskosten nach Abbildung 16 und Abbildung 17 auch die für die Herstellung notwendigen Personalkosten enthalten sind, kann trotzdem eine grobe Abschätzung gegeben werden, welche Materialkosten durch die Weiterverwertung des Konstruktionsvollholzes als Sekundärmaterial gespart werden könnten. Diese Kosten machten bei der «kleinen» Halle 38,6% und bei der großen Halle 27,6% der Gesamtkosten aus.

Bei diesen Preisen handelte es sich um Momentaufnahmen. Materialkosten schwanken und können sich schnell ändern. Um diesen Preisschwankungen entgegenzuwirken, wäre es umso besser, wenn die Landwirte durch die Verwendung des gebrauchten Holzes ihrer Hallen diesen Schwankungen entgegenwirken können.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: "kleine" Halle, Modulbausystem Grub-Weihenstephan (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Landtechnik und Tierhaltung, (Arbeitsgruppe Landwirtschaftliches Bauwesen, Dipl.-Ing. Architekt Jochen Simon).)...	6
Abbildung 2: "große" Halle, (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Landtechnik und Tierhaltung, (Arbeitsgruppe Landwirtschaftliches Bauwesen, Dipl.-Ing. Architekt Jochen Simon).)	6
Abbildung 3: Stoffströme - kleine Modulbauhalle in kg.....	7
Abbildung 4: Ressourcennutzungspotential [%] der Baustoffe der «kleinen» Modulbauhalle	8
Abbildung 5: Stoffströme - große Halle in kg.....	8
Abbildung 6: Ressourcennutzungspotential [%] der Baustoffe der «großen» Halle	9
Abbildung 7: Untersuchten Detailpunkte des Haupttragwerks.....	10
Abbildung 8: Detail Stützenfußpunkt an Stahlbetonstütze befestigt.....	11
Abbildung 9: Detail Stützenkopf-Träger	13
Abbildung 10: Fügemethodik der Schichten untereinander (links.), Lösbarkeit der Schichten (rechts).....	13
Abbildung 11: Graphische Auswertung Lösbarkeit (L).....	14
Abbildung 12: kleine» Halle, Detailpunkte (DT) und Träger (T)	14
Abbildung 13: 1-Reiher mit FT- «kleine» Halle - Träger T4: reduzierte Trägerlänge (gleichwertig stofflich verwertbar).....	16
Abbildung 14: Details Dreigelenkrahmen	20
Abbildung 15: Details Holzbinderträger.....	20
Abbildung 16: Herstellungskosten «kleine» Halle.....	22
Abbildung 17: Herstellungskosten «große» Halle.....	23
Abbildung 18: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T1: reduzierte Trägerlänge (gleichwertig stofflich verwertbar).....	38
Abbildung 19: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T2: reduzierte Trägerlänge	39
Abbildung 20: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T3: reduzierte Trägerlänge	39
Abbildung 21: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T4: reduzierte Trägerlänge	40
Abbildung 22: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Traufstütze oben: reduzierte Stützenlänge Traufstütze oben	40

Abbildung 23: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Traufstütze unten: reduzierte Stützenlänge Traufstütze unten	41
Abbildung 24: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Traufdiagonale: reduzierte Stützenlänge Traufdiagonale.....	42
Abbildung 25: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Mittelstütze: reduzierte Stützenlänge Mittelstütze	43
Abbildung 26: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Firststütze: reduzierte Stützenlänge Firststütze.....	44
Abbildung 27: 2-Reiher, «kleine» Halle – Träger T1: reduzierte Trägerlänge T1	45
Abbildung 28: 2-Reiher, «kleine» Halle – Träger T2: reduzierte Trägerlänge T2.....	46
Abbildung 29: 2-Reiher, «kleine» Halle – Träger T3: reduzierte Trägerlänge T3.....	47
Abbildung 30: 2-Reiher, «kleine» Halle – Träger T4: reduzierte Trägerlänge T4.....	47
Abbildung 31: 2-Reiher, «kleine» Halle – Träger 5: reduzierte Trägerlänge T5	48
Abbildung 32: 2-Reiher, «kleine» Halle – Traufstütze oben: reduzierte Stützenlänge Traufstütze oben.....	49
Abbildung 33: 2-Reiher, «kleine» Halle – Traufstütze unten: reduzierte Stützenlänge Traufstütze unten.....	50
Abbildung 34: 2-Reiher, «kleine» Halle – Traufdiagonale: reduzierte Trägerlänge Traufdiagonale.....	51
Abbildung 35: 2-Reiher, «kleine» Halle – Firstdiagonale: reduzierte Trägerlänge Firstdiagonale	51
Abbildung 36: 2-Reiher, «kleine» Halle – Firststütze oben: reduzierte Stützenlänge Firststütze oben	52
Abbildung 37: 2-Reiher, «kleine» Halle – Firststütze unten: reduzierte Stützenlänge Firststütze unten	53

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Zuordnung Begrifflichkeiten Recyclingpotential -Abfallampel.....	3
Tabelle 2: Definition der Lösbarkeit nach DIN 8593-0 (Norm DIN 8593-0)	11
Tabelle 3: Definition der Erreichbarkeit/ Zugänglichkeit der Verbindungsmittel (VB) nach VDI 2243, S.15 (VDI 2243).....	12
Tabelle 4: Definition der Erkennbarkeit (E) der Verbindungsmittel nach VDI 2243 (VDI 2243)	12
Tabelle 5: Zuordnung Verbindungsmittel zu Detailpunkten	15
Tabelle 6: Querschnitte 1-Reiher mit Futtertrog und 2- Reiher	15
Tabelle 7: Verbindungsmittelkombinationen mit den kürzesten und längen Trägerlängen nach Herausschneiden der Verbindungsmittel.....	17
Tabelle 8: Volumina der Träger nach Herausschneiden der Verbindungsmittel	18
<i>Tabelle 9 Bewertung des Details «Fußpunkt», «kleine Halle».....</i>	<i>28</i>
<i>Tabelle 10: Bewertung des Details «Strebe-Bauch», «kleine Halle»</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 11: Bewertung des Details «Stützenkopf», «kleine Halle»</i>	<i>32</i>
<i>Tabelle 12: Bewertung des Details «Strebe-Kopf», «kleine Halle».....</i>	<i>34</i>
<i>Tabelle 13: Bewertung des «Dreigelenkrahmens», «große Halle».....</i>	<i>36</i>
<i>Tabelle 14: Bewertung des «Holzbinderträgers», «große Halle»</i>	<i>37</i>

QUELLENVERZEICHNIS

Literaturverzeichnis

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Landtechnik und Tierhaltung, (Arbeitsgruppe Landwirtschaftliches Bauwesen, Dipl.-Ing. Architekt Jochen Simon): ILT 4c.

Deilmann, Clemens; Reichenbach, Jan; Krauß, Norbert; Gruhler, Karin (2017): Materialströme im Hochbau. Potenziale für eine Kreislaufwirtschaft. Stand: Dezember 2016. Hg. v. Bundesinstitut für Bau- Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (Schriftenreihe Zukunft Bauen, Band 06). Bonn.

Ebert, Samuel; Ott, Stephan; Krause, Karina; Hafner, Annette; Krechel, Marco (2020): Modell der Recyclingfähigkeit auf Bauteilebene. In: *Bautechnik* 97 (S1), S. 14–25. DOI: 10.1002/bate.201900109.

Deutsche Fassung EN 1995-1-1:2004 + AC:2006 + A1:2008, 12.2010: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten.

Europäisches Parlament und Rat (19.11.2008): Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien.

Norm DIN 8593-0, 09.20023: Fertigungsverfahren Fügen.

Fetzer, Robert; Luther, Jörn; Wagner, Andreas; Schneider, Hans-Jürgen (Hg.) (2019): BKI Baukosten 2019 Neubau Teil 3. Statistische Kostenkennwerte für Positionen. Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern. Stuttgart: BKI Baukosteninformationszentrum (BKI Kostenplanung, Teil 3).

Kreislaufwirtschaft Bau (2018): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2016. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2016. Berlin.

Norm DIN EN 1995-1-1/NA:2013-08, 08.2013: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter.

VDI 2243, Juli 2002: Recyclingorientierte Produktentwicklung.

VDI 2243, 07.2002: Recyclingorientierte Produktentwicklung.

Steger, Sören; Ritthoff, Michael; Bulach, Winfried (2018): Stoffstromorientierte Ermittlung des Beitrags der Sekundärrohstoffwirtschaft zur Schonung von Primärrohstoffen und Steigerung der Ressourcenproduktivität. Hg. v. Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, UBA-FB002704. Wuppertal, Darmstadt.

Varga, Zsafia; Birkholz, Antonia; Wagner, Anna; Winter, Stefan (2023): EVALUATION OF THE RECYCLABILITY OF WOODEN BEAM STRUCTURES.

ANHANG A

Tabelle 9 Bewertung des Details «Fußpunkt», «kleine Halle»

Position	Verbindungsmittel	Detail	Bewertung Lösbarkeit [%]	Bewertung Erkennbarkeit [%]
			Bewertung Erreichbarkeit / Zugänglichkeit [%]	
Fußpunkt	Stahlteil in Stütze einbetoniert Stabdübel + Schlitzblech			
	Dübel besonderer Bauart + Bolzen			

Fußpunkt	Schlitzblech seitlich an Beton befestigt				
	Dübel besonderer Bauart +Bolzen Stahlteil (U-Profil)				

Tabelle 10: Bewertung des Details «Strebe-Bauch», «kleine Halle»

Position	Verbindungsmittel	Detail	Bewertung Lösbarkeit [%]	Bewertung Erkennbarkeit [%]
			Bewertung Erreichbarkeit / Zugänglichkeit [%]	
Anschluss Strebe - Stütze	Versatz + Bolzen		<p>100%</p>	<p>100%</p>
			<p>100%</p>	
	Schlitzblech + Stabdübel		<p>100%</p>	<p>33%</p>
			<p>66%</p>	

Dübel besonderer Bauart +Bolzen

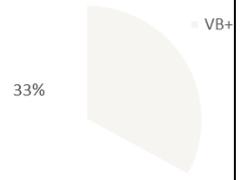
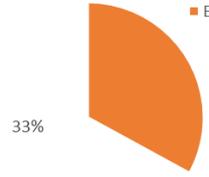
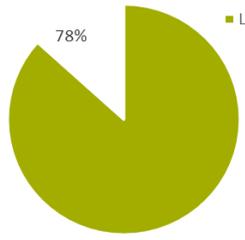
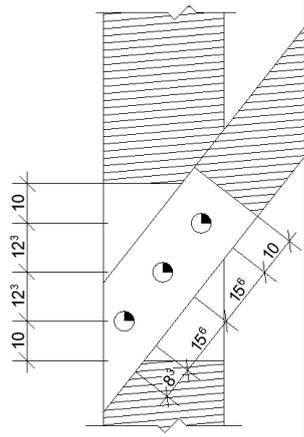


Tabelle 11: Bewertung des Details «Stützenkopf», «kleine Halle»

Position	Verbindungsmittel	Detail	Bewertung Lösbarkeit [%]	Bewertung Erreichbarkeit / Zugänglichkeit [%]	Bewertung Erkennbarkeit [%]
Stützenkopf	Dübel + Schlitzblech		<p>100%</p>	<p>66%</p>	<p>33%</p>
	Dübel besonderer Bauart + Bolzen (Doppelträger)		<p>82%</p>	<p>33%</p>	<p>33%</p>

	<p>Laschen + Vollgewindeschraube/ Holzschrauben</p>		<p>80%</p> <p>L</p>	<p>100%</p> <p>VB</p>
	<p>DBB + Bolzen + Laschen</p>		<p>82%</p> <p>L</p>	<p>33%</p> <p>VB</p>
			<p>33%</p> <p>E+</p>	

Tabelle 12: Bewertung des Details «Strebe-Kopf», «kleine Halle»

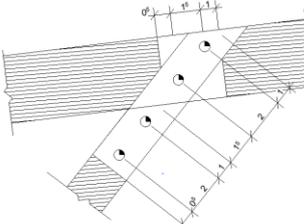
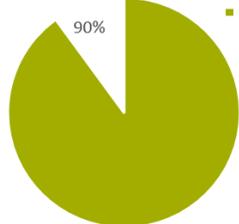
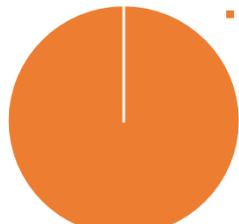
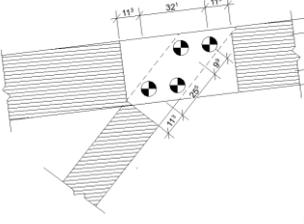
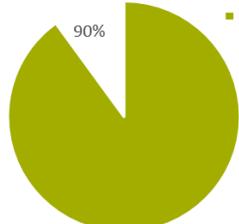
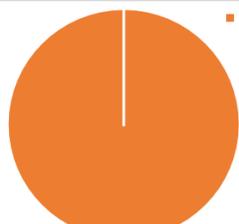
Position	Verbindungsmittel	Detail	Bewertung Lösbarkeit [%]	Bewertung Erkennbarkeit [%]
			Bewertung Erreichbarkeit / Zugänglichkeit [%]	
Anschluss Strebe-Träger	Dübel besonderer Bauart +Bolzen, Laschen abnehmbar			
				
	Dübel besonderer Bauart +Bolzen (Doppelträger)			
				

Tabelle 13: Bewertung des «Dreigelenkrahmens», «große Halle»

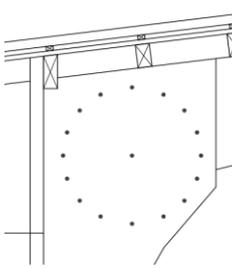
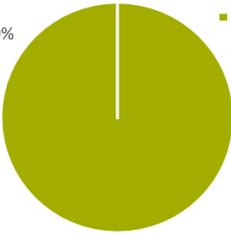
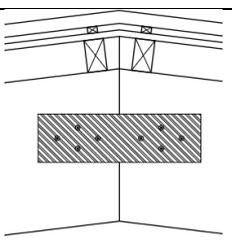
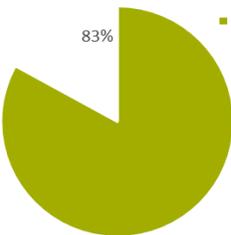
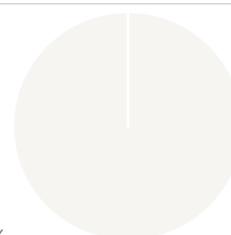
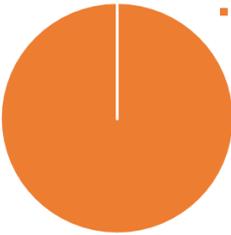
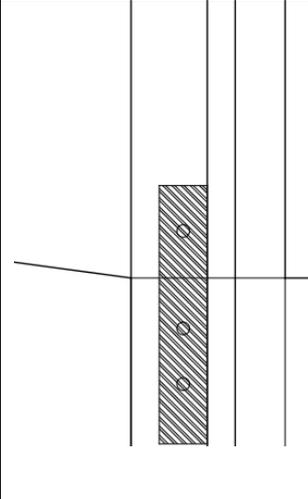
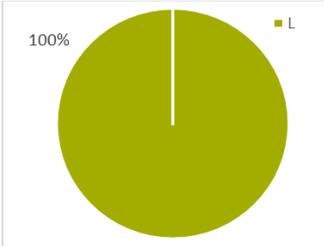
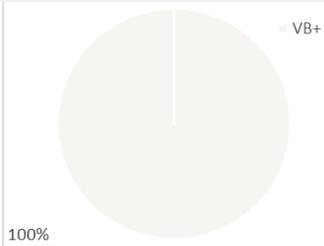
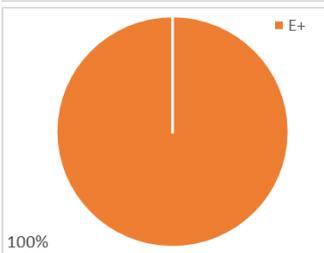
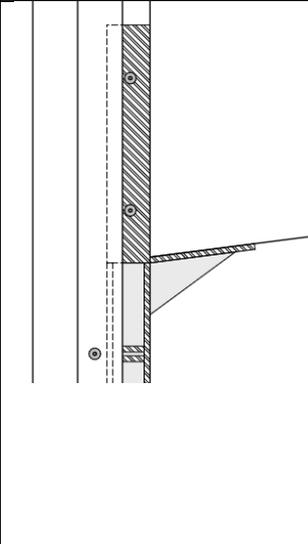
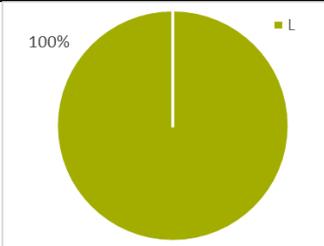
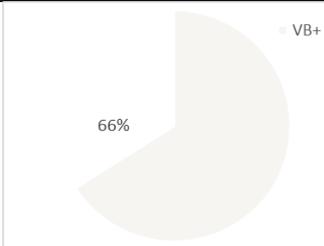
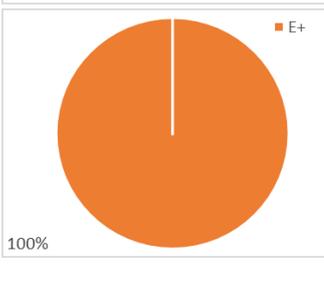
Position	Verbindungs mittel	Detail	Bewertung Lösbar- keit [%]	Bewertung Erkenn- barkeit [%]
			Bewertung Erreich- barkeit / Zugänglich- keit [%]	
Anschluss Stütze-Träger	Dübelkreis		 <p>100% L</p>	 <p>100% VB+</p>
Anschluss Träger-Träger	Gelenkt + Nagelplatte		 <p>83% L</p>	 <p>100% VB</p>
			 <p>100% E+</p>	

Tabelle 14: Bewertung des «Holzbinderträgers», «große Halle»

Position	Verbindungsmittel	Detail	Bewertung Lösbarkeit [%]	Bewertung Erkennbarkeit [%]
			Bewertung Erreichbarkeit / Zugänglichkeit [%]	
Anschluss Binder - Holzstütze	Stahllasche-Bolzen		 <p>100%</p>	 <p>100%</p>
			 <p>100%</p>	
Anschluss Binder - Stahlstütze	Bolzen		 <p>100%</p>	 <p>66%</p>
			 <p>100%</p>	

ANHANG B

1- Reiher-mit FT «kleine» Halle

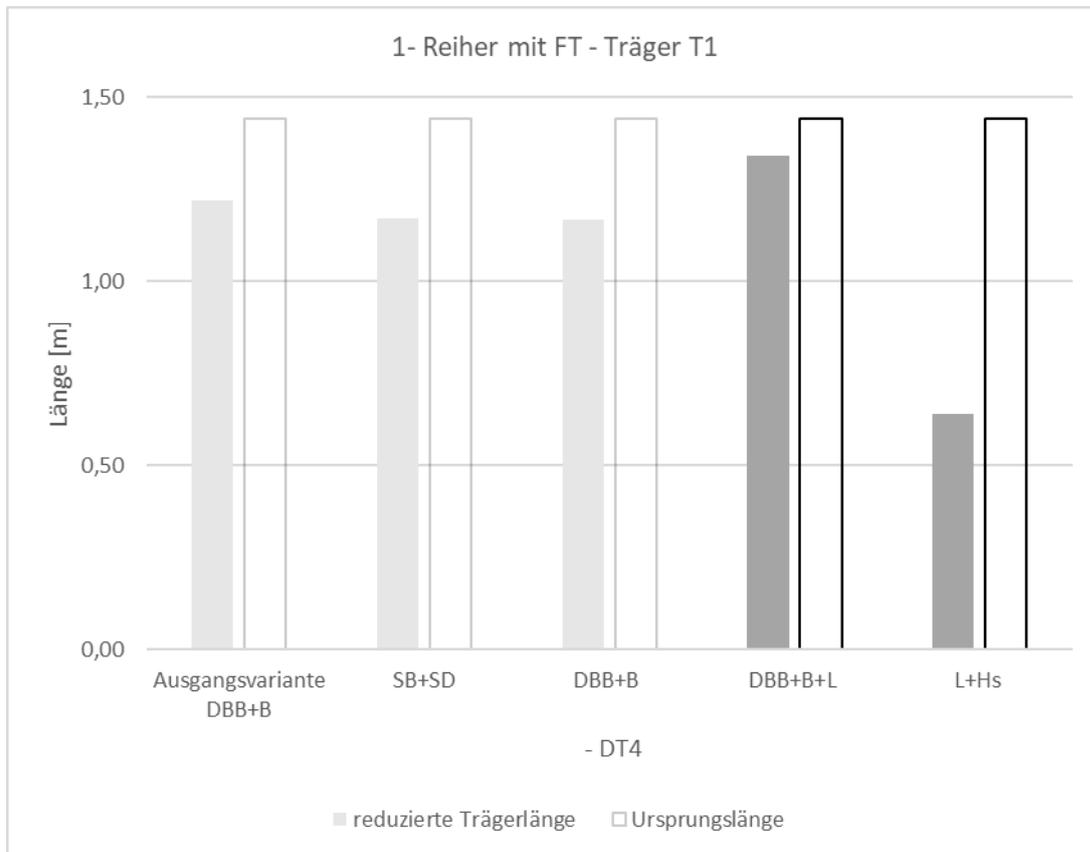


Abbildung 18: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T1: reduzierte Trägerlänge (gleichwertig stofflich verwertbar)

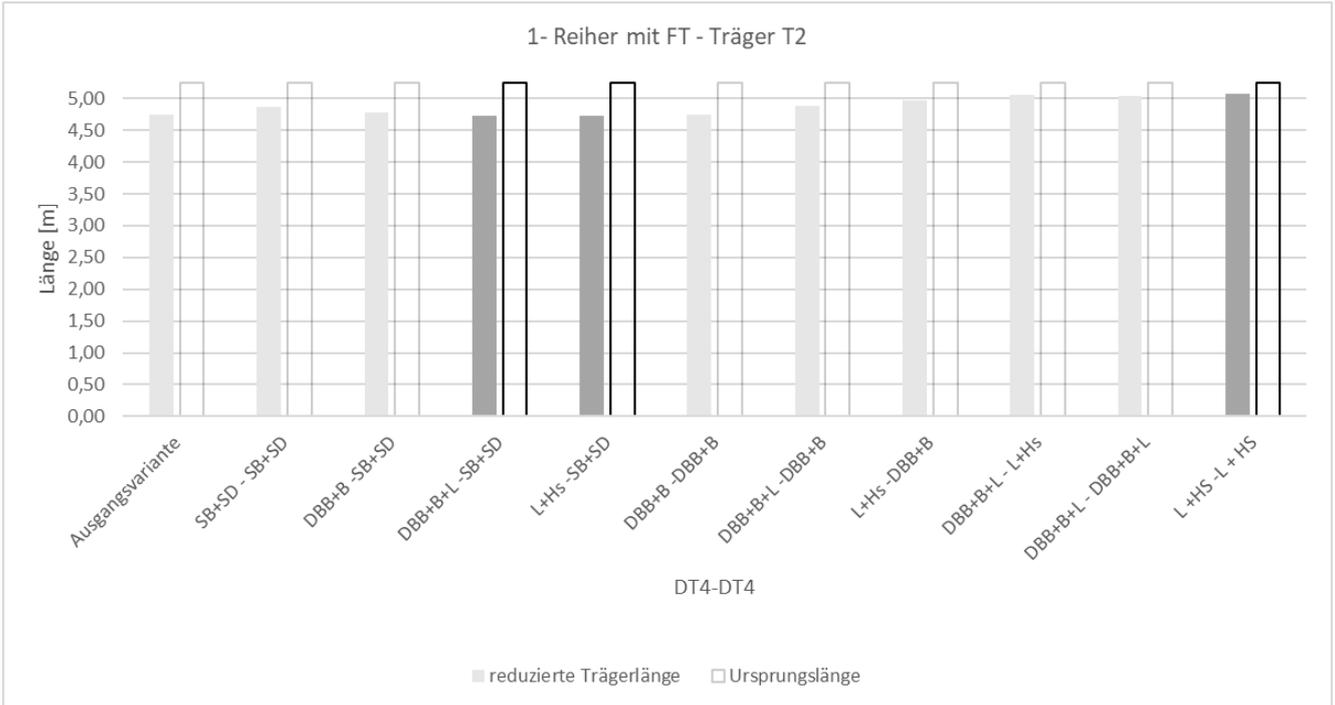


Abbildung 19: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T2: reduzierte Trägerlänge

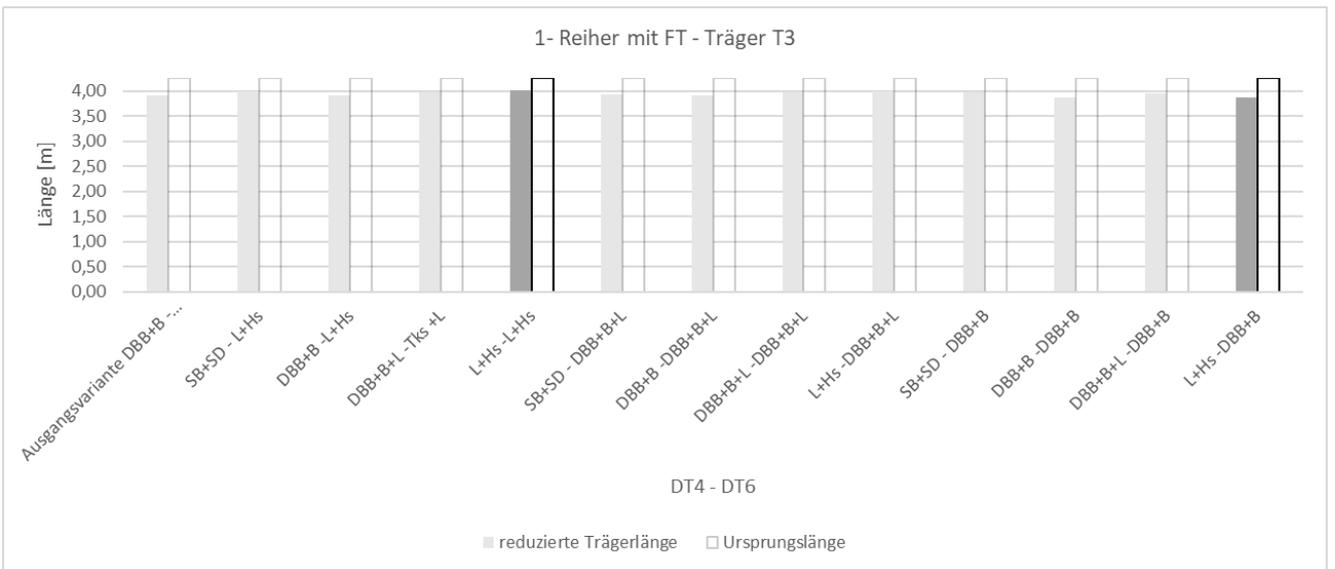


Abbildung 20: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T3: reduzierte Trägerlänge

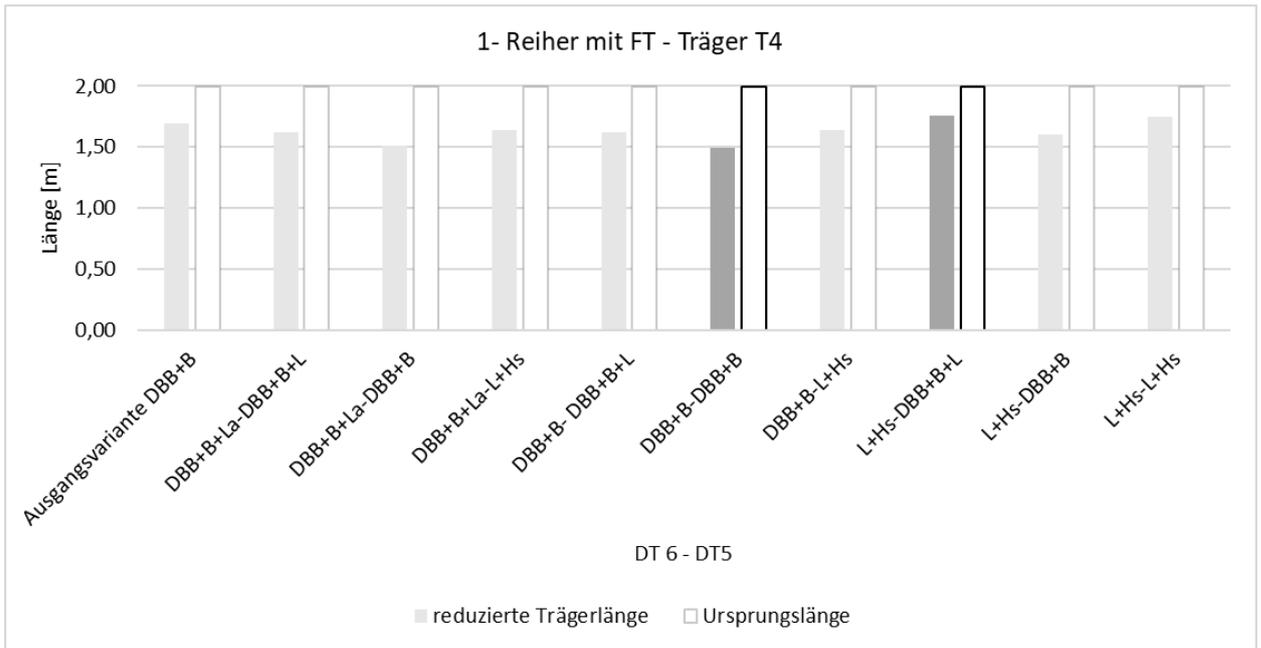


Abbildung 21: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Träger T4: reduzierte Trägerlänge

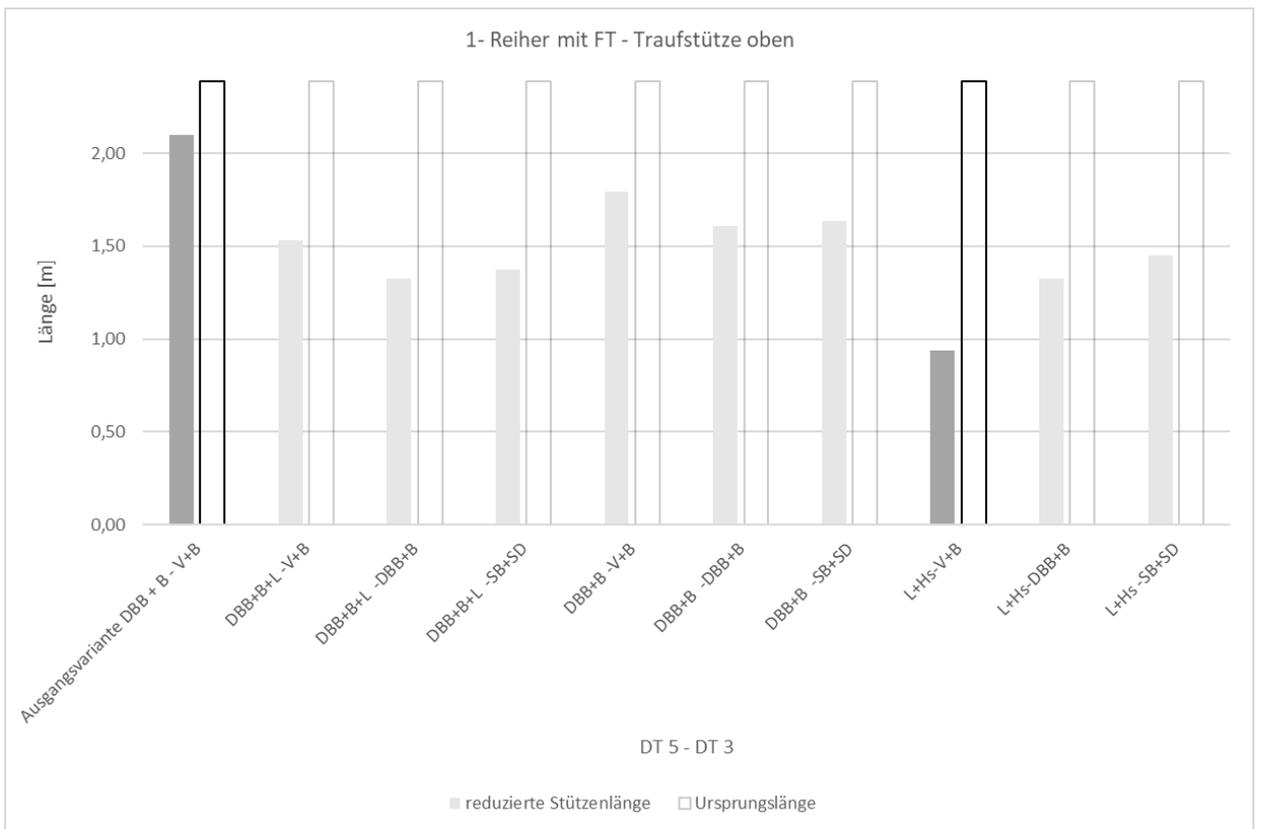


Abbildung 22: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Traufstütze oben: reduzierte Stützenlänge Traufstütze oben

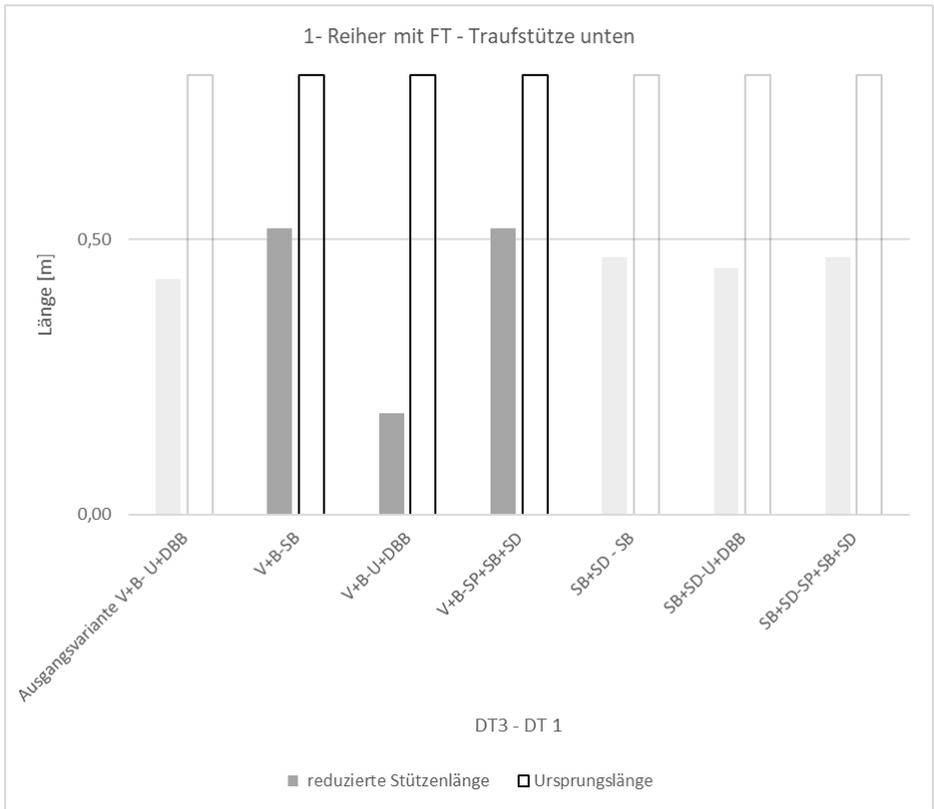


Abbildung 23: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Traufstütze unten: reduzierte Stützenlänge Traufstütze unten

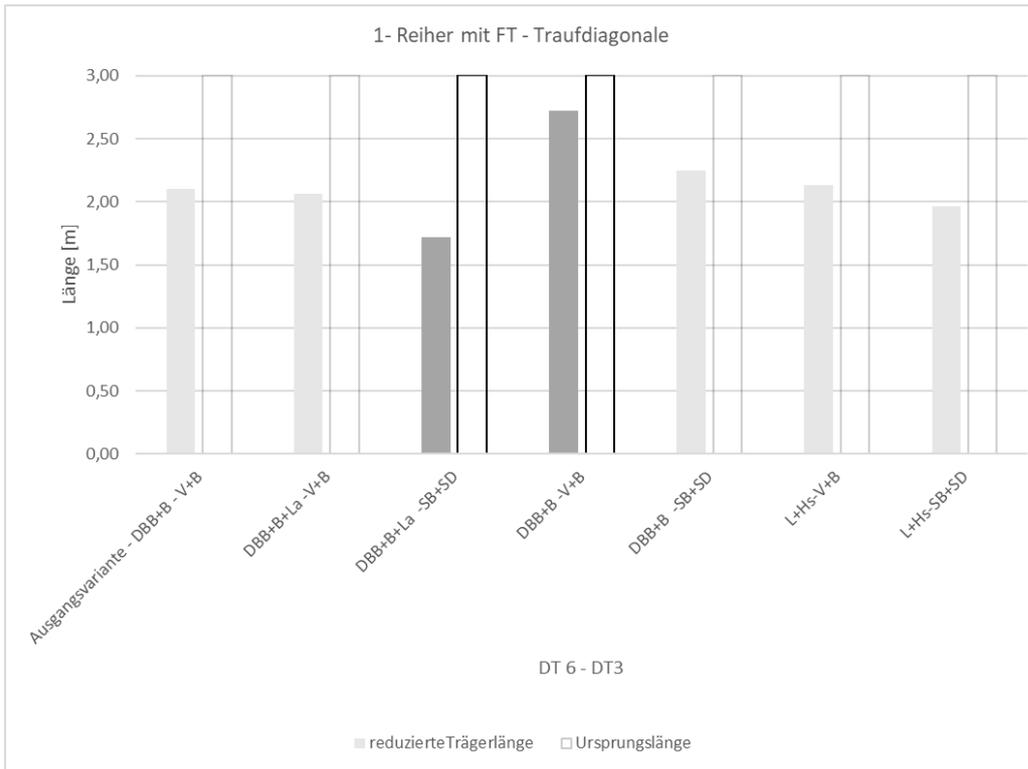


Abbildung 24:1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Traufdiagonale: reduzierte Stützenlänge Traufdiagonale

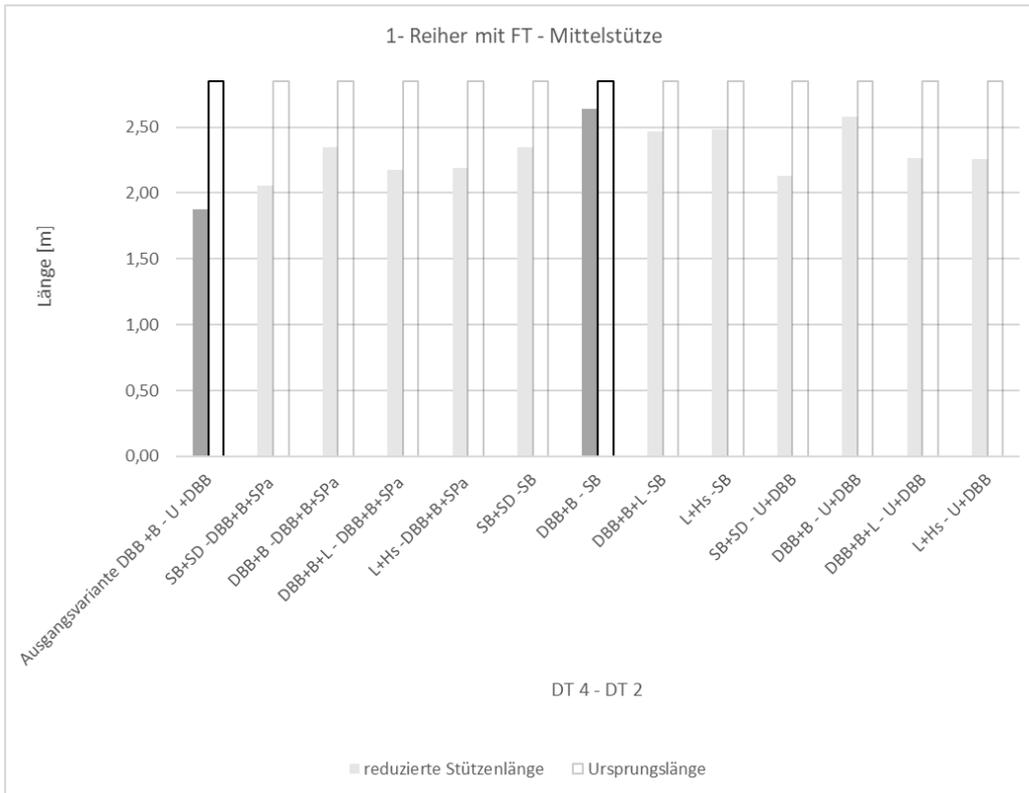


Abbildung 25: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Mittelstütze: reduzierte Stützenlänge Mittelstütze

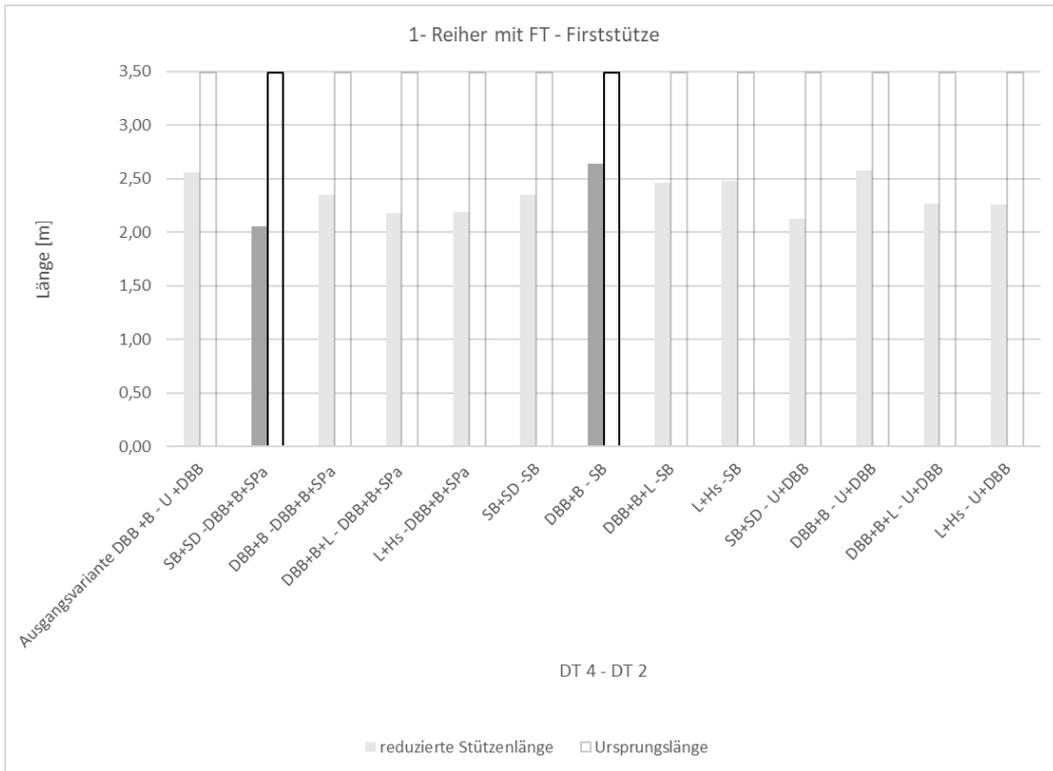


Abbildung 26: 1-Reiher mit FT, «kleine» Halle - Firststütze: reduzierte Stützenlänge Firststütze

2- Reiher- «kleine» Halle

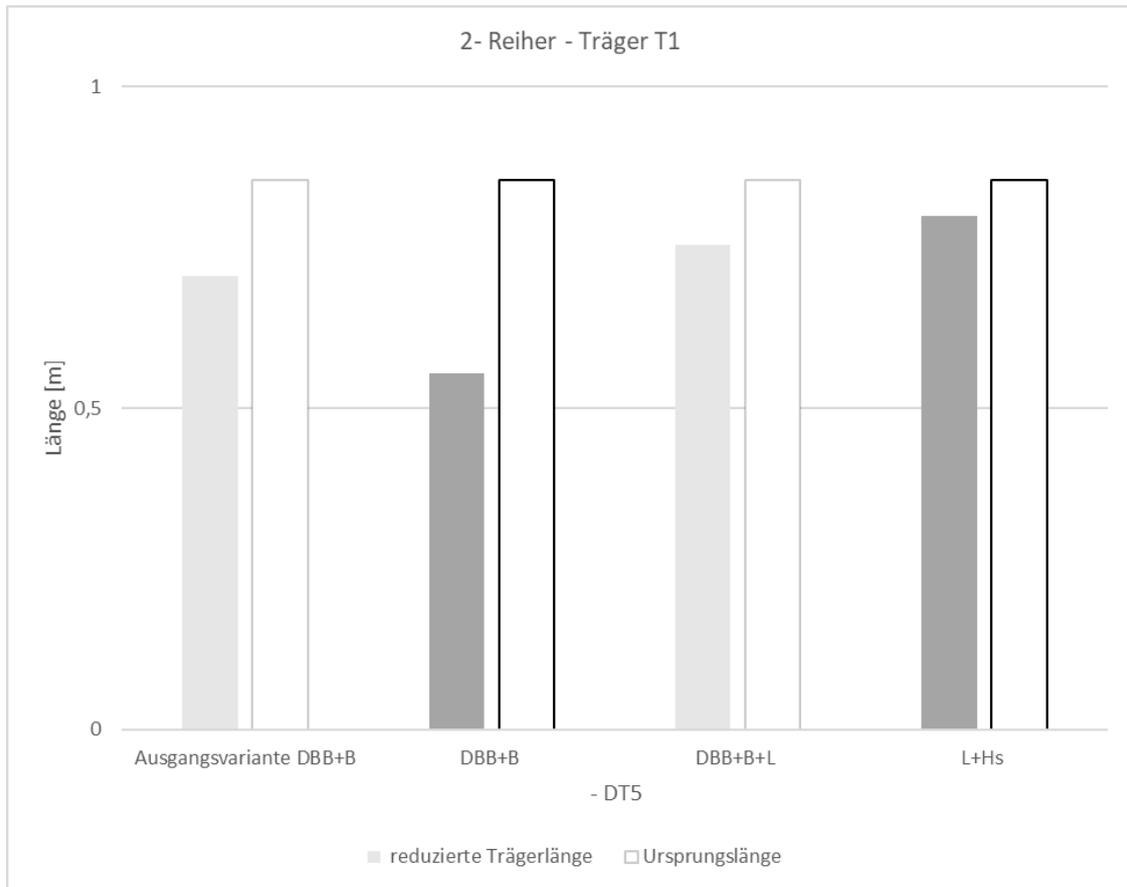


Abbildung 27: 2-Reiher, «kleine» Halle – Träger T1: reduzierte Trägerlänge T1

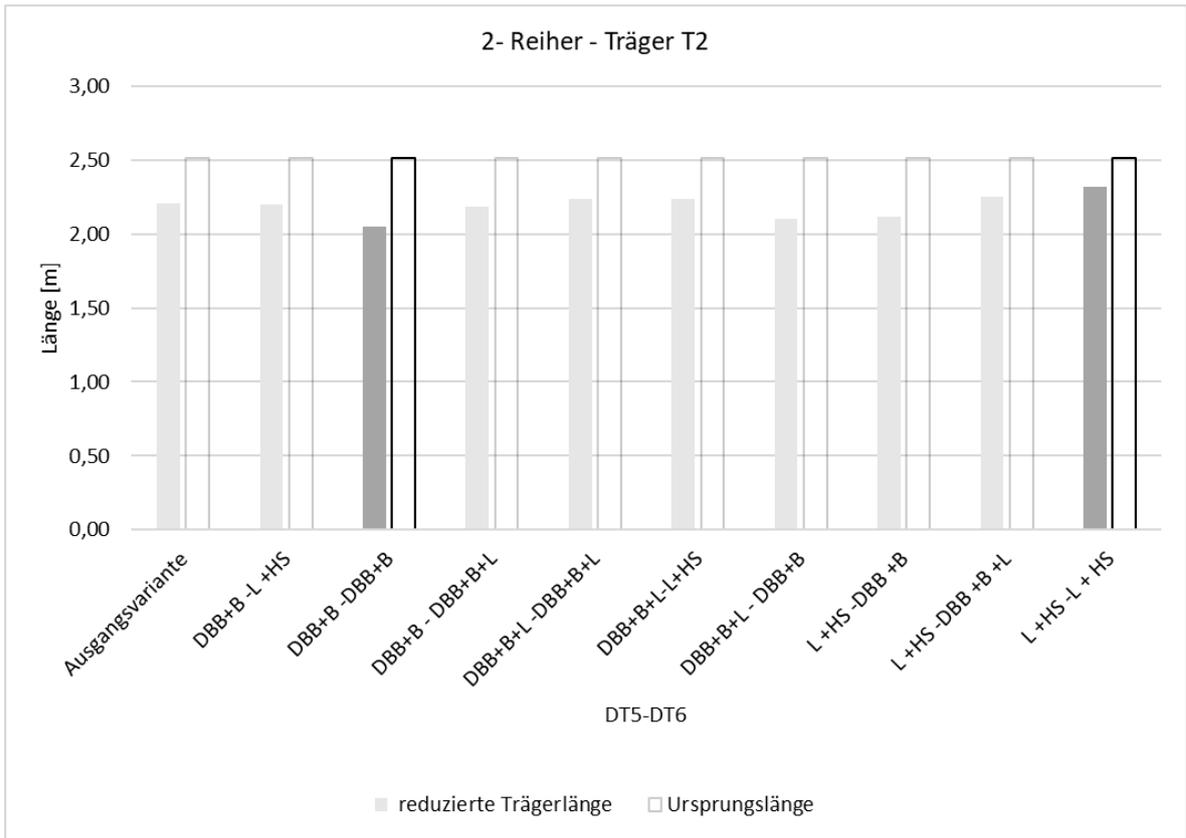


Abbildung 28: 2-Reiher, «kleine» Halle – Träger T2: reduzierte Trägerlänge T2

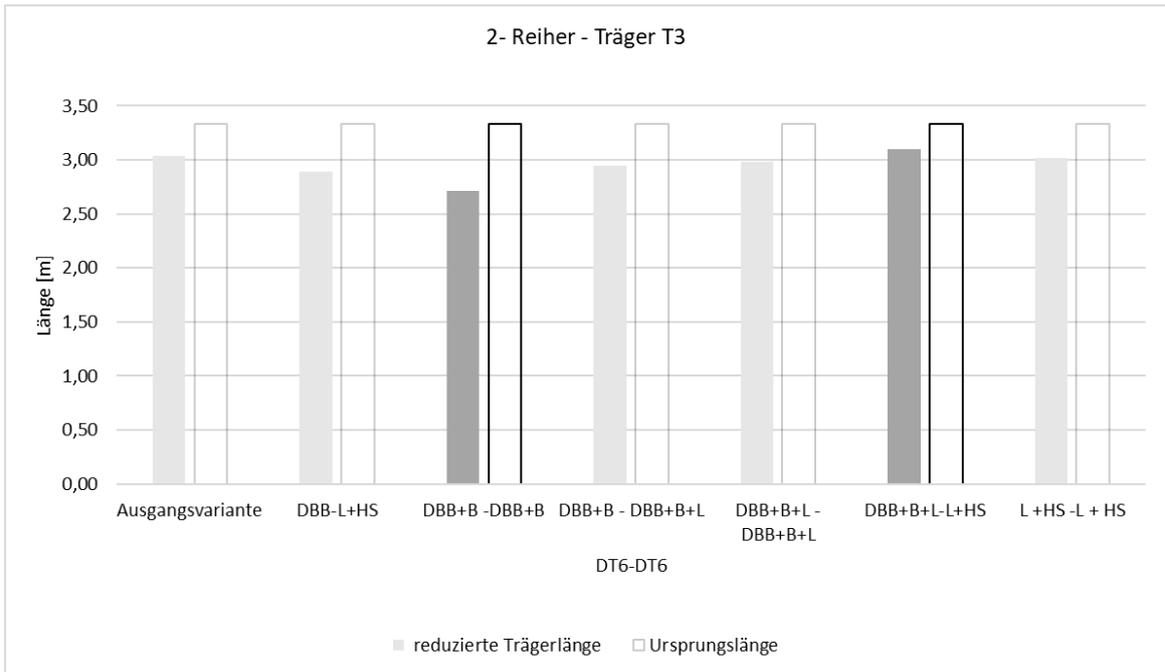


Abbildung 29: 2-Reiher, «kleine» Halle – Träger T3: reduzierte Trägerlänge T3

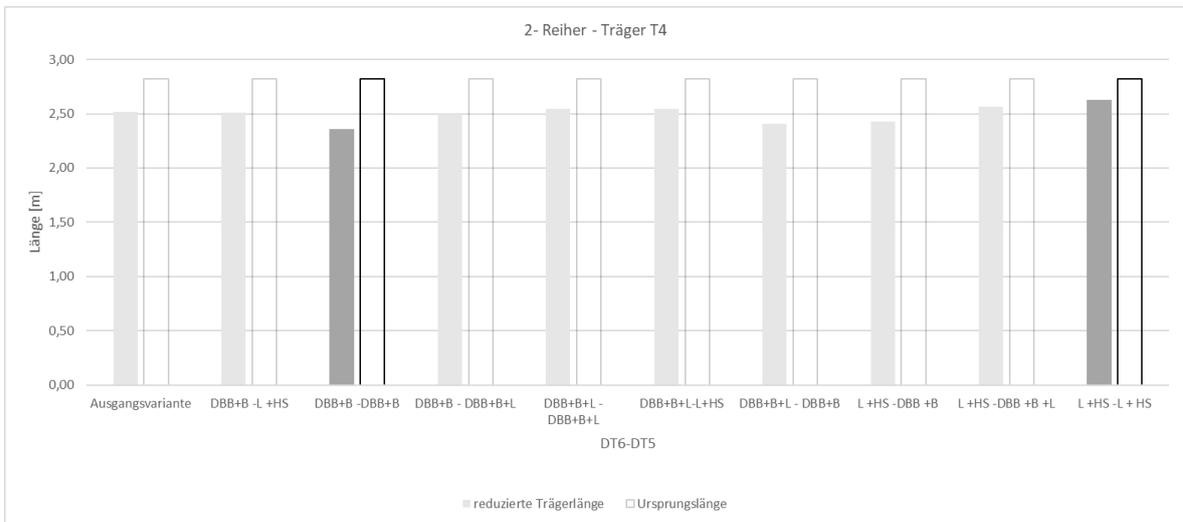


Abbildung 30: 2-Reiher, «kleine» Halle – Träger T4: reduzierte Trägerlänge T4

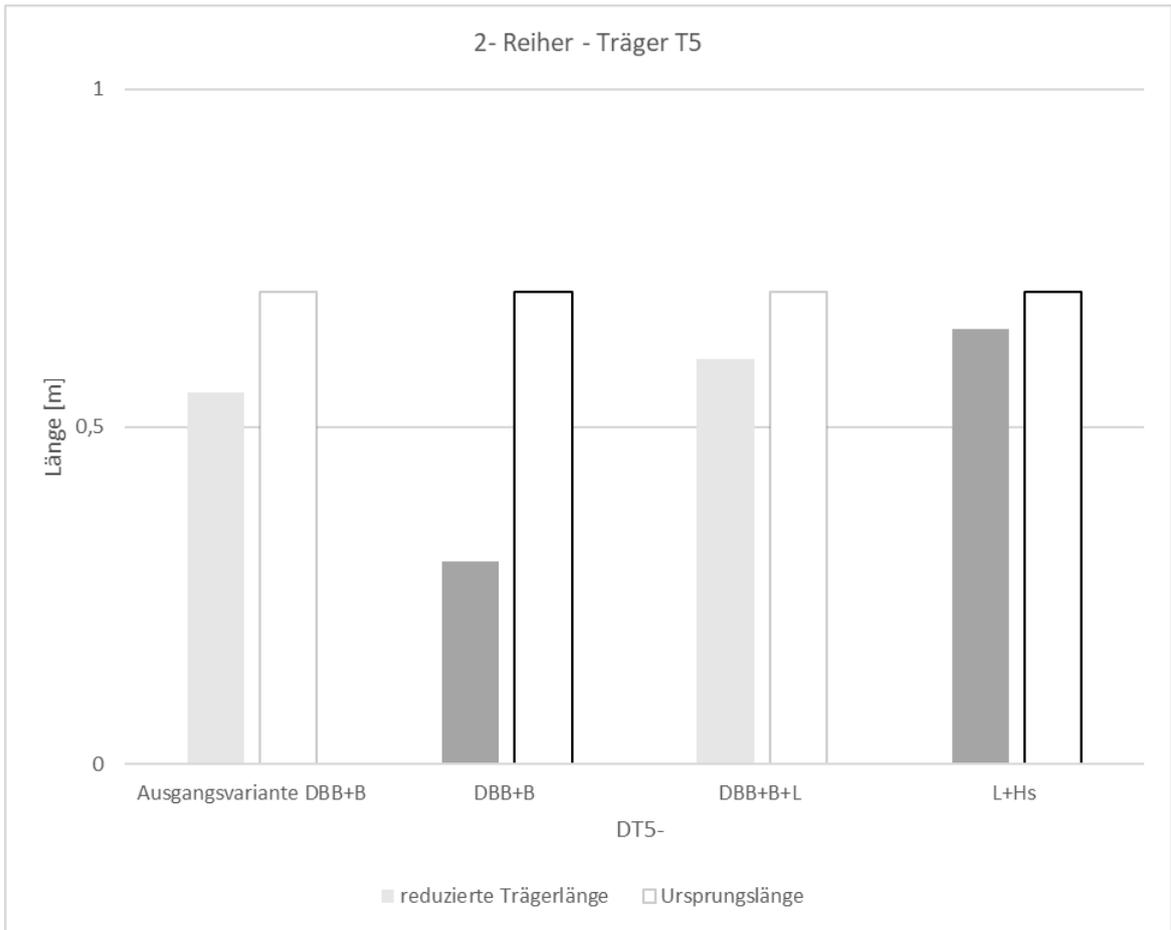


Abbildung 31: 2-Reiher, «kleine» Halle – Träger 5: reduzierte Trägerlänge T5

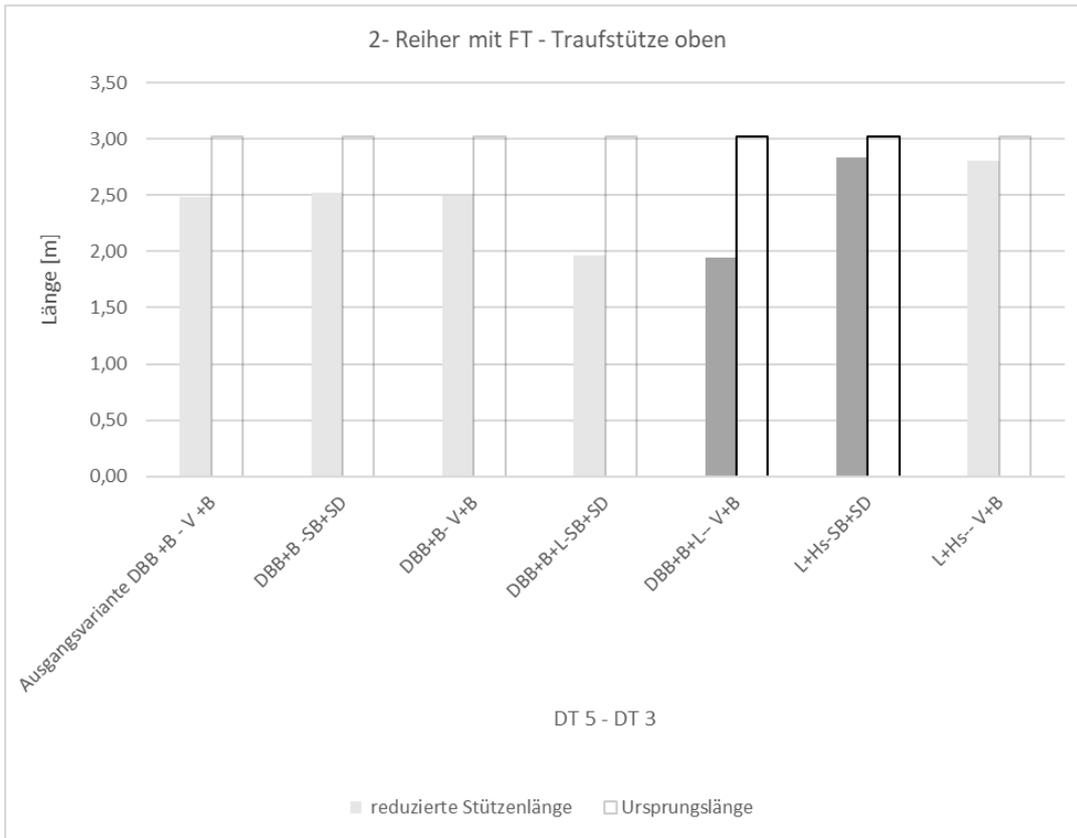


Abbildung 32: 2-Reiher, «kleine» Halle – Traufstütze oben: reduzierte Stützenlänge Traufstütze oben

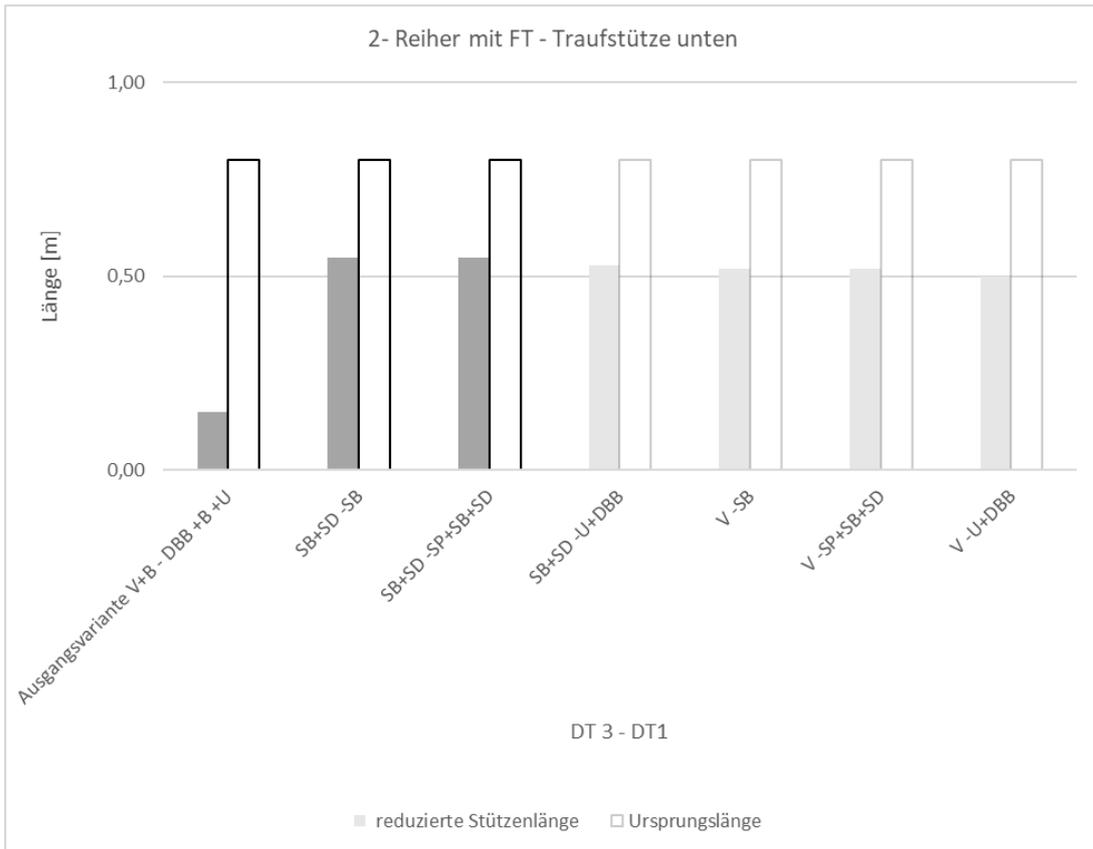


Abbildung 33: 2-Reiher, «kleine» Halle – Traufstütze unten: reduzierte Stützenlänge Traufstütze unten

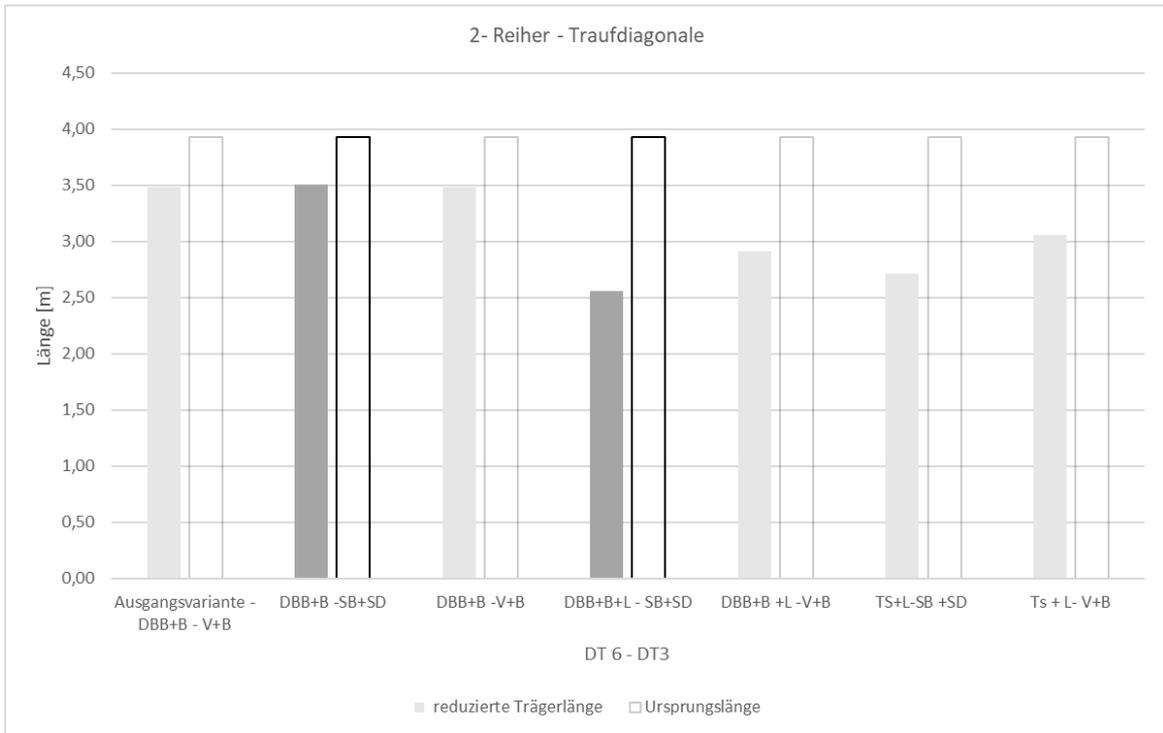


Abbildung 34: 2-Reiher, «kleine» Halle – Traufdiagonale: reduzierte Trägerlänge Traufdiagonale

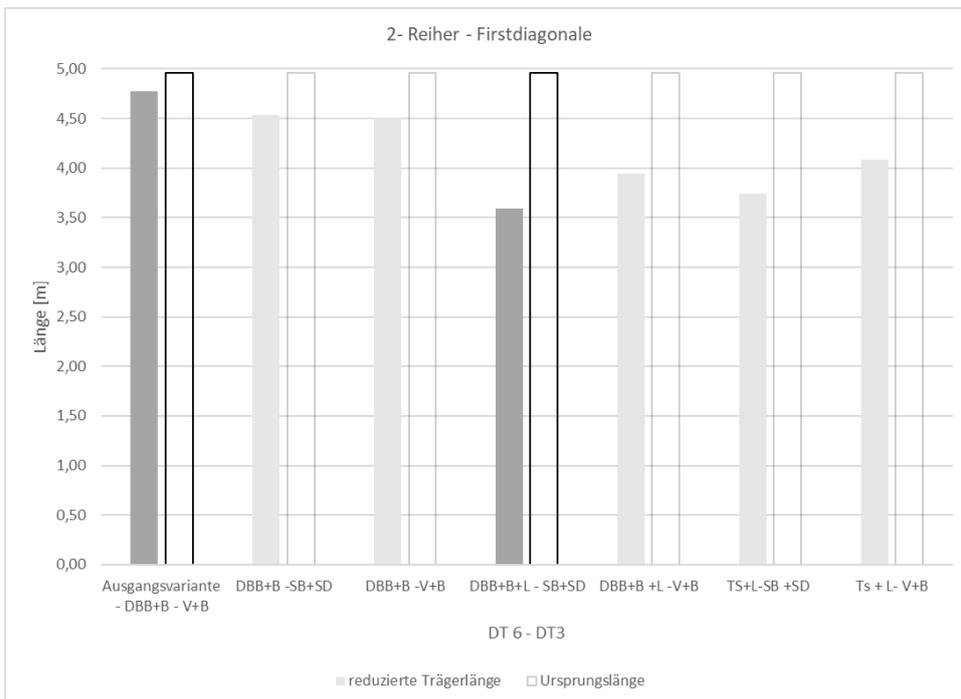


Abbildung 35: 2-Reiher, «kleine» Halle – Firstdiagonale: reduzierte Trägerlänge Firstdiagonale

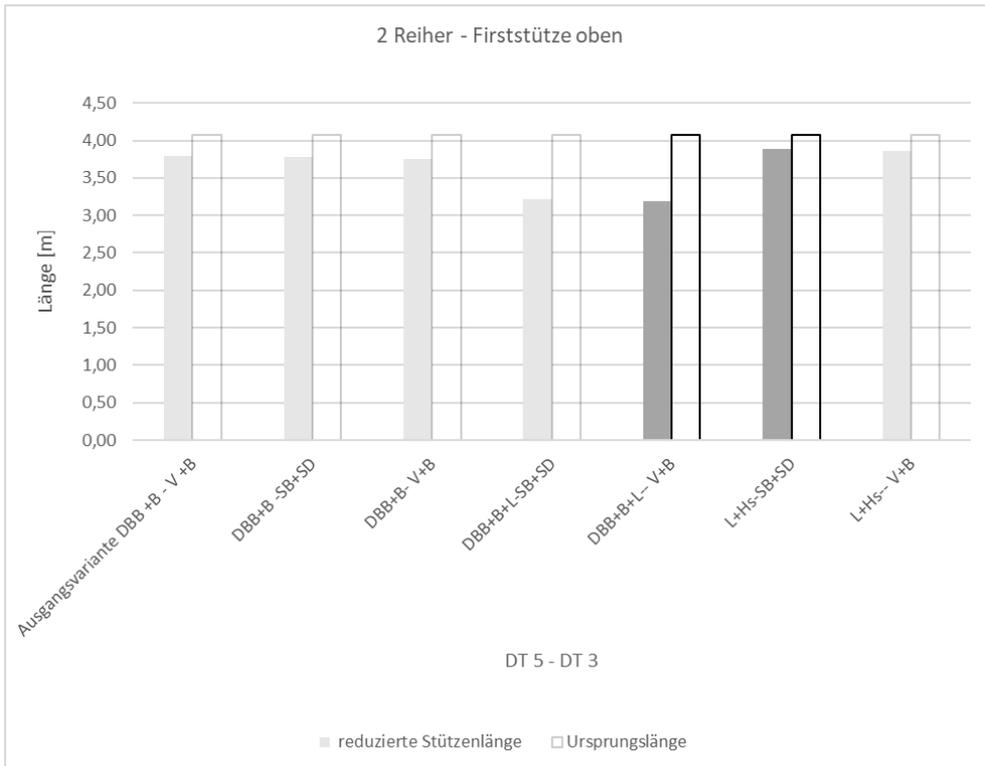


Abbildung 36: 2-Reiher, «kleine» Halle – Firststütze oben: reduzierte Stützenlänge Firststütze oben

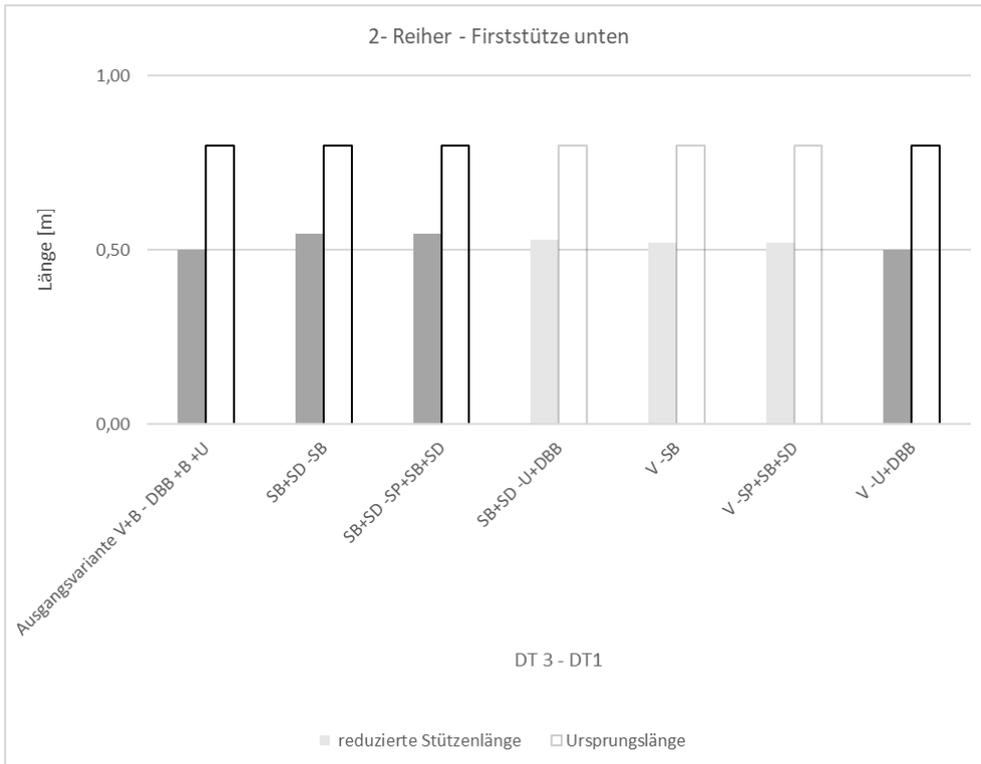


Abbildung 37: 2-Reiher, «kleine» Halle – Firststütze unten: reduzierte Stützenlänge Firststütze unten

Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen Bauen mit Holz - von der Planung bis zum Rückbau (ZukunftLaWiBau)

Schlussbericht über o.g. Forschungsvorhaben
gefördert unter dem Kennzeichen: 2220HV036
im Rahmen „Landwirtschaftliches Bauen mit Holz“ des Förderprogramms „Nachwach-
sende Rohstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)

TEIL D: LCA Gebäude

Ruhr-Universität Bochum
Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ressourceneffizientes Bauen

Projektbearbeitung:

Prof. Dr.-Ing. Annette Hafner, Projektleitung (RUB)
Carina Hartmann (RUB)
Dr.-Ing. Özlem Özdemir (RUB)

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungsverzeichnis	3
TEIL D: LCA Gebäude	4
1 Einleitung	4
2 Ökobilanzierung von Gebäuden	5
2.1 Vorgehen und Methodik.....	7
2.2 Funktionale Äquivalent für Ökobilanzvergleich	7
2.3 Gebäudeauswahl.....	8
2.4 Rahmenbedingungen der Gebäudeökobilanzierung	10
2.4.1 Systemgrenzen.....	10
2.4.2 Abschneidekriterien	14
2.4.3 Funktionale Einheit	14
2.4.4 Verwendete Hintergrunddatenbank: Ökobau.dat	15
2.4.5 Gebäudemodellierung	16
2.4.6 Allokationen.....	19
2.4.7 Definition Bereich wiederverwertbarer Bauteile zur Ermittlung der Recyclingmengen- und Potenziale.....	19
3 Ergebnisse	20
3.1 Auswertung nach Einzelbauteilen	20
3.1.1 Kleine Spannweite.....	21
3.1.2 Große Spannweite.....	25
3.1.3 Sonderauswertungen	29
3.2 Auswertung auf Gebäudeebene	35
3.2.1 Substitutionspotenzial allgemein.....	35
3.2.2 THG-Minderung kleine Spannweite	35
3.2.3 THG-Minderung große Spannweite	36
3.3 Allgemeine Ergebnisse	37
4 Ergänzungen zu Teil C (Design for Reuse)	38
4.1 Definition Bereich wiederverwertbarer Bauteile zur Ermittlung der Recyclingmengen- und potenziale.....	38
Abbildungsverzeichnis	39
Tabellenverzeichnis	40
Quellenverzeichnis	41

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BGF	Bruttogeschossfläche
THG	Treibhausgas
PENRT	Primary Energy Non-Renewable
LCA	Life Cycle Assessments
GEG	Gebäude Energie Gesetz
BBSR	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
BMI	Bundesministeriums des Innern und für Heimat
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen

TEIL D: LCA GEBÄUDE

1 EINLEITUNG

Im Projekt THG-Holzbau (Hafner et al. 2017, Hafner and Schäfer 2017) und dem Projekt HolzImBauDat (Hafner and Özdemir 2022) wurden normkonforme THG-Minderungspotenziale auf Gebäudeebene für unterschiedliche Gebäude ermittelt. Die Analysen der verschiedenen Systemelemente sind mehrfach extern begutachtet worden. Die Grundlagen hierbei bilden die DIN EN 15978 und die unter Berücksichtigung der Ökobau.dat bestimmten Bewertungen von einzelnen Gebäuden, gegliedert nach den einzelnen Modulen.

Dieses Projekt analysiert das Segment «landwirtschaftliche Gebäude» genauer. Hierzu wird auf der einer Bauteilebene ganz strukturiert jede Veränderung durch geänderte Materialwahl bei den Bauteilen ermittelt, um der Frage nachzugehen, mit welchem Bauteil die größten Minderungspotenziale umgesetzt werden können, und was dies für die Planung bedeutet. Dabei wurde an einem Hallentyp für Milchviehhaltung zwei Gebäudearten unterschieden: einerseits eine Halle mit großer Spannweite – stützenfreien Hallen, oder Hallen mit einer großen Tragweite zwischen den Stützen – und andererseits Halle mit kleiner Spannweite, die dann eine Nutzung von regional / lokal verfügbarem Holz einfacher ermöglichen könnte. Diese Daten erweitern die Datenbasis des Lehrstuhles zu den entsprechenden Segmenten.

Eine übergreifende Nutzung der Daten zur Evaluierung zukünftiger Auswirkungen und Potenziale der stofflichen Holznutzung und deren Einbezug in die nationalen Berechnungen wurde durch das Thünen Institut für Holzforschung vorgenommen. Deshalb wird für eine nationale Einordnung des Themas, das hier auf Gebäudeebene dargestellt wird, auf das Thünen Workingpaper 214: Abschätzung von Substitutionspotenzialen der Holznutzung und ihre Bedeutung im Kontext der Treibhausgas-Berichterstattung (Rüter 2023) verwiesen. Hier sind die einzelnen Effekte, die durch eine Beeinflussung auf Gebäudeebene entstehen können, in ihren komplexen Zusammenhängen dargestellt.

« Die mit der Nutzung des nachwachsenden Rohstoffs Holz verbundenen Treibhaus- (THG)-Emissionen lassen sich in drei Wirkmechanismen untergliedern. Zum einen in die biogenen CO₂-Emissionen und ihre Einbindung in den beiden Kohlenstoffspeichern „Wald“ und „Holzprodukte“ als Bestandteil des biogenen Kohlenstoffzyklus. Zum anderen in die übrigen THG-Emissionen der Holzverarbeitenden Industrie als Teil des produzierenden Gewerbes als drittes Element. Die Quantifizierung dieser Effekte erfolgt mittels verschiedener Berechnungsmethoden auf unterschiedlichen Skalenebenen mit zumeist unterschiedlichen Systemgrenzen (Land- bzw. Produktsystem) und betrifft zeitlich und räumlich voneinander abweichende Dimensionen (retro- und prospektive Effekte). Für eine fundierte und umfassende Abschätzung der Klimarelevanz des Forst- und Holzsektors müssen immer alle Effekte konsistent berücksichtigt werden. Dies gilt auch bei der Abschätzung möglicher THG-Minderungseffekte (Substitutionspotenziale) die mit der Verwendung von Holz verbunden sind. [...] Da die nicht-biogenen THG-Emissionen der Holzverarbeitenden Industrie nicht mit vom Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, Abk. IPCC) bereitgestellten Metho-

den ermittelt werden können, müssen andere Methoden angewandt werden. Die in internationalen Standards genormte Ökobilanzmethode bietet hierfür eine rechnerische Grundlage. [...] Die komplexen Zusammenhänge des biogenen Kohlenstoffzyklus der Forst- und Holz-kette [auf nationaler Ebene] können für holzbasierte Produkte in zeitlich dimensionslosen Produktökobilanzen methodisch bedingt nicht plausibel quantifiziert und abgebildet werden. Daher müssen für eine fundierte Abschätzung möglicher THG-Substitutionspotenziale durch die Verwendung von Holz [auf nationaler Ebene] mehrere Datenquellen im Einklang mit den jeweils geltenden methodischen Anforderungen (IPCC und int. Normen) konsistent miteinander kombiniert werden.» (Rüter 2023, Seite 3)

Es wird darauf hingewiesen, dass biogener Kohlenstoffspeicherung in den Konstruktionen, durch die stoffliche Nutzung auf Gebäudeebene ein Nullsumme ist (-1/+1 Approach nach DIN EN 15978), da der biogene Kohlenstoff eingebucht und am Ende des Lebenszyklus wieder ausgebucht werden muss (DIN EN 15978:2012, DIN EN 16485). Der biogene Kohlenstoffgehalt ist demnach eine materialinhärente Eigenschaft von Holz, die erst auf nationaler Ebene über die Änderung des definierten Kohlenstoffspeichers in Holzprodukten abgeschätzt werden und seit dem Jahr 2016 in der Quellgruppe LULUCF zu verbuchen sind (UNFCCC 2014).

Auf der Gebäudeebene (und damit der direkt zu beeinflussenden Ebene) ist es für eine Erhöhung der Holzverwendung in landwirtschaftlichen Gebäuden wichtig zu wissen, wie sich die Klimaschutzleistung durch diese Gebäude ändert, wenn einzelne statisch-konstruktive Bauteile in anderen Baustoffen erfolgen (z.B. Stütze in Stahlbeton / Stahl), um in der Dauerhaftigkeit des Gebäudes konstruktive und / oder wirtschaftliche Vorteile zu erzielen. Deshalb wurden die Ergebnisse in Kapitel 3 nach Bauteilen unterschieden dargestellt.

2 ÖKOBILANZIERUNG VON GEBÄUDEN

Gemäß der Normen (DIN EN ISO 14040:2021) und (DIN EN ISO 14044:2021) stellt eine Ökobilanz die „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ dar (DIN EN ISO 14040:2021). Dabei untergliedert die Norm eine Ökobilanz in vier Phasen, deren Erarbeitung iterativ erfolgt (DIN EN ISO 14044:2021).

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanzerstellung
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Mit der (DIN EN 15978:2012) wurde die Ökobilanzierung für Gebäude/Bauwerke spezifiziert und eine harmonisierte Methodik bereitgestellt. Danach sind die Ökobilanzinfor-

mationen in die Lebenszyklusabschnitte von Gebäuden und den darin verbauten Materialien zu untergliedern, womit spezifiziert wird, inwieweit und zu welchem Zeitpunkt mit bestimmten Auswirkungen durch die Nutzung von Gebäuden bzw. den darin enthaltenen Bauprodukten überhaupt zu rechnen ist (vgl. Rüter 2012). Eine Übersicht über die nach DIN EN 15978:2012 zu untergliedernden Lebenszyklusabschnitte, die im Folgenden auch Module genannt werden, ist in Abbildung 1 dargestellt. So untergliedern die Informationsmodule A1 – C4 alle anfallenden Umweltauswirkungen und –aspekte ab, die im System Bauwerk anfallen. In der Herstellungsphase A1 – A3 werden die Auswirkungen behandelt, die sich durch die Rohstoffgewinnung (A1) über den Transport der Baustoffe (A2) bis zur Herstellung (A3) eines Baumaterials ergeben. Die Errichtungsphase umfasst die Submodule Transport (A4) und Errichtung (A5) und stellt die Umweltauswirkungen der Prozesse dar, die bis zur Übergabe eines Bauwerks anfallen. In der Nutzungsphase B1 – B5 werden die Umweltauswirkungen abgebildet, die durch das bestehende Bauwerk verursacht werden. Das Submodul Energieverbrauch im Betrieb (B6) und weitere Betriebsprozesse (B7) spiegeln den anfallenden Energie- und Wasserverbrauch während des Betriebes des Bauwerks und der Grundstücksfläche wider. In der Entsorgungsphase C wird der Rückbau (C1), der Transport (C2), die Abfallbehandlung (C3) und die Entsorgung (C4) betrachtet. Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenzen wie z. B. Recycling von Baumaterial, Energierückgewinnung oder Umweltauswirkungen, die vermieden worden sind, werden in Modul D zusammengefasst (vgl. Abbildung 1). (DIN EN 15978:2012)

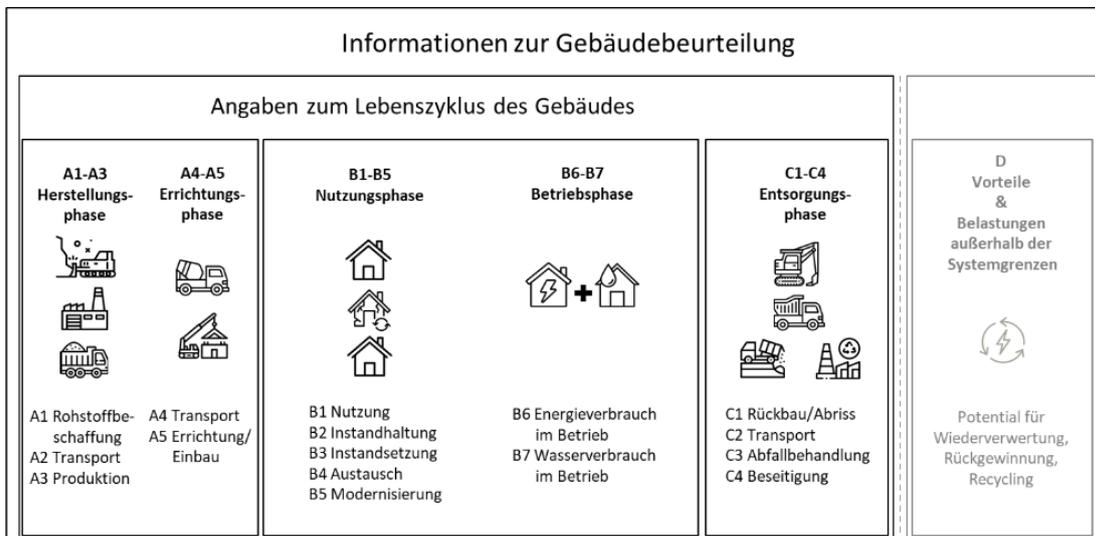


Abbildung 1: Einteilung der Lebenszyklusinformation in Module nach DIN EN 15978:2012 (Lehrstuhl Ressourceneffizientes Bauen (Reb) 2023a)

2.1 Vorgehen und Methodik

Die Gebäudeökobilanzen stellen die Eingangsdaten für die Berechnung von Treibhausgasminderungspotenzial in [kg CO₂ äq] auf Gebäudeebene bereit. Für eine Durchführung eines ökobilanziellen Vergleichs unterschiedlicher Gebäudeausführungen sind Vergleichsberechnungen auf Basis jeweils gerechneter Gebäudeökobilanzen erforderlich. Der ökobilanzielle Vergleich der Gebäude bzw. Konstruktionsunterschiede erfolgte nach der Normenreihe für Ökobilanzen (DIN EN ISO 14040:2021) und (DIN EN ISO 14044:2021), sowie nach der Norm (DIN EN 15978:2012), die die Berechnungsmethode für die Gebäudeökobilanzierung vorgibt. Auf Bauprodukteebene sind die Normen (DIN EN 15804:2022) sowie (DIN EN 16485) berücksichtigt. Das Vorgehen orientiert sich an der Methodik die bereits in «THG-Holzbau: Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanz und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren» und «HolzImBauDat: Datenbasis zur Bewertung einer nachhaltigen und effizienten Holzverwendung im deutschen Bausektor» angewandt und ein critical review Verfahren nach CEN ISO/TS (DIN CEN ISO/TS 14071:2016) durchlaufen haben.

Zur Durchführung des Ökobilanzvergleichs wird zunächst ein funktionales Äquivalent definiert. Gegenübergestellt werden die Originalbauteile (überwiegend Holz) in einem Gebäude und mineralische Bauteile (Stahl, Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton oder Stahlbeton) eingebaut in ein funktional gleichwertiges Gebäude. Verglichen wird anschließend der Indikator Treibhauspotenzial, um daraus die möglichen THG-Einsparpotenziale in [kg CO₂ äq.] die durch den Einsatz von Holzgebäuden anstelle mineralischer Gebäude erzielt werden können, zu ermitteln.

2.2 Funktionale Äquivalent für Ökobilanzvergleich

Nach (DIN EN 15978:2012) beschreibt das funktionale Äquivalent die quantifizierten funktionalen Anforderungen und/oder technischen Anforderungen an ein Gebäude oder ein zusammengesetztes Bauteil (Bauwerksteil), die als Grundlage für Vergleiche dient. Bei diesem Ökobilanzvergleich bezieht sich das funktionale Äquivalent auf das gesamte Gebäude, unterschieden werden einzelne Konstruktionselemente.

Für den ökobilanziellen Vergleich werden die einzelne Konstruktionselemente des Holzgebäudes funktionalen äquivalenten mineralischen Konstruktionselemente gegenübergestellt, der Vergleich muss aber immer auf der Grundlage eines Gesamtgebäudes gerechnet werden.

Es hat sich schon in vorherigen Studien gezeigt das zwischen mineralischen Gebäuden in den ausführungsvarianten Stahlbeton, Ziegel (Hochlochziegel, gedämmter Planziegel), sonstiger Mauerstein (Kalksandstein, Porenbeton) Unterschiede in den Ergebnissen der ökologischen Bewertung vorliegen (Hafner and Özdemir 2022, Hafner et al. 2017).

Das funktionale Äquivalent stellt jeweils die Erfüllung der technischen und funktionalen Mindestanforderungen dar. Grundsätzlich erfüllen alle berechneten Gebäude als funktionale Qualität die Mindestanforderung der Einhaltung gesetzlicher Anforderungen und den Stand der Technik. Die Gebäude erfüllen die Anforderungen an Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit der Konstruktion, und genauso die Widerstandsfähigkeit. Die betrachteten landwirtschaftlichen Bauwerke fallen nicht in den Geltungsbereich der Nutzungspflicht des GEGs. Es bestehen keine Anforderungen an den Schallschutz für Luft- und Trittschallschutz nach DIN (4109-1). Es werden keine technischen Gebäudeausrüstungen, wie z. B. Melkmaschine, berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Bauwerke an der Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen (AwSV 2017) und DWA-Regelwerk A 792- Technische Regel wassergefährdender Stoffe (TRwS) - Jauche-, Gülle- und Silagesickersaftanlagen (JGS-Anlagen) erfüllen.

2.3 Gebäudeauswahl

Als Gebäude wurden zwei repräsentative landwirtschaftliche Bauwerke gewählt die standardmässig gebaut wurden und werden. Die Gebäude werden in großer und kleiner Spannweite unterschieden. In anderen Teilen des Schlussberichtes wird vereinfacht die Bezeichnungen «kleine Halle» und «große Halle» verwendet. In Tabelle 1 sind die spezifischen Merkmale und die Bauteile der repräsentativen landwirtschaftlichen Bauwerke aufgeführt.

Die Daten sind von der Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) zur Verfügung gestellt worden. Es handelt sich jeweils um eine Hallentragwerk für einen Milchviehstall. Für jedes repräsentative Gebäude in «Original» wurden bis zu sechs Varianten erstellt in denen einzelne Bauteilkomponenten betrachtet werden.

Tabelle 1: Bauteilliste der repräsentativen landwirtschaftlichen Bauwerke

	Bauwerk mit kleiner Spannweite	Bauwerk mit großer Spannweite
Spannweite [m]	24,6 (8,60; 4,60; 5,20; 6,20)	25
Gesamtlänge [m]	68	45,50
Fläche Bodenplatte	1673 m ²	1138 m ²
Bodenplatte	Stahlbeton	Stahlbeton
Tragwerk (Stützen)	Konstruktionsvollholz	Brettschichtholz
Dachkonstruktion	Konstruktionsvollholz	Brettschichtholz
Tore	Holz	Holz
Fassade	Holz	Holz
Dachbelag	Faserzement	Trapezblech

Die repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäude werden in Abbildung 2, Abbildung 3, Abbildung 4 und Abbildung 5 und dargestellt.



Abbildung 2: 3D-Ansicht des repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäudes mit kleiner Spannweite bestehend aus 2-Reiher Liegehalle + 1 Reiher Liegehalle mit integriertem Futtertisch und Pultdachhalle (Spannweiten: 22,6 Meter (Spannweiten: 6,6 Meter (2-Reiher) + 5,20 und 6,20 Meter (1-Reiher))

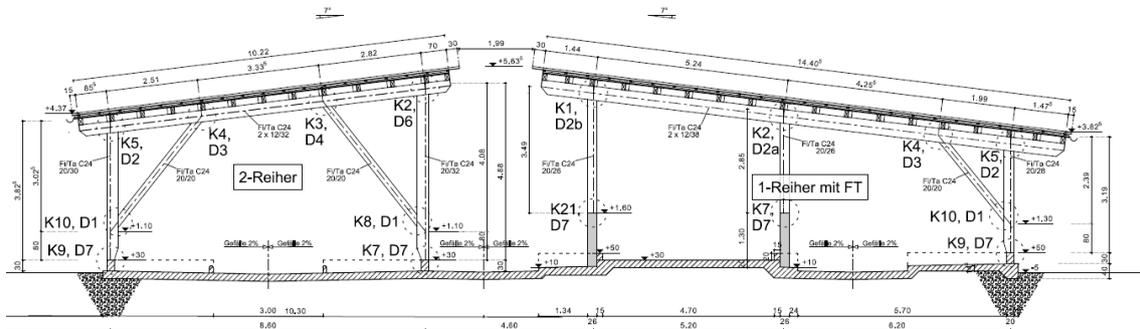


Abbildung 3: Querschnitt des repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäudes mit kleiner Spannweite bestehend aus 2-Reiher Liegehalle + 1 Reiher Liegehalle mit integriertem Futtertisch und Pultdachhalle (Spannweiten: 22,6 Meter (Spannweiten: 6,6 Meter (2-Reiher) + 5,20 und 6,20 Meter (1-Reiher))

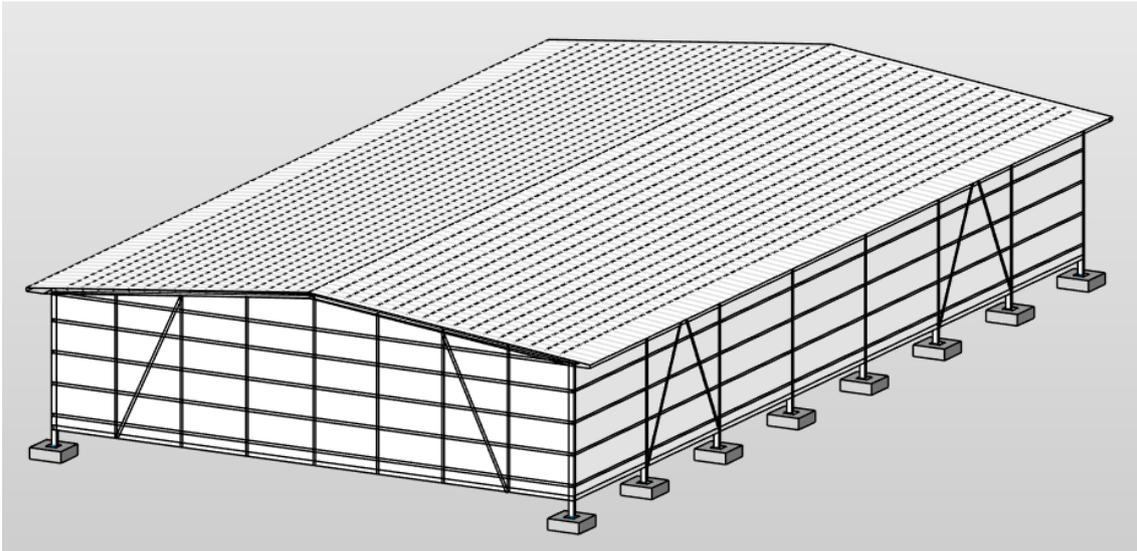


Abbildung 4: 3D-Ansicht des repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäudes mit großer Spannweite (Spannweite: 25 Meter)

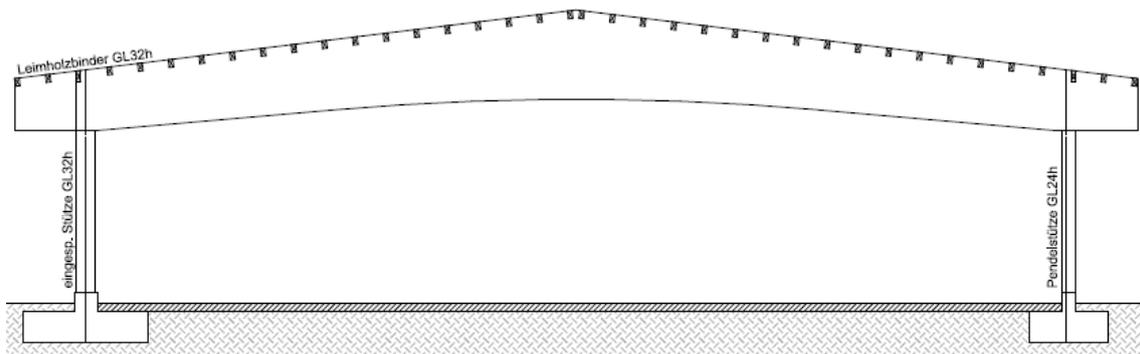


Abbildung 5: Querschnitt des repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäudes mit großer Spannweite (Spannweite: 25 Meter)

2.4 Rahmenbedingungen der Gebäudeökobilanzierung

2.4.1 Systemgrenzen

Betrachtete Module

Die Betrachtung des Lebenszyklus der Gebäude erfolgt gemäß der Zielsetzung nach dem Cradle-to-gate with options (von der Wiege bis zum Werkstor mit Optionen) Prinzip (DIN EN 15804:2022). Für die Gebäudebewertung werden die Normen DIN EN 15978:2012 *Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden* sowie auf Bauprodukteebene die DIN EN 15804:2022 zugrunde gelegt, siehe Abbildung 6.

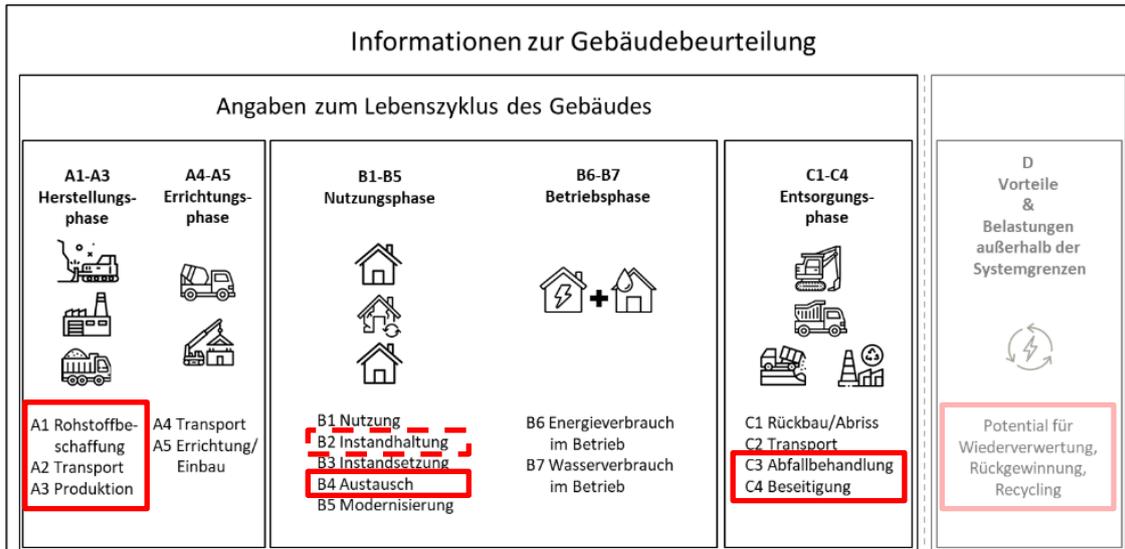


Abbildung 6: Modulare Struktur der umweltbezogenen Informationen über den Lebenszyklus eines Gebäudes nach DIN EN 15978:2012. Die rot umrandeten Module werden im Rahmen des Projekts bilanziert, wobei Modul D separat ausgewiesen wird (Lehrstuhl Ressourceneffizientes Bauen (Reb) 2023b)

Die Berechnungen orientieren sich an den Berechnungen der Ökobilanzen im Rahmen der Nachhaltigkeitszertifizierung für Gebäude nach dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) und Nachhaltiger Wohnungsbau (NaWoh) (Bundesministerium für Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2012, Verein zur Förderung der Nachhaltigkeit im Wohnungsbau e.V. (NaWoh 2019)) bzw. an den seit 2021 bestehenden Regelungen zum QNG, wobei der betriebliche Teil B6 und der Einbezug von Nutzerstrom nicht einbezogen wurde.

In der Gebäudebewertung werden innerhalb der Systemgrenze die Module A1-A3 (Herstellung), Modul B2 (Schutzanstriche) und B4 (Austausch, Ersatz) und die Module C3-C4 (Abfallbewirtschaftung und Entsorgung) berücksichtigt. Modul D (Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze) wird als Informationsmodul separat ausgewiesen. Dabei decken die Module A1-A3 die Prozesse „von der Wiege bis zum Verlassen des Werksgeländes“ für die beim Bau verwendeten Materialien und Dienstleistungen ab. Dies umfasst die Rohstoffgewinnung und –verarbeitung der benötigten Materialien (A1), den Transport der in Modul A1 erfassten Materialien bis zum Werkstor und interne Transporte (A2) sowie die Herstellung von Hilfs- und Betriebsstoffen, Vor-Produkten und Produkten (Baustoffe) (A3). Somit werden in Modul A2 die Transportwege vom Gewinnungsort des Rohstoffs (z.B. Holzimport aus Finnland oder Rohstoffe für Zement aus nahegelegenen Steinbruch) bis zum jeweils verarbeitenden Werk berücksichtigt. Verpackungsmaterialien der Baustoffe werden nicht betrachtet, da angenommen wird, dass diese für jede Konstruktionsart ähnlich sind und massenmäßig nur einen geringen Anteil ausmachen. Auch die Studie von Kellenberger und Althaus (Kellenberger and Althaus 2009) hat deutlich gemacht, dass die Aufwendungen für Logistik und Baustellenpro-

zesse einen geringeren Einfluss auf das Ergebnis der Gebäudebilanzierung haben, dagegen die Erfassungstiefe aller Bauteile mit allen erforderlichen Nebenleistungen (z.B. Schrauben, Folien, Fußbodenleisten, Kleber) eine wesentliche Bedeutung für das Gesamtergebnis mit sich bringt. Die Erfassungstiefe der Gebäudebestandteile durch die kostenbasierte Elementmethode in der verwendeten Ökobilanzsoftware LEGEP gewährleistet eine hohe Erfassungstiefe inklusive aller Nebenleistungen aller Bauteile. Anfallender Verschnitt im Werk ist in den Datensätzen der zugrundeliegenden Ökobilanzdatenbank des BBSR (Ökobau.dat) integriert und wird in A3 zur thermischen Holz Trocknung eingesetzt. Modul B2 beinhaltet nach DIN EN 15804:2022 die Inspektion, Wartung und Reinigung eines in ein Gebäude, Bauwerk oder Bauteil eingebauten Produktes. Phase B2 "Reinigung" wird bisher in den verfügbaren Datenbanken nicht mit Daten ausgestattet. Davon sind üblicherweise Fenster, Türen, Bodenflächen und Sanitärgegenstände betroffen. Diese sind in den Gebäuden nahezu identisch. Ökobilanzen von Reinigungsmitteln sind nicht in der Ökobau.dat enthalten. Ebenso fehlt ein Ökobilanzmodul für Abwasser. Inspektionen in Form von Schutzanstrichen werden gemäß den Instandsetzungszyklen der Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“ des BBSR (Bundesministerium für Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2017b) berücksichtigt. Es werden deshalb aus dem Modul B2 die Schutzanstriche, vornehmlich von Holzbauteilen, mit bilanziert und im Modul B mit ausgewiesen. In Modul B4 wird der Austausch und Ersatz eines Bauteils, um es während seiner Nutzungsphase in den Zustand zurückzusetzen in dem sowohl seine erforderliche funktionale und technische als auch seine ästhetische Qualität wiederhergestellt ist, beschrieben. Die Nutzungsdauern bzw. Nutzungszyklen der Bauteile werden ebenfalls nach der Nutzungsdauer Tabelle des BBSR berechnet. Der Betrachtungszeitraum beträgt 50 Jahre. Muss ein Bauteil erst im 48. Jahr oder später ausgetauscht werden, wird es nicht ausgetauscht. Dies umfasst die Herstellung der Austauschprodukte und Hilfsprodukte sowie die Entsorgungsprozesse der ausgetauschten Produkte und Hilfsprodukte. Modul B2 und B4 wird gemeinsam ausgewertet, da nicht eindeutig zwischen den Begriffen Inspektion und Austausch unterschieden werden kann. In der Entsorgungsphase (Modul C) werden die Abfallbehandlung zur Wiederverwendung, Rückgewinnung und/oder zum Recycling (C3) sowie die Abfallbeseitigung (C4) berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass die Recyclingfähigkeit aller Materialien gegeben ist und diese nach den Verwertungsvorschriften getrennt werden. Die Szenarien für C3 und C4 werden, wenn keine spezifischen Angaben vorliegen, entsprechend den Abfallschlüsseln des Kreislaufwirtschaftsgesetzes für die Produkte zugeordnet und mit generischen Datensätzen für die Prozesse berechnet. Die Entsorgungsregeln der Zertifizierungssysteme (DGNB/BNB) für die Gestaltung der End-of-Life Phase (EoL) beinhalten folgende Regeln:

In die Berechnung der Ökobilanzergebnisse des EoL- Szenarios des Gebäudes sind Verwertung und Entsorgung für alle in der Herstellungsphase gelisteten Materialien/Baustoffe einzubeziehen. Folgende Materialgruppen sind in den Berechnungen und Auswertungen nach Szenarienvorgaben des DGNB und BNB zu unterscheiden:

- 1) Metalle zur Verwertung
- 2) Mineralische Baustoffe zur Verwertung (z.B. Beton)
- 3) Materialien mit einem Heizwert zur thermischen Verwertung (z. B. Holz, Kunststoffe etc.)
- 4) Materialien, die nur auf Deponien abgelagert werden (Glas, Mineralwolle, Bitumenbahnen, Gipskartonplatten, etc.),

Für 1) gilt: Es ist der Entsorgungsweg „Recycling/Verwertung“ zu wählen. Hierzu sind EoL-Datensätze mit dem Modul C3 für die jeweiligen Metalle zu wählen. Liegt kein eindeutig passender Datensatz vor, so ist ein naheliegender Datensatz zu wählen.

Für 2) gilt: Es ist der Entsorgungsweg „Recycling/Verwertung“ zu wählen. Hierzu ist für die nachweislich mineralischen Baustoffe (zum Beispiel Beton, der als Unterbeton für Bodenplatten oder im Straßenbau eingesetzt wird) der Prozess „Bauschutttaufbereitung“ zu wählen.

Für 3) gilt: Es ist der Entsorgungsweg „Thermische Verwertung“ zu wählen. Die Datensätze sind mit den entsprechenden Datensätzen für thermische Verwertung abzubilden. Die Dokumentation erfolgt in Modul C3 (falls thermische Verwertung mit Energiegewinnung angewendet werden kann) oder in Modul C4 (falls thermische Verwertung ohne Energiegewinnung vorliegt) entsprechend der Definition im Datensatz.

Für 4) gilt: Es ist der Entsorgungsweg „Entsorgung auf Deponie“ zu wählen, sofern für die Materialien kein anderer Verwertungsweg als Ablagerung auf Deponien realistisch ist. (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) 2015)

Materialien mit Risikostoffen z.B. Holz und Holzwerkstoffe mit biozider Ausrüstung werden innerhalb dieser Systeme nicht erfasst. Es wird davon ausgegangen, dass entsprechend der DIN 68800 grundsätzlich biozidfreie Konstruktionen eingesetzt werden entweder durch den Konstruktionsaufbau oder die Wahl von Holz einer höheren Resistenzklasse. Die Systemgrenze nach der Entsorgung wird dort gezogen, wo die Outputs, d.h. Sekundärstoffe oder -brennstoffe, das Ende ihrer Abfalleigenschaft erreichen. Die aus den Sekundärstoffen und -brennstoffen durch Wiederverwendung, Recycling (stofflich oder thermisch) und Energierückgewinnung verursachten Umweltvorteile oder -belastungen werden Modul D außerhalb der Systemgrenze zugeordnet.

Nicht berücksichtigt werden gemäß den Rechenregeln des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen (BNB) die Module A4 (Transport vom Fertigungswerk zur Baustelle), A5 (Errichtung/Einbau), B1 (Nutzung), B2 (Instandhaltung)¹, B3 (Instandsetzung, Reparatur), B5 (Modernisierung), B7 (betrieblicher Wassereinsatz) C1 (Rückbau/Abriss) und C2 (Transport zur Abfallbehandlung/Beseitigung) (BMUB 2012). Die Nichtberücksichtigung

¹ B2 wird anteilig nicht berücksichtigt (Reinigung). Schutzanstriche werden berücksichtigt.

ist auf den Datenmangel in der Ökobau.dat für die genannten Module zurückzuführen. Modul A4/A5 bspw. ist in der Ökobau.dat in einigen Produkten in anderen aber nicht.

Der Betrachtungszeitraum für die Ökobilanz liegt bei 50 Jahren (Bundesministerium für Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2017b). Vorhergehende Forschungsarbeiten (Hafner et al. 2016) zeigen, dass eine Verlängerung des Betrachtungszeitraums keinen Einfluss auf die Module A und C eines Gebäudes hat. Die wesentlichen Unterschiede kommen in Modul B durch höhere Austauschzyklen der Bauteile, die sich zwangsläufig ergeben, zustande. Auf der Basis gleicher Betriebsnutzungskennzahlen verhalten sich die Gebäude in der verlängerten Nutzungsphase ähnlich. Bei einer Verdoppelung des Betrachtungszeitraums sind davon vor allem betroffen: die Fassadenbeschichtungen mit Austauschzyklen zwischen 8 und 15 Jahren.

2.4.2 Abschneidekriterien

Die Abschneidekriterien werden in der verwendeten Datenbasis (Ökobau.dat 2020-II) festgelegt. Es wird davon ausgegangen, dass für einen Einheitsprozess die Abschneidekriterien von 1 % des erneuerbaren und des nicht erneuerbaren Einsatzes von Primärenergie und 1 % der Gesamtmasse dieses Einheitsprozesses eingehalten werden. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die vernachlässigten Input-Flüsse je Modul höchstens 5 % des Energie- und Masseinsatzes betragen. Alle bekannten In- und Outputflüsse der betrachteten Module werden in die Sachbilanz aufgenommen. Bei den hier untersuchten Gebäuden ist aufgrund des Detaillierungsgrades der Gebäudebeschreibung davon auszugehen, dass der vernachlässigte Input bei höchstens 1 % liegt.

2.4.3 Funktionale Einheit

Nach DIN EN ISO 14044:2021 beschreibt die funktionale Einheit den quantifizierten Nutzen eines Produktsystems für die Verwendung als Vergleichseinheit. In dieser Studie ist die funktionale Einheit die Bereitstellung von 1 m² Bruttogrundfläche (BGF) bzw. 1 m³ Bruttorauminhalt (BRI) des Produktsystems „Gebäude“ über den Gebäudelebenszyklus von 50 Jahren. Das Produktsystem „Gebäude“ wurde in Kapitel 2.4.1 Systemgrenzen definiert. Die zu vergleichenden Gebäude sind funktional äquivalent und erfüllen die definierten Qualitätsmerkmale (vgl. Kapitel 2.2).

Inbegriffen sind hierbei nach DIN EN 15804:2022 die Module A1-A3, B2 (teilweise), B4 und C3-C4. Modul D wird separat ausgewiesen. Die Berechnungen erfolgen auf Gebäudeebene; anschließend werden die Ergebnisse auf 1 m² BGF bzw. 1 m³ BRI bezogen.

2.4.4 Verwendete Hintergrunddatenbank: Ökobau.dat

Die Hintergrunddaten zur Erstellung der Sachbilanz werden der Ökobau.dat 2020-II des Bundes entnommen (Stand Januar 2020) (Bundesministerium für Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2020b). In der Datenbank enthalten sind DIN EN 15804:2022-konforme generische Datensätze (thinkstep) und EPD (Environmental Product Declaration)-Datensätze (unterteilt in repräsentative Datensätze von Industrieverbänden, durchschnittliche Datensätze von Industrieverbänden und Hersteller-spezifische Datensätze). Einige Datensätze enthalten die getrennte Ausweisung von Modul C (Entsorgung) und Modul D (Recyclingpotenzial), wie in DIN EN 15804:2022 und DIN EN 15978:2012 gefordert wird. Als Beispiele seien die Holz- und Holzwerkstoffdatensätze des Thünen Instituts (unter Nr. 3.1 – 3.3 der Ökobau.dat 2020-I) genannt oder die Datensätze Mauerziegel der Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der Deutschen Ziegelindustrie e.V. (unter Nr. 1.3.02). Die generischen und Verbands-Datensätze, z.B. 1.3.03 Porenbeton, 1.3.01 Kalksandstein oder 2.3.01 XPS-Dämmstoff weisen dagegen nur die Module A1–A3 auf. Werden keine Angaben zu Modul C und D bereitgestellt, werden diese Datensätze mit generischen Entsorgungsinformationen (generischer Datensatz) zur vollständigen Berechnung der Ökobilanz verknüpft. Die Materialliste, die als Anhang 3 «Materialliste und –zuordnung Ökobau.dat» hinzugefügt ist, enthält die Materialdatenbank der LEGEP Software mit den Verknüpfungen der Ökobau.dat Datensätzen. Zudem werden die wenigen Datensätze denen ein generischer EoL-Datensatz zugeordnet werden musste aufgeführt.

Umgang mit Rezyklat: In den zugeordneten generischen C und D Datensätzen der Ökobau.dat wird nur der Datensatz „Bewehrungsstahl“ explizit als Sekundärmaterialdatensatz geführt. Dieser Datensatz weist im Modul D keine Recyclingpotenzial-Gutschriften auf. Ein Datenfeld „Recyclingmaterialanteil“ ist in den Datensätzen der Ökobau.dat nicht vorgesehen. Information darüber können nur dem Fließtext im Datensatzinformationsfeld oder spezifischen EPD-Informationen entnommen werden.

Zeitliche, geographische und technologische Repräsentativität

Die verwendeten Datensätze der Ökobau.dat 2020-II sind nicht älter als 5 Jahre (Referenzjahre der Datensätze zwischen 2014 und 2019) und sind bis mindestens 2019 (max. 2024) gültig. Die geographische Repräsentativität der Ökobau.dat bezieht sich auf Deutschland. Die technologische Repräsentativität der Ökobau.dat wird vorausgesetzt. Eine detaillierte technische Beschreibung für jeden Datensatz liefert die Ökobau.dat auf dem Datenblatt der einzelnen Datensätze, abrufbar (als xml-Dateien) unter <https://www.oekobaudat.de/datenbank/archiv.html> (Bundesministerium für Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2020a).

2.4.5 Gebäudemodellierung

Zur Modellierung der Gebäude und Berechnung der Ökobilanzen wurde die Software LEGEP (Version 2.10.695; Stand Datenbank 01.11.2021) verwendet, die von der AS-CONA GbR entwickelt wird. Die Software ermöglicht auf der Basis eines Gebäudemodells die vollständige Bilanzierung von Objekten über den Lebenszyklus für den Energiebedarf, die Lebenszykluskosten und die Umwelteinträge. In LEGEP ist die sirAdos-Baudatenbank des WEKA Verlags mit z.Zt. über 3000 Bauteilen und über 5000 Schichten hinterlegt, auf die bei der Modellierung der Gebäude zugegriffen wird (sirAdos 2018).

Die Software LEGEP ist den aktuellen Normen DIN EN 15804:2022 und DIN EN 15978:2012 angepasst und die Ökobau.dat 2020-I ist als Datenquelle hinterlegt. Bei notwendigen Anpassungen ist zu unterscheiden zwischen programmbezogenen Korrekturen und der Erweiterung der Datenbank. Die Forderungen der DIN EN 15804:2022 und DIN EN 15978:2012 sind durch einen erheblichen Umbau der Programmarchitektur und der Datenverarbeitung umgesetzt.

Durch die Trennung der EoL-Phase in die Module C und D kann der Anwender eine Auswahl hinsichtlich unterschiedlicher EoL-Szenarien eines Projektes treffen. Da die DIN EN 15804:2022 dem Datenlieferanten es freistellt, alle Module (A – D) oder nur die Herstellungsphase (A1 – A3) zu bedienen, ist das Programm nun in der Lage, nicht vollständige Datensätze aus in der Datenbank vorgehaltenen generischen Datensätzen zu ergänzen. Dazu wurden alle Materialdatensätze mit der Nummerierung nach den europäischen Abfallklassen ausgestattet. Diese Abfallklassen sind mit dem der Abfallklasse entsprechenden generischen EoL-Datensatz der Ökobau.dat verknüpft und werden über LEGEP dem Ökobilanzierer zur Verfügung gestellt. Es werden nur bei den Datensätzen ohne Angaben des Datenlieferanten (EPD des Herstellers) zu C und D die entsprechenden Entsorgungsdatensätze der Ökobau.dat herangezogen. Letztere sind unter der Ordnungszahl 100.1 EOL abgelegt und umfassen folgende Datensätze: 1-Bauschutt, 2-Hausmüll, 3-Holz, 4-Metall, 6-Kunststoffe, 08-Gebäudetechnik. Hier wurden Verknüpfungen mit den Sachbilanzdatensätzen für Modul C (und D) aus der Ökobau.dat (wie dargestellt) hergestellt.

Die Datensätze der Ökobau.dat 2020-I wurden in LEGEP so hinzugefügt, dass alle Materialien, Leistungsbeschreibungen, Herstellungs- und Instandsetzungselemente mit der jeweiligen Datenquelle (Datensätze der Ökobau.dat) verknüpft wurden, um die Berechnung der Wirkungsindikatoren über den Lebenszyklus des Gebäudes durchführen zu können. Entsprechend der Regelung für Nichtwohnungsbauten im BNB-System und für Wohnungsbauten im NaWoh-System wird mit einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren gerechnet, was in diesem Fall der geforderten Nutzungsdauer des Gebäudes entspricht. Hier wurde auch für landwirtschaftliche Gebäude keine Ausnahme gemacht. Für die Festlegung der Austauschzyklen der Bauteile innerhalb des Betrachtungszeitraums

wird die Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“, Stand 24.02.2017 verwendet. (Bundesministerium für Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2017a)

Tabelle 2 zeigt die zu bilanzierenden Lebenszyklusphasen und deren Umsetzung in LEGEP sowie die Weiterverwendung der Daten aus LEGEP. Die Ökobilanzergebnisse werden modulweise ausgewiesen: Modul A (A1-A3), Modul B (B2 und B4), Modul C (C3 und C4) sowie Modul D.

Tabelle 2: Lebenszyklusphasen und Umsetzung LEGEP

Module nach DIN EN 15978:2012	Umsetzung in LEGEP			Export aus LEGEP und Auswertungsdatei
	Bezeichnung in LEGEP	Was ist enthalten?	Datenquelle	
Modul A1: Rohstoffbereitstellung	Neubau "Neu"	Modul A1-A3	Angaben in Datenblättern der Ökobau.dat 2020	Modul A1-A3 liegt bereits normkonform vor
Modul A2: Transport				
Modul A3: Herstellung				
Modul A4: Transport	entfällt, da dieses Modul außerhalb der festgelegten Systemgrenzen liegt (vgl. Kapitel 2.4.1)			
Modul A5: Errichtung	entfällt, da dieses Modul außerhalb der festgelegten Systemgrenzen liegt (vgl. Kapitel 2.4.1)			
Modul B2 und B4: Inspektion, Austausch/Ersatz	Instandsetzung "Ins"	Austausch der Materialien (anteilig berechnet aus Modul A1-A3 der Herstellung) inkl. Entsorgung der ausgetauschten Materialien (in der Auswertung unter Entsorgung zusammengefasst)	Austauschzyklen der Bauteile/ Materialien nach Tabelle „Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB)“ (Bundesministerium für Innern, für Bau und Heimat (BMI) 2017a)	Modul B2 und B4 werden normkonform umgerechnet, d.h. Entsorgung der Materialien aus Modul B findet in Modul B statt
Modul C1: Abbruch	entfällt, da dieses Modul außerhalb der festgelegten Systemgrenzen liegt (vgl. Kapitel 2.4.1)			
Modul C2: Transport	entfällt, da dieses Modul außerhalb der festgelegten Systemgrenzen liegt (vgl. Kapitel 2.4.1)			
Modul C3: Abfallbewirtschaftung	Entsorgung „Ent“	Modul C3 und/oder C4, je nach Material (enthält die Entsorgung von Modul A und Modul B*)	Angaben in Datenblättern der Ökobau.dat 2020. Bei fehlenden Angaben generische Zuordnung	Modul C beinhaltet die Entsorgung der Materialien aus A1-A3 (die Entsorgung der Prozesse von Modul B wird normkonform herausgerechnet)
Modul C4: Entsorgung				

Module nach DIN EN 15978:2012	Umsetzung in LEGEP			Export aus LEGEP und Aus- wertungsdatei
	Bezeichnung in LEGEP	Was ist enthalten?	Datenquelle	
Modul D: Recyclingpotenzial	D	Modul D (für Holzdatensätze D _{them.})	Angaben in Datenblät- tern der Ökobau.dat 2020. Bei fehlenden Angaben generische Zuordnung	Modul D wird auf- bereitet in Modul D _A und D _B

*Zuordnung erkennbar

Die Gebäudemodellierung in LEGEP erfolgt auf Bauteilebene. Überwiegend werden hierfür materialbezogene Datensätze verwendet, Ausnahme ist die in KG 300 (Bauwerk – Baukonstruktionen) genannte Gruppe der Fenster und Trockenbauwände, in KG 400 (Bauwerk – technische Anlagen) sind es nahezu alle Bauteile, die auf produktbezogenen Datensätzen basieren. Die in einer EPD schon zu Produkten aggregierten Daten haben den Nachteil bezüglich der darin enthaltenen Materialien wenig Informationen vorzuhalten. Die funktionale Einheit ist deswegen oftmals "ein Stück", z.B. ein Stück Wärmepumpe. Wenn die Produktbeschreibung der Produkt-EPD nicht als Metadaten in die Ökobau.dat mit einfließt, lässt der Datensatz der Ökobau.dat bezüglich der Frage nach Menge der Materialien, Trennbarkeit und Wiederverwendbarkeit keine Antwort zu. Der Ersteller der LEGEP-Datenbank versucht in solchen Fällen derartige Daten zu gewinnen, in dem er ggf. die zugrundeliegende EPD auswertet oder aus anderen verfügbaren Quellen die Materialien und Massenanteile ermittelt und diese mit den entsprechenden Datenmodulen aus der Ökobau.dat verknüpft. (Künniger and Richter 2014, König and Kreißig 2010) Jeder Material-Datensatz ist mit einem Ökomoduldatensatz aus der Ökobau.dat 2009 bis 2018/19 verknüpft. Dies bedeutet, dass alle Datensätze seit 2015 normkonform nach DIN EN 15804:2022 sind. Grundsätzlich werden nach Verfügbarkeit generische oder bevorzugt repräsentative Datensätze verknüpft und der Anwender hat die Möglichkeit im Projekt über das Programm durchschnittliche oder spezifische Datensätze zu wählen.

Die zu bilanzierenden Gebäude werden entsprechend der vorliegenden Bauteilbeschreibung in die LEGEP Software eingegeben. Dazu wird aus der LEGEP/sirAdos-Stammdatenbank ein passendes bzw. möglichst der Bauteilbeschreibung entsprechendes Element (Bauteil, z.B. „Außenwand aus Ziegel, Mauerziegel Mz 12-1,6,...“) ausgewählt. Dieses Element wird nun ggf. durch Ändern der einzelnen Schichtdichten, die im Element bereits hinterlegt sind oder Austauschen / Entfernen einer Bauteilschicht angepasst. Das Ändern der Schichtdicken kann aus bauphysikalischen und aus statischen Gründen erfolgen. Auf Basis der Massenermittlung der Gebäude erfolgt die Eingabe der Fläche bzw. der Stückzahl des Bauteils. Nach Eingabe der zu bilanzierenden Bauteile des Gebäudes in LEGEP werden über die Volumina und Rohdichten der in den Bauteilen

eingesetzten Materialien die Materialmassen in kg des Gebäudes berechnet. Den verbauten Materialien werden Sachbilanzdaten (Datensätze der Ökobau.dat 2020-I) zugeordnet, woraus sich die Umweltwirkungen bzw. der Primärenergieeinsatz über die gewünschten Module für das Gebäude berechnen lassen.

Die Ergebnisse werden anschließend auf das funktionale Äquivalent des Gebäudes bezogen.

2.4.6 Allokationen

Allokation bedeutet die Zuordnung von Input- und Outputflüssen eines Prozesses oder eines Produktsystems zum untersuchten Produktsystem und zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen bei Koppelproduktion, Recycling und Abfallentsorgung (DIN EN ISO 14040:2021, DIN EN 15804:2022, Klöpffer, W. Grahl, B. 2009). Bei den Ökobau.dat Datensätzen wird davon ausgegangen, dass diese normkonform zu DIN EN 15804:2022 sind und somit die Allokationsregeln korrekt angewandt wurden. Die in der Ökobau.dat enthaltenen EPDs sind vom Institut Bauen und Umwelt (IBU) nach DIN EN ISO 14025:2011 und DIN EN 15804:2022 verifiziert. Hierfür sind in Produktkategorie-Regeln (PCR) für die einzelnen Bauprodukte einheitliche Regelungen festgelegt. Für Modul D (Recycling) wird ein „open loop“ – Recycling angenommen, d.h. die entsprechenden Sekundärrohstoffe verlassen das Produktsystem, in welchem sie als Reststoffe bzw. Abfälle zur Verwertung anfielen. Es ist nicht bekannt, in welcher Form die tatsächliche Nachnutzung des Produkts in einem anderen Produktsystem erfolgt (Nutzung als Sekundärbrennstoff oder als -material).

Zur Ermittlung der potenziellen Lasten und Gutschriften in Modul D werden die Datensätze der Ökobau.dat 2020-I zugrunde gelegt. Für die Datensätze der Ökobau.dat, die keine Angabe für Modul D bereitstellen, werden diese Datensätze mit Hilfe von materialgerechten generischen Recyclinginformationen und den entsprechenden Datensätzen für Recyclingprozesse der Ökobau.dat 2020-I zur vollständigen Berechnung von Modul D verknüpft (siehe auch Kapitel 2.4.4). Für Holz wird der Datensatz für thermische Verwertung als Modul D (Modul D_{therm}) zugrunde gelegt. Modul D wird in diesen Betrachtungen nicht explizit ausgewiesen.

2.4.7 Definition Bereich wiederverwertbarer Bauteile zur Ermittlung der Recyclingmengen- und Potenziale

Im Bereich des landwirtschaftlichen Bauens kann für den Anteil und den Bereich der wiederverwendbaren Bauteile keine pauschale Aussage getroffen werden, da die Art der Kontamination von der Nutzung der Halle sowie Einflussfaktoren wie Schmutz, Staub, Kot und oberflächlichen Ablagerungen abhängig ist. Generell kann allerdings davon ausgegangen werden, dass ab einer Höhe über 1,50 m Oberkante des Fußbodens eine geringere Belastung vorliegt und somit mit weniger Aufwand zur Wieder- oder Weiter-

verwertung zu rechnen ist. Wohingegen das Material bis zu der 1,50 m Grenze gesondert geprüft werden und wahrscheinlich mit einem höheren Aufwand aufgearbeitet werden muss. Durch Reinigung und Desinfektion kann ein hygienisch unbedenklicher Zustand für eine Wieder- oder Weiterverwertung hergestellt werden. Ergänzende Informationen sind in Teil E des Schlussberichtes aufgeführt.

3 ERGEBNISSE

3.1 Auswertung nach Einzelbauteilen

Die Ergebnisse der Ökobilanz mit der Gegenüberstellung der Austausch der einzelnen Baukonstruktionen werden im Folgenden dargestellt. Dabei wird zwischen landwirtschaftlichen Gebäuden mit kleiner Spannweite (s. Kapitel 3.1.1) und großer Spannweite (s. Kapitel 3.1.2) unterschieden. Im Kapitel 3.1.3 sind ergänzende Sonderauswertungen aufgeführt. Die Ergebnisse werden nach dem in Kapitel 2 erläuterten Vorgehen ermittelt.

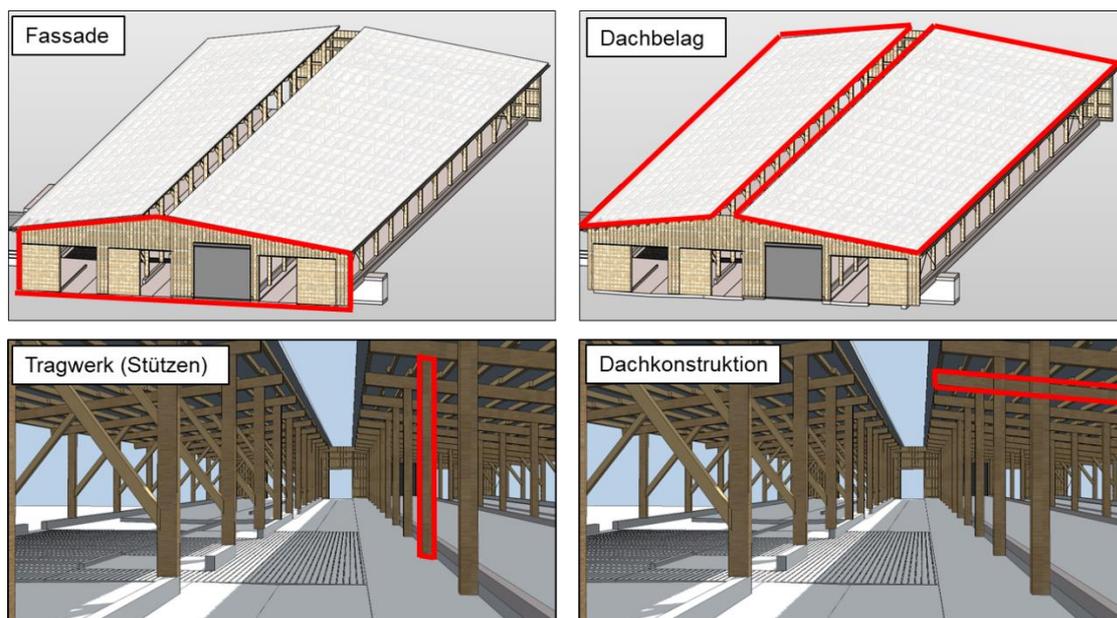


Abbildung 7: Exemplarische Darstellung der einzelnen Bauteile, die mineralischen Bauteilen gegenübergestellt werden

3.1.1 Kleine Spannweite

Vergleich Original Gebäude mit Pendants

In diesem Kapitel 3.1.1 werden die Ergebnisse der Berechnungen für den Vergleich Original-Gebäude mit Austausch einzelner Bauteile für die landwirtschaftlichen Gebäude mit kleiner Spannweite dargestellt. In der nachfolgenden Tabelle 3 werden die Baustoffe der einzelnen Bauteile in den Pendants gegenübergestellt, welche die Grundlage für die Berechnungen bildeten. Die Ergebnisse werden in Abbildung 8 gezeigt.

Bei den Berechnungen für die landwirtschaftlichen Gebäude mit kleiner Spannweite wurden sechs Pendants berechnet. Wie der Tabelle 3 zu entnehmen ist, wurde im Pendant 1 im Tragwerk die Holzkonstruktion durch eine Stahl-/Metallkonstruktion ersetzt. Im Pendant 2 wurde dieser Ersatz um den Austausch der Dachkonstruktion von Holz in Stahl ergänzt. Das Pendant 3 weist einen Austausch von Türen/Toren und der Fassade auf, hier wurde das originale Holzmaterial durch Stahl-/Metall ersetzt. Im Pendant 4 wurde der originale Dachbelag in Faserzement durch einen Metallbelag ersetzt. Das Pendant 5 unterscheidet sich von dem landwirtschaftlichen Gebäude im Original-Zustand im teilweisen Ersatz des Tragwerkes, hier wurde die Tragkonstruktion statt in Holz in einer Hybridkonstruktion (Holz und Stahl) ausgeführt. Im Pendant 6 wurden die gesamten Bauteile durch konventionelle Materialien ersetzt. Das Bauteil Fundament wird in keinem Pendant ersetzt, da konstruktiv kein anderes Material als Stahlbeton umzusetzen ist.

Tabelle 3: Baustoffe der einzelnen Bauteile in den einzelnen Pendants zur Gegenüberstellung

	Original	Pendant 1	Pendant 2	Pendant 3	Pendant 4	Pendant 5	Pendant 6	Legende
Fundament	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton	
Tragwerk (Stützen)	Holz	Stahl / Metall	Holz	Holz	Holz	Hybrid	Stahl / Metall	<ul style="list-style-type: none"> Holz Hybrid Stahl / Metall Faserzement Stahlbeton
Dachkonstruktion	Holz	Holz	Stahl / Metall	Holz	Holz	Holz	Stahl / Metall	
Türen & Tore	Holz	Holz	Holz	Stahl / Metall	Holz	Holz	Stahl / Metall	
Fassade	Holz	Holz	Holz	Stahl / Metall	Holz	Holz	Stahl / Metall	
Dachbelag	Faserzement	Faserzement	Faserzement	Faserzement	Stahl / Metall	Faserzement	Stahl / Metall	

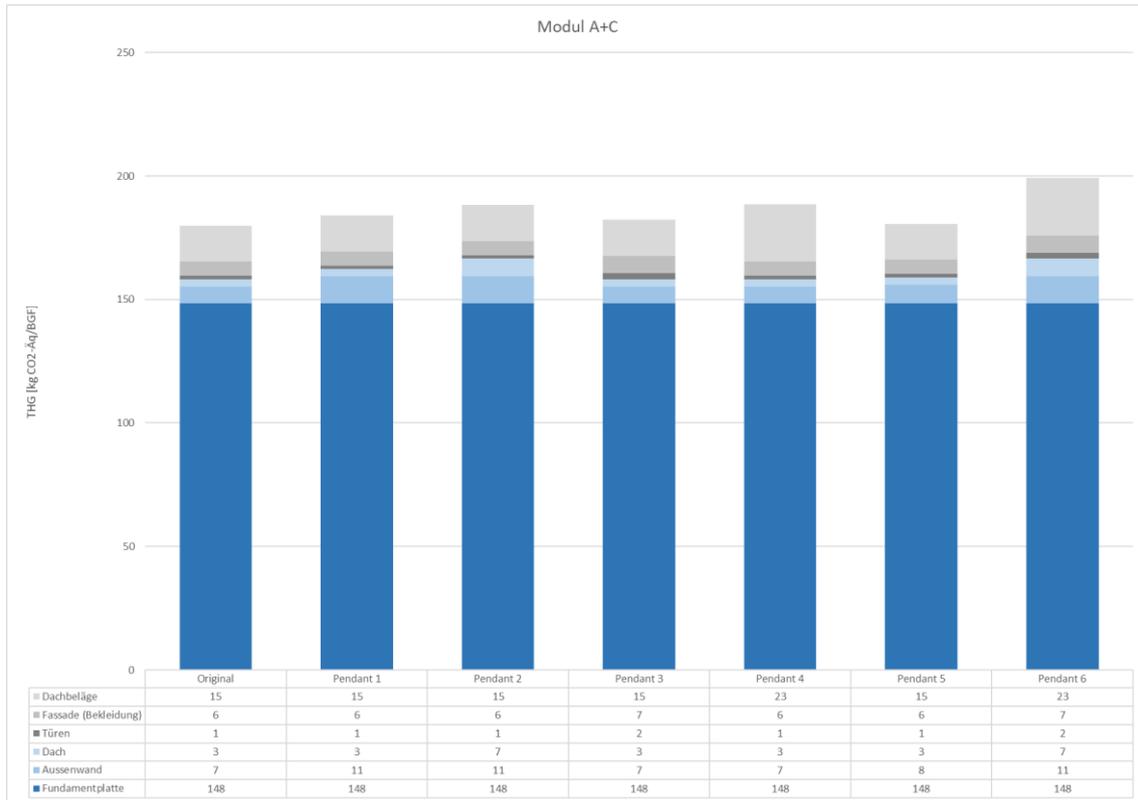


Abbildung 8: LCA-Ergebnisse (Indikator THG in kg CO₂-Äq./m² BGF) für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite

Aus den LCA-Ergebnissen für die landwirtschaftlichen Gebäude mit kleiner Spannweite (s. Abbildung 8) kann abgeleitet werden, dass die geringsten THG-Emissionen in dem «Original»-Gebäude auftreten. Die höchsten THG-Emissionen werden in Pendant 6 identifiziert, in welchem alle originalen Bauteile in Holz durch Stahl- und Metall ersetzt werden.

In Pendant 1 wurde das Holztragwerk gegen ein Stahltragwerk ausgetauscht, dies hat zur Folge, dass die THG-Emissionen in diesem Bauteil von 7 [kg CO₂-Äq./m² BGF] auf 11 [kg CO₂-Äq./m² BGF] steigen. In Pendant 2 ist die Dachkonstruktion und Tragwerkskonstruktion ausgetauscht worden. Der Austausch hat zur Folge, dass die THG-Emissionen in den einzelnen Bauteilen gegenüber dem «Original»-Bauwerk erheblich zunehmen und bei einer gesamten Steigerung von 10 [kg CO₂-Äq./m² BGF] auf 18 [kg CO₂-Äq./m² BGF] liegen. In Pendant 3 macht der Austausch von Türen/Tore und Fassade eine weniger signifikante Erhöhung von 7 [kg CO₂-Äq./m² BGF] auf 9 [kg CO₂-Äq./m² BGF] aus. Die Ergebnisse für das Pendant 4, den Austausch des Dachbelages zeigen, dass sich die THG-Emissionen von 15 [kg CO₂-Äq./m² BGF] auf 23 [kg CO₂-Äq./m² BGF] erhöhen. In Pendant 5 wurde das Tragwerk als Hybrid-Tragwerk ausgeführt. Die Steigerung der THG-Emissionen von 6 [kg CO₂-Äq./m² BGF] auf 7 [kg CO₂-Äq./m² BGF] stellt keinen signifikanten Unterschied dar.

Das Bauelement Bodenplatte weist in allen Pendants, wie im «Original»-Gebäude, die gleichen THG-Emissionen auf, da dieselbe Konstruktion als Bodenplatte aus Stahlbeton angenommen wurde.

Vergleich Anteil Emissionen in Bauteilen am Original-Gebäude

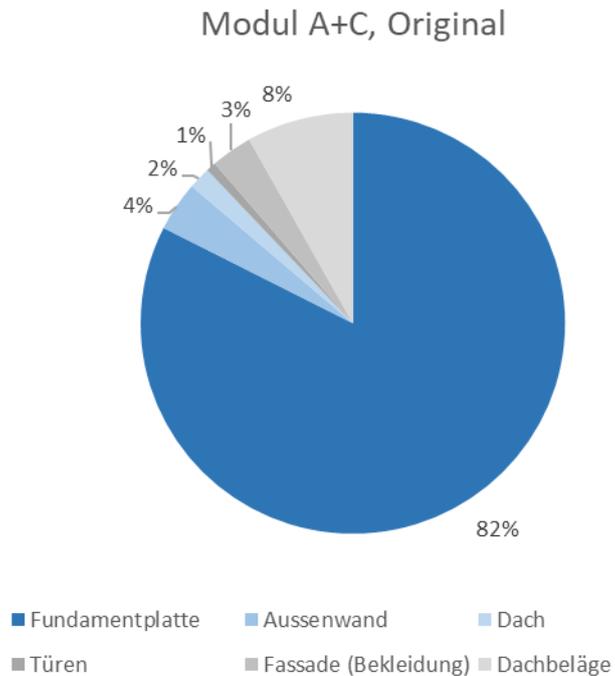


Abbildung 9: Aufteilung LCA-Ergebnisse (Indikator THG) für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite

Modul A+C, Original ohne Fundament

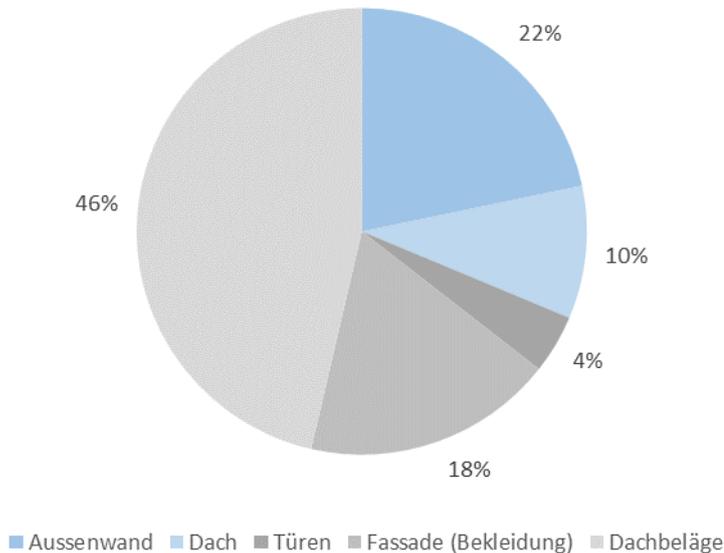


Abbildung 10: Aufteilung LCA-Ergebnisse (Indikator THG) für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite – ohne Bauteil Fundament

Die Abbildung 9 zeigt die Verteilung der THG-Emissionen für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite auf. Der höchste Anteil ist im Fundament mit 82% nachzuweisen. Mit großem Abstand folgt das Bauteil Dachbeläge mit 8%. Einen geringen Anteil im Gesamtvergleich machen die Bauteile Außenwand mit 4%, Fassade mit 3%, Dach mit 2% und Türen mit 1% aus.

Die Abbildung 10 zeigt die Verteilung der auftretenden Emissionen ohne Fundament auf. Es wird deutlich, dass die Dachbeläge in diesem Vergleich mit 46% fast die Hälfte der ohne Fundament verbleibenden Emissionen ausmachen. Danach reihen sich Bauteile Außenwand und Fassade mit 22% bzw. 18% ein. Einen geringeren Anteil machen die Bauteile Dach mit 10% und Türen mit 4% aus.

3.1.2 Große Spannweite

Vergleich Original Gebäude mit Pendants

In diesem Kapitel 3.1.2 werden die Ergebnisse der Berechnungen für den Vergleich Original-Gebäude mit Austausch einzelner Bauteile für die landwirtschaftlichen Gebäude mit großer Spannweite dargestellt. In der nachfolgenden Tabelle 4 werden die Baustoffe der einzelnen Bauteile in den Pendants gegenübergestellt, welche die Grundlage für die Berechnungen bildeten. Die Ergebnisse werden in Abbildung 11 dargestellt.

Bei den Berechnungen für die landwirtschaftlichen Gebäude mit großer Spannweite wurden fünf Pendants berechnet. Wie der Tabelle 4 zu entnehmen ist, wurde im Pendant 1 im Tragwerk die Holzkonstruktion durch eine Stahl-/Metallkonstruktion ersetzt. Im Pendant 2 wurde dieser Ersatz um den Austausch der Dachkonstruktion von Holz in Stahl ergänzt. Das Pendant 3 weist einen Austausch von Türen/Toren und der Fassade auf, hier wurde das originale Holzmaterial durch Stahl/Metall ersetzt. Im Pendant 4 wurde – gegenteilig zum Gebäude mit kleinerer Spannweite - der originale Dachbelag in Metall durch einen Faserzementbelag ersetzt. Im Pendant 5 wurden die gesamten Bauteile durch konventionelle Materialien ersetzt. Das Bauteil Fundament wird in keinem Pendant ersetzt, da konstruktiv kein anderes Material als Stahlbeton umzusetzen ist.

Tabelle 4: Baustoffe der einzelnen Bauteile in den einzelnen Pendants zur Gegenüberstellung

	Original	Pendant 1	Pendant 2	Pendant 3	Pendant 4	Pendant 5
Bodenplatte	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton	Stahlbeton
Tragwerk (Stützen)	Holz	Stahl / Metall	Stahl / Metall	Holz	Holz	Stahl / Metall
Dachkonstruktion	Holz	Holz	Stahl / Metall	Holz	Holz	Stahl / Metall
Türen & Tore	Holz	Holz	Holz	Stahl / Metall	Holz	Stahl / Metall
Fassade	Holz	Holz	Holz	Stahl / Metall	Holz	Stahl / Metall
Dachbelag	Stahl / Metall	Stahl / Metall	Stahl / Metall	Stahl / Metall	Faserzement	Stahl / Metall

Legende

- Holz
- Stahl / Metall
- Faserzement
- Stahlbeton

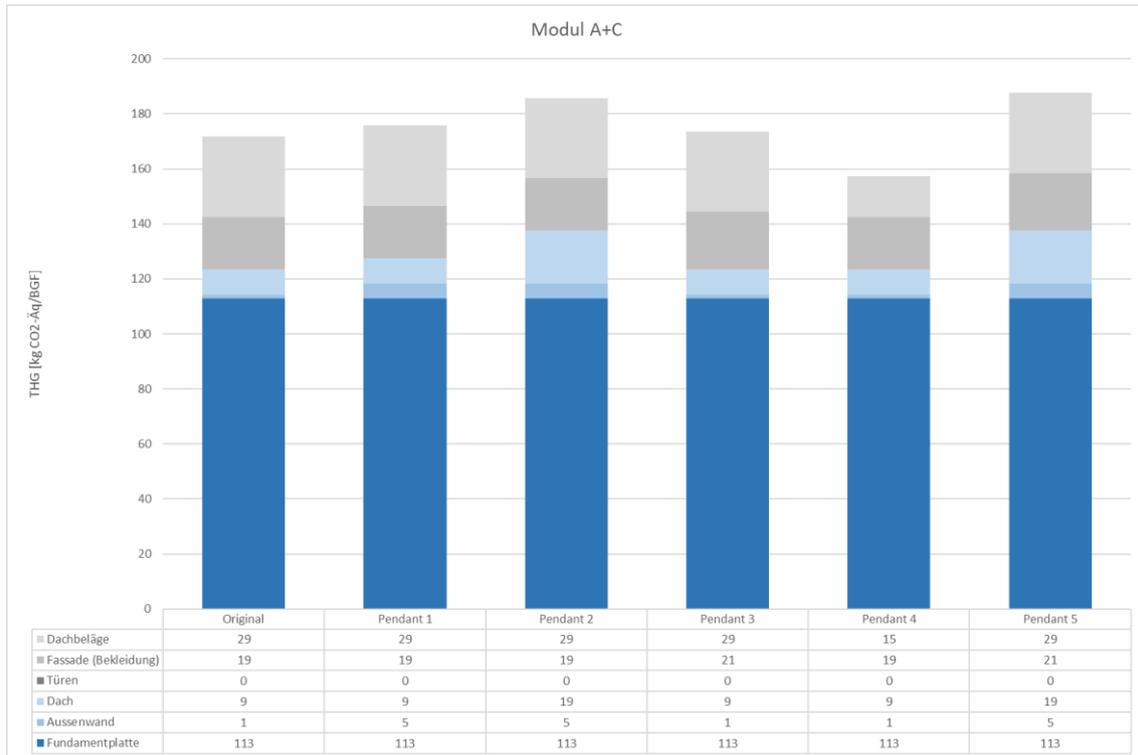


Abbildung 11: LCA-Ergebnisse (Indikator THG in kg CO₂-Äq./m² BGF) für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit großer Spannweite

Aus den LCA-Ergebnissen für das landwirtschaftliche Bauwerk mit großer Spannweite (s. Abbildung 11) kann abgeleitet werden, dass die geringsten THG-Emissionen in Pendant 4 auftreten. Dieses setzt sich aus den Original-Holzbauteile mit Ausnahme der ausgetauschten Dachbeläge in Faserzement zusammen.

Die höchsten THG-Emissionen werden in Pendant 5 identifiziert. In Pendant 5 werden alle Baukonstruktionselemente durch Stahlbauteile ersetzt.

In Pendant 1 wurden das Holztragwerk gegen ein Stahltragwerk ausgetauscht, dies hat zur Folge, dass die THG-Emissionen von 1 [kg CO₂-Äq./m² BGF] auf 5 [kg CO₂-Äq./m² BGF] steigen. Der Austausch von Dachkonstruktion und Tragwerkskonstruktion in Stahl im Pendant 2 hat zur Folge, dass sich THG-Emissionen für die beiden Bauteile von 10 [kg CO₂-Äq./m² BGF] auf 24 [kg CO₂-Äq./m² BGF] ändern. In Pendant 3 werden Türen/Tore und die Fassade in Stahl ausgeführt; die Erhöhungen der THG-Emissionen sind hierfür mit einer Änderung von 19 [kg CO₂-Äq./m² BGF] auf 21 [kg CO₂-Äq./m² BGF] nicht signifikant. Die Ergebnisse im Pendant 4, in welchem der Dachbelag aus Metall gegen Faserzementplatten ausgetauscht wurde, zeigen, dass sich die THG-Emissionen des Bauteils von 29 [kg CO₂-Äq./m² BGF] auf 15 [kg CO₂-Äq./m² BGF] verringern. Das Bauteil Fundament wird in keinem Pendant ersetzt, da konstruktiv kein anderes Material als Stahlbeton umzusetzen ist.

Vergleich Anteil Emissionen in Bauteilen am Original-Gebäude

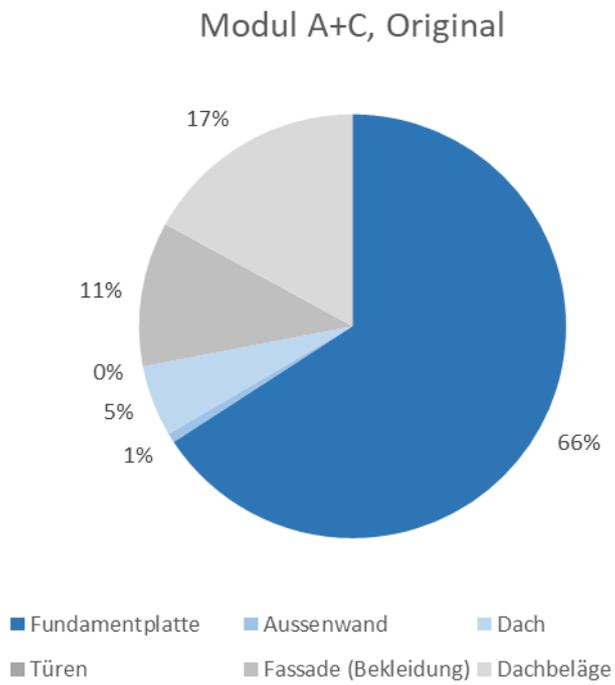


Abbildung 12: Aufteilung LCA-Ergebnisse (Indikator THG) für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit großer Spannweite

Modul A+C, Original
ohne Fundament

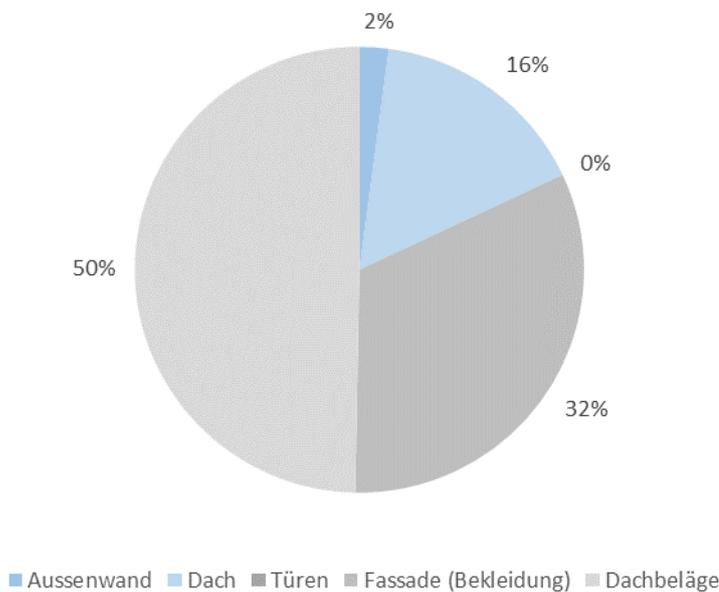


Abbildung 13: Aufteilung LCA-Ergebnisse (Indikator THG) für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit großer Spannweite – ohne Bauteil Fundament

Die Abbildung 12 zeigt die Verteilung der THG-Emissionen für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit großer Spannweite für die sechs betrachteten Bauteile auf. Der höchste Anteil ist im Fundament mit 66% nachzuweisen, gefolgt vom Bauteil Dachbeläge mit 17%. Das Bauteil Fassade ist mit einem Anteil von 11% und das Dach mit 5% zu verzeichnen. Im Bauteil Aussenwand sind die geringsten Emissionen mit 1% aufzuweisen. Das Bauteil Türen ist in diesem Gebäude nicht vorhanden, weist deshalb einen Anteil von 0% auf und wird nur für den vollständigen Vergleich aufgeführt.

Die Abbildung 13 zeigt die Verteilung der auftretenden Emissionen ohne Fundament auf. Es wird deutlich, dass die Dachbeläge in diesem Vergleich mit 50% die Hälfte der Emissionen ausmachen, gefolgt von der Fassade mit 32%. Einen geringeren Anteil weisen das Dach mit 16% und die Aussenwand mit 2% auf. Das Bauteil Türen ist in diesem Gebäude nicht vorhanden, weist deshalb einen Anteil von 0% auf und wird nur für den vollständigen Vergleich aufgeführt.

3.1.3 Sonderauswertungen

In diesem Kapitel werden spezielle Sonderauswertungen dargestellt. In der ersten Auswertung *Gründach* werden Ergebnisse für den Austausch des originalen Dachbelages in ein Gründach, ermittelt am repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäude mit kleiner Spannweite, dargestellt. Die zweite Auswertung vergleicht die *Verbaute Menge Holz* der in Kapitel 213.1.1 und 3.1.2 beschriebenen Pendants für die landwirtschaftlichen Gebäude mit kleiner und großer Spannweite. In einer weiteren Auswertung wird der *Kohlenstoffspeicher* in dem repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäude mit kleiner und großer Spannweite ausgewiesen.

Gründach

In dieser Betrachtung wird im repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäude mit kleiner Spannweite der originale Dachbelag aus Faserzementwellplatten um einen Gründachaufbau, welcher sich aus einer zusätzlichen Dachabdichtung aus Kunststoff und einer 8-10 cm dicken extensive Substratschicht zusammensetzt, ergänzt.

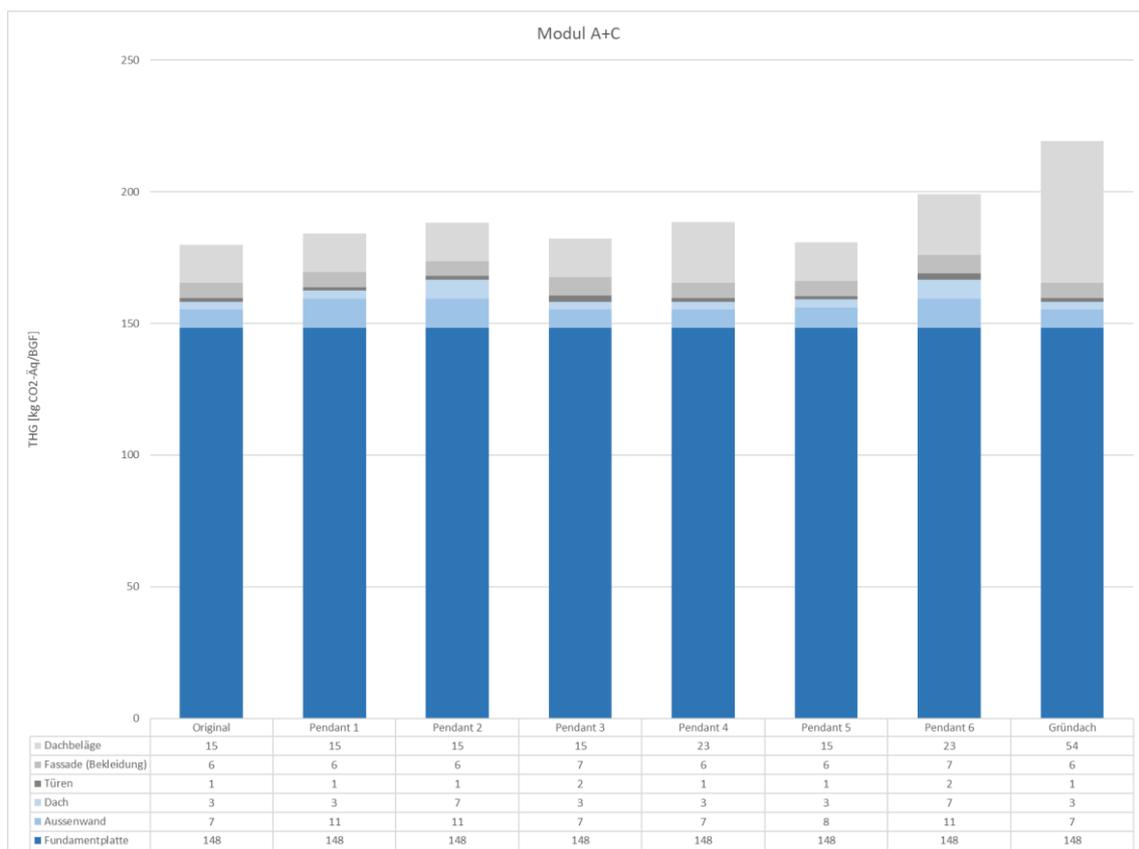


Abbildung 14: LCA-Ergebnisse (Indikator THG in kg CO₂-Äq./m² BGF) für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite inkl. Gründach-Betrachtung

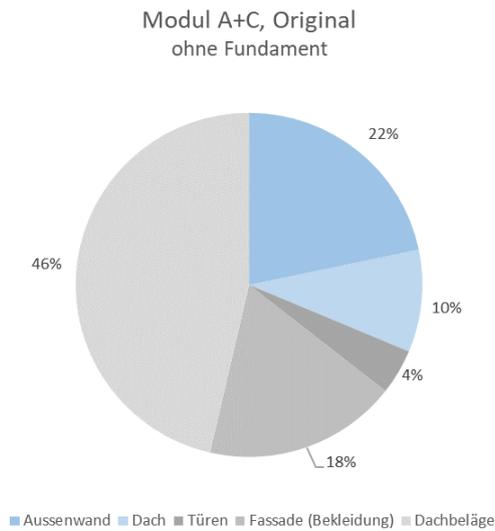


Abbildung 15: Aufteilung LCA-Ergebnisse (Indikator THG) für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite – ohne Bauteil Fundament

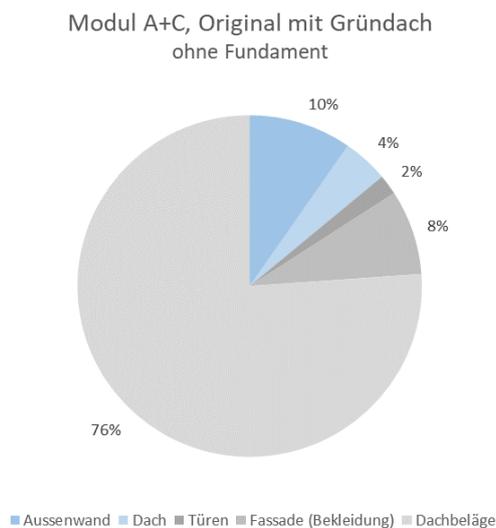


Abbildung 16: Aufteilung LCA-Ergebnisse (Indikator THG) für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite – ohne Bauteil Fundament, Austausch Dachbelag in Gründach

In dieser Betrachtung wurde der Dachbelag des originalen landwirtschaftlichen Gebäudes mit kleiner Spannweite mit einem Gründach ersetzt. Der Abbildung 14 kann der in Kapitel 3.1.1 dargestellte Vergleich des originalen Gebäudes mit den Pendants ergänzt um die Betrachtung bei Austausch des Daches in ein Gründach entnommen werden. Dieser Austausch zeigt, dass durch ein Gründach die THG-Emissionen für das gesamte

Gebäude von 180 [kg CO₂-Äq. /m² BGF] auf 219 [kg CO₂-Äq. /m² BGF] steigen. Dies ist auf den höheren Anteil an Materialien zurückzuführen.

Die Abbildung 15 zeigt die Aufteilung LCA-Ergebnisse (Indikator THG) für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite, aufgeschlüsselt nach Bauteilen, jedoch ohne das Bauteil Fundament. Die Abbildung 16 stellt dieselbe Aufschlüsselung dar, hier jedoch mit Betrachtung des Gründachbelages. Dem Vergleich sind die erhöhten Emissionen durch das Gründach zu entnehmen. Der Anteil des Bauteils Dachbelag erhöht sich in dieser Betrachtung, welche sich auf den Anteil der vom Bauteil erzeugten Emissionen anteilig am Gesamtgebäude (ausgenommen das Fundament) bezieht, von 46%-Anteil für den originalen Dachbelag auf 76% für das Gründach.

Durch den erhöhten Materialeinsatz, welchen das Gründach verursacht, sind einerseits erhöhte Emissionen zu verzeichnen. Andererseits bringen Gründächer Vorteile wie die Verbesserung des lokalen Klimas, eine Regenwasserrückhaltung, Schadstoffbindungen und die Verringerung die Lärmbelastung mit sich. Ein Gründach schafft außerdem ein angenehmeres Gebäudeklima und hilft, im Sommer in den Ställen angenehmere Temperaturen zu erzeugen, die dem Tierwohl zuträglich sind, so dass die zusätzlichen Emissionen akzeptiert werden könnten.

Verbaute Menge Holz

Für jeder der 7 Varianten für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite sowie 6 Varianten für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit großer Spannweite wurde die verbaute Menge an Holz für das Gesamtgebäude dargestellt.

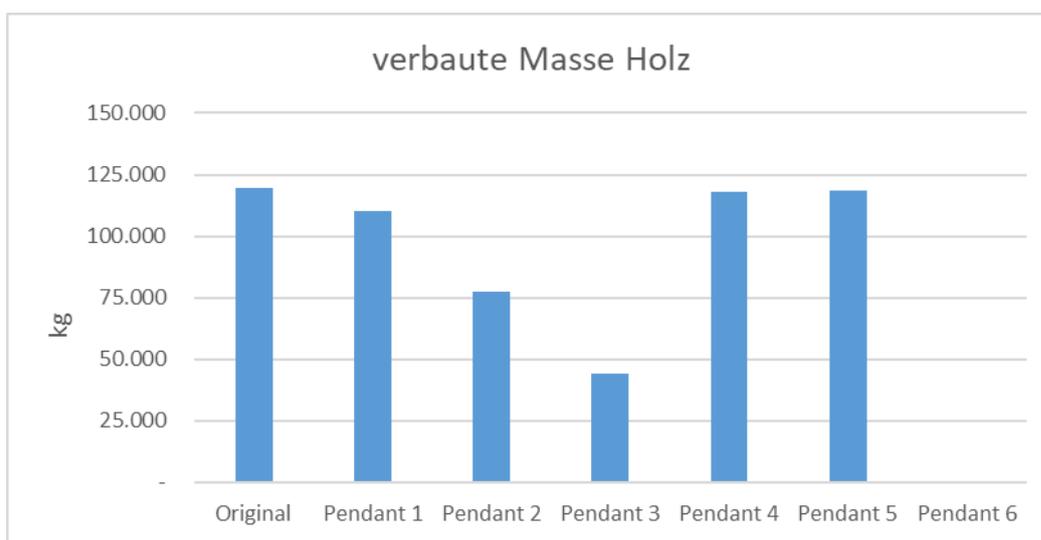


Abbildung 17: Reine verbaute Holzmasse [in kg] im Modul A für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite

Bei dem Vergleich der reinen verbauten Holzmenge im Modul A für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite zeigt sich, dass das Original-Gebäude mit einer Masse von 119.000 kg den höchsten Anteil aufweist. Das Pendant 5, in welchem das Tragwerk von einer reinen Holzkonstruktion auf eine Hybrid-Konstruktion geändert wurde und das Pendant 4 mit Änderung des Dachbelages (s. Tabelle 3) weisen eine unwesentlich kleinere Menge an verbautem Holz mit einer Masse von 118 und 117.000 kg auf. Abgesehen vom Pendant 6, dem gänzlichen Austausch der Materialien, ist die geringste nachzuweisende Masse an Holz im Pendant 3, in welchem die Türen und Fassade ausgetauscht sind, mit 44.000 kg verbaut. Im Pendant 6, in welchem jegliche Bauteile in konventionelles Material ausgetauscht wurden, ist eine geringe Masse von 237 kg enthalten.

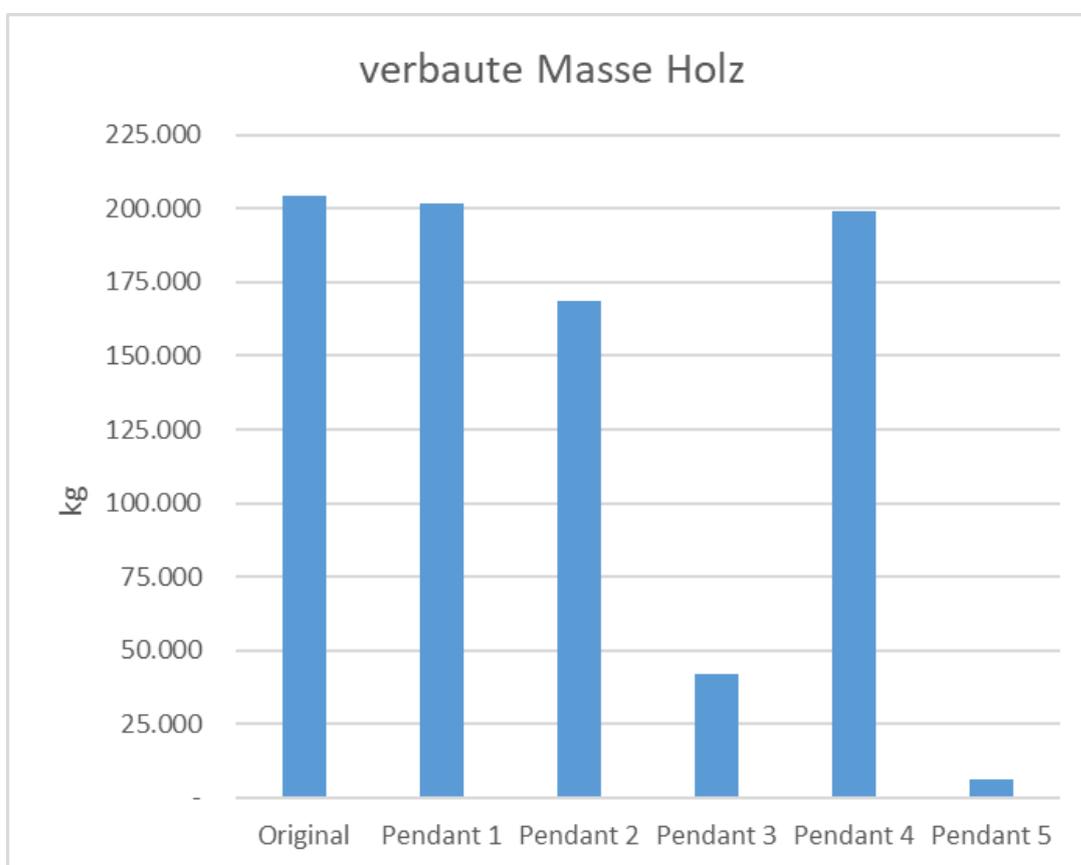


Abbildung 18: Reine verbaute Holzmasse [in kg] im Modul A für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit großer Spannweite

Bei dem Vergleich der reinen verbauten Holzmenge im Modul A für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit großer Spannweite zeigt sich, dass das Original-Gebäude mit einer Masse von 204.000 kg den höchsten Anteil aufweist. Das Pendant 1, in welchem das Tragwerk von einer reinen Holzkonstruktion auf ein Stahl-Konstruktion

geändert wurde und das Pendant 4 mit Änderung des Dachbelages (s. Tabelle 4) weisen eine unwesentlich kleinere Menge an verbautem Holz mit einer Masse von 201.000 kg und 199.000 kg auf. Die geringste Masse an Holz ist im Pendant 5, in welchem die Türen und Fassade ausgetauscht sind, mit 6.000 kg verbaut.

Kohlenstoffspeicher

Der Kohlenstoffspeicher zeigt die Speicherung des biogenen Kohlenstoffs in den Holzprodukten, dargestellt in CO₂ (Treibhauspotenzial (GWP biogen, mit negativem Vorzeichen) auf. Dieser ist über die Lebensdauer des Gebäudes gebunden und wird nach Ende des Produktlebenszyklus wieder freigesetzt (z.B. Holz wird energetisch genutzt oder Holz wird im nächsten Lebenszyklus als Sekundärprodukt wieder weitergenutzt / weiter stofflich verarbeitet).

Je größer die verbauten Holzmengen sind, desto größer ist der Kohlenstoffspeicher. Dies wird bei der Betrachtung der Ergebnisse für das beispielhafte Gebäude mit kleiner und großer Spannweite deutlich. Das Gebäude mit kleiner Spannweite weist eine maximale Spannweite von 6,60 m auf. Dadurch fallen die Querschnitte der Vollholzkonstruktion und somit auch der Kohlenstoffspeicher kleiner aus als bei dem Gebäude mit großer Spannweite. Hier bedingt die große Spannweite von 25 m eine größere Dimensionierung der Brettschichtholzträger, somit ergibt sich einen höheren Anteil an Holzmasse und gespeichertem Kohlenstoff. Einer ausschließlichen Optimierung für einen hohen Kohlenstoffspeichers ist jedoch immer der sparsame Umgang mit Ressourcen vorzuziehen. Dieser lässt sich in diesem Vergleich durch die kleineren Spannweiten und somit einfacheren und ressourcenärmeren Konstruktionen besser umsetzen.

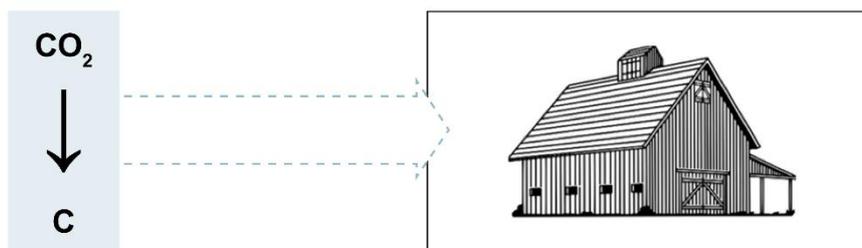
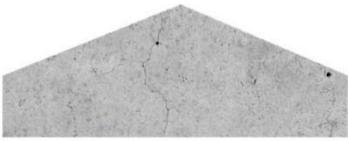


Abbildung 19: Speicherung Kohlenstoff im Gebäude

Tabelle 5: Kohlenstoffspeicher in kg CO₂-Äq/m² BGF für einen Standardstall und ein äquivalentes Holztragwerk für beispielhafte Gebäude mit kleiner Spannweite (das negative Vorzeichen bedeutet, dass hier der Kohlenstoff gebunden ist)

GWP biogen, Modul A	
	
0 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF	-131,7 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF

Hierbei ist anzumerken, dass der im Gebäude gebundene biogene Kohlenstoff zunächst einmal nur eine materialinhärente Eigenschaft der aus Biomasse verbauten Baustoffe darstellt, der über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes ein Nullsummenspiel darstellt, so wie auch in den entsprechenden Normen geregelt ist.

In Zusammenhang mit der Fragestellung nach der Klimawirksamkeit der Holzverwendung in Gebäuden ist jedoch zu beachten, dass der nachwachsende Rohstoff Holz Teil des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs ist, den Bäume während ihres Wachstums der Atmosphäre mit Hilfe der Photosynthese CO₂ entziehen und in Form von Kohlenstoff (C) in der Biomasse einlagern.

Wird der in geerntetem Rohholz enthaltene Kohlenstoff auf das aus diesem Rohstoff hergestellte Produkt übertragen, bleibt dieser über die Dauer seiner Verwendung weiterhin gespeichert. Im Rahmen der nationalen Treibhausgasberichterstattung wird die Treibhausgasbilanz der Wälder und die biogene Kohlenstoffspeicherwirkung der nachgelagerten Holznutzung auf Basis methodischer Vorgaben des Weltklimarates (IPCC) fortlaufend erfasst (IPCC 2014, 2019) und in der Quellgruppe LULUCF (Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) gemeldet. So kann festgestellt werden, ob die Wälder eines Landes in der Summe eine Quelle (definierte Kohlenstoffspeicher nehmen ab) oder eine Senke (Kohlenstoffspeicher werden größer) von atmosphärischem CO₂ darstellen. Auch der in Holzprodukten gebundene biogene Kohlenstoff kann auf nationaler Ebene zur biogenen Kohlenstoffspeicherwirkung, d.h. einer möglichen Senkenwirkung, beitragen. Die ebenfalls nach den Vorgaben des IPCC berechnete Speicherwirkung durch die stoffliche Holzverwendung beläuft sich auf eine Senkenwirkung in Höhe von zuletzt knapp 9 Mt CO₂ im Jahr verbunden (Umweltbundesamt 2022).

Tabelle 6: Kohlenstoffspeicher in kg CO₂-Äq/m² BGF für einen Standardstall und einen äquivalentes Holztragwerk für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit großer Spannweite (das negative Vorzeichen bedeutet, dass hier der Kohlenstoff gebunden ist)

GWP biogen, Modul A	
	
-10,2 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF	-328,0 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF

3.2 Auswertung auf Gebäudeebene

3.2.1 Substitutionspotenzial allgemein

Treibhausgasreduzierungs potenzial (Gebäude):

Das Treibhausgasreduzierungs potenzial im Gebäudebereich stellt die Reduktion von Treibhausgasemissionen dar, die entstehen, wenn anstelle eines konventionellen Gebäudes ein funktional äquivalentes Holzgebäude gebaut würde. Grundlage sind normkonforme Berechnungen von Ökobilanzen auf Produkt und Gebäudeebene. (siehe auch (Hafner et al. 2017, Rüter 2023))



Treibhausgasreduzierungs potenzial auf Gebäudeebene liegt zwischen 5 und 37%

Quelle: Comparative LCA study of wood and mineral non-residential buildings in Germany and related substitution potential (Hafner and Özdemir 2022)

3.2.2 THG-Minderung kleine Spannweite

Anhand des Vergleiches eines beispielhaften konventionell ausgeführten Standardstalls mit einem äquivalenten Holztragwerk mit kleiner Spannweite wurden die Treibhausgasemissionen für das Modul A+C ermittelt. Die Ergebnisse in Tabelle 7 zeigen auf, dass der konventionell ausgeführte Stall für das Modul A+C einen Wert von 333 kg CO₂-

Äq/m² BGF und das äquivalente Holztragwerk für das Modul A+C einen Wert von 301 kg CO₂-Äq/m² BGF aufweist.

Im Kapitel 3.1.1 wurde das Potenzial einer Treibhausgas-Minderung durch den Austausch einzelner Bauteile überprüft. Da das Bauteil Bodenplatte in jeder Variante in Stahlbeton ausgeführt und nicht durch einen anderen Baustoff ersetzt werden kann, weist dieses in allen Pendants, wie im «Original»-Gebäude, die gleichen THG-Emissionen auf. Im Verhältnis zu den anderen Bauteilen verzeichnet die Bodenplatte den größten Anteil an Emissionen, sodass der Austausch der anderen Bauteile im Verhältnis nur einen geringen Einfluss hat.

Tabelle 7: Treibhausgasemissionen (GWP) in kg CO₂-Äq/m² BGF für einen Standardstall und ein äquivalentes Holztragwerk für beispielhafte Gebäude mit kleiner Spannweite

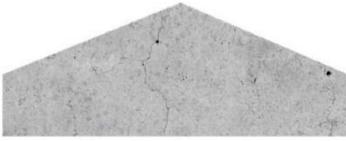
GWP gesamt, Modul A+C	
	
333 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF	301 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF

3.2.3 THG-Minderung große Spannweite

Anhand des Vergleiches eines beispielhaften konventionell ausgeführten Standardstalls mit einem äquivalenten Holztragwerk mit großer Spannweite wurden die Treibhausgasemissionen für das Modul A+C ermittelt. Die Ergebnisse in Tabelle 8 zeigen auf, dass der konventionell ausgeführte Stall für das Modul A+C einen Wert von 188 kg CO₂-Äq/m² BGF und das äquivalente Holztragwerk für das Modul A+C einen Wert von 172 kg CO₂-Äq/m² BGF aufweist.

Im Kapitel 3.1.1 wurde das Potenzial einer Treibhausgas-Minderung durch den Austausch einzelner Bauteile überprüft. Da das Bauteil Bodenplatte in jeder Variante in Stahlbeton ausgeführt und nicht durch einen anderen Baustoff ersetzt werden kann, weist dieses in allen Pendants, wie im «Original»-Gebäude, die gleichen THG-Emissionen auf. Im Verhältnis zu den anderen Bauteilen verzeichnet die Bodenplatte den größten Anteil an Emissionen, sodass der Austausch der anderen Bauteile im Verhältnis nur einen geringen Einfluss hat.

Tabelle 8: Treibhausgasemissionen (GWP) in kg CO₂-Äq/m² BGF für einen Standardstall und ein äquivalentes Holztragwerk für beispielhafte Gebäude mit großer Spannweite

GWP gesamt, Modul A+C	
	
188 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF	172 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF

3.3 Allgemeine Ergebnisse

Im Vergleich der Auswertungen nach Einzelbauteilen wurde deutlich, dass das Fundament mit Abstand den größten Anteil an THG-Emissionen aufweist. Da dieses Bauteil nicht durch ein anderes Material ersetzt werden kann und durch äußere Rahmenbedingungen bestimmt wird, verdeutlicht sich, dass in der Gesamtbetrachtung der landwirtschaftlichen Gebäude der mögliche Austausch von Bauteilen nur begrenzte Möglichkeiten mit ausschließlichem Bezug auf die THG-Emissionen aufweist. Dennoch ist auch in landwirtschaftlichen Gebäuden jede Verwendung von Holz als sinnvoll zu betrachten, da Kohlenstoff gespeichert und nachwachsender Rohstoff genutzt wird.

Neben der ökologischen Betrachtung muss auch immer der Zusammenhang mit der Nutzung entsprechenden und wirtschaftlich sinnvollen Spannweiten, der möglichen Verwendung des eigenen Holzes und die technische Trocknung (DIN 68800) betrachtet und deshalb im Einzelfall entschieden werden, welche Kombination aus Bauteilen am sinnvollsten ist.

4 ERGÄNZUNGEN ZU TEIL C (DESIGN FOR REUSE)

4.1 Definition Bereich wiederverwertbarer Bauteile zur Ermittlung der Recyclingmengen- und -potenziale

Für den Anteil und den Bereich der wiederverwendbaren Bauteile kann keine pauschale Aussage getroffen werden, da die Art der Kontamination von der Nutzung der Halle sowie Einflussfaktoren wie Schmutz, Staub, Kot und oberflächlichen Ablagerungen abhängig ist. Generell kann allerdings davon ausgegangen werden, dass ab einer Höhe über 1,50 m Oberkante des Fußbodens eine geringere Belastung vorliegt und somit mit weniger Aufwand zur Wieder- oder Weiterverwertung zu rechnen ist. Wohingegen das Material bis zu der 1,50 m Grenze gesondert geprüft werden und wahrscheinlich mit einem höheren Aufwand aufgearbeitet werden muss. Durch Reinigung und Desinfektion kann ein hygienisch unbedenklicher Zustand für eine Wieder- oder Weiterverwertung hergestellt werden. Ergänzende Informationen sind in Teil E aufgeführt.

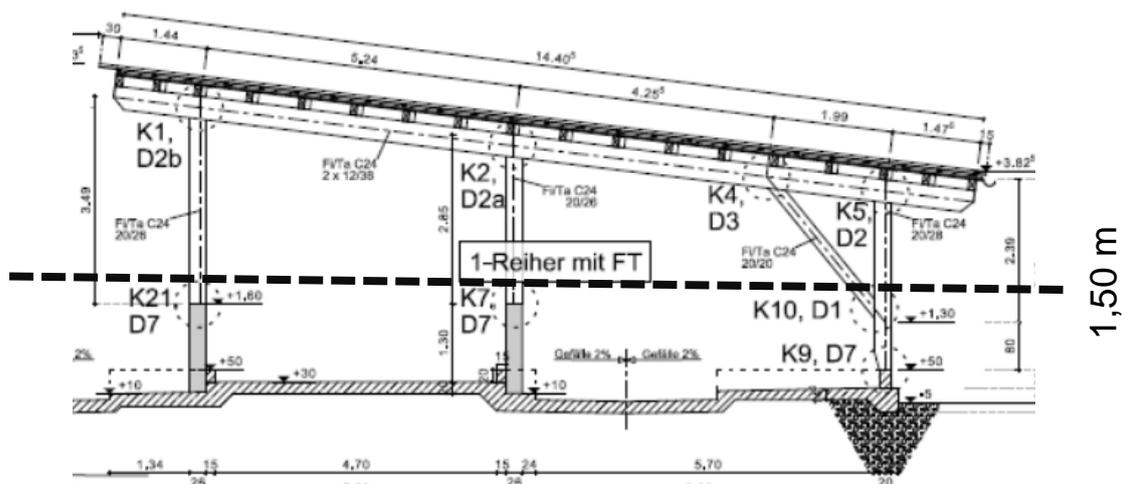


Abbildung 20: Querschnitt des repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäudes mit kleiner Spannweite mit Angabe 1,50 m Grenze

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Einteilung der Lebenszyklusinformation in Module nach DIN EN 15978:2012 (Lehrstuhl Ressourceneffizientes Bauen (Reb) 2023a)	6
Abbildung 2: 3D-Ansicht des repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäudes mit kleiner Spannweite bestehend aus 2-Reiher Liegehalle + 1 Reiher Liegehalle mit integriertem Futtertisch und Pultdachhalle (Spannweiten: 22,6 Meter (Spannweiten: 6,6 Meter (2-Reiher) + 5,20 und 6,20 Meter (1-Reiher))	9
Abbildung 3: Querschnitt des repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäudes mit kleiner Spannweite bestehend aus 2-Reiher Liegehalle + 1 Reiher Liegehalle mit integriertem Futtertisch und Pultdachhalle (Spannweiten: 22,6 Meter (Spannweiten: 6,6 Meter (2-Reiher) + 5,20 und 6,20 Meter (1-Reiher)).....	9
Abbildung 4: 3D-Ansicht des repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäudes mit großer Spannweite (Spannweite: 25 Meter)	10
Abbildung 5: Querschnitt des repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäudes mit großer Spannweite (Spannweite: 25 Meter)	10
Abbildung 6: Modulare Struktur der umweltbezogenen Informationen über den Lebenszyklus eines Gebäudes nach DIN EN 15978:2012. Die rot umrandeten Module werden im Rahmen des Projekts bilanziert, wobei Modul D separat ausgewiesen wird (Lehrstuhl Ressourceneffizientes Bauen (Reb) 2023b)	11
Abbildung 7: Exemplarische Darstellung der einzelnen Bauteile, die mineralischen Bauteilen gegenübergestellt werden	20
Abbildung 8: LCA-Ergebnisse (Indikator THG in kg CO ₂ - Äq./ m ² BGF) für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite	22
Abbildung 9: Aufteilung LCA-Ergebnisse (Indikator THG) für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite	23
Abbildung 10: Aufteilung LCA-Ergebnisse (Indikator THG) für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite – ohne Bauteil Fundament	24
Abbildung 11: LCA-Ergebnisse (Indikator THG in kg CO ₂ - Äq./ m ² BGF) für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit großer Spannweite	26
Abbildung 12: Aufteilung LCA-Ergebnisse (Indikator THG) für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit großer Spannweite	27
Abbildung 13: Aufteilung LCA-Ergebnisse (Indikator THG) für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit großer Spannweite – ohne Bauteil Fundament	28

Abbildung 14: LCA-Ergebnisse (Indikator THG in kg CO ₂ - Äq./ m ² BGF) für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite inkl. Gründach-Betrachtung	29
Abbildung 15: Aufteilung LCA-Ergebnisse (Indikator THG) für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite – ohne Bauteil Fundament	30
Abbildung 16: Aufteilung LCA-Ergebnisse (Indikator THG) für das originale repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite – ohne Bauteil Fundament, Austausch Dachbelag in Gründach	30
Abbildung 17: Reine verbaute Holzmasse [in kg] im Modul A für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite.....	31
Abbildung 18: Reine verbaute Holzmasse [in kg] im Modul A für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit großer Spannweite.....	32
Abbildung 19: Speicherung Kohlenstoff im Gebäude	33
Abbildung 20: Querschnitt des repräsentativen landwirtschaftlichen Gebäudes mit kleiner Spannweite mit Angabe 1,50 m Grenze	38

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Bauteilliste der repräsentativen landwirtschaftlichen Bauwerke	8
Tabelle 2: Lebenszyklusphasen und Umsetzung LEGEP.....	17
Tabelle 3: Baustoffe der einzelnen Bauteile in den einzelnen Pendants zur Gegenüberstellung.....	21
Tabelle 4: Baustoffe der einzelnen Bauteile in den einzelnen Pendants zur Gegenüberstellung.....	25
Tabelle 5: Kohlenstoffspeicher in kg CO ₂ -Äq/m ² BGF für einen Standardstall und ein äquivalentes Holztragwerk für beispielhafte Gebäude mit kleiner Spannweite (das negative Vorzeichen bedeutet, dass hier der Kohlenstoff gebunden ist)	34
Tabelle 6: Kohlenstoffspeicher in kg CO ₂ -Äq/m ² BGF für einen Standardstall und einen äquivalentes Holztragwerk für das repräsentative landwirtschaftliche Gebäude mit großer Spannweite (das negative Vorzeichen bedeutet, dass hier der Kohlenstoff gebunden ist).....	35
Tabelle 7: Treibhausgasemissionen (GWP) in kg CO ₂ -Äq/m ² BGF für einen Standardstall und ein äquivalentes Holztragwerk für beispielhafte Gebäude mit kleiner Spannweite.....	36

Tabelle 8: Treibhausgasemissionen (GWP) in kg CO₂-Äq/m² BGF für einen Standardstall und ein äquivalentes Holztragwerk für beispielhafte Gebäude mit großer Spannweite..... 37

QUELLENVERZEICHNIS

- DIN EN ISO 14044:2021 - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin. Umweltmanagement
- DIN EN ISO 14040:2021 - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin. Umweltmanagement
- DIN EN 16485 :2014 Rund- und Schnittholz – Umweltproduktdeklarationen – Produktkategorie-regeln für Holz und Holzwerkstoffe im Bauwesen; Deutsche Fassung EN 16485:2014. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2015) Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) Neubau Büro- und Verwaltungsgebäude 2015
- Bundesministerium für Innern, für Bau und Heimat (BMI) (2012) Der Leitfaden Nachhaltiges Bauen und das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) - Vertiefung zu Lebenszyklusanalysen: Ökobilanzierung, Unterlagen für Fort- und Weiterbildungsveranstaltungen.
https://www.nachhaltigesbauen.de/fileadmin/Netzwerk_NB/pdf/Men%C3%BCpunkt_Unterrichtsmaterialien/07_BNB_Seminar_Oekobilanz.pdf. Accessed 15 Jan 2019
- Bundesministerium für Innern, für Bau und Heimat (BMI) (2017a) Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB
- Bundesministerium für Innern, für Bau und Heimat (BMI) (2017b) Nutzungsdauern von Bauteilen zur Lebenszyklusanalyse nach BNB
- Bundesministerium für Innern, für Bau und Heimat (BMI) (2020a) ÖKOBAUDAT 2020-I. Stand: 30.01.2020. <https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/dastocks/8201b671-10cd-4dc5-9750-0b856d998be4/exportCSV?decimalSeparator=comma>
- Bundesministerium für Innern, für Bau und Heimat (BMI) (2020b) ÖKOBAUDAT 2020-I. Stand: 30.01.2020. <https://www.oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/dastocks/8201b671-10cd-4dc5-9750-0b856d998be4/exportCSV?decimalSeparator=comma>
- 68800 DIN 68800-1:2019-06, Holzschutz_ - Teil_1: Allgemeines. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

- Hafner A, Özdemir Ö (2022) Comparative LCA study of wood and mineral non-residential buildings in Germany and related substitution potential. *Eur. J. Wood Prod.* doi: 10.1007/s00107-022-01888-2
- Hafner A, Rüter S, Schäfer S, Ebert S, König H, Cristofaro L, Diederichs S, Kleinhenz M, Krechel M (2017) Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden. Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau), Bochum
- Hafner A, Schäfer S (2017) Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level
- Hafner A, Schäfer S, Krause K (2016) Effects of different reference study periods of timber and mineral buildings on material input and global warming potential, Hamburg
- IPCC (2014) 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. In: Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., und Troxler, T.G. (Hrsg.) IPCC, Switzerland
- IPCC (2019) 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories - Vol 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use. In: Calvo Buendia, E., Tanabe, K., Kranjc, A., Baasansuren, J., Fukuda, M., Ngarize, S., Osako, A., Pyrozhenko, Y., Shermanau, P., und Federici, S. (Hrsg.). National Greenhouse Gas Inventories Programme Technical Support Unit, IPCC,, Switzerland
- Kellenberger D, Althaus H-J (2009) Relevance of simplifications in LCA of building components. *Building and Environment* 44(4):818–825. doi: 10.1016/j.buildenv.2008.06.002
- Klöpffer, W. Grahl, B. (2009) Ökobilanz (LCA). Ein Leitfadens für Ausbildung und Beruf. WILEY-VCH, Weinheim
- König H, Kreißig J (2010) Ökologische Bewertung der Haustechnik. Forschungsprojekt Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung -BBR-, Forschungsinitiative "Zukunft Bau" Bonn (Auftraggeber) Leinfelden-Echterdingen: PE INTERNATIONAL GmbH, Ascona GbR
- Künniger T, Richter K (2014) Ökologische Bewertung von Fensterkonstruktionen. SZFF-EMPA (Eidgenössische Material- und Forschungsanstalt)-Forschungsprojekte
- Lehrstuhl Ressourceneffizientes Bauen (Reb) (2023a) Einteilung der Lebenszyklusinformation in Module nach DIN EN 15978:2012
- Lehrstuhl Ressourceneffizientes Bauen (Reb) (2023b) Einteilung der Lebenszyklusinformation in Module nach DIN EN 15978:2012
- 15978:2012 Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- DIN EN 15978:2012 Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode; Deutsche Fassung EN 15978:2011. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

- 15804:2022 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- DIN EN 15804:2022 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- Rüter S (2012) Umwelt-Produktdeklarationen für Bauprodukte nach EN 15804. Holztechnologie 53 4:56–57
- Rüter S (2023) Abschätzung von Substitutionspotentialen der Holznutzung und ihre Bedeutung im Kontext der Treibhausgas-Berichterstattung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 50 p, Thünen Working Paper 214, DOI:10.3220/WP1685603200000 https://literatur.thuenen.de/digbib_external/dn066391.pdf
- 4109-1 Schallschutz im Hochbau. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Umweltbundesamt (2022) Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2017 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 - 2020. In: Gniffke, P. (Hrsg.) Umweltbundesamt, Clim Change, 24/2022, 1048
- DIN EN ISO 14025:2011 Umweltkennzeichnungen und -deklarationen – Typ III Umweltdeklarationen – Grundsätze und Verfahren (ISO 14025:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14025:2011. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin
- DIN CEN ISO/TS 14071:2016 Umweltmanagement - Ökobilanz - Prozesse der Kritischen Prüfung und Kompetenzen der Prüfer: Zusätzliche Anforderungen und Anleitungen zu ISO 14044:2006 (ISO/TS 14071:2014); Deutsche und Englische Fassung CEN ISO/TS 14071:2016
- UNFCCC (2014) Report of the COP on its nineteenth session, held in Warsaw from 11 to 23 November 2013. Addendum: Decision 24/CP.19 on the Revision of the UNFCCC reporting guidelines on annual inventories for Parties included in Annex I to the Convention. FCCC/CP/2013/10/Add.3.
- Verein zur Förderung der Nachhaltigkeit im Wohnungsbau e.V. (NaWoh (2019) Nachhaltigkeit im Wohnungsbau. <http://nawoh.de> / Accessed 15 Jan 2019

Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen Bauen mit Holz - von der Planung bis zum Rückbau (ZukunftLaWiBau)

**Schlussbericht über o.g. Forschungsvorhaben
gefördert unter dem Kennzeichen: 2220HV036
im Rahmen „Landwirtschaftliches Bauen mit Holz“ des Förderprogramms „Nachwach-
sende Rohstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)**

TEIL E: Hygiene

Fachbereich Veterinärmedizin
Institut für Tier- und Umwelthygiene
Freie Universität Berlin (FU)

Projektbearbeitung:

Prof. Dr. med. vet. Uwe Rösler (FU)
Dr. med. vet. Anika Friese (FU)
Marie-Christin Mattauch (FU)
Fabian Conradi, PhD (FU)

INHALTSVERZEICHNIS

Begriffe und Definitionen	3
Abkürzungsverzeichnis.....	4
Kurzfassung.....	5
TEIL E: Hygiene	6
1 Bakterielle Kontamination der Holzprodukte und Prüfung der Desinfektionswirkung	6
1.1 Hintergrund.....	6
1.2 Zielstellung	7
1.3 Eingehende Darstellung der Labormethoden.....	8
1.3.1 Studiendesign.....	8
1.3.2 Untersuchung der Hygienisierung der Holzoberflächen - planktonische Zellen.	9
1.3.3 Systematische Anzucht von Biofilmen auf Holzoberflächen und Quantifizierung der Biofilmbildung	11
1.3.4 Untersuchung der Hygienisierung der Holzoberflächen - Biofilm	12
1.3.5 Tenazitätsversuche	13
1.3.6 Statistische Auswertung	14
1.4 Ergebnisse und Interpretation.....	15
1.4.1 Hygienisierung der Holzoberflächen bei +10°C und -10°C - planktonische Zellen	15
1.4.2 Zusätzlich getestete Hölzer bei +10°C und -10°C	21
1.4.3 Zusätzliche Messung der Luftfeuchte	22
1.4.4 Quantifizierung der Biofilmbildung auf Holzoberflächen	22
1.4.5 Keimträgerversuche bei Biofilmbildung auf Holzoberflächen	24
1.4.6 Tenazitätsversuche	28
1.5 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse.....	34
1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	34
Abbildungsverzeichnis.....	35
Tabellenverzeichnis.....	35
Quellenverzeichnis	36

BEGRIFFE UND DEFINITIONEN

Biofilm: «Biofilme sind Lebensgemeinschaften von Bakterien (...), die sich an Oberflächen anheften und dort aufwachsen. Sie können aus Individuen einer einzigen Spezies oder aus Mischpopulationen verschiedener Organismenarten zusammengesetzt sein. Dabei sind sie an die jeweilige Umgebung angepasst und verfügen über eine höhere Resistenz gegenüber Umgebungsbedingungen. Charakteristisch ist, dass die Zellen von einer mikrobiell induzierten Matrix – die Extrazelluläre polymere Substanz EPS – aus Polysacchariden, einer Vielzahl von Proteinen, Lipiden und oft auch von extrazellulärer DNA umgeben sind. (...)» (Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB)

Kältefehler eines Desinfektionsmittels: «Bei der Auswahl des Desinfektionsmittels ist zu berücksichtigen, dass etliche Mittel, vor allem die Aldehyde, bei niedrigen Temperaturen nicht oder nicht ausreichend wirken (...)» (Bayerisches Landesamt 2007)

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

d	Tage
DVG	Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft
<i>E. hirae</i>	<i>Enterococcus hirae</i>
<i>P. aeruginosa</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>
KbE	koloniebildende Einheiten
log	dekadischer Logarithmus
SD	Standardabweichung
TSA	Trypton-Soja-Agar

KURZFASSUNG

Die hygienischen Charakteristika des Baumaterials Holz werden seit Jahrzehnten kontrovers diskutiert. Das Ziel der Untersuchungen in dieser Studie war es, den Hygienestatus von Holz als häufig verwendetes Material im landwirtschaftlichen Bauen, welches sich vielfach auch im direkten Kontakt mit dem Tier befindet, zu prüfen und zu beurteilen. Es wurde die Effektivität von chemischen Desinfektionsmitteln zur oberflächlichen Anwendung (Peressigsäure, Ameisensäure, Glutaraldehyd) auf verschiedenen, kontaminierten Holzoberflächen (Pappel, Fichte, Kiefer, Buche, Douglasie) praxisnah bei zwei verschiedenen Umgebungstemperaturen (+10°C, -10°C) geprüft und beurteilt. Zur Kontamination wurden Indikatorkeime (*Enterococcus (E.) hirae*, *Pseudomonas (P.) aeruginosa*) eingesetzt. Ebenso wurde die Bildung von Biofilmen, welche eine erhöhte Resistenz gegenüber antimikrobiellen Substanzen aufweisen, auf hölzernen Oberflächen beobachtet und die Auswirkung auf die Desinfizierbarkeit mit Peressigsäure getestet.

Die Desinfektionsmittel Peressigsäure und Glutaraldehyd erreichten in praxistauglichen Konzentrationen von 0,5% beziehungsweise 1% auf allen intakten, feingesägten Holzoberflächen mit geringer Rautiefe bei einer Prüftemperatur von +10°C ein erfolgreiches Desinfektionsergebnis. Ameisensäure zeigte bei dieser Temperatur hingegen eine unbefriedigende Desinfektion in praktisch gebräuchlichen Konzentrationen. Bei -10°C konnte einzig Peressigsäure eine wirksame Desinfektion mit praxistauglichen Konzentrationen auf Holzoberflächen hervorrufen.

Außerdem wurde eine Biofilmbildung auf allen Hölzern beobachtet. Die Desinfektion aller mit Biofilm bewachsenden Holzoberflächen mit Peressigsäure wies eine deutlich verminderte Wirksamkeit des Desinfektionsmittels auf. Unter den getesteten Bedingungen erzielte die fünfzigfache Erhöhung der initial für planktonische Zellen ermittelten Konzentration eine sichere desinfizierende Wirkung von Biofilmen.

TEIL E: HYGIENE

1 BAKTERIELLE KONTAMINATION DER HOLZPRODUKTE UND PRÜFUNG DER DESINFEKTIONSWIRKUNG

Marie-Christin Mattauch, Anika Friese, Fabian Conradi, Uwe Rösler; Institut für Tier- und Umwelthygiene; Freie Universität Berlin

Die im Planungsleitfaden angegebenen rechtlichen Quellen und Literaturnachweise sind zu beachten, um eingehendere Informationen zu den nationalen und internationalen rechtlichen Grundlagen sowie zur Durchführung und den Einflussfaktoren der Reinigung und Desinfektion im Tierstall zu erhalten. Die Homepage der Deutschen Veterinärmedizinischen Gesellschaft, Ausschuss Desinfektion, bietet Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Desinfektionsmittel für die Tierhaltung (<https://www.desinfektion-dvg.de/index.php?id=1789>). Im Folgenden werden detailliert die im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen und deren Ergebnisse beschrieben.

1.1 Hintergrund

Bereits lange Zeit wird Holz traditionell im landwirtschaftlichen Bauen eingesetzt. In den letzten Jahrzehnten verlor das Baumaterial Holz aber gegenüber anderen Materialien zunehmend an Bedeutung (Destatis 2022). Ein möglicher Grund dafür ist das potenzielle hygienische Risiko bei der Verwendung von Holz in der Tierhaltung. In Deutschland gibt es keine offiziellen spezifischen Richtlinien für die Reinigung und Desinfektion von Holz. Zur vorbeugenden Desinfektion von Holzoberflächen gelten dieselben internationalen und nationalen rechtlichen Grundlagen wie für alle anderen Oberflächen. Im Tierseuchenfall ist das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft ermächtigt über Mittel und Verfahren zu bestimmen, die bei der Durchführung der tierseuchenrechtlich vorgeschriebenen Desinfektion angewendet werden dürfen. Das Friedrich-Loeffler-Institut, Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit, veröffentlichte in diesem Rahmen die Richtlinie über Mittel und Verfahren für die Durchführung der Desinfektion bei bestimmten Tierseuchen (Friedrich-Loeffler-Institut 2023). In diesen wird nicht spezifisch auf das Material Holz eingegangen. Dort heißt es lediglich im Abschnitt Reinigung: «brennbare Gegenstände sind der thermischen Verwertung zuzuführen» (Stand: August 2023). Jedoch liegt die Entscheidung über die spezifische Reinigung und Desinfektion im Tierseuchenfall beim jeweils zuständigen Veterinäramt. In den letzten Jahrzehnten waren die hygienischen Eigenschaften von Holz und die Möglichkeiten, es effizient zu reinigen und zu desinfizieren, ein sehr kontrovers diskutiertes Thema. Aufgrund der hohen Porosität und Saugfähigkeit des Werkstoffs Holz stufen einige Studien die Hygienisierungsmöglichkeiten dieses Materials als eher negativ ein (Abrishami et al. 1994, Gkana et al. 2016). Andere Studien wiesen bestimmten hingegen Holzarten antimikrobielle Eigenschaften zu und empfahlen den Einsatz von Holz auch in hygienisch kritischen Bereichen (Schönwälder et al. 2002, Gehrig et al. 2000). Darüber hinaus wurde in diesen Studien

betont, dass eine Verallgemeinerung der hygienischen Eigenschaften des Holzes unzulässig und eine Unterscheidung zwischen den Holzarten zwingend notwendig ist (Milling et al. 2005).

Zur Kontrolle der Biokontamination von Flächen in der Tierhaltung sind chemische Desinfektionsverfahren die gängigsten Methoden (Böhm 1998). In Deutschland werden kommerzielle Desinfektionsmittel für die Tierhaltung von der Deutschen Veterinärmedizinischen Gesellschaft geprüft und gelistet (DVG 2017). Die chemische Basis für die meisten in der Tierhaltung verwendeten Desinfektionsmittel stellen Sauerstoffabspalter, Aldehyde und organische Säuren dar (DVG 2023).

Die Desinfektionsmittelwirksamkeit kann sowohl von anwendungsbezogenen Faktoren aber auch von Umweltfaktoren beeinflusst werden (Bessems, Russell and McDonnell 2000).

Auch die Art des Bakterienwachstums auf der Oberfläche beeinflusst die Desinfektionswirksamkeit maßgeblich. Bei Biofilmen auf Oberflächen kann es zu einem ausgeprägten Wirkverlust des Desinfektionsmittels kommen (van Klingeren et al. 1998). Viele, auch pathogene, Mikroorganismen können Biofilme auf Holzoberflächen bilden (Gosling et al. 2017). Untersuchungen zur Möglichkeit der Hygienisierung verschiedenartiger Oberflächen mit Biofilmen zeigten, dass Holzoberflächen im Vergleich zu Oberflächen anderer Materialien mit Biofilmen schwieriger zu reinigen und desinfizieren waren (Bang et al. 2014, Adetunji and Isola 2011). Diese Studien unterschieden jedoch nicht zwischen verschiedenen Holzarten.

1.2 Zielstellung

Das Ziel des Arbeitspakets 5 war es, den Hygienestatus von Stalleinrichtungen in Holzbauweise zu analysieren und zu bewerten. Besonderer Fokus lag dabei auf:

- der Untersuchung der Widerstandsfähigkeit, Tenazität, bakterieller Erreger auf verschiedenartigen Holzoberflächen im Vergleich zu Edelstahl
- der Untersuchung der Hygienisierung verschiedener Bauhölzer, welche mit relevanten bakteriellen Erregern kontaminiert wurden, mittels geeigneter Desinfektionsmittel zur oberflächlichen Anwendung
- Untersuchung des praxisrelevanten Einflussfaktors «Temperatur» auf die Desinfektionseffizienz der verschiedenen chemischen Desinfektionsmittel
- Quantitative Analyse von Biofilmbildung bakterieller Erreger auf Oberflächen unterschiedlicher Holzarten
- Einfluss von Biofilmbildung auf die Desinfektionseffizienz

1.3 Eingehende Darstellung der Labormethoden

1.3.1 Studiendesign

Zunächst erfolgte die Testung der Desinfektionseffizienz auf Oberflächen mit planktonischen Zellen spezifischer Surrogaterreger im Keimträgertest. Dieser erfolgte nach derzeitig geltenden nationalen Prüfrichtlinien. Die Desinfektionseffizienz auf Holzoberflächen wurde bei zwei Temperaturen getestet. Standardmäßig wurden die Testungen bei +10°C durchgeführt. Zur Repräsentation auch kälterer Umgebungstemperaturen in Nutztierställen im Winter erfolgten ebenfalls Testungen bei -10°C.

Für noch mehr Praxisrelevanz wurden zusätzlich Versuche mit dem erfolgreichsten Desinfektionsmittel und Holzoberflächen, auf denen sich bereits Biofilme der Surrogaterreger gebildet hatten, durchgeführt. Dazu wurde in einem ersten Schritt ein Protokoll zur systematischen Anzucht von Biofilmen auf Holzoberflächen entwickelt und anschließend quantitativ die Menge des Biofilms auf den unterschiedlichen Holzoberflächen ermittelt und verglichen. In einem nächsten Schritt erfolgten mit Biofilm-tragenden Keimträgern angepasste Keimträgertests nach Vorbild der nationalen Prüfrichtlinien.

In einem weiteren Schritt wurde durch Tenazitätsversuche die Überlebensrate der getesteten Surrogaterreger über die Zeit auf hölzernen Oberflächen im Vergleich zu Stahl ermittelt.

Bakterienstämme

In dieser Studie wurden die Referenzstämme *Enterococcus (E.) hirae* ATCC 10541 als Surrogat für grampositive Bakterien und *Pseudomonas (P.) aeruginosa* ATCC 15442 als repräsentativer Stamm für gramnegative Bakterien verwendet. Beide Bakterienstämme wurden aufgrund ihrer bekannten Toleranz gegenüber Biozidwirkstoffen ausgewählt (Akinbobola, AB et al. 2017, Suchomel et al. 2019).

Verwendete Holzarten und Aufbereitung der hölzernen Keimträger

Spezielle Pappelkeimträger (DES-IN-TEST SUPPLY, Stuttgart, Deutschland) werden üblicherweise für Wirksamkeitstests von Desinfektionsmitteln nach nationalen und internationalen Prüfrichtlinien bzw. -normen verwendet. In unserer Studie wurde diese spezifische Pappelart zusammen mit Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*), die im Bauwesen weit verbreitet sind, untersucht. Als Referenz wurde ebenfalls eine andere Variante der Pappel (*Populus spp.*) einbezogen. Zusätzliche Tests wurden mit Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und Buche (*Fagus spp.*) durchgeführt. Sie könnten Bauhölzer der Zukunft darstellen. Für die Versuche wurden Holzkeimträger mit spezifischen Anforderungen benötigt. Die Herstellung dieser Holzkeimträger erfolgte durch die Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzwissenschaften. Jede Holzart wurde vor dem Gebrauch technisch getrocknet. Um vergleichbare hölzerne Keimträger zu schaffen, wurden 10x20x1mm große Holzstücke mit ebenen Oberflächen und optisch glatten Kanten aller Holzarten hergestellt (Abb. 2). Die Keimträger wurden in tangentialer und

radialer Richtung sägerau gesägt. Im S2-Labor erfolgte die Sterilisation der standardisierten Holzkeimträger durch Autoklavieren bei 121°C für 15 Minuten.

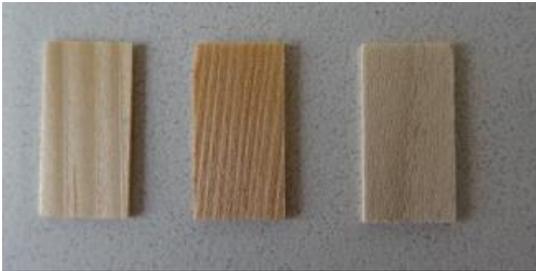


Abbildung 1. Im Versuch verwendete Holzkeimträger (von links nach rechts: Fichte, Kiefer und Pappel).

Desinfektionsmittel

Die Desinfektionsmittel wurden aufgrund ihrer hohen Relevanz für die Tierhaltung ausgewählt (DVG 2023). Folgende chemische Desinfektionsmittel wurden verwendet:

- 15%ige Peressigsäure, als Vertreter der Sauerstoffabspalter
- 98%ige Ameisensäure, als Vertreter der organischen Säure und
- 50%iges Glutaraldehyd, als Vertreter der Aldehyde.

Durch die Verwendung von Reinsubstanzen als Desinfektionsmittel wird eine bessere Vergleichbarkeit ihrer Wirksamkeit gewährleistet. Zur Verdünnung der Reinsubstanzen diente Wasser standardisierter Härte. Die Konzentrationen der in den Versuchen eingesetzten Desinfektionsmittel wurden nach den Richtlinien der Deutschen Veterinärmedizinischen Gesellschaft für die Wirksamkeitsprüfung von Desinfektionsmitteln im Nutztierbereich (DVG 2017) festgelegt. Die Untersuchung der Desinfektionseffizienz auf Biofilm-bewachsenden Holzkeimträgern wurden nur mit Peressigsäure durchgeführt.

1.3.2 Untersuchung der Hygienisierung der Holzoberflächen - planktonische Zellen

Die Prüfung der Desinfektionseffizienz auf Holzoberflächen erfolgte in Anlehnung an die Prüfrichtlinien der DVG zur Prüfung von Desinfektionsverfahren und chemischen Desinfektionsmitteln, Kapitel V.1.7.2, Version 7. November 2017 unter Anwendung der DIN EN 16437 für die quantitative Prüfung von Desinfektionsmitteln auf porösen Oberflächen (DIN EN 16437:2019-12). Jeder Test wurde je dreimal für die Testorganismen *E. hirae* und *P. aeruginosa* unter Verwendung der drei Desinfektionsmittel auf zunächst vier hölzernen Oberflächen (Kiefer, Fichte, Pappel, nach DVG hergestellte Pappel) durchgeführt.

Für jeden Erreger wurde in einem ersten Schritt spezifisch eine Erregersuspension hergestellt. Diese Initialsuspensionen beider Erreger wurden durch Messung der optischen

Dichte mit einem McFarland-Densitometer auf eine Zellzahl von $1,5 \times 10^9$ bis 5×10^9 koloniebildende Einheiten (*KbE*)/ml eingestellt. Organisches Material kann die Wirksamkeit eines Desinfektionsmittels bedeutend reduzieren (Drauch et al. 2020). Da diese potenzielle Quelle der verminderten Wirksamkeit bei der Desinfektion von Tierställen praktisch sehr relevant ist, wurde sich dazu entschieden, eine Belastungssubstanz bei der Desinfektionstestung zu verwenden. Aus diesem Grund wurde die Belastungssubstanz Bovines Serumalbumin (Endkonzentration: 3 g/l; Sigma, St. Louis, Missouri) hinzugefügt. Zu Beginn jedes Versuchs wurden die entsprechenden sterilen Holzkeimträger waagrecht in eine Petrischale gelegt und 0,1 ml der vorbereiteten Mischung aus Erregersuspension und Belastungssubstanz wurde auf jeden Holzträger gegeben. Anschließend erfolgte eine Trocknung der Keimträger im Inkubator. Die optisch trockenen Träger wurden danach zusammen mit den zuvor vorbereiteten Desinfektionsmittelkonzentrationen vorgekühlt. Die Tests bei +10 °C in einem Kühlschrank. Nachdem der limitierende Erreger bei +10°C identifiziert war, wurden mit diesem weitere Tests in einer Gefrierbox bei einer Temperatur von -10°C durchgeführt (Abb.3).



Abbildung 2. Verwendete Gefrierbox für Keimträgerversuche bei -10°C.

Für die eigentlichen Tests wurden die jeweiligen gekühlten Desinfektionsmittellösungen unterschiedlicher Konzentration in eine Petrischale gegeben. Anschließend wurde jeweils ein einzelner gekühlter Holzkeimträger für eine Minute vollständig in je eine Desinfektionsmittelkonzentration getaucht, dann herausgenommen und anschliessend je nach Prüftemperatur für 60 Minuten bei +10°C oder bei -10°C in eine Petrischale gestellt, um das Desinfektionsmittel einwirken zu lassen (=Einwirkzeit). Es erfolgte eine Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit der Luft während der Einwirkzeit.

Am Ende der Einwirkzeit wurde jeder Holzkeimträger in ein Reagenzglas mit einem für das jeweilige Desinfektionsmittel geeigneten Neutralisationsmittel überführt. Dies diente zum Stoppen der Desinfektionswirkung. Die Auswahl der Neutralisationsmittel für die einzelnen Desinfektionsmittel erfolgte in Anlehnung an die DVG-Prüfrichtlinien, Kapitel IV 2.4., Version 7. November 2017. Die genaue Zusammensetzung der Neutralisations-

mittel kann dem Anhang IV.3 dieser Richtlinien entnommen werden. Um die anhaftenden Zellen von der Holzoberfläche abzulösen, wurden die Reagenzgläser samt Keimträger in ein Ultraschallbad mit einer Temperatur von 0-4°C gegeben. Schließlich wurden die entstandenen Lösungen aus jedem Reagenzglas in Trypton-NaCl-Lösung dekadisch verdünnt und im Doppelansatz auf Trypton-Soja-Agar (TSA)-Platten ausplattiert. Die Agarplatten wurden 24 Stunden lang aerob bei 37°C bebrütet. Um die Reduktion jeder Desinfektionsmittelkonzentration berechnen zu können, wurde bei jeder Durchführung parallel eine Kontrolle mit Wasser standardisierter Härte anstelle eines Desinfektionsmittels mitgeführt. Die Auswertung der Platten und die Berechnung der Reduktion für jede Konzentration erfolgte nach DIN EN 16437. Alle Platten, auf denen sich zwischen 14 und 301 Kolonien befanden, wurden in die Auswertung einbezogen. Zusätzlich wurden für jeden Test weitere Kontrollen (Toxizitätskontrolle, Neutralisationskontrolle) nach DIN EN 16437 bzw. den Richtlinien der DVG, Kapitel V.1.7.3.2.2, durchgeführt.

1.3.3 Systematische Anzucht von Biofilmen auf Holzoberflächen und Quantifizierung der Biofilmbildung

Systematische Anzucht von Biofilmen auf Holzkeimträgern

Ein Protokoll für die systematische Anzucht von Biofilmen auf Holzoberflächen wurde ebenfalls etabliert:

Die, wie oben beschriebenen, vorbereiteten Holzkeimträger wurden getrennt nach Holzart waagrecht in Petrischalen platziert. Für jeden Erreger (*E. hirae* und *P. aeruginosa*) wurde je Holzart eine Petrischale vorbereitet. Vorversuche ergaben für beide Bakterienstämme eine starke Biofilmbildung im Brain Heart Infusion Medium. Aus Kulturen jedes Surrogaterregers wurde separat Material gewonnen, dieses im Brain Heart Infusion Medium gelöst und je Erreger eine standardisierte Ausgangssuspension für jeden Versuch hergestellt. Eine definierte Menge an Ausgangssuspension wurde in die entsprechenden Petrischalen hinzugefügt. Die Petrischalen wurden dann für 14 Tage im Kühlschrank bei +10°C gelagert, um eine gleichmäßige und kontrollierte Biofilmbildung zu ermöglichen. Es konnte für beide Erreger auf allen Holzarten ein Biofilmwachstum lichtmikroskopisch festgestellt werden.

Quantifizierung der Biofilmbildung auf hölzernen Oberflächen

Für *E. hirae* und *P. aeruginosa* wurden unabhängig voneinander jeweils drei Suspensionen hergestellt. Jede Suspension wurde zusammen mit sechs Holzkeimträgern der jeweiligen Holzart (Kiefer, Fichte, Pappel, Buche, Douglasie) in eine Petrischale gegeben. Diese Versuchsanordnung ergab drei biologische Wiederholungen pro Pathogen und Holzart. Die Petrischalen wurden dann in einen Kühlschrank bei +10°C verbracht und nach 60 Minuten, einem Tag, drei Tagen, sieben Tagen, zehn Tagen und vierzehn Tagen erfolgte die quantitative Bestimmung der Erregermenge auf jedem Holzkeimträger. Dafür wurde je ein Holzkeimträger pro Petrischale nach den entsprechenden Zeiträumen entnommen, 20 Sekunden lang in entmineralisiertem Wasser gewaschen und dann in

ein Trypton-Soja-Bouillon (TSB)-Röhrchen überführt. Nachfolgend wurde der Keimträger im TSB-Röhrchen in ein Ultraschallbad gegeben und anschließend sonifiziert. Die resultierende Zellsuspension wurde in Trypton-NaCl-Lösung seriell verdünnt und in doppelter Ausführung auf TSA-Platten ausgebracht. Diese Platten wurden 24 Stunden aerob bei 37 °C inkubiert. Zur Quantifizierung der Biofilmbildung wurden die koloniebildenden Einheiten gezählt und die Menge, die auf jedem Holzkeimträger vorhandenen Erreger berechnet. Alle Platten wurden in die Auswertung miteinbezogen.

1.3.4 Untersuchung der Hygienisierung der Holzoberflächen - Biofilm

Im ersten Teil dieser Untersuchung wurde die Desinfizierbarkeit der mit Biofilm bewachsenden, hölzernen Oberflächen geprüft. Ziel des ersten Teils war es, die Erregerreduzierung von Biofilm-bildenden Zellen auf Holzoberflächen bei Behandlung mit spezifischen Desinfektionsmittelkonzentrationen zu bestimmen. Die Testung der Desinfektionseffizienz gegenüber Biofilmen folgte weitgehend nach den Prüfrichtlinien der DVG für planktonische Zellen. Jedoch erfolgten einige Versuchsanpassungen speziell für Biofilme.

Auf den Keimträgern aller fünf Holzarten wurden Biofilme gezüchtet und diese anschließend bei +10°C mit Peressigsäure behandelt. Jeder Versuch wurde dreimal durchgeführt. Für diese Versuche wurden die wirksamen Konzentrationen des limitierenden Erregers verwendet, die in den Test mit planktonischen Zellen für jede Holzoberfläche ermittelt wurden.

Die Biofilm-tragenden Holzkeimträger wurden zu Beginn aus dem Kühlschrank genommen und für 20 Sekunden in 20 ml sterilem Wasser getaucht, um lose anhaftende Zellen mit sanften kreisenden Bewegungen zu entfernen. Die anschließende Testung erfolgte ähnlich zur oben beschriebenen Testung der planktonischen Zellen, mit der Ausnahme, dass Vorversuche zeigten, dass eine Verlängerung der Dauer des Ultraschallbads zu einer besseren Ablösung der Zellen vom Holzträger führte. Um eine bessere Suspension des Biofilmmaterials im Inaktivierungsmittel zu erreichen, wurde die Lösung zusätzlich 1,5 Minuten lang sonifiziert (Abb. 5). Die Einstellungen des Sonifikators wurden auf der Grundlage von Vorversuchen festgelegt.



Abbildung 3. Sonifikator, zur Auflösung des Biofilmmaterials in Suspension.

Für die Versuche des zweiten Teils der Untersuchung wurde diejenige Holzart ausgewählt, bei der die geringste Biofilminaktivierung durch das Desinfektionsmittel beobachtet werden konnte. Ziel dieses zweiten Teils war es, diejenige Konzentration zu ermitteln, bei der eine erfolgreiche Desinfektion des Biofilms möglich ist. Dafür wurde die initiale Konzentration der Peressigsäure um das Zwei-, Fünf-, Zehn-, Fünfzig- und Hundertfache erhöht. Der Versuch wurde zwei Mal wiederholt.

1.3.5 Tenazitätsversuche

Vorbereitung der Stahlprüffläche

Als vergleichende Referenz-Prüfoberflächen dienten Scheiben aus nicht rostendem Stahl 304 mit ebener Oberfläche und einem Durchmesser von 2cm. Die Scheiben wurden vor dem Versuch gründlich gereinigt, gespült, mit 95%igem Propanol desinfiziert, getrocknet und anschließend sterilisiert.

Durchführung der Tenazitätsversuche bei +10°C

Als hölzerne Prüfflächen wurden die oben beschriebenen Holzkeimträger verwendet und ebenso vorbereitet. Als Vergleich dienten die oben beschriebenen Stahlflächen. Nach DIN EN 16437 wurden aus Übernachtskulturen von *E. hirae* und *P. aeruginosa* separate Ausgangskeimsuspensionen hergestellt. Zur Ermittlung des initialen Erregergehalts pro Ausgangssuspension wurden dekadische Verdünnungsreihen mit einer Trypton-NaCl-Lösung erstellt und im Doppelansatz auf TSA ausplattiert. Zur Repräsentation von organischem Material auf Stallobereflächen wurde jeder Ausgangssuspension im 1:1 Verhältnis Bovines Serumalbumin (Endkonzentration: 3g/l) hinzugefügt. Je Erreger und je Holzart wurden je drei Petrischalen vorbereitet. Je Petrischalen wurden sechs Keimträger waagrecht platziert. Auf jeden Keimträger wurden 0,1 ml der Mischung aus Keimsuspension und Bovinem Serumalbumin gegeben. Ohne vorheriges Antrocknen der Suspensionen auf den Keimträgern wurden diese anschließend in ihren Petrischalen in einen Kühlschrank mit einer Temperatur von +10°C verbracht. Nach definierten Zeitspannen (Tag 1, Tag 3, Tag 7, Tag 14, Tag 21, Tag 28, Tag 42, Tag 56) wurde je ein Keimträger aus jeder Petrischale entnommen und die Keimzahl pro Keimträger wie folgt bestimmt. Der jeweilig entnommene Holzkeimträger wurde in Trypton-Soja-Bouillon gegeben und gevortext. Zur Ablösung der Zellen von der Holzoberfläche wurden die Reagenzgläser samt Holzkeimträger in ein Ultraschallbad gegeben. Die jeweiligen Stahlkeimträger wurden hingegen in Reagenzgläser mit Trypton-Soya-Bouillon und zusätzlichen Glasperlen verbracht. Zur Ablösung der Zellen von der Stahlfläche wurden diese anschließend auf einen Rundsüttler gegeben. Die entstandenen Suspensionen wurden dekadisch in einer Trypton-NaCl-Lösung verdünnt und auf TSA ausplattiert. Die Platten wurden für 18-24h bei 37°C inkubiert und anschließend ausgezählt. In die Auswertung wurden Platten mit einem Bewuchs zwischen 14 und 301 KbE miteinbezogen. Die verbliebene Erregermenge pro Holzkeimträger wurde berechnet. Die Berechnung der verbliebenden Keimzahl pro Keimträger erfolgte mit folgender Formel:

$$N = \frac{c}{(n_1 + 0,1n_2)} \times \frac{10}{d}$$

N = Keimzahl pro Keimträger in KbE/Keimträger

c = Summe der einbezogenen ausgezählten KbE je Platte

n₁ = Anzahl der einbezogenen KbE-Werte der niedrigsten Verdünnungsstufe

n₂ = Anzahl der einbezogenen KbE-Werte der höheren Verdünnungsstufe

d = Verdünnungsstufe der niedrigeren Verdünnungsstufe

Zu jedem Messzeitpunkt wurde pro Oberflächenart die Erregerzahl von drei unabhängigen Keimträgern bestimmt.

Durchführung des Tenazitätsversuchs bei -10°C

Als Prüfflächen dienten ebenso die oben beschriebenen Holzkeimträger sowie die Stahlkeimträger. Ebenfalls wurden aus Übernachtskulturen von *E. hirae* und *P. aeruginosa* je eine Ausgangskeimsuspension nach DIN EN 16437 hergestellt und diese Suspension in einem 1:1 Verhältnis mit Bovinen Serumalbumin (Endkonzentration: 1g/l) gemischt. Je Erreger und je Holzart wurden je drei Petrischalen vorbereitet. Je Petrischale wurden diesmal sieben Keimträger waagrecht platziert. Auf jeden Keimträger wurden 0,1 ml der Mixtur aus Keimsuspension und Bovinem Serumalbumin gegeben. Die Keimträger gelangten dann zur Trocknung in den Inkubator. Nach der Trocknung wurde anschließend jeder Petrischale ein Keimträger zur Bestimmung des initialen Erregergehalts entnommen. Der Rest wurde in eine Gefrierbox verbracht und nach definierten Zeitspannen (Tag 1, Tag 3, Tag 7, Tag 14, Tag 21, Tag 28, Tag 42, Tag 70) wurde, wie oben beschrieben, die Keimzahl pro Keimträger bestimmt. Zu jedem Messzeitpunkt wurde pro Oberflächenart die Erregerzahl von drei unabhängigen Keimträgern ermittelt.

1.3.6 Statistische Auswertung

Für die statistische Analyse wurde IBM SPSS Statistics Version 28.0.1.0 für Windows© verwendet. Die wirksamen Konzentrationen der einzelnen Desinfektionsmittel wurden für die verschiedenen Holzoberflächen mit dem Kruskal-Wallis-Test für nichtparametrische Daten verglichen. Zur Bewertung der Unterschiede der wirksamen Desinfektionsmittelkonzentrationen zwischen beiden Surrogaterregern und der Unterschiede zwischen den wirksamen Konzentrationen bei beiden Temperaturen wurde der Mann-Whitney-U-Test verwendet.

Zur Untersuchung der Tenazitätsversuche wurden die ermittelten Erregerzahlen pro Keimträger (KbE/Keimträger) logarithmiert und für jede Temperatur und jeden Erreger separat ebenfalls mit Hilfe von IBM SPSS Statistics Version 28.0.1.0 für Windows© aus-

gewertet. Dabei wurde mit Hilfe einer Welch-ANOVA, für normalverteilte Daten, die Erregerzahlen pro Oberfläche zu jedem Messzeitpunkt verglichen. Aufgrund von Varianzungleichheiten wurde für den paarweisen Vergleich der Games-Howell post-hoc Test durchgeführt.

1.4 Ergebnisse und Interpretation

1.4.1 Hygienisierung der Holzoberflächen bei +10°C und -10°C - planktonische Zellen

Zur Bestimmung der Konzentration der chemischen Desinfektionsmittel, welche eine wirksame Desinfektion auf den unterschiedlichen Holzoberflächen hervorruft, wurden die getesteten Konzentrationen so gewählt, dass der Übergang von ineffektiver Konzentration zur effektiven Konzentration gezeigt werden konnte. Die niedrigste Konzentration, die eine Erregerreduktion um 4 dekadische Logarithmus(log)-Stufen der mikrobiellen Keimzahl (KbE/Keimträger) erreichte, wurde dabei als effektive Konzentration definiert. Jeder Versuch wurde drei Mal durchgeführt. Die höchste in diesen drei Versuchen ermittelte Konzentration wurde als anzuwendende Konzentration bezeichnet. Eine Ausnahme bildete die Ameisensäure. Die Desinfektionsversuche mit Ameisensäure auf beiden Pappelflächen bei -10°C zeigten inkonstante Ergebnisse. Der Übergang von ineffektiver zur effektiven Ameisenkonzentration konnte auf diesen beiden Pappelflächen nicht gezeigt werden. Aus diesem Grund erfolgte eine Anpassung der Definition und die Konzentration, welche drei Mal hintereinander eine Reduzierung um 4 log-Stufen erreichte, wurde als effektive Konzentration definiert.

Prüfung der Desinfektionswirkung auf Kiefer, Fichte und Pappel bei +10°C

Die Ergebnisse der Keimträgerversuche bei +10°C können der Tabelle 1 entnommen werden.

Peressigsäure zeigte sich auf allen hölzernen Oberflächen mit Konzentrationen von 0,1% bis 0,5% als wirksames Desinfektionsmittel gegenüber *E. hirae*. Die ermittelten Peressigsäure-Konzentrationen für eine wirksame Desinfektion von *P. aeruginosa* auf den vier verschiedenen Holzoberflächen waren mit einer Spanne von 0,05% und 0,1% geringfügig niedriger. Zudem konnten, sowohl für *E. hirae* als auch für *P. aeruginosa*, keine signifikanten Unterschiede zwischen den effektiven Peressigsäure-Konzentrationen der verschiedenen Holzoberflächen ermittelt werden ($p=0,106$).

Die ermittelten anzuwendenden Konzentrationen der Peressigsäure zur erfolgreichen Desinfektion von Holzoberflächen bei +10°C liegen damit insgesamt im, in der Literatur angegeben, normalen Anwendungsbereich dieses Desinfektionsmittels (Strauch and Böhm 2002). Zudem lassen sich alle Holzoberflächen uniform desinfizieren.

Die ermittelten anzuwendenden Konzentrationen von Glutaraldehyd bei +10°C schwankten je nach Holzart zwischen 0,75% und 1,5% zur Desinfektion von *E. hirae*. Die anzuwendende Konzentration von Glutaraldehyd zur Desinfektion von *P. aeruginosa* zeigten sich mit 0,25% auf der Fichten-, Kiefer- und Pappeloberfläche (nach DVG produziert) niedriger. Lediglich auf der Referenzpappel benötigte Glutaraldehyd zur Desinfektion beider Erreger dieselbe Konzentration mit 0,75%. Auch hier konnte für beide Erreger kein signifikanter Unterschied zwischen den, auf den unterschiedlichen hölzernen Oberflächen, benötigten effektiven Konzentrationen festgestellt werden ($p=0,104$).

Die ermittelten anzuwenden Konzentrationen von Glutaraldehyd liegen damit leicht über den in der einschlägigen Fachliteratur empfohlen Konzentration. So führt die Richtlinie des Friedrich-Loeffler-Instituts eine Glutaraldehyd-Konzentration von 0,2% bei einer Einwirkzeit von 20 Minuten zur Desinfektion von vegetativen Bakterienzellen auf und in Wallhäußers Praxis der Sterilisation, Desinfektion, Antiseptik und Konservierung liegt die empfohlene Konzentration von Glutaraldehyd bei 0,5% mit einer Einwirkzeit von 5 Minuten (Friedrich-Loeffler-Institut 2023, Kramer and Assadian 2008). Jedoch gibt das Friedrich-Loeffler-Institut ebenfalls in ihren Empfehlungen zur Desinfektion von Bakteriensporen an 2%ige Glutaraldehydlösungen für eine Einwirkzeit von 2 Stunden zu verwenden. Zudem sind im spezifischem Tierseuchenfall laut Literatur Konzentrationen bis zu maximal 4-5% Glutaraldehyd mit Einwirkzeiten bis zu 2h anzuwenden (Bisping 1999, Friedrich-Loeffler-Institut 2023). Insgesamt lässt sich feststellen, dass eine erfolgreiche Desinfektion einheitlich für Holzoberflächen bei +10°C mit Glutaraldehyd möglich ist, jedoch sollten Konzentrationen angepasst oder längere Einwirkzeiten verwendet werden. Dabei muss jedoch zwingend auf die Einhaltung aller sicherheitsrelevanten Vorschriften geachtet werden, da Glutraldehyd Reizungen und Sensibilisierungsreaktionen der Haut und der Atemwege auslösen kann (Internationalen Vereinigung für Soziale Sicherheit 2014).

Ameisensäure zeigte eine erfolgreiche Desinfektion von *E. hirae* auf Holzoberflächen mit anzuwendenden Konzentrationen zwischen 4,5% und 9,5%. Dabei benötigte die Kiefernoberfläche mit 4,5% die niedrigste Ameisensäurekonzentration zur Desinfektion von *E. hirae*, wohingegen die Pappeloberflächen mit jeweils 7,5% (Referenzpappel) und 9,5% (Pappel, nach DVG-Prüfrichtlinien) die höchsten Konzentrationen benötigten. Außerdem konnte eine große Varianz in den Reduktionsleistungen der Ameisensäure gegenüber *E. hirae* insbesondere auf der Fichtenoberfläche und der Pappeloberfläche, welche nach DVG-Prüfrichtlinien produziert wurde, beobachtet werden. Wesentlich niedrigere anzuwendende Konzentrationen der Ameisensäure (0,5% bis 3%) konnten hingegen bei der Desinfektion von *P. aeruginosa* festgestellt werden. Auch hier benötigte die Pappel nach DVG-Prüfrichtlinien die höchste Ameisenkonzentration mit 3%. Es konnte jedoch insgesamt für beide Erreger kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den effektiven Konzentrationen der Ameisensäure auf den verschiedenen Holzoberflächen festgestellt werden ($p=0,123$).

Die von uns ermittelten anzuwendenden Konzentrationen der Ameisensäure liegen damit über den in der Literatur angegebenen Anwendungskonzentrationen der Ameisensäure, ausgenommen der Kiefernoberfläche. Anwendungskonzentrationen der Ameisensäure in der Nutztierhaltung liegen typischerweise zwischen 2% und 4% bei Einwirkzeiten von 2 Stunden (Strauch and Böhm 2002, Friedrich-Loeffler-Institut 2023). Auch im spezifischen Tierseuchenfall liegen die von der Literatur empfohlenen Konzentrationen bei maximal 5% (Friedrich-Loeffler-Institut 2023).

Zwar konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den effektiven Konzentrationen von Ameisensäure bei der Anwendung auf den verschiedenen Holzoberflächen gezeigt werden, jedoch ließen sich insbesondere bei der Desinfektion von *E. hirae* größere Varianzen in der Reduktionsleistung feststellen. In Bezug auf die obenstehenden Ergebnisse kann eine erfolgreiche Desinfektion von verschiedenen Holzoberflächen mit Ameisensäure mit praxisüblichen Konzentrationen nicht sicher gewährleistet werden.

Wie in Tabelle 1 ersichtlich, waren die ermittelten anzuwendenden Konzentrationen zur Desinfektion von *E. hirae* bei +10°C bei allen Desinfektionsmitteln auf allen Oberflächen signifikant höher als die ermittelten anzuwendenden Konzentrationen zur Desinfektion von *P. aeruginosa* (Peressigsäure und Glutaraldehyd: $p < 0,001$ / Ameisensäure: $p = 0,002$). Aus diesem Grund wurde *E. hirae* als limitierender Erreger für die Desinfektion der Holzoberflächen bestimmt und für weitere Versuche bei -10°C ausgewählt.

Prüfung der Desinfektionswirkung auf Kiefer, Fichte und Pappel bei -10°C

In Tabelle 2 sind die effektiven Konzentrationen der Desinfektionsmittel je Holzart vollständig für die Versuche bei -10°C dargestellt.

Die ermittelten anzuwendenden Konzentrationen der Peressigsäure bei -10°C zeigten sich im Vergleich zu den Versuchen bei +10°C auf allen Holzoberflächen zur erfolgreichen Desinfektion von *E. hirae* um das Zwei- bis Dreifache erhöht und lagen zwischen 0,5% und 1,5%. Ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den effektiven Konzentrationen der Peressigsäure auf den unterschiedlichen Hölzern konnte bestimmt werden ($p = 0,002$).

Desinfektionsmittel verlieren mit kälter werdenden Temperaturen einen Teil ihrer Wirksamkeit (Müller and Schlenker 2021). Dabei gehört Peressigsäure zu den wenigen Desinfektionsmitteln, die auch bei Temperaturen zwischen 0°C - 10°C eine ausreichend inaktivierende Wirkung gegenüber Bakterien besitzen (Friedrich-Loeffler-Institut 2023). Bei Temperaturen unter 0°C muss eine Konzentrationsanpassung vorgenommen werden. Andere Autoren konnten ebenfalls bei einer Erhöhung der Peressigsäure-Konzentration um das Zwei- bis Vierfache eine erfolgreiche Desinfektion unter 0°C beobachten (Kraus B. 1983). Die von uns festgestellte höchste Peressigsäure-Konzentration von 1,5% liegt im praxisgebräuchlichen Bereich. Ein Einsatz von Peressigsäure zur Holzoberflächendesinfektion ist also auch bei niedrigeren Temperaturen möglich. Zur

Untersuchung des statistisch signifikanten Unterschiedes zwischen den Hölzern wurden zusätzliche Test mit zwei weiteren Holzarten durchgeführt (Ergebnisse siehe 1.6.2).

Eine erfolgreiche Desinfektion mit Glutaraldehyd konnte bei -10°C auf drei der vier Holzoberflächen selbst bei einer Konzentrationserhöhung auf 20% nicht erreicht werden. Auf eine weitere Erhöhung der Konzentration wurde verzichtet, da ein Einsatz von höheren Konzentrationen bei der Desinfektion in Tierställen ausgeschlossen ist.

Glutaraldehyd hat einen ausgeprägten Kältefehler (Strauch and Böhm 2002). Mehrere Autoren raten von einem Einsatz bei Temperaturen unter 10°C ab (Bisping 1999, Friedrich-Loeffler-Institut 2023). Unsere Versuche zeigten, dass dieser ausgeprägte Temperaturfehler auch bei der Desinfektion von Holzoberflächen zu beobachten ist und das Glutaraldehyd nicht zur Desinfektion von Holzoberflächen bei kälteren Temperaturen geeignet ist.

Ameisensäure zeigte eine erfolgreiche Desinfektion bei -10°C auf allen Holzoberflächen mit anzuwendenden Konzentrationen von 9% bis 17%. Dabei konnte ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Pappeloberflächen und der Fichtenoberfläche ($p < 0,001$) festgestellt werden.

Die ermittelten anzuwendenden Konzentrationen der Ameisensäure bei -10°C liegen weit über praxisüblichen Konzentrationen. Aber insbesondere die starke Inkonstanz der Reduktionsleistungen der Ameisensäure, welche in einem wesentlich geringeren Maße bereits bei den $+10^{\circ}\text{C}$ Versuchen beobachtet werden konnte, lassen zu dem Schluss kommen, dass Ameisensäure unter keinen Bedingungen zur Desinfektion von Holzoberflächen geeignet ist.

Tabelle 1. Effektive Konzentrationen von Peressigsäure, Ameisensäure und Glutaraldehyd in % für eine wirksame Desinfektion von *E. hirae* und *P. aeruginosa* bei einer Umgebungstemperatur von +10°C auf Keimträgern aus Fichte, Kiefer und Pappel (Referenz und nach DVG)

Erreger	Test-nr.	Desinfektionsmittel												
		Peressigsäure				Ameisensäure				Glutaraldehyd				
Holzart		Fichte	Kiefer	Pappel	Pappel (DVG) ¹	Fichte	Kiefer	Pappel	Pappel (DVG) ¹	Fichte	Kiefer	Pappel	Pappel (DVG) ¹	
<i>E. hirae</i>	1	0,25	0,5	0,25	0,25	7	4	7,5	4	0,75	1	0,25	1	
	effektive Konzentration je Test	2	0,25	0,25	0,25	0,1	5,5	4,5	7,5	9,5	1	0,75	0,5	0,75
		3	0,5	0,5	0,1	0,1	5,5	4,5	7,5	5	1	0,75	0,75	1,5
	anzuwendende Konzentration²		0,5	0,5	0,25	0,25	7	4,5	7,5	9,5	1	1	0,75	1,5
<i>P. aeruginosa</i>	1	0,1	0,05	0,05	0,1	0,5	0,5	0,5	2	0,25	0,25	0,75	0,25	
	effektive Konzentration je Test	2	0,1	0,1	0,05	0,1	0,5	0,75	0,75	3	0,1	0,1	0,5	0,25
		3	0,05	0,1	0,05	0,1	0,5	0,5	0,5	0,25	0,1	0,1	0,25	0,1
	anzuwendende Konzentration²		0,1	0,1	0,05	0,1	0,5	0,75	0,75	3	0,25	0,25	0,75	0,25

¹ Referenzpappel, welche nach den Prüfrichtlinien der Deutschen Veterinärmedizinischen Gesellschaft produziert wurde

² die anzuwendende Konzentration ist die höchste ermittelte effektive Konzentration der drei Versuchsdurchführungen

Tabelle 2. Effektive Konzentrationen von Peressigsäure, Ameisensäure und Glutaraldehyd in % für eine wirksame Desinfektion von *E. hirae* und *P. aeruginosa* bei einer Umgebungstemperatur von -10°C auf Keimträgern aus Fichte, Kiefer und Pappel (Referenz und nach DVG)

Erreger	Test-nr.	Desinfektionsmittel											
		Peressigsäure				Ameisensäure				Glutaraldehyd			
Holzart		Fichte	Kiefer	Pappel	Pappel (DVG) ¹	Fichte	Kiefer	Pappel	Pappel (DVG) ¹	Fichte	Kiefer	Pappel	Pappel (DVG) ¹
<i>E. hirae</i>	1	1,5	1	0,5	0,25	9	15	17 ³	17 ³	>20	>20	>20	13
	2	0,75	1	0,75	0,5	8,5	14	17 ³	17 ³	>20	>20	>20	14
	3	1,5	1	0,25	0,5	8	14	17 ³	17 ³	>20	>20	>20	13
anzuwendende Konzentration²		1,5	1	0,75	0,5	9	15	17³	17³	>20	>20	>20	14

¹ Referenzpappel, welche nach den Prüfrichtlinien der Deutschen Veterinärmedizinischen Gesellschaft produziert wurde

² die anzuwendende Konzentration ist die höchste ermittelte effektive Konzentration der drei Versuchsdurchführungen

³ Abweichungen von Teststandards, adaptierte Versuchsdurchführung

1.4.2 Zusätzlich getestete Hölzer bei +10°C und -10°C

Peressigsäure, als vielversprechendstes Desinfektionsmittel zur Desinfektion von Holzoberflächen wurde für Versuche mit zwei weiteren Holzarten (Buche und Douglasie) ausgewählt. Als Indikatorkeim diente hierbei nur *E. hirae*, als limitierender Erreger. Die entsprechenden Ergebnisse können der Tabelle 3 entnommen werden. Bei +10°C konnte für Peressigsäure auf beiden Holzoberflächen 0,1% als anzuwendende Konzentration für eine erfolgreiche Desinfektion von *E. hirae* ermittelt werden. Bei -10°C jedoch wurden höhere anzuwendende Konzentrationen von 0,75% für eine wirksame Desinfektion von *E. hirae* auf der Douglasienoberfläche und 0,25% für die Desinfektion auf der Buchenoberfläche benötigt. Bemerkenswert ist, dass sowohl bei 10°C als auch bei -10°C beim Vergleich zwischen den effektiven Konzentrationen der Peressigsäure auf den sechs unterschiedlichen Holzoberflächen ein signifikanter Unterschied detektiert werden konnte ($p=0,022$).

Tabelle 3. Effektive Konzentrationen von Peressigsäure in % für eine wirksame Desinfektion von *E. hirae* bei 2 Temperaturen (+10°C und -10°C) auf Keimträgern aus Douglasie und Buche

Erreger	Test-nr.	Temperatur			
		10°C		-10°C	
Holzart		Douglasie	Buche	Douglasie	Buche
<i>E. hirae</i>	1	0,1	0,05	0,75	0,25
	2	0,1	0,1	0,75	0,25
	3	0,05	0,05	0,75	0,1
anzuwendende Konzentration¹		0,1	0,1	0,75	0,25

¹die anzuwendende Konzentration ist die höchste ermittelte effektive Konzentration der drei Versuchsdurchführungen

Somit lässt sich feststellen, dass Peressigsäure in praxistauglichen Konzentrationen unter allen getesteten Bedingungen eine wirksame Desinfektion auf Holzoberflächen erreicht hat. Unsere Testungen beziehen die gebräuchlichsten Bauholzarten mit ein. Da sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Hölzern zeigte, müssen gegebenenfalls noch spezifische Testungen anderer Holzarten erfolgen.

1.4.3 Zusätzliche Messung der Luftfeuchte

Bei allen Desinfektionstests mit planktonischen Zellen wurde die Luftfeuchtigkeit der Umgebungsluft während der Einwirkzeit gemessen. Dabei ergab sich bei Versuchen mit einer Umgebungstemperatur von +10°C eine durchschnittliche Luftfeuchtigkeit von 60,20% und bei Versuchen mit einer Umgebungstemperatur von -10°C lag die Luftfeuchtigkeit im Mittel bei 61,99%.

Die Messung erfolgte aufgrund des Einflusses der Luftfeuchte auf die Desinfektionseffizienz. Niedrige Luftfeuchten haben einen negativen Einfluss auf die Wirksamkeit von Desinfektionsmittel (Böhm 1998). Die angestrebte optimale Luftfeuchtigkeit im Stall liegt bei 50% bis 80% (Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen BLV - Tiererschutz 2009). Die von uns gemessenen Werte lagen innerhalb dieses Bereiches und waren stets konstant mit geringgradigen Schwankungen. Es kann also bezogen auf die Luftfeuchte von praxisnahen Versuchsbedingungen ausgegangen werden.

1.4.4 Quantifizierung der Biofilmbildung auf Holzoberflächen

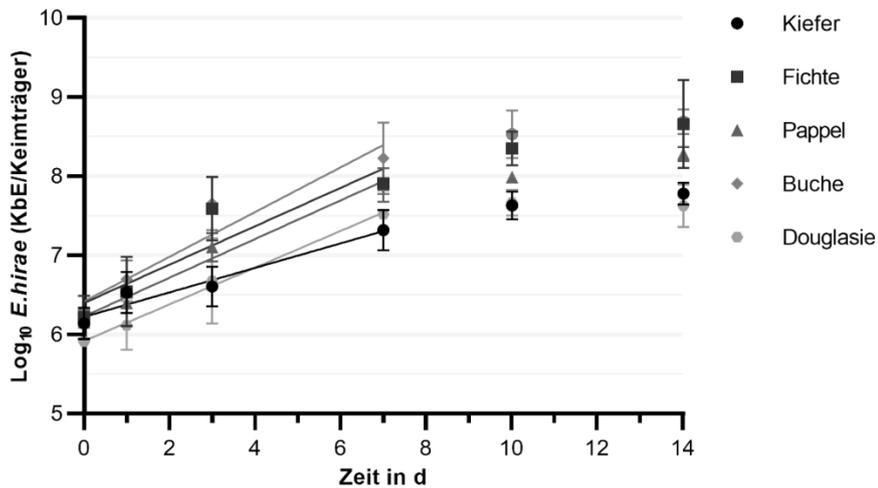
Die Biofilmbildung von *E. hirae* und *P. aeruginosa* wurde auf fünf verschiedenen Holzoberflächen (Kiefer, Fichte, Pappel, Douglasie und Buche) mit einer Wachstumszeit von 14 Tagen geprüft. Es konnte für beide Erreger ein Biofilmwachstum auf allen fünf Holzoberflächen nachgewiesen werden. Insgesamt ergaben sich für beide Erreger auf allen Oberflächen sigmoidale Wachstumskurven innerhalb der 14 Tage. Ein exponentielles Wachstum konnte jedoch für beide Erreger auf allen Holzoberflächen nur in den ersten 7 Tagen beobachtet werden. Nach einer logarithmischen Transformation der Wachstumsdaten (KbE/Keimträger), erfolgte ein Vergleich der Wachstumsraten der exponentiellen Phase beider Erreger auf den unterschiedlichen hölzernen Flächen mit Hilfe eines multivariaten linearen Modells (Abbildung 6).

Die initiale Besiedlung von *E. hirae* auf der Douglasie war signifikant niedriger als auf der Buchenoberfläche ($p < 0,008$). Es konnten keine weiteren signifikanten Unterschiede in der Erstbesiedlung für *E. hirae* zwischen anderen Holzarten festgestellt werden. Ebenso konnte für *P. aeruginosa* kein signifikanter Unterschied in der Erstbesiedlung der fünf verschiedenen Hölzer beobachtet werden.

Durch die Analyse der Steigung konnten die Wachstumsraten der Erreger auf den unterschiedlichen Holzoberflächen verglichen werden. Dabei zeigte *E. hirae* eine signifikant niedrigere Wachstumsrate auf der Kiefernoberfläche im Vergleich zur Buchenoberfläche ($p < 0,01$). Es konnten keine weiteren Unterschiede im Wachstum von *E. hirae* je nach Holzoberfläche detektiert werden. *P. aeruginosa* zeigte ein geringeres Biofilmwachstum auf der Buchenoberfläche als auf der Kiefernoberfläche ($p = 0,001$), der Fichtenoberfläche ($p < 0,002$) und der Pappeloberfläche ($p < 0,001$). Die Wachstumsraten von *P. aeruginosa* auf der Buchenoberfläche und der Douglasienoberfläche waren statistisch nicht unterschiedlich.

Ab dem siebten Tag wurde nur noch ein leichter Anstieg der Erregerzahlen von *E. hirae* und *P. aeruginosa* beobachtet. Aufgrund dieser Daten kann davon ausgegangen werden, dass beide Erreger bis zum 14. Tag auf allen Holzoberflächen einen reifen Biofilm gebildet hatten. Daher wurde die Wachstumsperiode für Biofilme für alle nachfolgenden Experimente auf 14 Tage festgelegt.

(A)



(B)

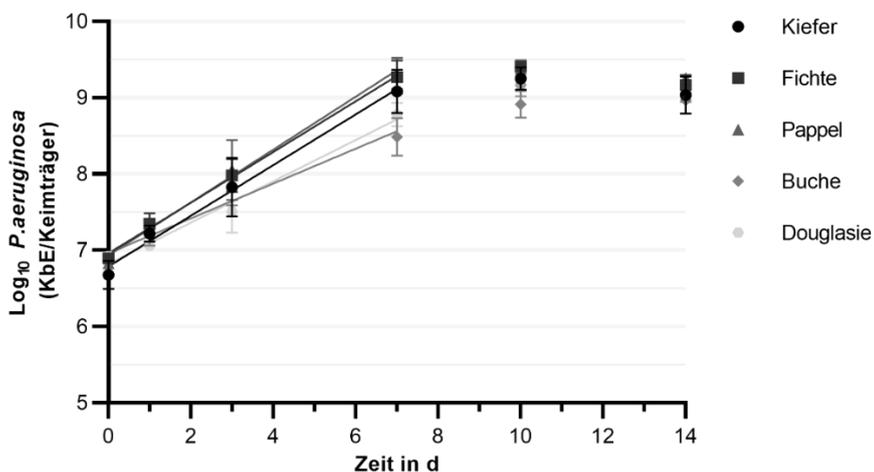


Abbildung 4. Quantitative Darstellung des Biofilmwachstums von (A) *E. hirae* und (B) *P. aeruginosa* auf fünf verschiedenen Holzoberflächen über 14 Tage (d). Die Wachstumsdaten (KbE/Keimträger) wurden logarithmiert. Für die ersten 7 Tage des Wachstums beider Erreger wurde für alle Holzarten ein multivariates lineares Modell erstellt (Linien). Die unterschiedlichen Symbole und Schattierungen repräsentieren die unterschiedlichen Holzarten. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder.

In unseren Versuchen konnte wir zeigen, dass auch *E. hirae* und *P. aeruginosa* dazu in der Lage sind Biofilme auf Holz zu bilden.

In unseren Testungen zeigte sich, dass die initiale Haftung der Erreger und die Wachstumsraten des Biofilms zwischen verschiedenen Holzarten differieren können. Im Vergleich mit anderen Studien lässt sich ebenso annehmen, dass die Dauer bis zur Ausreifung der Biofilme von der Holzart, dem Erreger und den Umweltbedingungen abhängig ist.

1.4.5 Keimträgerversuche bei Biofilmbildung auf Holzoberflächen

Die Biofilm-Keimträgerversuche erfolgten ausschließlich bei einer Umgebungstemperatur von +10°C. Die Desinfektion der Biofilme beider Erreger auf Holzoberflächen wurden nur mit dem vielversprechendsten Desinfektionsmittel, Peressigsäure, durchgeführt. Während dieser Versuche wurde zunächst nicht die effektive Konzentration zur erfolgreichen Desinfektion der Biofilme beider Erreger bestimmt. Stattdessen wurden die zuvor für planktonische Zellen ermittelten anzuwendenden Konzentrationen der Peressigsäure für den limitierenden Erreger entsprechend ihrer Holzart angewendet (Kiefer/Fichte: 0,5%; Pappel: 0,25%, Douglasie/Buche: 0,1%) und die jeweiligen Reduktionsraten der Biofilm-bildenden Zellen beider Erreger untersucht.

Desinfektionseffizienz von Peressigsäure gegenüber P. aeruginosa-Biofilmen auf verschiedenen Holzoberflächen

Die erreichten Reduktionsraten der Biofilm-bildenden Zellen von *P. aeruginosa* je Holz sind in Abbildung 7 ersichtlich.

Peressigsäure in einer Konzentration von 0,5% erreichte auf der Kiefernoberfläche eine Reduktion von 2.53 ± 0.806 (Mittelwert \pm Standardabweichung (SD) log Stufen der Biofilm-bildenden Zellen von *P. aeruginosa*. Die mit derselben Konzentration von 0,5% Peressigsäure behandelte Fichtenoberfläche, zeigte eine in etwa vergleichbare Reduktionsrate der *P. aeruginosa* Biofilm-bildenden Zellen.

Auf der Pappeloberfläche, welche mit 0,25% Peressigsäure desinfiziert wurde, konnten die Biofilm-bildenden Zellen von *P. aeruginosa* in einem deutlich geringeren Maße, um nur 0.92 ± 0.04 (Mittelwert \pm SD) log Stufen, reduziert werden.

Sowohl die Buchenoberfläche als auch die Douglasienoberfläche wurden mit 0,1% Peressigsäure behandelt. Auf der Douglasienoberfläche wurden die Biofilm-bildenden Zellen von *P. aeruginosa* um 1.02 ± 0.07 (Mittelwert \pm SD) log-Stufen reduziert. Auf der Buchenoberfläche zeigte sich die Reduktion der *P. aeruginosa* Biofilm-bildenden Zellen im Vergleich zur Douglasie um die Hälfte vermindert auf 0.45 ± 0.48 (Mittelwert \pm SD) log Stufen, bei Desinfektion mit gleicher Peressigsäure-Konzentration von 0,1%. Damit konnte auf der Buchenoberfläche die niedrigste Reduktionsrate des *P. aeruginosa*-Biofilms detektiert werden, wenn dieser mit der für planktonische Zellen anzuwendenden Konzentration desinfiziert wurde.

Es kann insgesamt festgestellt werden, dass keine der für planktonischen Zellen bestimmten anzuwendenden Konzentrationen für Holzoberflächen dazu in der Lage war eine 4 log Stufen Reduktion der Biofilm-bildenden Zellen von *P. aeruginosa*, und damit eine erfolgreiche Desinfektion dieser, zu erreichen.

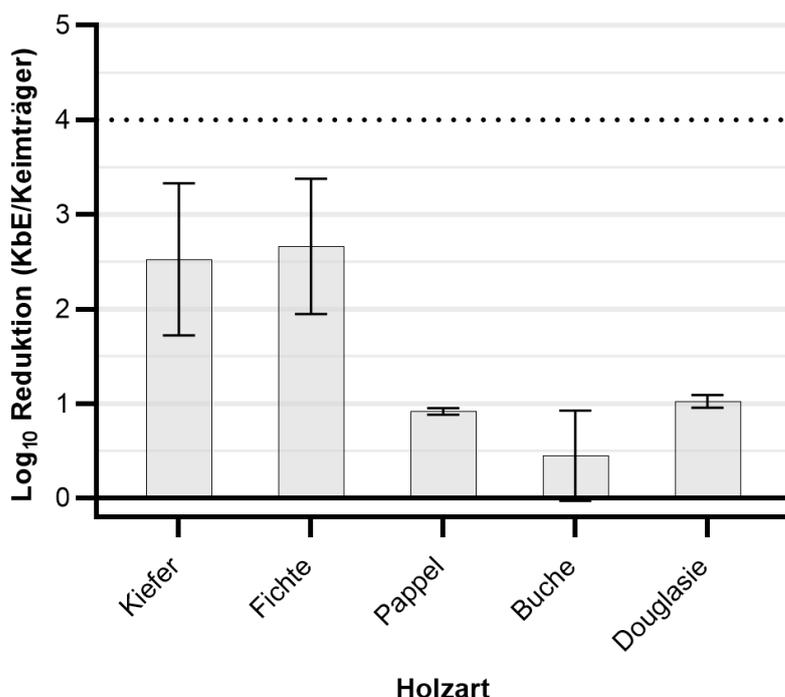


Abbildung 5. Mittlere \log_{10} -Reduktion (KbE/Keimträger) der Biofilm-bildenden Zellen von *P. aeruginosa* nach Desinfektion mit Peressigsäure. Die Balken zeigen die \log_{10} -Reduktion der Biofilm-bildenden Zellen von *P. aeruginosa* auf fünf verschiedenen Holzarten, die mit für planktonische Zellen wirksamen Konzentrationen (Kiefer und Fichte: 0,5 %; Pappel: 0,25 %; Douglasie und Buche: 0,1 %) von Peressigsäure behandelt wurden. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an. Die gestrichelte Linie steht für eine erfolgreiche Desinfektion

Vergleich der Desinfektionseffizienz von Peressigsäure gegenüber planktonischen und Biofilm-bildenden Zellen von *E. hirae* auf unterschiedlichen Holzoberflächen

Wie der Abbildung 8 zu entnehmen ist, konnten bei einer Behandlung der Kiefernoberfläche mit 0,5%iger Peressigsäure planktonische *E. hirae* Zellen um $4,75 \pm 0,61$ (Mittelwert \pm SD) log-Stufen reduziert werden. Bei der Desinfektion von Biofilm-bildenden *E. hirae* Zellen auf der Kiefernoberfläche mit 0,5%iger Peressigsäure zeigte sich eine Reduktion um lediglich $2,17 \pm 1,619$ (Mittelwert \pm SD) log-Stufen.

Ein ähnliches Bild ergab sich bei der Desinfektion von *E. hirae* auf der Fichtenoberfläche, welche ebenfalls mit 0,5% Peressigsäure behandelt wurde. Während die planktonischen Zellen von *E. hirae* durch die 0,5%ige Peressigsäure auf der Fichtenoberfläche um im Mittel $5,18 \pm 0,623$ (SD) log-Stufen reduziert wurden, war die Reduktion der Biofilm-bildenden *E. hirae* Zellen bei gleicher Behandlung mit 0,5% Peressigsäure im Vergleich stark vermindert.

Um *E. hirae* auf der Pappeloberfläche zu desinfizieren, wurde Peressigsäure mit einer Konzentration von 0,25% angewandt. Dabei zeigte sich die Reduktion der Biofilm-bildenden *E. hirae* Zellen auf der Pappeloberfläche erheblich verringert im Vergleich zur Reduktion der planktonischen *E. hirae* Zellen auf der Pappel. Insgesamt konnte nur eine Reduktion von $0,71 \pm 0,60$ (Mittelwert \pm SD) log Stufen Biofilm-bildenden *E. hirae* Zellen auf der Pappeloberfläche durch 0,25% Peressigsäure hervorgerufen werden.

Zur Reduktion von *E. hirae* auf der Douglasienoberfläche wurde 0,1% Peressigsäure eingesetzt. Während die planktonischen *E. hirae* Zellen durch 0,1% Peressigsäure deutlich erfolgreich auf der Douglasienoberfläche desinfiziert wurden, lag die Reduktion der Biofilm-bildenden Zellen von *E. hirae* niedriger bei $0,83 \pm 0,44$ (Mittelwert \pm SD) log-Stufen.

Die geringste Reduktion der Biofilm-bildenden Zellen von *E. hirae* wurde bei Verwendung von 0,1% Peressigsäure auf der Buchenoberfläche beobachtet. Auf Buche konnten die Biofilm-bildenden *E. hirae* Zellen nur um $0,53 \pm 0,32$ (Mittelwert \pm SD) log-Stufen reduziert werden. Im Vergleich dazu war die Reduktionsrate der planktonischen Zellen von *E. hirae* auf der Buchenoberfläche höher (Mittelwert= 5,48 log-Stufen; SD= 0,27), wenn 0,1%ige Peressigsäure verwendet wurde. Deswegen wurde die Buchenoberfläche zur Verwendung für weitere Test ausgewählt.

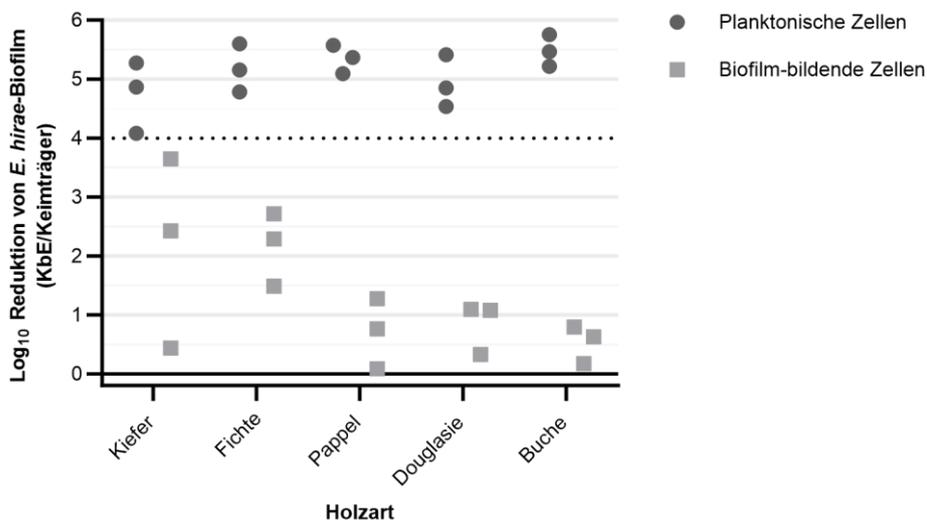


Abbildung 6. Vergleich der log₁₀-Reduktion (KbE/Keimträger) von planktonischen und Biofilm-bildenden Zellen von *E. hirae*, die mit für planktonische Zellen anzuwendenden Konzentrationen (Kiefer und Fichte - 0,5%; Pappel - 0,25%; Douglasie und Buche - 0,1%) von Peressigsäure je

Holzart behandelt wurden. Die Symbole stehen für die drei Durchführungen jedes Versuchs mit den planktonischen (Kreis) und den Biofilm-bildenden (Quadrat) Zellen von *E. hirae*. Die gepunktete Linie repräsentiert eine erfolgreiche Desinfektion.

Bestimmung der benötigten Peressigsäure-Konzentration zur erfolgreichen Desinfektion von *E. hirae*- und *P. aeruginosa*- Biofilmen auf unterschiedlichen Holzoberflächen

Um zu untersuchen, welche Konzentrationen von Peressigsäure für eine wirksame Desinfektion der Biofilme beider Erreger erforderlich sind, wurde die ursprünglich verwendete Konzentration von 0,1% für die Buchenoberfläche, die für eine erfolgreiche Desinfektion der planktonischen Zellen von *E. hirae* erforderlich ist, um ein Vielfaches erhöht (0,2%, 0,5%, 1%, 5%, 10%) und die Reduktion wurde beobachtet (Abbildung 9).

Erstmals wurde eine erfolgreiche Desinfektion von *P. aeruginosa*-Biofilmen, also eine Verminderung der Biofilm-bildenden Zellen von *P. aeruginosa* um 4 log Stufen, bei einer Verzehnfachung der ursprünglichen Peressigsäure-Konzentration auf 1% beobachtet. Da diese erfolgreiche Desinfektion nicht bei allen drei Durchführungen des Experimentes nachgewiesen werden konnte, wurde im Mittel durch den Einsatz von 1% Peressigsäure eine Verringerung der Biofilm-bildenden Zellen von *P. aeruginosa* um $3,70 \pm 2,11$ (Mittelwert \pm SD) log-Stufen auf der Buchenoberfläche erreicht. Biofilm-bildende Zellen von *E. hirae* auf Buche wurden durch die Behandlung mit 1%iger Peressigsäure lediglich um durchschnittlich $1,50 \pm 1,21$ (SD) log-Stufen reduziert. Das bedeutet insgesamt, dass eine Verzehnfachung der Ausgangskonzentration der Peressigsäure auf 1% keine zuverlässige Desinfektion der Holzoberfläche erreicht, wenn die Erreger Biofilme gebildet haben.

Unter den von uns getesteten Bedingungen konnte erst ab einer Konzentration von 5% Peressigsäure eine mindestens 4 log-Stufen-Reduktion der Biofilm-bildenden Zellen beider Erreger auf der Buche in allen Versuchsdurchführungen beobachtet werden. Die Behandlung mit 5%iger Peressigsäure reduzierte die Biofilm-bildenden Zellen von *P. aeruginosa* um durchschnittlich $5,95 \pm 0,41$ (SD) log-Stufen und die Biofilm-bildenden Zellen von *E. hirae* um durchschnittlich $4,95 \pm 0,42$ (SD) log-Stufen.

Die Behandlung der Oberflächen mit 10% Peressigsäure führte in jedem Test zu einer Verringerung der *P. aeruginosa*-Biofilmzellen unter die Nachweisgrenze, während vereinzelt *E. hirae* selbst nach der Behandlung mit 10%iger Peressigsäure noch nachweisbar war.

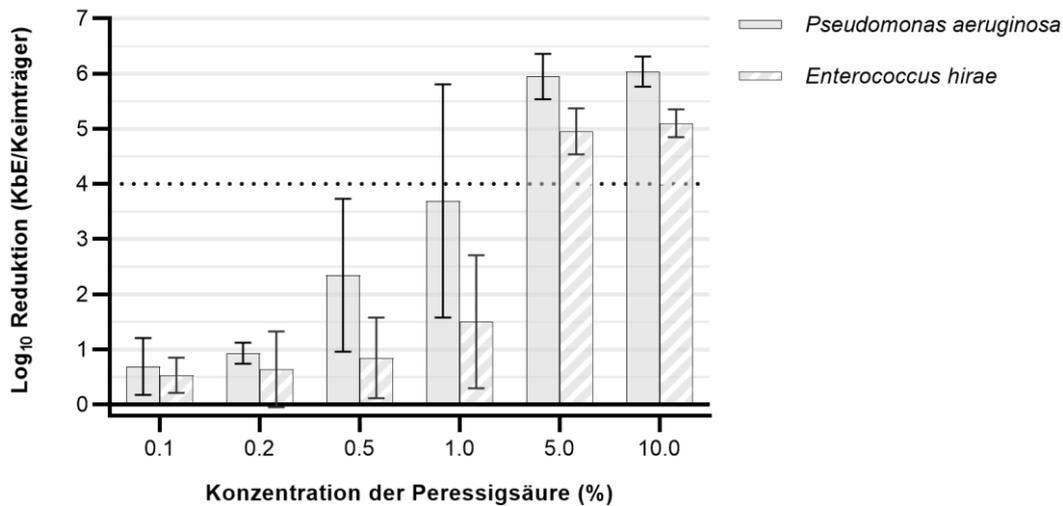


Abbildung 7. Mittlere \log_{10} -Reduktion (KbE/Keimträger) der Biofilm-bildenden Zellen auf der Buchenoberfläche nach der Desinfektion mit verschiedenen Konzentrationen von Peressigsäure. Die grauen Balken zeigen die Reduktion der *P. aeruginosa* Biofilm-bildenden Zellen und die grau gestreiften Balken die Reduktion der *E. hirae* Biofilm-bildenden Zellen nach Behandlung mit verschiedenen Konzentrationen von Peressigsäure. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung an. Die gepunktete Linie repräsentiert eine erfolgreiche Desinfektion.

Peressigsäure gilt als eines der wirksamsten Desinfektionsmittel gegenüber bakteriellen Biofilmen. Trotzdem konnte bei der Desinfektion von Biofilmen beider getesteter Erreger auf Holzoberflächen im Vergleich zur Desinfektion von planktonischen Zellen beider Erreger auf Holzoberflächen eine deutlich verminderte Wirksamkeit des Desinfektionsmittels Peressigsäure beobachtet werden. Spezifisch konnte eine bis zu zehnfach reduzierte Desinfektionsmitteleffizienz nachgewiesen werden, wenn Biofilm-bildenden Zellen anstatt planktonischer Zellen desinfiziert wurden.

Zudem lassen die Ergebnisse erkennen, dass auch auf Holzoberflächen nur mit einer deutlichen Erhöhung der Desinfektionsmittelkonzentration, eine erfolgreiche Desinfektion von Biofilmen erzielt werden kann. Eine in der Praxis geeignetere Alternative wäre jedoch die Biofilme vor der Desinfektion der Holzoberfläche mechanisch, etwa mit Hilfe eines Hochdruckreinigers, zu entfernen. Das bedeutet die obligat vor der Desinfektion erfolgende Reinigung im Tierstall sollte mit größerer Gründlichkeit durchgeführt werden.

1.4.6 Tenazitätsversuche

Überleben von *E. hirae* und *P. aeruginosa* bei +10°C auf verschiedenen Holzoberflächen im Vergleich zu Stahl

Die Ergebnisse der Tenazitätsversuche bei +10°C sind in Abbildung 10 dargestellt. Ziel der Versuche war es festzustellen, ob es Unterschiede in der Überlebensfähigkeit der Erreger *E. hirae* und *P. aeruginosa* auf den unterschiedlichen Holzoberflächen im Ver-

gleich zur Referenzoberfläche Stahl gibt. Besonderer Fokus lag dabei auf der Untersuchung der Tenazität der Erreger auf den unterschiedlichen Oberflächen in den ersten 28 Tagen, da dies in der Regel der Zeit des angeordneten Leerstands eines Tierstalles nach einer Tierseuche entspricht.

Bei der Untersuchung der Tenazität von *E. hirae* auf den unterschiedlichen Oberflächen konnte bis Tag 21 kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Holzoberflächen und der Stahloberfläche detektiert werden. Die Abbildung 10 (A) lässt graphisch zwar eine stärkere Reduktion der Erregermenge auf der Kiefernoberfläche im Vergleich zur Stahloberfläche erkennen, aber aufgrund der großen Varianzen konnte kein statistisch signifikanter Unterschied festgestellt werden. Eine mögliche Begründung für die Varianzen ist die unterschiedliche Beschaffenheit der Keimträger. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Keimträger aus Holz, als organisches Material, unterschiedliche chemische Zusammensetzungen sowie unterschiedliche morphologische und physikalische Eigenschaften aufwiesen. Erst ab Tag 28 und Tag 42 wurden signifikante Unterschiede zwischen Stahl und einzelnen Hölzern nachgewiesen. Durch die starken Schwankungen der Erregerzahlen pro Keimträger pro Messzeitpunkt, insbesondere bei Kiefer, ist eine eindeutige und sichere Aussage bezüglich des Einflusses der Oberfläche auf die Tenazität von *E. hirae* schwierig.

Am ersten Tag konnte kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Erregerzahlen von *P. aeruginosa* auf den unterschiedlichen Holzoberflächen und dem Stahl nachgewiesen werden. Am dritten Tag konnten signifikant weniger *P. aeruginosa* auf der Pappeloberfläche nachgewiesen werden als auf der Stahloberfläche ($p=0,006$). Zwischen den Erregerzahlen von *P. aeruginosa* auf der Fichten- und der Stahloberfläche am Tag 3 wurde kein signifikanter Unterschied detektiert.

An Tag 7 konnte der, am vorherigen Messzeitpunkt gefundene signifikante Unterschied zwischen den Erregerzahlen von *P. aeruginosa* zwischen der Pappel- und der Stahloberfläche nicht noch einmal ermittelt werden. Auf der Kiefernoberfläche an Tag 7 war *P. aeruginosa* nur noch nach Anreicherung nachweisbar. Auf der Fichtenoberfläche konnte *P. aeruginosa* gar nicht mehr nachgewiesen werden.

Bis zum Ende der Messung nach 56 Tagen konnte sowohl bei Pappel als auch bei Stahl auf mindestens einem der je drei getesteten Keimträger pro Art relevante Erregermengen von *P. aeruginosa* nachgewiesen werden.

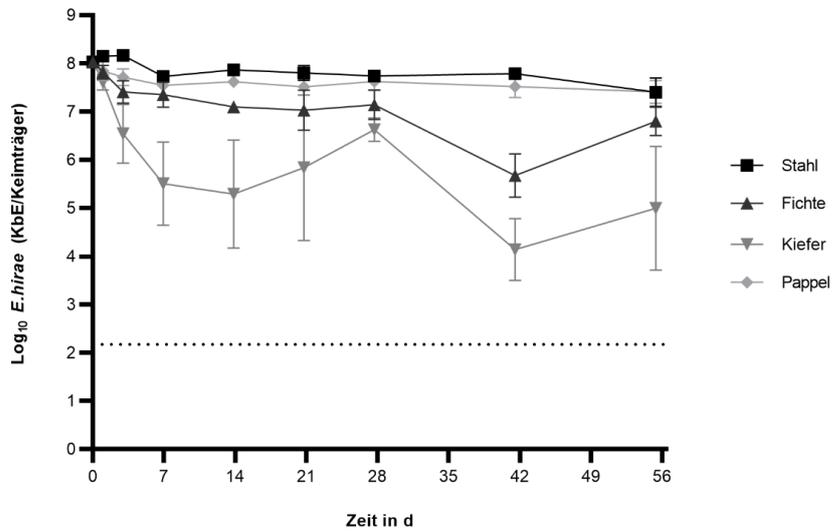
Insgesamt überlebt *E. hirae* länger auf allen Oberflächen als *P. aeruginosa*. An Tag 56 konnten noch immer hohe *E. hirae*-Erregerzahlen von allen getesteten Oberflächen wiedergewonnen werden.

Eine Auswertung, ob Holzoberflächen einen Einfluss auf die Überlebensfähigkeit von auf ihnen befindlichen *E. hirae*-Zellen haben, ist aufgrund der bestehenden Varianzen und der damit verbundenen nicht eindeutigen statistischen Ergebnisse, nicht einwandfrei durchführbar. Die graphische Darstellung gibt Hinweise darauf, dass ein schnelleres Absinken der Erregerzahlen von *E. hirae* auf der Kiefernoberfläche möglich wäre.

Bei *P. aeruginosa* konnte dagegen eindeutig eine schnellere Reduktion der Erregerzahlen innerhalb der ersten 7 Tage auf der Fichten- und der Kiefernoberfläche im Vergleich

zur Stahloberfläche gezeigt werden. Dabei sind die Gründe für den schnelleren Abfall der Erregerzahlen schwierig zu ermitteln. *P. aeruginosa* weist eine größere Sensitivität gegenüber dem Austrocknen auf (Crone et al. 2020). Das heißt eine mögliche Erklärung wäre, dass ein schnelleres Abtrocknen der Holzoberflächen zum zeitnahen Erregerabfall geführt hat. Aber auch die in zahlreicher Literatur beschriebenen antimikrobiellen Effekte des Kiefern- und Fichtenholzes wären ein möglicher Erklärungsansatz (Milling et al. 2005, Vainio-Kaila et al. 2015).

(A)



(B)

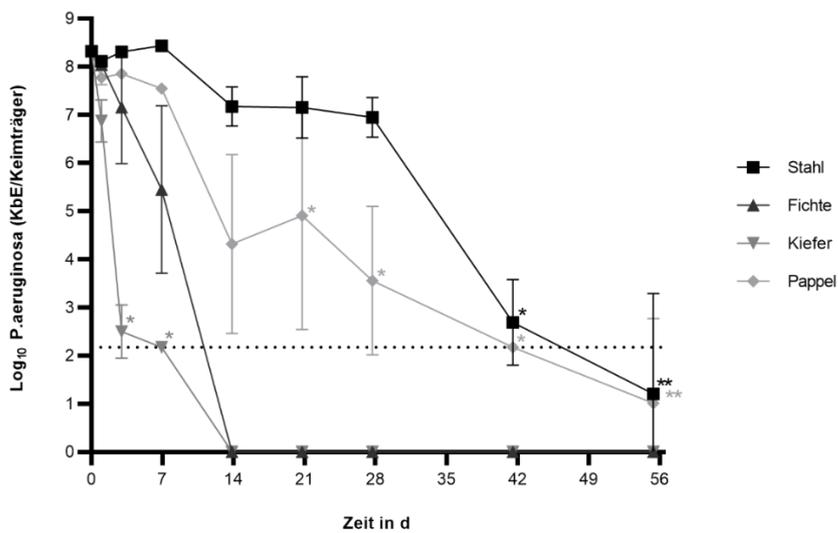


Abbildung 8. Überleben von (A) *E. hirae* und (B) *P. aeruginosa* auf unterschiedlichen Holzoberflächen (Kiefer, Fichte, Pappel) und Stahl bei einer Umgebungstemperatur von +10°C. Pro Oberflächenart wurden pro Messzeitpunkt (Tag 0, Tag 1, Tag 3, Tag 7, Tag 14, Tag 21, Tag 28, Tag 42 und Tag 56) je drei Keimträger ausgewertet. Die Kurven ergeben sich aus den Mittelwerten der pro Messzeitpunkt ermittelten logarithmierten Erregerzahlen der je drei Keimträger. Die unterschiedlichen Symbole repräsentieren die unterschiedlichen Oberflächenarten. Die gepunktete Linie steht für die Nachweisgrenze. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder. Bei der Kalkulation der Mittelwerte die mit einem Stern (*) markiert wurden, lag mindestens einer der drei ermittelten Werte für die Erregeranzahl je Keimträger unter der Nachweisgrenze. Zur Darstellung des Mittelwerts wurde dafür der Logarithmus der Nachweisgrenze in die Berechnung miteinbezogen. Bei den Mittelwerten die mit zwei Sternen (**) markiert sind, konnten auf zwei der drei Keimträgern kein Erreger mehr nachgewiesen werden, auf dem dritten hingegen lag die beobachtete Erregerzahl über der Nachweisgrenze.

Überleben von *E. hirae* und *P. aeruginosa* bei -10°C auf verschiedenen Holzoberflächen im Vergleich zu Stahl

Wie in Abbildung 11 dargestellt, wurde der Messzeitraum für die Tenazitätsversuche bei einer Umgebungstemperatur von -10°C von 56 Tage auf 70 Tage verlängert, dabei wurde am Tag 56 die Erregerzahl nicht mehr bestimmt.

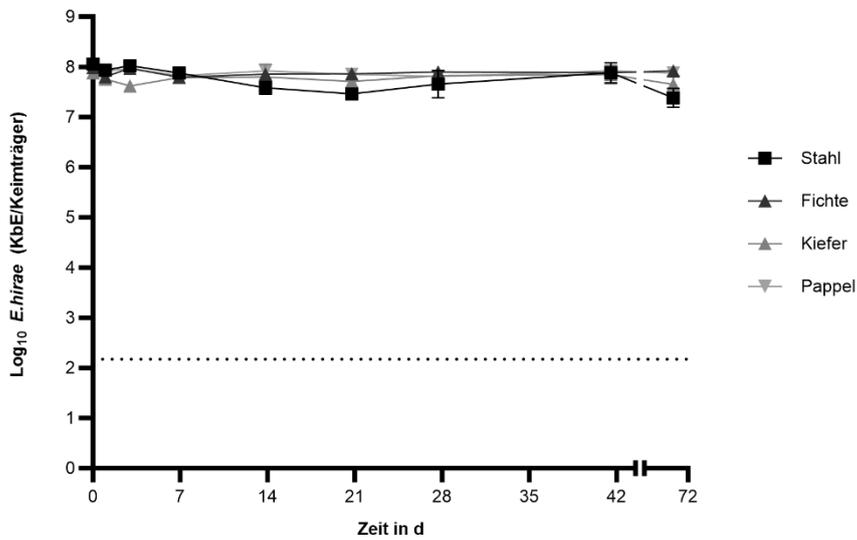
Bei *E. hirae* konnte bei -10°C keine signifikante Minderung der Erregerzahl pro Keimträger aller Oberflächen bis zum Tag 42 beobachtet werden. Erst an Tag 70 zeigte sich auf der Stahloberfläche eine signifikante Reduktion der Erregerzahl um etwas mehr als eine halbe log-Stufe (Welch-Test: $p=0,025$). Eine Veränderung der Erregerzahl auf den Holzoberflächen konnte auch an Tag 70 nicht festgestellt werden. Beim Vergleich der Erregerzahlen auf der Stahl- und den Holzoberflächen wurde bei keinem Messzeitpunkt ein bedeutender signifikanter Unterschied gefunden.

Eine Reduktion der Erregeranzahl von *P. aeruginosa* bei -10°C war hingegen über den Messzeitraum von 70 Tagen auf allen Oberflächen nachweisbar. Es zeigten sich innerhalb der ersten 28 Tage keine signifikanten Unterschiede beim Vergleich der Erregerzahlen von *P. aeruginosa* auf den Holzoberflächen und der Stahloberfläche. Dies bedeutet, dass ein gleichmäßiges Absinken der Erregerzahlen bei -10°C auf allen Oberflächen zu beobachten war. Erst zum Messzeitpunkt am Tag 42 konnte erstmalig ein signifikanter Unterschied zwischen den Erregerzahlen von *P. aeruginosa* auf den Oberflächen beobachtet werden. Auf der Pappel wurde signifikant mehr ($p=0,005$) und auf der Fichtenoberfläche signifikant weniger ($p=0,012$) *P. aeruginosa* gefunden als im Vergleich zur Stahloberfläche. Die gefundenen Unterschiede konnten jedoch beim nächsten Messzeitpunkt an Tag 70 nicht noch einmal beobachtet werden.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass eine Verminderung der Erregerzahlen von *E. hirae* auf den Holzoberflächen innerhalb von 70 Tagen nicht nachweisbar war. Im Vergleich zeigte sich auf der Stahloberfläche nur eine geringgradige Reduktion von *E. hirae* nach 70 Tagen.

Eine Verminderung von *P. aeruginosa* bei -10°C über den Messzeitraum von 70 Tagen konnte hingegen beobachtet werden. Der Abfall der Erregerzahlen erfolgte auf allen beurteilten Oberflächen eher gleich und langsamer als bei +10°C. Ein spezifischer Einfluss der hölzernen Oberflächen, auf die sich auf ihnen befindlichen Erreger konnte bei -10°C, im Gegensatz zu den Beobachtungen bei +10°C, nicht festgestellt werden. Möglicher Erklärung wären, dass keine Abtrocknung der Oberflächen während der Messung bei -10°C erfolgten oder etwaige antimikrobielle Substanzen bestimmter Holzoberflächen bei Temperaturen unter 0°C nicht wirken oder nicht freigesetzt wurden.

(A)



(B)

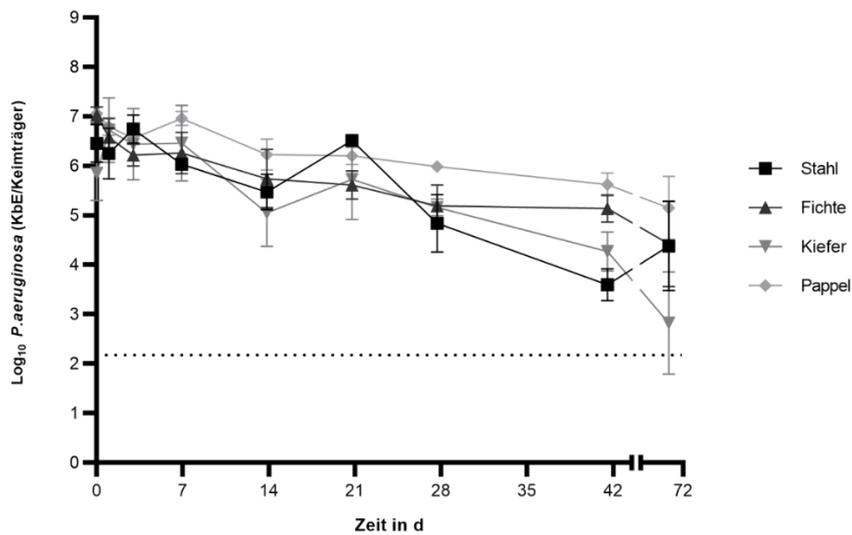


Abbildung 9. Überleben von (A) *E. hirae* und (B) *P. aeruginosa* auf unterschiedlichen Holzoberflächen (Kiefer, Fichte, Pappel) und Stahl bei einer Umgebungstemperatur von -10°C . Pro Oberflächenart wurden pro Messzeitpunkt (Tag 0, Tag 1, Tag 3, Tag 7, Tag 14, Tag 21, Tag 28, Tag 42 und Tag 70) je drei Keimträger ausgewertet. Die Kurven ergeben sich aus den Mittelwerten der pro Messzeitpunkt ermittelten logarithmierten Erregerzahlen der drei Keimträger. Die unterschiedlichen Symbole repräsentieren die unterschiedlichen Oberflächenarten. Die gepunktete Linie steht für die Nachweisgrenze. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung wieder.

1.5 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

Im Laboransatz wurde gezeigt, dass intaktes, feingesägtes Bauholz mit geringer Rautiefe bei Temperaturen von 10°C sowohl mit Peressigsäure als auch mit Glutaraldehyd in praktisch gebräuchlichen Konzentrationen hinsichtlich bakterieller Erreger wirksam desinfiziert werden kann. Bei Minustemperaturen ist einzig Peressigsäure dazu in der Lage eine effiziente Desinfektion in praxisüblichen Konzentrationen auf Holzoberflächen zu erreichen. Zudem wurde eine Biofilmbildung der getesteten Erreger auf allen Holzoberflächen beobachtet. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Biofilmbildung je nach Holzart und Erreger differiert. In jedem Fall wurde jedoch eine starke Einschränkung der Desinfektionseffizienz des chemischen Desinfektionsmittels Peressigsäure gegenüber Biofilmen nachgewiesen. Eine Erhöhung der Konzentration brachte zwar einen Desinfektionserfolg, jedoch sollte eine mechanische Beseitigung des Biofilms vor der Desinfektion in der Praxis bevorzugt werden. Die Bewertung der Wirkung von Holzprodukten auf Indikatorkeime im Vergleich zu Stahl bei +10°C zeigte eine deutlich schnellere Abnahme von *P. aeruginosa* auf Kiefern- und Fichtenoberflächen im Vergleich zur Stahloberfläche. Ob dieses schnellere Absterben des Erregers durch Trocknungseffekte oder doch durch holzspezifische antibakterielle Extraktionsstoffe hervorgerufen wurde, konnte durch die Daten nicht abschließend geklärt werden und sollte zukünftig untersucht werden.

1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine enge Zusammenarbeit erfolgte innerhalb des Arbeitspakets 5 «Hygiene» mit dem Friedrich-Loeffler-Institut. Die Freie Universität Berlin untersuchte dabei den Hygienestatus von Holz in Bezug auf bakterielle Erreger, das Friedrich-Loeffler-Institut in Bezug auf virale Erreger. Dabei wurden die Arbeitspakete 5.1 und 5.2 gemeinschaftlich bearbeitet. Die Bereitstellung der Holzkeimträger für die Laboruntersuchungen erfolgte durch die Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzforschung. Zudem fand mit dem Arbeitspaket 4 «Holzprodukte» eine enge Absprache und Zusammenarbeit in Bezug auf die Dauerhaftigkeit der Holzprodukte (Arbeitspaket 5.3) bei der Anwendung von Desinfektionsmitteln statt, wobei die Laborversuche durch die Technische Universität München durchgeführt wurden.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1. Im Versuch verwendete Holzkeimträger (von links nach rechts: Fichte, Kiefer und Pappel).....	9
Abbildung 2. Verwendete Gefrierbox für Keimträgerversuche bei -10°C.....	10
Abbildung 3. Sonifikator, zur Auflösung des Biofilmmaterials in Suspension.....	12
Abbildung 4. Quantitative Darstellung des Biofilmwachstums von (A) <i>E. hirae</i> und (B) <i>P. aeruginosa</i> auf fünf verschiedenen Holzoberflächen über 14 Tage (d).....	23
Abbildung 5. Mittlere log ₁₀ -Reduktion (KbE/Keimträger) der Biofilm-bildenden Zellen von <i>P. aeruginosa</i> nach Desinfektion mit Peressigsäure.....	25
Abbildung 6. Vergleich der log ₁₀ -Reduktion (KbE/Keimträger) von planktonischen und Biofilm-bildenden Zellen von <i>E. hirae</i> , die mit für planktonische Zellen anzuwendenden Konzentrationen (Kiefer und Fichte - 0,5%; Pappel - 0,25%; Douglasie und Buche - 0,1%) von Peressigsäure je Holzart behandelt wurden.....	26
Abbildung 7. Mittlere log ₁₀ -Reduktion (KbE/Keimträger) der Biofilm-bildenden Zellen auf der Buchenoberfläche nach der Desinfektion mit verschiedenen Konzentrationen von Peressigsäure.....	28
Abbildung 8. Überleben von (A) <i>E. hirae</i> und (B) <i>P. aeruginosa</i> auf unterschiedlichen Holzoberflächen (Kiefer, Fichte, Pappel) und Stahl bei einer Umgebungstemperatur von +10°C.....	31
Abbildung 9. Überleben von (A) <i>E. hirae</i> und (B) <i>P. aeruginosa</i> auf unterschiedlichen Holzoberflächen (Kiefer, Fichte, Pappel) und Stahl bei einer Umgebungstemperatur von -10°C.....	33

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1. Effektive Konzentrationen von Peressigsäure, Ameisensäure und Glutaraldehyd in % für eine wirksame Desinfektion von <i>E. hirae</i> und <i>P. aeruginosa</i> bei einer Umgebungstemperatur von +10°C auf Keimträgern aus Fichte, Kiefer und Pappel (Referenz und nach DVG).....	19
Tabelle 2. Effektive Konzentrationen von Peressigsäure, Ameisensäure und Glutaraldehyd in % für eine wirksame Desinfektion von <i>E. hirae</i> und <i>P. aeruginosa</i> bei einer Umgebungstemperatur von -10°C auf Keimträgern aus Fichte, Kiefer und Pappel (Referenz und nach DVG).....	20
Tabelle 3. Effektive Konzentrationen von Peressigsäure in % für eine wirksame Desinfektion von <i>E. hirae</i> bei 2 Temperaturen (+10°C und -10°C) auf Keimträgern aus Douglasie und Buche.....	21

QUELLENVERZEICHNIS

- Abrishami SH, TALL BD, BRUURSEMA TJ, EPSTEIN PS, SHAH DB (1994) Bacterial adherence and viability on cutting board surfaces. *Journal of Food Safety* 14(2):153–172
- Adetunji VO, Isola TO (2011) Crystal violet binding assay for assessment of biofilm formation by *Listeria monocytogenes* and *Listeria spp* on wood, steel and glass surfaces. *Global Veterinaria* 6(1):6–10
- Akinbobola, AB, Sherry L, McKay WG, Ramage G, Williams C (2017) Tolerance of *Pseudomonas aeruginosa* in in-vitro biofilms to high-level peracetic acid disinfection. *Journal of Hospital Infection* 97(2):162–168
- Bang J, Hong A, Kim H, Beuchat LR, Rhee MS, Kim Y, Ryu J-H (2014) Inactivation of *Escherichia coli* O157: H7 in biofilm on food-contact surfaces by sequential treatments of aqueous chlorine dioxide and drying. *International journal of food microbiology* 191:129–134
- Bayerisches Landesamt (2007) Merkblatt Nr. 4.5/17. Gewässerschutz bei der Anwendung von chemischen Desinfektionsmitteln im Rahmen der Vogelgrippe-Abwehr. https://www.lfu.bayern.de/wasser/merkblattsammlung/teil4_oberirdische_gewaesser/doc/nr_4517.pdf. Accessed 22 Aug 2023
- Bessemis E The effect of practical conditions on the efficacy of disinfectants. *International biodeterioration & biodegradation* 1998(41(3-4)):177–183
- Bisping W (1999) Kompendium der Staatlichen Tierseuchenbekämpfung. Enke
- Böhm R (1998) Disinfection and hygiene in the veterinary field and disinfection of animal houses and transport vehicles. *International biodeterioration & biodegradation* 41(3-4):217–224
- Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen BLV - Tierschutz (2009) Fachinformation Tierschutz - Stallklimawerte und ihre Messung in Rinderhaltungen. Die Bedeutung des Stallklimas für das Tier
- Crone S, Vives-Flórez M, Kvich L, Saunders AM, Malone M, Nicolaisen MH, Martínez-García E, Rojas-Acosta C, Catalina Gomez-Puerto M, Calum H (2020) The environmental occurrence of *Pseudomonas aeruginosa*. *Apmis* 128(3):220–231
- Destatis SB (2022) Bauen und Wohnen. Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach überwiegend verwendetem Baustoff. Lange Reihen ab 2000. Lange Reihen ab 2000. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Bauen/Publikationen/Downloads-Bautaetigkeit/baufertigstellungen-baustoff-pdf-5311202.html>
- DIN EN 16437:2019-12 DIN EN 16437:2019-12. Deutsches Institut für Normierung
- Drauch V, Ibesich C, Vogl C, Hess M, Hess C (2020) In-vitro testing of bacteriostatic and bactericidal efficacy of commercial disinfectants against *Salmonella Infantis* reveals substantial differences between products and bacterial strains. *International journal of food microbiology* 328:108660

- DVG (2017) specific test guidelines for the livestock aerea - guideline for bactericidal efficacy. https://www.desinfektion-dvg.de/fileadmin/FG_Desinfektion/Dokumente/Fuer_Gutachter/Pruefrichtlinien/englisch/402020-001_V.1_Bakterizidie_7Nov2017_EN_final.pdf. Accessed 10 Jul 2023
- DVG (2023) 13. Liste der nach den Richtlinien der DVG geprüften und als wirksam befundenen Desinfektionsmittel (Handelspräparate, ohne Ausbringungsverfahren) für den Tierhaltungsbereich. www.desinfektion-dvg.de. Accessed 02 Aug 2023
- Fraunhofer-Institut für Grenzflächen- und Bioverfahrenstechnik IGB Biofilme und Hygiene. Biofilme – Vermeiden, nutzen und kontrollieren. Was sind Biofilme? <https://www.igb.fraunhofer.de/de/forschung/biofilme-und-hygiene/biofilme-charakterisierung-und-vermeidung.html>. Accessed 22 Aug 2023
- Friedrich-Loeffler-Institut (2023) Richtlinien des Friedrich-Loeffler-Instituts über Mittel und Verfahren für die Durchführungeiner tierseuchenrechtlich vorgeschriebenen Desinfektion(BAnz AT 16.12.2022 B1). <https://desinfektions-rl.fli.de/de/home>
- Gauly M, Hoy S, Krieter J (2016) Nutztierhaltung und -hygiene. 2. überarb. Aufl.
- Gehrig M, Schnell G, Zürcher E, Kucera LJ (2000) Hygienic aspects of wood and polyethylen cutting boards regarding food contaminations. A comparison. *Holz als Roh- und Werkstoff* 58:265–269
- Gkana E, Lianou A, Nychas G-J (2016) Transfer of Salmonella enterica serovar Typhimurium from beef to tomato through kitchen equipment and the efficacy of intermediate decontamination procedures. *Journal of food protection* 79(7):1252–1258
- Gosling RJ, Mawhinney I, Vaughan K, Davies RH, Smith RP (2017) Efficacy of disinfectants and detergents intended for a pig farm environment where Salmonella is present. *Veterinary microbiology* 204:46–53
- Internationalen Vereinigung für Soziale Sicherheit (2014) Prävention chemischer Risiken beim Umgang mit Desinfektionsmitteln im Gesundheitswesen
- Kramer A, Assadian O (eds) (2008) Wallhäußers Praxis der Sterilisation, Desinfektion, Antiseptik und Konservierung. Qualitätssicherung der Hygiene in Industrie, Pharmazie und Medizin, 6th edn. Thieme
- Kraus B. (1983) Die experimentelle Prüfung verschiedener Desinfektionsmittel und Desinfektionsverfahren auf Sporozidie im Modellversuch unter Berücksichtigung einiger Faktoren, die ihre Wirksamkeit beeinflussen
- Milling A, Kehr R, Wulf A, Smalla K (2005) Survival of bacteria on wood and plastic particles: Dependence on wood species and environmental conditions. 1437-434X
- Müller W, Schlenker G (2021) Kompendium der Tierhygiene, 6th edn. Lehmanns Media
- Russell AD, McDonnell G (2000) Concentration: a major factor in studying biocidal action. *Journal of Hospital Infection* 44(1):1–3
- Schönwälder A, Kehr R, Wulf A, Smalla K (2002) Wooden boards affecting the survival of bacteria? *Holz als Roh- und Werkstoff* 60:249–257
- Strauch D, Böhm R (2002) Reinigung und Desinfektion in der Nutztierhaltung und Veredelungswirtschaft. Enke

- Suchomel M, Lenhardt A, Kampf G, Grisold A (2019) *Enterococcus hirae*, *Enterococcus faecium* and *Enterococcus faecalis* show different sensitivities to typical biocidal agents used for disinfection. *Journal of Hospital Infection* 103(4):435–440
- Vainio-Kaila T, Kyyhkynen A, Rautkari L, Siitonen A (2015) Antibacterial Effects of Extracts of *Pinus sylvestris* and *Picea abies* against *Staphylococcus aureus*, *Enterococcus faecalis*, *Escherichia coli*, and *Streptococcus pneumoniae*. *BioResources* 10(4):7763–7771
- van Klingeren B, Koller W, Bloomfield SF, Böhm R, Cremieux A, Holah J, Reybrouck G, Rödger H-J (1998) Assessment of the efficacy of disinfectants on surfaces. *International biodeterioration & biodegradation* 41(3-4):289–296
- Wales AD, Gosling RJ, Bare HL, Davies RH (2021) Disinfectant testing for veterinary and agricultural applications: A review. *Zoonoses and Public Health* 68(5):361–375–376

Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen Bauen mit Holz - von der Planung bis zum Rückbau (ZukunftLaWiBau)

Schlussbericht über o.g. Forschungsvorhaben
gefördert unter dem Kennzeichen: 2220HV036
im Rahmen „Landwirtschaftliches Bauen mit Holz“ des Förderprogramms „Nachwachsende Rohstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)

TEIL E: Hygiene

Institut für Epidemiologie (IfE)
Friedrich-Loeffler-Institut (FLI)

Projektbearbeitung:

Martin Oettler
PD Dr. med. vet. Nicolai Denzin
Prof. Dr. med. vet. Franz J. Conraths

Grundsätzliche Hinweise:

Da bestimmte Berichtsteile (z. B. der Hintergrund) vollidentisch zum Bericht der FU Berlin (Desinfektion bakteriell kontaminierter Hölzer) wird an diesen Stellen auf den Bericht der FU Berlin referenziert.

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungsverzeichnis.....	3
Kurzfassung.....	4
TEIL E: Hygiene	5
1 Virale Kontamination der Holzprodukte und Prüfung der Desinfektionswirkung	5
1.1 Hintergrund.....	5
1.2 Zielstellung	5
1.3 Eingehende Darstellung der Labormethoden.....	5
1.3.1 Studiendesign.....	5
1.3.2 Untersuchung der Hygienisierung der Holzoberflächen	7
1.3.3 Tenazitätsversuche	9
1.3.4 Statistische Auswertung	10
1.4 Ergebnisse und Interpretation.....	11
1.4.1 Hygienisierung der Holzoberflächen bei +10°C und -10°C.....	11
1.4.2 Hygienisierung der Holzoberflächen bei -10°C	13
1.4.3 Tenazitätsversuche	17
1.5 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse.....	18
1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	18
Abbildungsverzeichnis.....	19
Tabellenverzeichnis.....	19
Quellenverzeichnis	19

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

d	Tage
DVG	Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft
<i>EV-E</i>	<i>Bovines Enterovirus E</i>
<i>NDV</i>	<i>Newcastle Disease Virus</i>
CPE	zytopathischer Effekt
log	dekadischer Logarithmus
SD	Standardabweichung

KURZFASSUNG

Die hygienischen Charakteristika des Baumaterials Holz werden seit Jahrzehnten kontrovers diskutiert. Das Ziel der Untersuchungen in dieser Studie war es, den Hygienestatus von Holz als häufig verwendetes Material im landwirtschaftlichen Bauen, welches sich vielfach auch im direkten Kontakt mit dem Tier befindet, zu prüfen und zu beurteilen. Es wurde die Effektivität von chemischen Desinfektionsmitteln zur oberflächlichen Anwendung (Peressigsäure, Ameisensäure, Glutaraldehyd) auf verschiedenen, kontaminierten Holzoberflächen (Pappel, Fichte, Kiefer, Buche, Douglasie) praxisnah bei zwei verschiedenen Temperaturen (+10°C, -10°C) geprüft und beurteilt. Zur Kontamination wurden Indikatorkeime [*Enterovirus E (EV-E)*, unbehüllt, und *Newcastle Disease Virus (NDV)*, behüllt] eingesetzt.

Bei dem behüllten Virus war eine wirksame Desinfektion mit allen drei Desinfektionsmitteln auf intakten, feingesägten Holzoberflächen mit geringer Rautiefe bei einer Prüftemperatur von +10°C möglich. Bei dem unbehüllten Virus zeigen nur Peressigsäure und Ameisensäure unter vorgenannten Bedingungen eine wirksame Desinfektion. Diese beiden Desinfektionsmittel zeigten ebenfalls bei -10°C ihre Wirksamkeit.

In den Langzeitbeobachtungen wurden signifikante Unterschiede zwischen den intakten feingesägten Hölzern mit geringer Rautiefe und auch Unterschiede zu der Stahlkontrolle festgestellt. Bei den Versuchen mit dem unbehüllten Virus stellte sich heraus, dass Douglasienholz den Erreger am schnellsten inaktivierte, während dies bei dem behüllten Virus für Kiefernholz der Fall war.

TEIL E: HYGIENE

1 VIRALE KONTAMINATION DER HOLZPRODUKTE UND PRÜFUNG DER DESINFEKTIONSWIRKUNG

Martin Oettler, Nicolai Denzin, Franz J. Conraths; Institut für Epidemiologie; Friedrich-Loeffler-Institut

Die im Planungsleitfaden angegebenen rechtlichen Quellen und Literaturnachweise sind zu beachten, um eingehendere Informationen zu den nationalen und internationalen rechtlichen Grundlagen sowie zur Durchführung und den Einflussfaktoren der Reinigung und Desinfektion im Tierstall zu erhalten. Die Homepage der Deutschen Veterinärmedizinischen Gesellschaft, Ausschuss Desinfektion, bietet Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Desinfektionsmittel für die Tierhaltung (DVG e.V. 2023). Im Folgenden werden detailliert die im Rahmen des Projekts durchgeführten Untersuchungen und deren Ergebnisse beschrieben.

1.1 Hintergrund

Siehe Abschlussbericht FU Berlin.

1.2 Zielstellung

Das Ziel des Arbeitspaketes 5 war es, den Hygienestatus von Stalleinrichtungen in Holzbauweise zu analysieren und zu bewerten. Besonderer Fokus lag dabei auf:

- der Untersuchung der Widerstandsfähigkeit, Tenazität, viraler Erreger auf verschiedenartigen Holzoberflächen im Vergleich zu Stahl
- der Untersuchung der Hygienisierung verschiedener Bauhölzer, welche mit relevanten viralen Erregern kontaminiert wurden, mittels geeigneter Desinfektionsmittel zur oberflächlichen Anwendung
- der Untersuchung des praxisrelevanten Einflussfaktors «Temperatur» auf die Desinfektionseffizienz der verschiedenen chemischen Desinfektionsmittel

1.3 Eingehende Darstellung der Labormethoden

1.3.1 Studiendesign

Zunächst erfolgte die Testung der Desinfektionseffizienz auf Holzkeimträgern, welche mit spezifischen Surrogaterregern kontaminiert wurden. Diese erfolgte nach derzeit geltenden nationalen Prüfrichtlinien in Kombination mit europäischen Normen (DVG e.V. 2017, DIN e.V. 2020, 2019). Die Desinfektionseffizienz auf Holzoberflächen wurde bei

zwei Temperaturen getestet. Standardmäßig wurden die Testungen bei +10°C durchgeführt. Zur Repräsentation auch kälterer Jahreszeiten in Nutztierställen erfolgten ebenfalls Testungen bei -10°C.

In einem weiteren Schritt wurde durch Tenazitätsversuche die Überlebensrate der getesteten Surrogaterreger über die Zeit (ohne Desinfektionsmitteleinwirkung) auf hölzernen Oberflächen im Vergleich zu Stahl ermittelt.

Testviren:

Die verwendeten Viren orientierten sich an den gelisteten Testviren der Methoden zur Prüfung von chemischen Desinfektionsmitteln für die Tierhaltung, Kapitel Viruzidie der DVG (DVG e.V. 2017). Von den dort aufgeführten Viren wurde, jeweils für unbehüllte und behüllte Viren, das limitierende Virus mit der höchsten anzunehmenden Tenazität für die in dieser Arbeit verwendeten mikrobizid wirksamen Grundchemikalien identifiziert und in den Desinfektionsversuchen genutzt. Als das limitierende Virus bei den unbehüllten Viren stellte sich das *Enterovirus E (EV-E, Stamm LCR 4)* dar. Bei den behüllten Viren stellte das *Newcastle Disease Virus (NDV, Stamm Montana)* das limitierende Virus dar.

Beide Virusstämme wurden vom Institut für Tier- und Umwelthygiene der Freien Universität Berlin zur Verfügung gestellt.

Keimträger:

Als erster Vertreter der hölzernen Keimträger wurden Holzplättchen aus Pappelholz (*Populus sp.*) verwendet. Dies stellt den nationalen Standardprüfkeimträger für viruzide Desinfektionsmitteltestungen auf porösen Oberflächen in der Tierhaltung dar (DVG e.V. 2017). Als weitere hölzerne Prüfkeimträger dienten entsprechende Holzplättchen aus Kiefernholz (*Pinus sylvestris*) und Fichtenholz (*Picea abies*). Diese Holzarten stellen klassische deutsche Bauhölzer dar. Demgegenüber wurden Keimträgerplättchen aus Douglasienholz (*Pseudotsuga menziesii*) und Buchenholz (*Fagus sylvatica*) als Vertreter moderner Bauhölzer verwendet. Die verschiedenen Holzplättchen wurden vom Lehrstuhl für Holzwissenschaft der Technischen Universität München zur Verfügung gestellt.

Als nicht poröses Material wurde ein Stahlkeimträger untersucht. Dies stellt den europäischen Standardprüfkeimträger für viruzide Desinfektionsmitteltestungen auf nicht porösen Oberflächen für den Veterinärbereich dar (DIN e.V. 2020). Die Stahlplättchen wurden den Vorgaben entsprechend in Auftrag gegeben und von der Fa. ottim Metall GmbH, Berlin bezogen.

Die Keimträger sind in Abbildung 1 dargestellt.

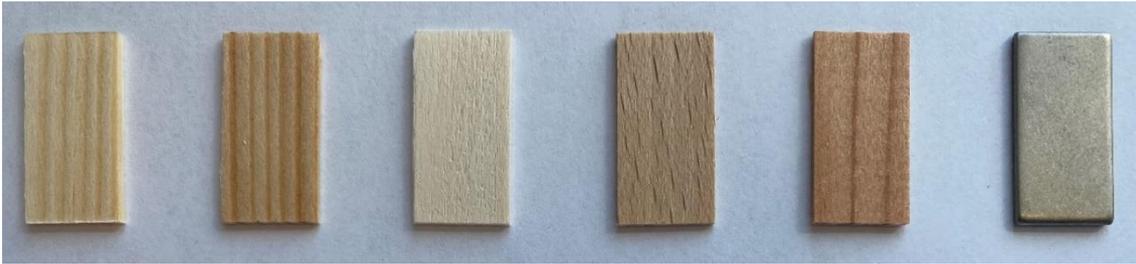


Abbildung 1: Verwendete Keimträger (v.l.n.r. Fichte, Kiefer, Pappel, Buche, Douglasie, Stahl)

Mikrobizide Grundchemikalien

Als „Desinfektionsmittel“ wurden mikrobizid wirksame Grundchemikalien verwendet. Diese Reinsubstanzen haben gegenüber den Handelspräparaten den Vorteil, dass sie keinen Komponentenmix darstellen oder mit Tensiden versetzt sind. Die jeweils verwendeten Grundchemikalien sind der Wirkstoffgruppe der Peroxide, organischen Säuren und Aldehyden zuzuordnen.

Tabelle 1: Verwendete mikrobizide Grundchemikalien

Grundchemikalie	Konzentration	Hersteller
Peressigsäure	15 %	AppliChem GmbH, Darmstadt
Ameisensäure	≥ 98 %	Carl Roth GmbH + Co. KG, Karlsruhe
Glutaraldehyd	50 %	Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Steinheim

1.3.2 Untersuchung der Hygienisierung der Holzoberflächen

Die Desinfektionsprüfungen im Labor orientierten sich an den nationalen Prüfrichtlinien der DVG „Methoden der Prüfung von chemischen Desinfektionsmitteln für die Tierhaltung, Viruzidie“ (DVG e.V. 2017) in Kombination mit den aktuellen europäischen Normen „Chemische Desinfektionsmittel und Antiseptika – Quantitativer Oberflächenversuch zur Bestimmung der bakteriziden Wirkung chemischer Desinfektionsmittel und Antiseptika für den Veterinärbereich auf nicht-porösen Oberflächen – Prüfverfahren und Anforderungen Phase 2, Stufe 2“ (DIN e.V. 2020) und „Chemische Desinfektionsmittel und Antiseptika – Quantitativer Oberflächenversuch zur Bestimmung der viruziden Wirkung chemischer Desinfektionsmittel und Antiseptika für den Veterinärbereich auf porösen Oberflächen ohne mechanische Wirkung – Prüfverfahren und Anforderungen (Phase 2, Stufe 2)“ (DIN e.V. 2019).

Zur Schaffung einer sterilen Oberfläche wurden die Holzkeimträger autoklaviert. Dafür wurden die 20 mm x 10 mm großen Keimträger zunächst einmal quer zur Holzmaserung halbiert und bei 121 °C und 280 kPa für 1,5 Stunden autoklaviert und getrocknet.

Die Kontamination der Keimträger erfolgte mit Virus-Prüfsuspension, versetzt mit Belastungssubstanz (3 g BSA pro Liter Virus-Prüfsuspension). Mehrere Keimträger einer Holzart wurden in Petrischalen überführt und mit jeweils 100 µl Virus-Prüfsuspension mit Belastungssubstanz beimpft (50 µl auf 10 mm x 10 mm).

Das Antrocknen der beimpften Keimträger in den offenen Petrischalen erfolgte in einem mit Kieselgel bestückten Exsikkator unter Vakuum.

Für die Desinfektion wurden sechs Keimträgerpaare in eine Vertiefung einer 6-Wellplatte überführt. Anschließend wurden die Vertiefungen mit jeweils 4 ml der verschiedenen verdünnten mikrobiziden Grundchemikalie aufgefüllt. Die jeweiligen Verdünnungen der Konzentrationen der mikrobiziden Grundchemikalien wurden mit Wasser standardisierter Härte (WSH) hergestellt.

Eine Vertiefung der 6-Wellplatte wurde nur mit 4 ml WSH aufgefüllt. Der zugehörige Keimträger ohne Kontakt zu einer verdünnten Grundchemikalie stellte die Grundlage für den späteren Referenztitel dar. Alle Keimträger wurden für eine Stunde bei 10 °C (und teils auch -10 °C) mit der verdünnten mikrobiziden Grundchemikalie bzw. nur WSH (Kontrolle) inkubiert.

Nach dem Ablauf der Einwirkzeit wurden die Keimträger entnommen. Zur Neutralisation wurden diese in Zentrifugenröhrchen mit jeweils 9,9 ml des jeweiligen Erhaltungsmediums überführt. Dabei wurden die bereits halbierten Keimträger noch einmal in 4 Teile zerteilt. Zur Desorption wurde der Inhalt der Zentrifugenröhrchen durch ein Schüttelgerät aufgewirbelt und anschließend für 10 min in einem mit Eiswasser gefüllten Ultraschallbad behandelt. Anschließend wurden die Proben für 15 min bei 1600 g_N zentrifugiert.

Die Proben wurden jeweils in einer halben 96-Wellplatte im Querformat durch eine Titration verdünnt. Mit einer serologischen Pipette wurde Probenflüssigkeit der Zentrifugenröhrchen in jeweils sechs Vertiefungen der obersten Reihe überführt und anschließend in die unteren Reihen titriert.

Für die Inkubation der Proben titration wurden jeweils eine halbe, mit MDBK (*Madin-Darby bovine kidney epithelial cells*) - bzw. LMH (*Leghorn Male-chicken Hepatocellular carcinoma*) - Zellen bewachsene, 96-Wellplatte im Querformat verwendet, auf diese wurde die Proben titration überführt. Die beimpften Zellkulturen wurden bei 37 °C und 5 % CO₂ bis zur Auswertung im Brutschrank inkubiert.

Die Auswertung der Desinfektionsversuche erfolgte für das EV-E sechs Tage, für das NDV fünf Tage nach dem Beimpfen der Zellkulturplatten mit Hilfe eines Umkehrmikroskopes. Geprüft wurde hierbei auf das Vorhandensein eines virusspezifischen zytopathischen Effektes (CPE).

Die Berechnung des Virustiters erfolgte mit der Formel nach Spearman-Kaeber (Kärber 1931, Spearman 1908):

$$m = x_k + d/2 - d \sum p_i$$

Dabei ist:

- m der negative dekadische Logarithmus des Titers auf Basis des Prüfvolumens in den Vertiefungen, Angabe in $\log \text{KID}_{50}/\text{Volumen}$
- x_k der Logarithmuswert der niedrigsten Verdünnungsstufe bei dem alle Vertiefungen einer Verdünnungsreihe einen CPE aufweisen
- d der log des Verdünnungsfaktors
- p_i die beobachtete Reaktionsrate
- $\sum p_i$ die Summe der Reaktionsrate von x_k bis zur höchsten Verdünnungsstufe

Um die Virusreduktion der jeweiligen Konzentration der mikrobiziden Grundchemikalie zu berechnen, wurde der jeweilige Testtiter von dem Referenztiter der Viruskontrolle abgezogen. Dieser Referenztiter wurde auf Grundlage desjenigen Keimträgers berechnet, welcher über die Einwirkzeit nur in WSH lag.

Der Prüfversuch wurde als erfolgreich bewertet, wenn durch die unterschiedlichen Konzentrationsabstufungen der mikrobiziden Grundchemikalie der Übergang von einer nicht wirksamen Desinfektion (<4 log-Stufen) zu einer wirksamen Desinfektion (≥ 4 log-Stufen) dargestellt werden konnte. Die jeweilige Testung wurde in drei Ansätzen an verschiedenen Tagen durchgeführt bzw. wiederholt. Die jeweils höchste notwendige Konzentration der Grundchemikalie der drei erfolgreichen Ansätze wurde als wirksame Konzentration der jeweiligen Grundchemikalie definiert.

1.3.3 Tenazitätsversuche

Vorbereitung der Stahlprüffläche

Die Stahlkeimträger wurden vor der Verwendung gereinigt, abgespült, entfettet, erneut abgespült, autoklaviert und getrocknet.

Durchführung der Tenazitätsversuche bei +10°C

Die Methodik richtete sich wie in den Desinfektionsversuchen nach den gängigen Prüfrichtlinien und Normen. Für einen Langzeitversuch wurden 27 Keimträger je Holzart, sowie 54 Stahlkeimträger verwendet und zu neun unterschiedlichen Testzeitpunkten ausgewertet.

Die Kontamination der verschiedenen Keimträger erfolgte wie in den Desinfektionsversuchen beschrieben. Das nachfolgende Antrocknen der beimpften Holzkeimträger sowie der Hälfte der Stahlkeimträger erfolgte zusammen im Exsikkator, dieser wurde für einen Tag Trocknungszeit bei 10 °C gelagert. Nach der Trocknung wurden die Keimträger zur Langzeitlagerung in 6-Wellplatten mit Deckel überführt und diese bei 10 °C gelagert. Zusätzlich wurde die zweite Hälfte der Stahlkeimträger (Stahl*) mit einem anderen Verfahren behandelt. Hierbei wurden die beimpften Stahlkeimträger im Exsikkator unter Vakuum bei Raumtemperatur vollständig getrocknet. Danach wurden diese Keimträger ebenfalls in 6-Wellplatten mit Deckel überführt und versiegelt. Die Langzeitlagerung erfolgte zusammen mit den unversiegelten 6-Wellplatten im Klimaschrank bei 10 °C.

Die Virusfreisetzung von den Keimträgern zum jeweiligen Testzeitpunkt, sowie die Auswertung der Versuche erfolgten wie in den Desinfektionsversuchen beschrieben. Eine Ausnahme stellten die Stahlkeimträger dar, diese wurden unzerteilt in das jeweilige Erhaltungsmedium aufgenommen. Die Auswertung erfolgte zu neun Testzeitpunkten jeweils im Dreifachansatz.

Die erste Auswertung erfolgte am Tag des Umsetzens der Keimträger aus dem Exsikkator in die 6-Wellplatten, bzw. am Tag nachdem die Stahlkeimträger versiegelt wurden. Dieser Tag wurde als der Tag der Trocknung, bzw. Tag „Null“ der Versuche definiert. Danach erfolgte die nächste Auswertung drei Tage später. Für EV-E erfolgte die weitere Auswertung im 7, 14 oder 28 Tage Rhythmus nach der Trocknung. Für NDV erfolgte die Auswertung im 5 Tages Rhythmus nach dem Tag der Trocknung.

Die Berechnung der Virusreduktion erfolgte im Vergleich zum Initialtiter in Suspension.

1.3.4 Statistische Auswertung

Zur Prüfung auf statistisch signifikante Unterschiede der Ergebnisse wurde die Software RStudio Version 2023.06.2+561 für Windows verwendet. Zum statistischen Vergleich bei den Desinfektionsversuchen wurde bei zwei Gruppen der Mann-Whitney-U-Test angewandt sowie der Kruskal-Wallis-Test bei mehr als zwei Gruppen. Als Signifikanzniveau für nachzuweisende Unterschiede wurde ein p-Wert von $< 0,05$.

Zum statistischen Vergleich bei den Langzeitbeobachtungen wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test überprüft, ob die logarithmierten Ergebnisse der Titerreduktion normalverteilt waren. Beim Vergleich von mehr als zwei Keimträgern wurde ein ANOVA-Test durchgeführt. Der Test erfolgte jeweils mit den logarithmierten Ergebnissen. Als Signifikanzniveau für nachzuweisende Unterschiede wurde ein p-Wert von $< 0,05$.

1.4 Ergebnisse und Interpretation

1.4.1 Hygienisierung der Holzoberflächen bei +10°C und -10°C

In Tabelle 2 sind die effektiven Konzentrationen der Desinfektionsmittel je Holzart für die Versuche bei +10°C dargestellt.

Die Peressigsäure zeigte bei beiden viralen Erregern eine gute Wirksamkeit. Eine erfolgreiche Desinfektion war auf allen getesteten Holzarten möglich. EV-E zeigte dabei aber eine höhere Tenazität als NDV, was sich in höheren erforderlichen Konzentrationen der Peressigsäure manifestierte.

Für das EV-E als Surrogatvirus für unbehüllte Viren ergaben sich bei den benötigten Konzentrationen der Peressigsäure für Kiefer und Pappel mit jeweils 0,05 % die niedrigsten Konzentrationen. Die anderen Holzarten lagen knapp über diesen Werten mit 0,075 % für Fichte und Buche, sowie 0,1 % für Douglasie. Die ermittelten Konzentrationen für die unterschiedlichen Holzarten waren nicht signifikant verschieden (p-Wert: 0,1013).

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommen Pirschel sowie Al-Khleif. Im Keimträgerstest auf Pappelholz nach der DVG-Methodik genügten 0,05 % Peressigsäure nach 60 min Einwirkzeit bzw. 0,01 % nach 120 min und 0,1 % nach 30 min (Pirschel 2015). Im Suspensionsversuch wurden 0,01 % Peressigsäure benötigt, um EV-E ohne eine Belastungssubstanz nach 30 min wirksam zu desinfizieren (Al-Khleif 2008). In Versuchen mit einer Belastungssubstanz stieg die Konzentration auf 0,05 % an, bei einer Einwirkungszeit von 15 min (Al-Khleif 2008).

Für das NDV als Surrogatvirus für behüllte Viren stellte sich Kiefer als diejenige Holzart dar, welche mit 0,0025 % Peressigsäure die niedrigste Konzentration der Grundchemikalie für eine wirksame Desinfektion benötigte. Die anderen Hölzer benötigten für eine wirksame Desinfektion höhere Konzentrationen der Grundchemikalie mit 0,01 % für Fichte und 0,025 % für Pappel, Buche und Douglasie. In den ermittelten Konzentrationen für das behüllte Virus ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen den Holzarten (p-Wert: 0,02773). Die Ergebnisse decken sich weitestgehend mit den Ergebnissen von Schmidt (2015). Sie untersuchte die Desinfizierbarkeit von NDV auf Pappelholz. Das Ziel hierbei war eine Keimreduktion um mindestens drei dekadische Logarithmusstufen. Ihre Desinfektionsversuche ergaben, dass 0,05 % Peressigsäure benötigt wurde, um eine durchschnittliche Virusreduktion von $> 3,45 \log_{10} \text{KID}_{50}/\text{ml}$ zu erreichen. Die Einwirkzeit betrug 30 min, bei einer Temperatur von 20 °C und einer niedrigen Belastung. Al-Khleif (2008) führte Suspensionsversuche mit dem NDV und Peressigsäure durch. Hier zeigte sich, dass 0,005 % der Reinsubstanz nach 30 min NDV ohne eine Eiweißbelastung wirksam ($\geq 4 \log_{10} \text{KID}_{50}/\text{ml}$) desinfizieren kann.

Die Ameisensäure zeigte ebenfalls bei beiden viralen Erregern eine gute Wirksamkeit. Die Tenazität der beiden Viren lag nahe beieinander. Für Fichte, Kiefer und Pappel stellte sich das EV-E als das Virus dar, welches die höheren Konzentrationen benötigte.

Bei Buche war dies für das NDV der Fall und für Douglasie ergaben sich ähnliche Werte beider Viren.

Douglasie stellte sich bei dem EV-E als das Holz dar, welches mit 0,075 % die geringste Konzentration der Ameisensäure für die wirksame Desinfektion benötigte. Kiefer und Buche lagen mit 1 % knapp darüber, ebenso wie Fichte und Pappel mit 1,5 %. Die ermittelten erforderlichen Konzentrationen für eine wirksame Desinfektion für das EV-E zeigten zwischen den Holzarten keine signifikanten Unterschiede (p-Wert: 0,05502). Pirschel (2015) erzielte in seinen Versuchen auf Pappelholz ähnliche Ergebnisse. Hierbei waren durchschnittlich Konzentrationen von 0,5 % Ameisensäure nach 120 min, 1 % nach 60 min und 1,5 % nach 30 min erforderlich. Nach Rheinbaben and Wolff (2002) wird eine viruswirksame Desinfektion des Keimes durch Ameisensäure im DVG-Keimträgertest nach 30 min mit einer Konzentration von 1 % erreicht bzw. durch 0,5 % nach 15 min im Suspensionstest.

Für das NDV gelang eine wirksame Desinfektion auf den Nadelhölzern bei geringeren Konzentrationen der Ameisensäure als auf den Laubhölzern. Kiefer benötigte mit 0,25 % die geringste Konzentration. Die weiteren Nadelhölzer benötigten 0,5 % der Grundchemikalie für Fichte und 0,75 % für Douglasie. Die Laubhölzer benötigten für eine wirksame Desinfektion bei Pappel eine Konzentration von 1 % und bei Buche von 2 % der Ameisensäure. Die Unterschiede der erforderlichen Konzentrationen zwischen den verschiedenen Hölzern in den Desinfektionsversuchen waren statistisch signifikant (p-Wert: 0,01478). Al-Khleif (2008) führte mit NDV Suspensionsversuche durch. 0,5 % der Grundchemikalie reduzierte den Virustiter ohne eine zusätzliche Belastungssubstanz um $4,25 \log_{10} \text{KID}_{50}/\text{ml}$ nach 30 min. Mit Verdopplung der Konzentration benötigte die Ameisensäure für den Prozess der wirksamen Desinfektion nur noch 5 min. Unter Zugabe einer Belastungssubstanz betrug die Virusreduktion durch 1 % der organischen Säure $4,25 \log_{10} \text{KID}_{50}/\text{ml}$ nach 30 min. Nach Rheinbaben and Wolff (2002) inaktiviert Ameisensäure das NDV nach 5 min bei einer Konzentration von 2 % der organischen Säure bzw. nach 15 min bei 1 %.

Bei Glutaraldehyd wurde eine wirksame Desinfektion nur für das behüllte Surrogatvirus NDV, nicht jedoch für das unbehüllte Surrogatvirus EV-E erreicht.

Für das EV-E konnte keine Wirksamkeit des Glutaraldehyds bis zu einer Konzentration von 10 % festgestellt werden. Unabhängig von der getesteten Holzart war meist nur eine Reduktion von 2 - 3 $\log_{10} \text{KID}_{50}/\text{ml}$ möglich. Pirschel (2015) kam in seinen Laborversuchen zu ähnlichen Ergebnissen. In seinen Untersuchungen konnte er mit Konzentrationen bis zu 2 % Glutaraldehyd und einer Einwirkzeit bis zu 120 min nicht mal eine reproduzierbare Desinfektion über drei dekadische Logarithmusstufen erzielen. Rhee et al. (2022b) untersuchten die Desinfizierbarkeit von EV-E durch Glutaraldehyd mittels Suspensionsversuchen. In den Versuchen konnte ebenfalls keine wirksame Desinfektion nachgewiesen werden. Die durchschnittlich ermittelte Virusreduktion durch 8 % der Grundchemikalie betrug lediglich $2,72 \log_{10} \text{KID}_{50}/\text{ml}$.

Bei NDV zeigte sich, ebenso wie bei der Ameisensäure, dass für eine wirksame Desinfektion auf den Nadelhölzern geringere Konzentrationen erforderlich sind als auf den Laubhölzern. Vor allem auf Kiefernholz erwies sich mit 0,1 % eine sehr niedrige Konzentration der Grundchemikalie als entsprechend der Kriterien wirksam. Die anderen beiden getesteten Nadelhölzer benötigten für eine wirksame Desinfektion 0,75 % und die beiden Laubhölzer 1,5 % des Glutaraldehydes. Zwischen den verschiedenen Holzarten ergaben sich in den ermittelten Konzentrationen für das behüllte Virus signifikante Unterschiede (p-Wert: 0,01141). Schmidt (2015) untersuchte die Desinfizierbarkeit von NDV auf Pappelholz, ihr Ziel war dabei eine Keimreduktion um mindestens drei dekadische Logarithmusstufen. Ihre Versuche ergaben, dass 0,25 % Glutaraldehyd benötigt werden, um NDV je nach Art der Virusvermehrung um durchschnittlich $> 3,25 \log_{10} \text{KID}_{50}/\text{ml}$ zu reduzieren. Die Einwirkzeit betrug jeweils 30 min bei 20 °C und einer niedrigen Belastung. Die Wirksamkeit von Glutaraldehyd auf das NDV in Suspensionsversuchen wurde von Rhee et al. (2022a) untersucht. Das Ergebnis war hierbei, dass durch 0,4 % des Aldehyds eine reproduzierbare, wirksame Desinfektion erfolgte bei einer hohen organischen Belastung, 30 min Einwirkzeit und einer Temperatur von 4 °C.

1.4.2 Hygienisierung der Holzoberflächen bei -10°C

In Tabelle 3 sind die effektiven Konzentrationen der Desinfektionsmittel je Holzart für die Versuche bei -10°C dargestellt.

Die Desinfektionsversuche bei -10 °C erfolgten nur für das EV-E, da sich dieses Virus (mit der Ausnahme von Ameisensäure auf Buchenholz) von den beiden getesteten Viren (bei +10 °C) als das limitierende Virus darstellte. Dies wurde ersichtlich in den jeweils höheren oder gleichen benötigten Konzentrationen der Grundchemikalien für eine erfolgreiche Desinfektion.

Bei der Peressigsäure ergaben sich für Fichte und Pappel mit 0,25 % die niedrigsten benötigten Konzentrationen der Grundchemikalie. Danach folgten Kiefer und Douglasie mit jeweils 0,5 %, gefolgt von Buche mit 0,75 %. Unter den ermittelten Werten für eine erfolgreiche Desinfektion gab es signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Holzarten (p-Wert: 0,0106).

Für die Ameisensäure stellen sich Fichte, Pappel und Buche als die Hölzer dar, welche mit 3 % der Reinsubstanz die geringsten Desinfektionsmittelkonzentrationen benötigten. Die anderen Hölzer folgten mit 4 % für Douglasienholz und 5 % für Kiefernholz. Es ergaben sich hier signifikante Unterschiede in den untersuchten Werten für eine wirksame Desinfektion (p-Wert: 0,03081).

Für Glutaraldehyd wurden keine Desinfektionsversuche bei -10 °C durchgeführt. Aufgrund der nicht vorhandenen Wirksamkeit bei dem unbehüllten Virus bei 10 °C und dem

beschriebenen Kältefehlers des Glutaraldehyds, war hier von keiner Wirksamkeit auszugehen und die Versuche wurden nicht durchgeführt.

Zusammenfassend entsprechen die Versuchsergebnisse der Desinfektionsmitteltestung mit einer Prüftemperatur von -10 °C den Ergebnissen von Schliesser (1981). Hierbei wurde beschrieben, dass bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts die besten Desinfektionsergebnisse mit Peressigsäure erzielt wurden. Organische Säuren (u.a. Ameisensäure) wurden als weniger effektiv, aber dennoch wirksam eingestuft. Für Formalin als Vertreter der Aldehyde wurden die schlechtesten Ergebnisse beschrieben, mit einer Wirkung, die erst nach tagelanger Einwirkzeit einsetzte. Bremer (2003) führte ebenfalls Desinfektionsmitteltestungen unter der Berücksichtigung der Prüftemperatur durch, allerdings nur bis zu 4 °C . Hierbei sind die Auswirkungen des Kältefehlers nicht so deutlich wie bei einer Testung unterhalb des Gefrierpunktes ersichtlich, jedoch ebenfalls vorhanden

Tabelle 2: Effektive Konzentrationen von Peressigsäure, Ameisensäure und Glutaraldehyd in % für eine wirksame Desinfektion von EV-E und NDV bei einer Umgebungstemperatur von +10°C auf Keimträgern aus Fichte, Kiefer, Pappel, Buche und Douglasie

Erreger	Testnr.	Desinfektionsmittel														
		Peressigsäure					Ameisensäure					Glutaraldehyd				
Holzart		Fichte	Kiefer	Pappel	Buche	Douglasie	Fichte	Kiefer	Pappel	Buche	Douglasie	Fichte	Kiefer	Pappel	Buche	Douglasie
<i>EV-E</i>	1	0,075	0,05	0,05	0,075	0,05	1,5	1	1,5	1	0,75	-	-	-	-	-
	2	0,075	0,025	0,05	0,05	0,1	1,5	1	1	1	0,75	-	-	-	-	-
	3	0,075	0,05	0,05	0,075	0,05	1	0,75	1	0,75	0,75	-	-	-	-	-
	anzuwendende Konzentration¹		0,075	0,05	0,05	0,075	0,1	1,5	1	1,5	1	0,75	-	-	-	-
<i>NDV</i>	1	0,01	0,001	0,025	0,025	0,025	0,5	0,25	1	1,5	0,25	0,75	0,1	1,5	1,5	0,5
	2	0,01	0,0025	0,025	0,025	0,01	0,25	0,25	1	1,5	0,75	0,5	0,075	1,5	1,5	0,5
	3	0,0075	0,001	0,025	0,01	0,0075	0,5	0,25	1	2	0,5	0,75	0,075	1,5	1	0,75
	anzuwendende Konzentration¹		0,01	0,0025	0,025	0,025	0,025	0,5	0,25	1	2	0,75	0,75	0,1	1,5	1,5

¹ die anzuwendende Konzentration ist die höchste ermittelte effektive Konzentration der drei Versuchsdurchführungen
Bei EV-E und Glutaraldehyd ergab sich keine wirksame Desinfektion (getestet jeweils bis 10% Glutaraldehyd)

Tabelle 3: Effektive Konzentrationen von Peressigsäure und Ameisensäure in % für eine wirksame Desinfektion von EV-E und NDV bei einer Umgebungstemperatur von -10°C auf Keimträgern aus Fichte, Kiefer, Pappel, Buche und Douglasie

Erreger	Testnr.	Desinfektionsmittel														
		Peressigsäure					Ameisensäure					Glutaraldehyd				
Holzart		Fichte	Kiefer	Pappel	Buche	Douglasie	Fichte	Kiefer	Pappel	Buche	Douglasie	Fichte	Kiefer	Pappel	Buche	Douglasie
EV-E	1	0,25	0,5	0,25	0,5	0,5	3	5	2,5	2,5	3,5					
	2	0,25	0,5	0,25	0,75	0,5	3	5	3	3	3					
	3	0,25	0,5	0,25	0,5	0,5	2,5	5	3	2,5	4					
anzuwendende Konzentration¹		0,25	0,5	0,25	0,75	0,5	3	5	3	3	4					

¹ die anzuwendende Konzentration ist die höchste ermittelte effektive Konzentration der drei Versuchsdurchführungen
Glutaraldehyd wurde nicht untersucht da bereits bei +10°C keine wirksame Desinfektion möglich war

1.4.3 Tenazitätsversuche

In den Langzeitbeobachtungen zur Tenazität auf den verschiedenen Oberflächen mit dem *EV-E* konnte beginnend ab Tag 3 ein statistisch signifikanter Unterschied (p-Wert: 0,0009368) der Titerreduktionen zwischen den Holzarten detektiert werden. Die insgesamt beste biozide Wirkung zeigte das Douglasienholz. Nach zwei Wochen des Versuchslaufs erreichte die Titerreduktion das Ergebnis einer wirksamen Desinfektion. Nach sechs Wochen konnten keine Restviren mehr auf dem Douglasienholz nachgewiesen werden. Dieses Ergebnis hielt über den gesamten weiteren Prüfversuch an. Das nächstbeste Ergebnis erzielte der trockene Stahl (Stahl*, erzwungene Abtrocknung durch Inkubation mit Kieselgur, s.o.). Hierbei konnte ebenfalls nach 2 Wochen das Ziel einer erfolgreichen Desinfektion erreicht werden. Nach 12 Wochen waren hierbei keine Viren mehr nachweisbar. Danach folgten die Ergebnisse von Kiefer, Fichten- und Buchenholz. Keines der letztgenannten Hölzer konnte über den Versuchsablauf über ca. 4 Monate den Restvirusgehalt für den Status einer erfolgreichen Desinfektion erreichen. Das Pappelholz wies ebenfalls nur eine geringe Virusreduktion über den gesamten Prüfdurchlauf auf. Das schlechteste Ergebnis nach Ablauf des Gesamtversuchs lieferte die Stahlprobe ohne gesonderte Behandlung (kein Kieselgur, s.o., kaum Abtrocknung durch Kondensation von Luftfeuchte).

Für das unbehüllte *Enterovirus E* wurde die hohe Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen, welche Olszewska et al. (2008) und auch Steiger (1986) darlegen, entsprechend bestätigt. Eine Ausnahme unter den Hölzern stellte das Douglasienholz dar, bei welchem ein deutlicher biozider Effekt sichtbar wurde. Dieser Effekt könnte mit dem besonders niedrigen pH-Wert des Douglasienholzes (Grosser and Teetz 1998) zusammenhängen.

In den Tenazitätsversuchen mit dem *NDV* auf verschiedenen Oberflächen konnte beginnend am Tag nach der Trocknung ein statistisch signifikanter Unterschied (p-Wert: 0,0006084) der Titerreduktionen zwischen den Holzarten detektiert werden. Insgesamt zeigte Kiefernholz die beste biozide Wirkung. Bereits an dem Tag der Trocknung erreichte die Titerreduktion das Ergebnis einer wirksamen Desinfektion. Nach 5 Tagen konnten keine Restviren mehr nachgewiesen werden. Fichte und Douglasie erreichten das Ergebnis einer erfolgreichen Desinfektion an Tag 3 und waren von Tag 15 an nicht mehr nachweisbar. Bei Buche und Pappel konnte das Ergebnis der wirksamen Desinfektion an Tag 3 bzw. Tag 5 erreicht werden und ab Tag 25 bzw. Tag 30 waren keine Restviren mehr nachweisbar. Bei den Ergebnissen der Stahlprobe (Stahl, s.o.) war nach 35 Tagen noch ein geringer Resttiter vorhanden, während bei der anderen Stahlprobe (Stahl*, s.o.) noch ein sehr hoher Resttiter vorhanden war.

Für das behüllte *Newcastle Disease Virus* konnten die Unterschiede nach den Holzarten aus der Desinfektionsmitteltestung bestätigt werden. Die Nadelhölzer, insbesondere das Kiefernholz, konnten in kürzerer Zeit die Viren inaktivieren als die Laubhölzer. Dieser Unterschied ist durch den höheren Gehalt an Holzinhaltstoffen (Grosser and Teetz 1998) wie Gerbsäuren, Harze oder Tannine zu erklären.

1.5 Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse

Im Laboransatz wurde gezeigt, dass intaktes, feingesägtes Bauholz mit geringer Rautiefe bei Temperaturen von 10°C mit Peressigsäure, Ameisensäure und Glutaraldehyd hinsichtlich behüllter viraler Erreger wirksam desinfiziert werden kann. Bei unbehüllten Viren bei 10 °C sowie auch bei Minustemperaturen ist nur Peressigsäure und Ameisensäure dazu in der Lage eine effiziente Desinfektion auf Holzoberflächen zu erreichen. In den Langzeitbeobachtungen wurde die virusinaktivierende Wirkung der feingesägten Hölzer mit geringer Rautiefe festgestellt. Bei den Versuchen mit dem unbehüllten Virus stellte sich heraus, dass Douglasienholz den Erreger am schnellsten inaktivierte, während dies bei dem behüllten Virus für Kiefernholz der Fall war.

1.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine enge Zusammenarbeit erfolgte innerhalb des Arbeitspakets 5 «Hygiene» mit der Freien Universität Berlin. Das Friedrich-Loeffler-Institut untersuchte dabei den Hygienestatus von Holz in Bezug auf virale Erreger, die Freie Universität Berlin in Bezug auf bakterielle Erreger. Dabei wurden die Arbeitspakete 5.1 und 5.2 gemeinschaftlich bearbeitet. Die Bereitstellung der Holzkeimträger für die Laboruntersuchungen erfolgte durch die Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzwissenschaft. Zudem fand mit dem Arbeitspaket 4 «Holzprodukte» eine enge Absprache und Zusammenarbeit in Bezug auf die Dauerhaftigkeit der Holzprodukte (Arbeitspaket 5.3) bei der Anwendung von Desinfektionsmittel statt, wobei die Laborversuche durch die Technische Universität München durchgeführt wurden.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Verwendete Keimträger (v.l.n.r. Fichte, Kiefer, Pappel, Buche, Douglasie, Stahl)	7
---	---

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Verwendete mikrobizide Grundchemikalien	7
Tabelle 2: Effektive Konzentrationen von Peressigsäure, Ameisensäure und Glutaraldehyd in % für eine wirksame Desinfektion von EV-E und NDV bei einer Umgebungstemperatur von +10°C auf Keimträgern aus Fichte, Kiefer, Pappel, Buche und Douglasie.....	15
Tabelle 3: Effektive Konzentrationen von Peressigsäure und Ameisensäure in % für eine wirksame Desinfektion von EV-E und NDV bei einer Umgebungstemperatur von -10°C auf Keimträgern aus Fichte, Kiefer, Pappel, Buche und Douglasie.....	16

QUELLENVERZEICHNIS

- Al-Khleif A (2008) Entwicklung eines quantitativen Keimträgertests zur Prüfung der Wirksamkeit von Desinfektionsmitteln gegen animale Viren im Lebensmittelbereich, Justus-Liebig-Universität Gießen
- Bremer P (2003) Untersuchungen zur viruziden Wirksamkeit von chemischen Desinfektionsmitteln bei verschiedenen Temperaturen, Justus-Liebig-Universität Gießen
- DIN e.V. (2019) DIN EN 16437: Chemische Desinfektionsmittel und Antiseptika - Quantitativer Oberflächenversuch zur Bestimmung der bakteriziden Wirkung chemischer Desinfektionsmittel und Antiseptika für den Veterinärbereich auf porösen Oberflächen ohne mechanische Wirkung - Prüfverfahren und Anforderungen (Phase 2, Stufe 2)
- DIN e.V. (2020) DIN EN 17122: Chemische Desinfektionsmittel und Antiseptika - Quantitativer Oberflächenversuch zur Bestimmung der viruziden Wirkung chemischer Desinfektionsmittel und Antiseptika für den Veterinärbereich auf nicht-porösen Oberflächen - Prüfverfahren und Anforderungen - Phase 2, Stufe 2
- DVG e.V. (2017) Methoden der Prüfung von chemischen Desinfektionsmitteln für die Tierhaltung, Viruzidie. https://www.desinfektion-dvg.de/fileadmin/FG_Desinfektion/Dokumente/Fuer_Gutachter/Pruefrichtlinien/V.4_Viruzidie_7Nov2017.pdf. Accessed 03 Aug 2023 um 13.21

- DVG e.V. (2023) DVG-Desinfektionsmittelliste für den Tierhaltungsbereich.
<https://www.desinfektion-dvg.de/index.php?id=2150>. Accessed 10 Sep 2023 um 10.42 Uhr
- Grosser D, Teetz W (1998) *Einheimische Nutzhölzer (Loseblattsammlung)*, 1st edn. Centrale Marketing-Gesellschaft der deutschen Agrarwirtschaft, Bonn
- Kärber G (1931) Beitrag zur kollektiven Behandlung pharmakologischer Reihenversuche. *Archiv f. experiment. Pathol. u. Pharmacol* 162(4):480–483. doi: 10.1007/BF01863914
- Olszewska H, Paluszak Z, Jarzabek Z (2008) Survival of bovine enterovirus strain LCR-4 in water, slurry, and soil. *Bulletin of the Veterinary Institute in Pulawy* 52(2):205–209
- Pirschel JC (2015) Untersuchungen zur Eignung verschiedener animaler Viren zur Prüfung der Viruzidie chemischer Desinfektionsmittel in der Nutztierhaltung, Universität Leipzig
- Rhee CH, Her M, Jeong W (2022a) Virucidal efficacy of potassium peroxymonosulfate, sodium dichloroisocyanurate, glutaraldehyde, and quaternary ammonium compounds against Newcastle disease virus. *J. Prev. Vet. Med.* 46(1):16–21. doi: 10.13041/jpvm.2022.46.1.16
- Rhee CH, Park S-C, Her M, Jeong W (2022b) Surrogate Selection for Foot-and-Mouth Disease Virus in Disinfectant Efficacy Tests by Simultaneous Comparison of Bacteriophage MS2 and Bovine Enterovirus Type 1. *Viruses* 14(12). doi: 10.3390/v14122590
- Rheinbaben F von, Wolff MH (2002) *Handbuch der viruswirksamen Desinfektionen*, 1st edn. Springer-Verlag, Berlin
- Schliesser T (1981) Grundlagen der Desinfektion. In: *Desinfektion in Tierhaltung, Fleisch- und Milchwirtschaft*/Hrsg.: Schliesser T und Strauch D, 1st edn. Flexibles Taschenbuch. Enke, Stuttgart
- Schmidt F (2015) Etablierung neuer Richtlinien für die Desinfektionsmittelprüfung im Bereich Tierhaltung sowie für die tierärztliche Praxis, Universität Leipzig
- Spearman C (1908) The method of 'right and wrong cases' ('constant stimuli') without Gauss's formulae. *British Journal of Psychology*, 1904-1920 2(3):227–242. doi: 10.1111/j.2044-8295.1908.tb00176.x
- Steiger A (1986) *Desinfektion*, 1st edn. VEB Gustav Fischer, Jena

Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen Bauen mit Holz - von der Planung bis zum Rückbau (ZukunftLaWiBau)

Schlussbericht über o.g. Forschungsvorhaben
gefördert unter dem Kennzeichen: 2220HV036
im Rahmen „Landwirtschaftliches Bauen mit Holz“ des Förderprogramms „Nachwach-
sende Rohstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)

TEIL E: Hygiene TEIL F: Holzprodukte

Technische Universität München (TUM)
TUM School of Life Sciences
Holzforschung München (HFM)
Lehrstuhl für Holzwissenschaft

Projektbearbeitung:

Dr. Elisabeth Windeisen-Holzhauser (TUM-HFM)
Dr. Regina Wanschura (TUM-HFM)

INHALTSVERZEICHNIS

Begriffe und Definitionen	3
TEIL E: Hygiene	4
1 Potentielle chemische Einflüsse auf Holzbauteile	4
1.1 Bestimmung der Dauerhaftigkeit von Holzprodukten in Laborexperimenten	4
1.1.1 Material und Methode	4
1.1.2 Ergebnisse	8
1.2 Bestimmung der Dauerhaftigkeit von Holzprodukten in Feldversuchen	14
1.2.1 Material und Methode	14
1.2.2 Ergebnisse	14
TEIL F: Holzprodukte.....	15
1 Konventionell im Stallbau genutzte und potentiell nutzbare Holzprodukte und Holzarten	15
1.1.1 Material und Methode	15
Abbildungsverzeichnis.....	28
Tabellenverzeichnis.....	28
Quellenverzeichnis	29

BEGRIFFE UND DEFINITIONEN

Sägerau: Begriff der Holzverarbeitung: die noch unbearbeitete raue Oberfläche nach dem Holzzuschnitt im Sägewerk.

in situ: In situ bedeutet an Ort und Stelle. Chemisch: Verfahren, die ohne Probenahme, unmittelbar im Reaktionssystem, arbeiten.

TEIL E: HYGIENE

1 POTENTIELLE CHEMISCHE EINFLÜSSE AUF HOLZBAUTEILE

Die potentiellen Belastungen sind aufgrund der vielfältigen Einbausituationen **physikalischer/mechanischer** (Biss, Tritt, Abrieb, statische oder dynamische Kräfte, Sorption, Quellen und Schwinden, UV-Strahlung, Temperaturschwankungen), **biologischer** (Bakterien, Pilze, Insekten) und **chemischer** Natur (Inhaltsstoffe der Stallatmosphäre, Mist/Gülle, Desinfektionsmittel).

Bei Stallatmosphären handelt es sich um heterogene Mischatmosphären, d.h. mehrere Verbindungen werden als Gase oder Aerosole gemeinsam mit unterschiedlichen Mengen Wasserdampf emittiert. Daneben treten auch nichtflüchtige (trockene) Stäube auf (Erler 1998b). Als wichtigstes Gas ist Ammoniak (NH_3) zu nennen, welches als Zersetzungsprodukt aus Exkrementen entsteht, die Harnstoff und Proteine beinhalten (Pflanz 2005, Belie et al. 2000b, Pflanz 2007). Des Weiteren werden Desinfektionsmittel zu Reinigungszwecken eingesetzt.

Um etwaige Veränderungen innerhalb des kurzen Beobachtungszeitraumes messbar zu machen, werden sowohl Labor- als auch Feldversuche durchgeführt. Für die Laborversuche werden kleine Holzproben einer extremen, in der normalen Stallumgebung nicht auftretenden Ammoniak-Atmosphäre ausgesetzt. Die so erzielten Ergebnisse können als eine Art worst-case-Szenario betrachtet werden und folglich nur im Vergleich mit Feldversuchen für den Realfall interpretiert werden. Für die Feldversuche werden in ausgewählten Ställen an verschiedenen, durch Tierkontakt belasteten Bauteilen mittels einer Rasierklinge Proben der Holzart Fichte genommen.

1.1 Bestimmung der Dauerhaftigkeit von Holzprodukten in Laborexperimenten

1.1.1 Material und Methode

Zu Projektbeginn wird in Absprache mit den Projektpartnern festgelegt, vorrangig die drei Holzarten Pappel (*Populus sp.*), Fichte (*Picea abies*) und Kiefer (*Pinus sylvestris*) zu bearbeiten. Diese Priorisierung begründet sich u.a. dadurch, dass die experimentellen Arbeiten in AP5 als derart zeitintensiv anzunehmen waren, dass zunächst davon auszugehen war, dass im Rahmen der Projektlaufzeit nur drei Probenkollektive bearbeitet werden können. Im Projektverlauf werden Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und Buche (*Fagus sylvatica*) in die Bearbeitung aufgenommen. Es werden 2000 Probeträger je Holzart aus handelsüblichen Brettern, welche zum Teil aus dem Präsenzbestand der Holzforschung München (HFM) stammen in der Dimension 20 mm x 10 mm x 1 mm (L x B x H) hergestellt. Diese Dimension ist zugleich für die Normprüfungen nach DIN EN 16437 in AP 5 vorgegeben. Für diese Prüfungen werden der Freien Universität Berlin (FUB) für AP5 über den gesamten Projektzeitraum hinweg 1300 Probeträger je Holzart bereitgestellt. Die Oberfläche ist als sägerauh zu bezeichnen. Zum Vergleich zwischen

den in der HFM hergestellten Probeträgern und jenen, die üblicherweise für Desinfektionsmittelprüfungen an porösen Oberflächen zur Anwendung kommen, erhält die HFM von der FUB 100 Referenzträger aus Pappel. Im Folgenden werden die beiden Pappelproben zur besseren Unterscheidung als Pappel (TUM) und Pappel (DVG) bezeichnet, wobei die Bezeichnung DVG (Deutsche Veterinärmedizinischen Gesellschaft) beim Projektpartner FUB üblich ist und daher übernommen wird.

Lagerung in einer Modellatmosphäre: Die Probeträger werden in dafür eigens angefertigten Teflonblöcken mit gefrästen Steckschlitten



Abbildung 1. Probenraum zur Beaufschlagung mit der Modellatmosphäre

positioniert (ca. 100 Probekörper pro Block) und in gesättigter NH_3 -Atmosphäre in Exsikkatoren (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**) gelagert, welche über eine Mischung aus Ammoniumchlorid und Natronlauge ($\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NaOH} \rightarrow \text{NH}_3 + \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$) *in situ* erzeugt wird. Ammoniak wird gewählt, da es zum einen typischerweise in Stallatmosphären auftritt und zum anderen Auswirkungen auf Holz aufgrund seiner Reaktivität zwar bereits bekannt, aber wenig systematisch untersucht sind. Temperatur und Luftfeuchte werden für dieses worst-case-Szenario mittels Hygrometer protokolliert (65 % rel. LF; Labortemperatur zwischen 23-25 °C). Um einen möglicherweise fortschreitenden Einfluss des NH_3 -Gases auf die Proben nach-

vollziehen zu können, erfolgt die Beprobung nach 4, 20 sowie 35 Wochen. Ein Referenzkollektiv wird unter kontrollierten Bedingungen (65 % rel. LF; Labortemperatur zwischen 23-25 °C) ohne Beaufschlagung mit Ammoniakatmosphäre in einem separaten Exsikkator gelagert. So ist es möglich einen analytischen Vergleich der in NH_3 Atmosphäre gelagerten Proben mit Referenzproben desselben Ursprungs und desselben Alters durchzuführen.

Ermittlung einer möglichen kombinatorischen Wirkung von Modellatmosphäre und aufgebrauchten Desinfektionsmitteln: Zur Erfassung einer möglichen kombinatorischen Wirkung von eingesetzten Desinfektionsmitteln mit der NH_3 -Beaufschlagung auf die Holzproben, werden die Probekörper mit Ameisensäure, Glutaraldehyd und Peressigsäure benetzt (je 400 μl / Probekörper, aufgetragen mit einer Spritze). Zur Anwendung kommen die von der FUB im Zwischenbericht genannten wirksamen Konzentrationen (AP5). Für die Durchführung wird ein Probenkollektiv nach 20 Wochen NH_3 -Belastung dem Exsikkator entnommen, desinfiziert und nach 60 Minuten Trockenzeit in die NH_3 - Atmosphäre zurückgegeben. Ein erneuter Desinfektionszyklus erfolgt nach 35 Wochen NH_3 - Belastungszeit. Es werden drei Varianten desinfizierter Proben analysiert:

- a) 20 Wochen NH₃-Atmosphäre + 1 Desinfektionsdurchgang (Proben nach Desinfektion getrocknet),
- b) 35 Wochen NH₃-Atmosphäre + 1 Desinfektionsdurchgang,
- c) unbehandelte native Holzproben (Referenzen).

Erfassung eines worst-case Szenarios im Hinblick auf mögliche Schäden an der nativen Holzoberfläche durch häufiges Desinfizieren:

Es werden Probeträger (15-20 Stück pro Holzart) in Petrischalen gelagert und mittels einer Spritze mit 400 µl Peressigsäure benetzt. Es kommen folgende Konzentrationen zur Anwendung: Fichte 1,5 %, Kiefer 1%, Pappel 0,75 %. Die Angaben beruhen auf den von der FUB festgestellten wirksamen Konzentrationen für Peressigsäure. Für die Holzarten Buche und Douglasie existieren zum Versuchszeitpunkt noch keine Daten. Daher werden in Anlehnung an die Befunde zu den anderen Holzarten für Buche 0,75 % und für Douglasie 1 % als Konzentrationen gewählt. Es werden 52 Desinfektionszyklen durchgeführt. Zwischen jedem Zyklus trocknet die Probe vollständig ab. Zur Darstellung eines Extremszenarios werden eine Charge Proben (bestehend aus je 5 Probeplättchen je Holzart) 15 % iger Peressigsäure ausgesetzt.

Untersuchung von Holzwerkstoffen:



Abbildung 2. Probekörper aus Holzwerkstoffplatten (links: Seitenansicht, mittig: Aufsicht) sowie rechts: Schulterstabproben für die Zugscherversuche

Neben Vollholzprodukten können im Stallbau auch Holzwerkstoffe eingesetzt werden. Diese enthalten in der Regel neben Holz auch einen möglicherweise durch Ammoniakgas beeinflussbaren Klebstoffanteil. Daher werden zwei handelsübliche Mehrschichtplatten zur Untersuchung ausgewählt. Es handelt sich dabei um Furnierschichtholz bestehend aus mehreren Lagen ca. 3 mm starker, miteinander verklebter Furniere. Einmal liegt dabei Buche als Holzart zugrunde und einmal eine Mischung aus Fichten- und Kiefern furnieren. Der genutzte Klebstoff ist in beiden Fällen ein Phenol-Formaldehydharz (PF). Aus den Platten werden Proben mit 9 cm x 2 cm x 2 cm (L x B x H) hergestellt, welche jeweils drei Klebfugen enthalten (Abbildung 2). Diese Probekörper werden etwa mittig, von beiden Seiten mit einem Versatz von 1 cm zueinander, 1 cm tief eingeschnitten. Es wird dabei darauf geachtet, dass die Einschnitte jeweils die mittlere Klebfuge treffen. Es werden je Platte 44 Probekörper hergestellt, welche zu gleichen Teilen in ein Test- und ein Referenzkollektiv unterteilt werden. Das Testkollektiv wird stehend im Exsikkator positioniert. Um mögliche Veränderungen im Holz von jenen im Klebstoff differenzieren zu können, werden mittels Laserdrucker erzeugte Schulterstabproben aus Melamin-Urea-Formaldehyd- (MUF) und Phenol-Resorcin-Formaldehyd- (PRF) Klebstoff sowie ein, zu analytischen Vergleichszwecken separat im Labor ausgehärtetes Stück PF Klebstoff ebenso im Exsikkator gelagert und beaufschlagt.

Die Beaufschlagung mit Ammoniak erfolgt für 14 Wochen analog zu den zuvor untersuchten Holzproben. Nach Ablauf der Beaufschlagung werden die Proben zunächst 1 Woche normaler Laborumgebung im Abzug gelagert und anschließend eine Woche im Normalklima bei 60 % rel. LF und 20 °C klimatisiert. Die Festigkeitsprüfung erfolgte als Zugscherprüfung. Des Weiteren wird der ausgehärtete Phenolharzklebstoff mittels TD-Py-GC/MS charakterisiert und mit einer Referenz verglichen.

Messung des Oberflächen-pH-Wertes: Die Bestimmung des Oberflächen-pH-Wertes erfolgt in einem dafür vorgesehenen Behälter aus Teflon in welchem der Probeträger mittig positioniert wird. Um die Umgebungsluft möglichst auszuschliessen wird die Vorrichtung mittels Schraubzwingen zusammengehalten. Es werden 150 µl destilliertes Wasser mittels einer Spritze aufgetragen und eine pH-Flachmembranelektrode (Mettler-Toledo) mittig über der Öffnung positioniert. Der Wert wird bei Erreichen eines konstanten Wertes notiert. Abhängig von der Holzart erfolgt dies nach 2 bis 7 Minuten.

FTIR/ ATR- Messungen: Die Messungen erfolgen an einem Nicolet iS50 (ThermoFisher), für die Oberflächenmessungen mit eingesetzter ATR-Einheit, im mittleren Infrarotbereich mit 32 Scans. Es werden je 5 Probeträger pro Holzart (pro Probe) gemessen. Aus je 3 basislinienkorrigierten und auf $\approx 800 \text{ cm}^{-1}$ normierten Einzelmessungen pro Probeträger wird jeweils ein Mittelwertsspektrum gebildet. Es werden pro Probe 25- 30 Einzelmessungen durchgeführt. Bei Nadelhölzern werden zudem Frühholz und Spätholz getrennt gemessen. Mit den aus landwirtschaftlichen Betrieben stammenden Realproben wird analog verfahren. Sie werden je auf der Oberseite (dem Tier zugewandt) und auf der Unterseite gemessen. Es wird dabei keine Unterscheidung zwischen Früh – und Spätholz vorgenommen.

Thermodesorptions-GC/MS: Luftproben sowie die Thermoextraktion von kleinen Feststoffproben (80 µg Probe eingewogen in einem leeren, konditionierten TD-Röhrchen) werden als Dreifachbestimmung mittels eines automatischen Probengebers in die Desorptionseinheit (Gerstel TDS 2) geladen, in welcher sie bei 250°C desorbiert werden. Gemessen wird mit folgenden Parametern: GC-Temperaturprogramm 50°C (8/min) auf 300°C; Säule: Kapillarsäule (Restek): ms-5, Länge: 60m, Durchmesser 0,25 mm und Filmdicke 0,25 µm.

Pyrolyse-GC/MS: Die Pyrolyse GC-MS Messungen werden in einem Pyrolyse Ofen (Py 2020iD, FrontierLab) welcher an ein GC-MS (5975C Agilent Technologies) angeschlossen ist in Doppelbestimmung durchgeführt. Im Desorptionsschritt wird die Probe (ca. 70 µg) mit 20 °C/min von 100 °C auf 260 °C erhitzt und nachfolgenden mit 450 °C für 0.2 min pyrolysiert. Das GC-Temperaturprogramm beginnt bei 50°C und heizt mit 7°C/min auf 300 °C. Inlet: 280 °C; Split: 30; Säule: Kapillarsäule (Agilent): VF-17ms; Länge: 30 m; Durchmesser 0,25 mm; Filmdicke 0,25 µm.

REM Aufnahmen: Anatomische Veränderungen der Proben werden mittels Rasterelektronenmikroskopie erfasst. Die Bilder werden mit einer Vergrößerung von $2,09 \times 10^3$ aufgenommen.

1.1.2 Ergebnisse

Farbliche Veränderung: Farblich ändert sich die Oberfläche der Kiefer am stärksten. Es ist eine wesentlich deutlichere Dunkelfärbung vor allem des Frühholzes erkennbar. Die Verfärbung beginnt bereits ca. 30 min. nach Beginn der Belastung.

Bestimmung des Oberflächen pH-Wertes der mit NH₃ behandelten Proben: Die gemessenen Oberflächen pH-Werte (Tabelle 1. Oberflächen pH-Werte nach 4, 20 und 35 Wochen Belastungszeit sowie die zugehörigen Referenzoberflächen: Pappel (DVG: Deutsche Veterinärmedizinischen Gesellschaft), Probenherkunft: FUB; Pappel (TUM), Probenherkunft: HFMTabelle 1) entsprechen den Erwartungen. Die an der Holzoberfläche gemessenen Werte liegen etwas niedriger im Vergleich zu pH-Werten welche in Wasserextrakten bei Raumtemperatur (Fichte: 4,0-5,3; Kiefer: 5,1; Pappel: 5,8-6,7; Douglasie: 3,6; Buche 5,5) (Koch 2010, Fengel and Wegener 1984) ermittelt werden. Die Messung nach NH₃-Belastung erfolgt direkt nach Entnahme der Probe aus der Atmosphäre. Der hohe Wert lässt sich daher vorwiegend durch das im (zur Messung aufgetragene) Wasser (150 µl) gelöste NH₃ erklären. Nach Lagerung an der Luft für ca. 3 Wochen sinkt der pH-Wert wieder deutlich ab (vgl. Tabelle 2). Da die Messung auch an Proben erfolgt, die mittels Rasierklinge im Querschnitt reduziert (entlang der dünnen Seite der Probe durchtrennt, bzw. eine Oberflächenschicht abgehoben) werden, kann geschlossen werden, dass das Gas die Probe vollständig durchdringt und auftretende Veränderungen über den gesamten Probenquerschnitt stattfinden. Die Tendenz ist bei den Nadelhölzern ähnlich, während sich die beiden Laubhölzer Pappel und Buche davon unterscheiden.

Tabelle 1. Oberflächen pH-Werte nach 4, 20 und 35 Wochen Belastungszeit sowie die zugehörigen Referenzoberflächen: Pappel (DVG: Deutsche Veterinärmedizinischen Gesellschaft), Probenherkunft: FUB; Pappel (TUM), Probenherkunft: HFM

	Fi Ref.	Fi NH ₃	Ki Ref.	Ki NH ₃	Doug. NH ₃	Doug. Ref.	Bu NH ₃	Bu Ref.	Pap. (TUM) Ref.	Pap. (DVG) Ref.	Pap.I (TUM) NH ₃
4 Wochen	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	9,9	3,9	9,4	4,8	n.b.	n.b.	n.b.
20 Wochen	4,5	10,9	4,1	10,7	10,0	3,9	9,5	4,7	4,9	5,4	9,2
35 Wochen	4,5	10,4	4,1	10,3	9,8	3,9	10,0	4,7	4,8	5,3	10,1

Charakterisierung und chemische Analyse mittels FTIR und Py-GC/MS: Abbildung 3 zeigt den Vergleich der ATR-Spektren der Oberflächen von Pappelproben nach 4-wöchiger Lagerung in NH₃-Atmosphäre zur unbehandelten Referenzprobe. Die größte Auffälligkeit wird deutlich durch eine Abnahme der Schwingungen bei 1737 cm⁻¹ und 1240 cm⁻¹ bei gleichzeitiger Zunahme der Schwingung bei 1657 cm⁻¹. Ursache hierfür könnte eine Reaktion von in der Pappel vorhandenen Acetylgruppen mit Ammoniak zu Amiden sein. Diese Veränderung tritt mit zunehmender Behandlungsdauer verstärkt auf, wird aber auch teilweise von Alterseffekten der Proben überlagert. Eine Differenzierung von Veränderungen, welche durch natürliche Alterung der Holzoberfläche entstanden sind, und den Veränderungen durch NH₃ Exposition gelang nicht.

Mittels Pyrolyse-GC/MS (Abbildung 3, rechts) kann eine Vielzahl verschiedener Monoterpene, Diterpene, Aldehyde und Sesquiterpene identifiziert werden. Des Weiteren können etliche nicht eindeutig identifizierte, stickstoffhaltige Verbindungen detektiert werden.

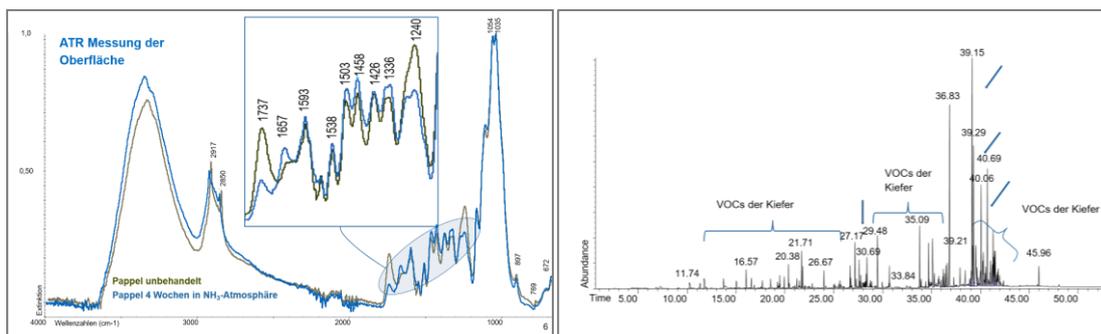


Abbildung 3. links: FTIR-Spektrum der Oberfläche einer Pappelprobe nach 4-wöchiger Lagerung in NH₃-Atmosphäre. Rechts: Chromatogramm der Py-GC/MS Messung einer Kiefernprobe nach 4-wöchiger Lagerung in NH₃-Atmosphäre.

Der Einfluss der unterschiedlichen Belastungsstärken ist auch in den Ergebnissen der Pyrolyse-GC/MS Untersuchungen zu erkennen, die mitunter auf den Abbau von Ligninbestandteilen hindeuten. So lässt sich beispielsweise in der Fichtenprobe mit zunehmender Behandlungsdauer eine prozentuale Abnahme der Peakfläche des Sinapylalkohols im Chromatogramm beobachten.

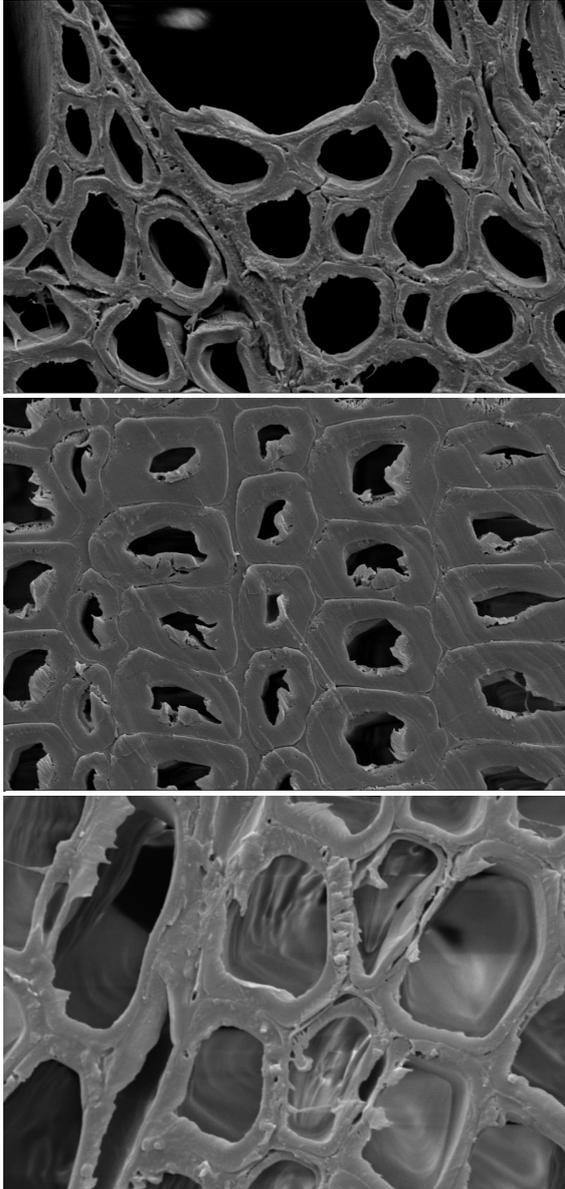


Abbildung 4. REM Aufnahmen nach 20 Wochen in NH_3 - Atmosphäre in 2.09×10^3 -facher Vergrößerung: von oben nach unten: Pappel, Fichte, Kiefer

REM Aufnahmen: Mittels Rasterelektronenmikroskopie können Veränderungen in der Anatomie der beaufschlagten Proben sichtbar gemacht werden. Nach 20 Wochen in NH_3 Atmosphäre wirken die Zellwände der Pappel sowie der Kiefernproben deutlich deformiert und weichen teils auseinander (Abbildung 4. REM Aufnahmen nach 20 Wochen in NH_3 - Atmosphäre in 2.09×10^3 -facher Vergrößerung: von oben nach unten: Pappel, Fichte, Kiefer Abbildung 4). Im Spätholz der Fichtenprobe lassen sich stark aufgequollene Zellwände erkennen.

Ermittlung einer möglichen kombinatorischen Wirkung von Modellatmosphäre und auf-gebrachten Desinfektionsmitteln: Die Beaufschlagung der NH₃ behandelten Proben mit Ameisensäure und Peressigsäure führt zu einem Absenken des pH-Wertes in den leicht sauren Bereich. Des Weiteren werden die pH-Werte der unbehandelten Referenzen durch die, nach dem Trocknen im Probekörper verbliebene Säure des Desinfektionsmittels deutlich unter ihren natürlichen pH-Wert abgesenkt, wobei dessen Einfluss aber erkennbar ist. Unterschiede im pH-Wert, wie sie zwischen den beiden Pappelherkünften (DVG und TUM) auftreten, werden durch die Säurewirkung nahezu nivelliert. Nach Beaufschlagung der Proben mit dem ebenfalls zum Einsatz kommenden Glutaraldehyd lässt sich erwartungsgemäß keine entsprechende Absenkung des pH-Wertes feststellen. Die kombinatorisch mit NH₃ und Glutaraldehyd behandelten Proben der Kiefer weisen einen ähnlichen pH-Wert auf, wie die nur mit NH₃ behandelte Probe, welche nach der NH₃ Behandlung für drei Wochen an der Luft gelagert wurde (Tabelle 2). Des Weiteren weist die entsprechende Pappelprobe (TUM Probe, Glutaraldehyd+NH₃) einen um eine pH Stufe höheren pH-Wert auf, als ihre ausschließlich NH₃ behandelte Vergleichsprobe.

Tabelle 2. Oberflächen pH-Werte nach 35-wöchiger NH₃ Beaufschlagung mit einer zwischenzeitlichen Desinfektion im Vergleich zu desinfizierten Referenzen

	Glutaraldehyd				Ameisensäure				Peressigsäure				NH ₃ (abgedampft)		
	Fichte	Kiefer	Pappel (TUM)	Pappel (DVG)	Fichte	Kiefer	Pappel (TUM)	Pappel (DVG)	Fichte	Kiefer	Pappel (TUM)	Pappel (DVG)	Fichte	Kiefer	Pappel
35+1	8,4	8,7	8,6	nb	6,1	7,1	5,5	nb	7,5	7,0	6,4	nb	8,4	8,2	7,6
Unbehandelt	nb	nb	nb	nb	2,9	3,0	3,4	3,3	4,1	3,5	4,1	4,3	x	x	x

nb: nicht bestimmt

Die Proben nach 35 Wochen, welche einen zwischenzeitlichen Desinfektionszyklus erhalten hatten, sind deutlich angegriffen. Im Besonderen die mit Glutaraldehyd behandelten Proben und hierbei speziell die Kiefer weisen beim Schneiden mit der Rasierklinge eine deutliche weichere Konsistenz auf, als die mit anderen Desinfektionsmitteln behandelten Proben. Auch zeigen sie ein leicht brüchiges Erscheinungsbild. Das Frühholz scheint zudem besonders angegriffen. Ein Grund hierfür könnte, sofern kein Tüpfelverschluss vorliegt, das bessere Eindringvermögen von Flüssigkeiten in das Frühholz sein.

Erfassung eines worst-case-Szenarios im Hinblick auf mögliche Schäden an der nativen Holzoberfläche durch häufiges Desinfizieren: Die Ergebnisse (Ausbleichen, deutliches Aufrauen der Holzoberfläche, Probekörper wirkt brüchig), des durchgeführten Belastungsversuches mit Peressigsäure lassen darauf schließen, dass es hierdurch zwar zu Abbauerscheinungen an den Zellen im Holzoberflächenbereich kommt, diese aber erst bei unrealistisch hohen Konzentrationen (15 % ige Peressigsäure) und Einwirkzeiten auffällig in Erscheinung treten (bei den empfohlenen Konzentrationen kommt es selbst

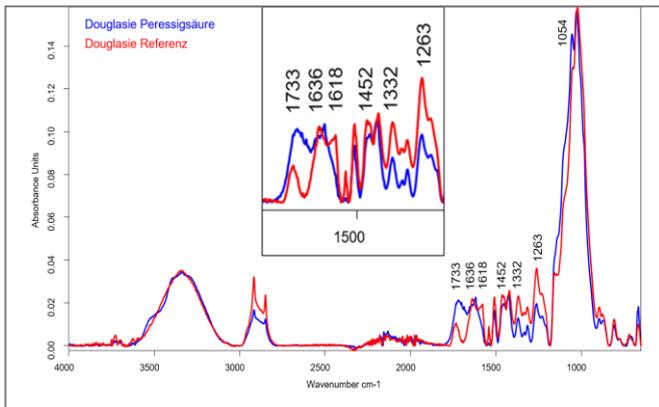


Abbildung 5. Vergleich der ATR- Spektren von Douglasie vor und nach intensiver Behandlung mit 15 %-iger Peressigsäure

zu beobachten sind verminderte Banden im Bereich der für Lignin typischen Schwingungen bei 1332 cm^{-1} und 1263 cm^{-1} .

bei 50-facher Desinfektionswiederholung nur vereinzelt zu sichtbaren Schäden.

Das FTIR-Spektrum (Abbildung 5) zeigt an der Oberfläche einer Douglasienprobe vor allem eine deutliche Zunahme der Schwingungsbande bei 1733 cm^{-1} (C=O Schwingung). Dies kann auf eine Oxidation durch die Peressigsäure zurückzuführen sein. Des Weiteren ist eine Schwingung bei 1618 cm^{-1} nur noch leicht als Schulter wahrnehmbar, welche in der Referenz noch deutlich als Bande zu erkennen ist. Ebenfalls

Untersuchung von Holzwerkstoffen: Die Prüfung der Zugscherproben zeigt eine Tendenz zur Abnahme der Festigkeiten nach Ammoniakbeaufschlagung im Mittel um etwa 7 % bei der Buchenplatte und 14 % bei der Kiefer-/Fichten Platte. Die Streuungsverhältnisse der Ergebnisse, lassen diesen Schluss allerdings nur bedingt zu (Abbildung 6). Um gesicherte Aussagen treffen zu können, müsste ein größeres Probenkollektiv gewählt werden. Das Versagen ist augenscheinlich allerdings nicht auf ein Versagen der Klebverbindung zurückzuführen. Die Analyse der ausgehärteten PF-Probe mittels Py-GC/MS und FTIR kann keinen Unterschied zwischen der

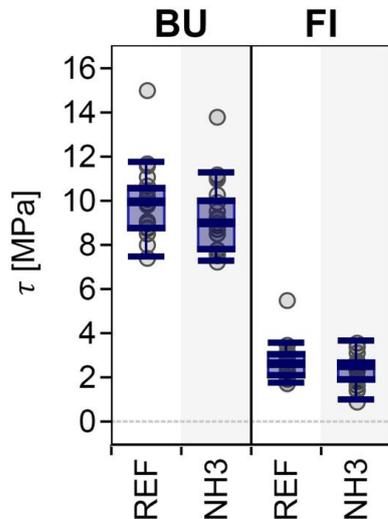


Abbildung 6. Boxplot Zugscherversuche: Vergleich zwischen beaufschlagten Proben (NH₃) und ihren Referenzen (REF)

mit NH₃ Atmosphäre beaufschlagten Probe und ihrer Referenz aufzeigen. Des Weiteren ist das Versagen visuell im Holz zu erkennen.

Hinsichtlich der getesteten Schulterstabproben muss festgestellt werden, dass sich diese während der Beaufschlagung im Schulterbereich deutlich verformten und daher keine sinnvolle Festigkeitsprüfung mehr durchgeführt werden konnte. Es wurde für diese Proben nur der E-Modul ausgewertet. Dieser zeigt für den PRF-Klebstoff keine Unterschiede zwischen den behandelten und den unbehandelten Proben. Für den MUF-Klebstoff kann allerdings eine mittlere Abnahme des E-Modul von 3,3 GPa auf 2,2 GPa festgestellt werden.

1.2 Bestimmung der Dauerhaftigkeit von Holzprodukten in Feldversuchen

1.2.1 Material und Methode



Abbildung 7 Beispiele für Realproben aus landwirtschaftlichen Gebäuden

Feldversuche: Die mittels Lagerung in Modellatmosphäre erzielten Ergebnisse sind als worst-case-Szenario zu betrachten und folglich nur im Vergleich mit Feldversuchen für den Realfall zu interpretieren. Die Probennahme für die Feldversuche erfolgt in 6 landwirtschaftlichen Betrieben (davon 5x Rinder- und 1x Schweinehaltung) an verschiedenen Bauteilen (Schalung, Stützen, Buchten, Futtertische und Abteilwände sowie bodenliegende Bauteile). Mittels Rasierklinge werden ca. 0,2 - 0,3 mm dicke Proben von der Oberfläche entnommen (Abbildung 7). Diese werden in der Folge als Realproben bezeichnet. Die Luftprobennahme erfolgt in 2 Offenställen und einem Warm-

stall über jeweils 1 Stunde mittels einer kontinuierlich arbeitenden Pumpe (167 ml/min) auf Tenax als Adsorbens. Die Tenax Röhrrchen wurden zum Schutz vor Verschmutzung in Kunststoff-röhrrchen platziert und nach der Probennahme fest verschlossen und nach Ankunft im Labor sofort gemessen. Die analytischen Untersuchungen erfolgen analog zu den Untersuchungen unter 1.1.

1.2.2 Ergebnisse

Die Bearbeitung der genommenen Real-Luftproben zeigt zwei wesentliche Schwierigkeiten auf. Die Proben der Holzbauteile sind einerseits auf der Probenoberseite durch Tierkontakt verunreinigt. Dies erschwert eine Differenzierung zwischen Verbindungen tierischen Ursprungs und Verbindungen, welche aus der Veränderung des Holzes resultieren. Eine Analyse der Probenrückseite mittels ATR zeigt, dass selbst bei sehr dünnen Probenquerschnitten (weniger als 0,5 mm) die Rückseite nahezu keine Veränderungen mehr aufweist und der nativer Fichte entsprach.

Zum anderen sind alle zur Probennahme ausgewählten Ställe sogenannte Offenställe, weshalb das Stallklima dem Aussenklima entspricht. Die Luftmessung wird daher nur an einem Standort zur Absicherung durchgeführt. Im einzigen beprobten Warmstall (Schweinestall) wird die Innenraumluft regelmäßig mit einer Lösung effektiver Mikroorganismen (EM) befeuchtet. Bereits der intensive Geruch der EM-Lösung lässt eine Raumluftmessung als nicht zielführend erscheinen.

TEIL F: HOLZPRODUKTE

1 KONVENTIONELL IM STALLBAU GENUTZTE UND POTENTIELL NUTZBARE HOLZPRODUKTE UND HOLZARTEN

Es erfolgt zunächst eine Erfassung und Darstellung der derzeit in landwirtschaftlichen Bauten, insbesondere im Stallbau genutzten Holzarten und Holzprodukte, welche hauptsächlich auf Literatur sowie auf bisherigen Erfahrungen von Landwirten basiert. Eine Beschreibung und Bewertung relevanter mechanischer, biologischer und chemischer Eigenschaften von (potentiell) nutzbaren einheimischen Holzarten in Bezug auf die Einflüsse im Stallbau, insbesondere den vorherrschenden mikroklimatischen Bedingungen folgt. Im Weiteren schließt sich eine Beschreibung der genutzten und potentiell nutzbaren Holzarten an. Hier wird, sofern aus der Literatur ersichtlich, auf Erfahrungen und Empfehlungen zur Nutzung der jeweiligen Holzart in landwirtschaftlichen Bauten verwiesen. Abschließend werden ausgewählte, die Holzarten beschreibende Parameter in einer Tabelle zusammengestellt.

1.1. Analyse der Eignung verschiedener Holzarten bzw. Holzprodukte und ihrer Materialeigenschaften hinsichtlich der Anforderungen und Belastungen im landwirtschaftlichen Bauen (Literaturrecherche)

1.1.1 Material und Methode

Zur Literaturrecherche werden online Datenbankabfragen im Web of knowledge und google scholar durchgeführt. Gesucht wird nach Schlagwortkombinationen aus deutschen sowie englischen Schlagwörtern (Auswahl): jeweilige Holzart, Stallatmosphäre, landwirtschaftliche Betriebsgebäude, Emissionen, Räuchern, chemisch aggressive Beanspruchung, Holzkorrosion, VOC, livestock agriculture, agricultural environment, impregnation, ammonia treatment. Das Meinungsbild des Anwenders hinsichtlich der Eignung der verschiedenen Holzarten im Stallbau wurde im Rahmen der in AP3 durchgeführten Umfrage erhalten.

1.1.2 Ergebnisse

Im Wesentlichen konnten konstruktive Vollholzprodukte wie Baurundholz, Bauschnittholz, Brettschichtholz (BSH) sowie konstruktive Holzwerkstoffe wie Bau-Furniersperrholz, Furnierschichtholz, Brettsperrholz, OSB-Platten, Faserplatten als die wesentlichen, konventionell im Stallbau genutzten Holzprodukte identifiziert werden. Hinsichtlich der verwendeten Holzarten kann festgestellt werden, dass in Deutschland hauptsächlich die Holzarten Fichte (Tanne), Kiefer, Lärche, Douglasie und Eiche für den Stallbau eingesetzt werden. Von Interesse kann künftig auch die Buche sein (Egler 2002). Des Weiteren wird die Pappel in künftige Überlegungen inkludiert, da sie einerseits ein wichtiges Referenzholz für Forschungszwecke (vgl. AP 5) darstellt, und andererseits als sogenanntes

Opferholz (zum Knabbern) vor allem in der Ziegenhaltung Gebrauch findet. Allgemein ist festzuhalten, dass in allen baunahen Bereichen überwiegend Nadelholzarten (Fichte, Tanne, Kiefer und Lärche) verwendet werden, da Nadelholz bisher ausreichend verfügbar ist, ein geringeres spezifisches Gewicht als Laubholz hat und hervorragende Bearbeitungsmöglichkeiten aufweist. Allgemein wird Laubholz (z.B. Buche, Eiche, Ahorn) in geringerem Umfang genutzt (Egle 2002, Stockinger et al. 2001, Neuhaus 2017). Holzarten mit zukünftigem Potential für bauliche Anwendungen sind neben der Buche und Eiche beispielsweise Edelkastanie und Robinie. Besonders auch Holzwerkstoffe auf Basis von Laubhölzern haben bei Herstellung und Bearbeitung in den letzten Jahren zunehmend Aufmerksamkeit erhalten. Es ist davon auszugehen, dass sich die Wertschöpfung bei Laubhölzern zudem durch Fortschritte in Sortier- und Klebstofftechnologie in den nächsten Jahren verbessert (Egle 2002, Knauf and Frühwald 2020). Aufgrund von erteilten allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen sind BSH aus Buche, Eiche und Edelkastanie prinzipiell anwendbar, aber am Markt nur als Nischenprodukte eingesetzt. Aktuelle Bemühungen zielen auf einen anwendbaren Prozess zur Herstellung von Robinienbrettschichtholz (Berthold 2022).

Eine weitere Möglichkeit, um die Einsatzdauer von Holzprodukten im landwirtschaftlichen Bau zu erhöhen, stellen bekannte Holzschutzverfahren oder Holzmodifikationen dar. Beispielhaft zu nennen wären das Räuchern sowie thermische oder chemische Verfahren (Acetylierung, Furfurylierung). Ob sich die Nutzung dieser Produkte im Stallbau wirtschaftlich lohnt, muss allerdings gesondert betrachtet werden. Der Einsatz von chemischen Holzschutzmaßnahmen (Druck- oder Nichtdruckprozesse) mit konventionellen Schutzmitteln zum Zweck der Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegen biotischen Abbau stellt aufgrund der hohen Toxizität, die vielen dieser Mittel zu eigen ist, keine Alternative dar (Dietsch et al. 2018).

Einflüsse auf Holz(bau)teile in landwirtschaftlichen Bauten

Die zu erwartenden Belastungen im Stall sind aufgrund der vielfältigen Einbausituationen komplex, d.h. von physikalischer/ mechanischer (Biss, Tritt, Maschine), biologischer (bakteriell, pilzlich) und chemischer Natur (Inhaltsstoffe Mist/Gülle), wobei die vorkommenden Aggregatzustände fest (Art, Löslichkeit in Wasser, pH-Wert der Lösung, Hygroskopizität), flüssig (pH-Wert, Konzentration) und gasförmig (Art, Konzentration, abhängig von der Holzfeuchte) zu beachten sind.

Mechanische/physikalische Einflüsse: Als mechanische Einflüsse sind im Wesentlichen Trittschäden oder Belastungen durch Reiben zu erwarten. Hier sind Holzarten mit hoher Rohdichte, welche in der Regel auch eine hohe Härte und Abriebfestigkeit aufweisen, allgemein im Vorteil. Die Härte steht auch in Zusammenhang mit Einflüssen wie dem Anbeißen. Allerdings werden hierfür, unabhängig von der Rohdichte, speziell harz- oder tanninhaltige Hölzer, wie z.B. Lärche oder Eiche empfohlen. Es wird vermutet, dass der aus den Extraktstoffen resultierende intensive Geschmack ursächlich für ein vermindertes Anbeißen ist (Früh 2011). Das vorrangig genutzte Fichtenholz hat einen geringen Extraktstoffgehalt. Fichtenholz besitzt eine vergleichsweise geringe Rohdichte, ist daher

relativ weich und weist aufgrund des niedrigen Extraktgehaltes vermutlich keinen als unangenehm empfundenen Geschmack auf. Alternativ ist in der Schweinemast sowie der Ziegenhaltung der Einsatz von Pappelholz als Opferholz bekannt, welches bevorzugt angeagt und wenn nötig ausgetauscht wird.

Ebenso als physikalischer Einfluss ist eine Folge der Sorptionseigenschaft des Holzes in Umgebungen mit hoher Luftfeuchte in Kombination mit Gasen und Lösungen, auch gelösten Salzen zu werten: Durch die Aufnahme von Wasser, welches die Zellsubstanz zur Quellung bzw. bei Feuchteabnahme zur Volumenminderung bringt, können bei Einlagerung und häufigem Wechsel physikalische Veränderungen in der Zellsubstanz resultieren (Niemz 2005). Auch können starke Quellungen und eingedrungene Kristalle von Salzen den Zellverband sowie auch die Zellwände zerstören. Beispielsweise ist das streifenartige Lösen von Holz in Salzlagerhallen vorrangig auf diese Wirkung zurückzuführen (Egle 2003).

Biologische Einflüsse (Trockenholzinsekten, holzabbauende Pilze, Mikroorganismen):

Als biologische Einflüsse erachtet werden Trockenholzinsekten, holzabbauende Pilze und Mikroorganismen. Im Stallbau sind im allgemeinen Trockenholzinsekten, wie der Hausbock, Nagekäfer und Splintholzkäfer relevant (Egle 2002). Allerdings spielt ein Befall aufgrund der heutzutage verwendeten, technisch getrockneten Hölzer eine unbedeutende Rolle - auch wenn dieser in allen Gebrauchsklassen nach DIN 68800-1 theoretisch möglich wäre. Zudem ist ein Befall bei Einsichtbarkeit der Konstruktionen und regelmäßiger visueller Kontrolle durch den Bohrmehlausstoß in einer frühen Befallsphase feststellbar und kann bekämpft werden.

Die holzerstörenden Pilze werden in drei Fäuletypen eingeteilt. Die Braunfäule, die Weißfäule und die Moderfäule. Bei der Braunfäule, die meist durch Basidiomyceten verursacht wird, werden Cellulose und Hemicellulosen abgebaut. Das Lignin bleibt hingegen weitgehend unverändert zurück. In Folge der Depolymerisation der Kohlenhydrate kommt es zu einem hohen Festigkeitsverlust und zur Abnahme der Dimensionsstabilität. Nadelhölzer sind dabei stärker betroffen als Laubhölzer. Neben der Cellulose und den Hemicellulosen bauen Weißfäuleerreger auch Lignin ab, bevorzugen im Allgemeinen allerdings Laubhölzer. Die Erreger der Moderfäule (Švajlenka et al. 2019) bauen Cellulose und Hemicellulosen ab und bevorzugen ebenfalls Laubhölzer, allerdings vorrangig im Erdkontakt (Augusta 2007).

Damit Holz von Pilzen besiedelt, verändert und abgebaut werden kann, müssen für die Mikroorganismen geeignete Lebensbedingungen vorliegen. Neben der Nährstoffquelle benötigen sie spezifische Licht- und Sauerstoffverhältnisse, einen günstigen pH-Wert sowie passende Umweltbedingungen. Der im Holz natürlich vorkommende pH-Wert von 3 bis 6 liegt dabei für alle holzersetzenen Pilze in einem tolerierbaren Bereich. Für ein optimales Pilzwachstum wird ein Temperaturfenster von 20 bis 30 °C genannt (Rabe 2008). Neben diesen Parametern ist aber die Holz- bzw. Substratfeuchte die wichtigste Voraussetzung für eine optimale Entwicklung von Pilzen auf bzw. in Holz (Mariño et al. 2009, Jiang et al. 2018, Švajlenka et al. 2019). Zu erwähnen ist des Weiteren, dass

Bakterien für den pilzlichen Abbau als Wegbereiter dienen können und die im Mist enthaltenen Nährstoffe sowie der in der Atmosphäre enthaltene Sauerstoff sich ebenfalls günstig auf das Wachstum von Mikroorganismen auswirken (Clausen 2010).

Dauerhaftigkeiten/Gebrauchsklassen: Um eine Gefährdung von Holz aufgrund erhöhter Holzfeuchte zu vermeiden, sind konkrete bauliche und organisatorische Maßnahmen vorgeschrieben (DIN 68800-2, 2012). Für den Einsatz von Hölzern im Stallbau sind nur Pilze relevant, welche außerhalb des Erdreiches aktiv (Basidiomyceten) und solche, die bei Einbettung in einem feuchten Bodensubstrat aktiv sind (Moderfäuleerreger). Für die Zersetzung durch Pilze wird eine Holzfeuchte im Gebrauchszustand von 20 % als kritischer Wert angenommen, wohingegen holzbesiedelnde Insekten auch bei geringer Holzfeuchte aktiv sein können (Svajlenka et al. 2019). Bei technisch getrockneten Vollholzprodukten ist die Gefahr eines Schadens durch holzerstörende Insekten (z. B. Hausbock) aber stark reduziert. Ist eine Gefährdung prinzipiell möglich, sind in in Abhängigkeit der gegebenen Gebrauchsklasse Maßnahmen beschrieben (DIN 68800-1, 2019), welche die geforderte Dauerhaftigkeit der Konstruktion sicherstellen sollen. Dies kann die Auswahl besonders dauerhafter Holzarten sein (Schmidt et al. 2015).

Folgende Tabelle (Tabelle 3) stellt Beispiele für Einbausituationen im Stall zusammen mit der daraus resultierenden Gebrauchsklasse und der Dauerhaftigkeit der einzusetzenden Hölzer dar. Die voraussichtliche Standdauer der jeweiligen Hölzer bei Erdkontakt (GK4) ist als Vergleich ebenfalls beschrieben.

Tabelle 3 Überblick über Dauerhaftigkeitsklassen und beispielhafte Einbausituationen ausgewählter Holzarten

Holzart	Dauerhaftigkeitsklasse	Beispiel Einbausituation	Gebrauchsklasse	Konsequenz Erdkontakt (bez. GK4)
Fichte	4 wenig dauerhaft	Trennwände, Türen von Innenboxen; nicht der Bewitterung ausgesetzt; U ≤ 20%	GK 1	3 - 5 Jahre Standdauer
Tanne				
Kiefer	3-4 wenig bis mäßig dauerhaft	Trennwände, Türen im geschützten Außenbereich	GK 2	5 - 8 Jahre Standdauer
Lärche	3-4 wenig bis mäßig dauerhaft	Stalltüren, Außenstellen, Tränken, regelmäßig befeuchtet durch Spritzwasser	GK 2-3.1	
Douglasie	3 mäßig dauerhaft		GK 3.1	
Pappel	5 nicht dauerhaft	Abdeckungen, Verschalungen die nicht der Bewitterung ausgesetzt sind U ≤ 20% Giebel- und Stützenverkleidung	GK 1	< als 3 Jahre Standdauer
Buche	5 nicht dauerhaft	Trennwände, Türen von Innenboxen, nicht der Bewitterung ausgesetzt; U ≤ 20%		
Eiche	2 dauerhaft	Ungeschützte, horizontale liegende Bauteile im Außenbereich ohne Mistkontakt	GK 3.2	8 - 13 Jahre Standdauer

Chemische Einflüsse: Zu den chemischen Belastungen, welchen Holz im Stall ausgesetzt ist, gehört die Stallatmosphäre. Bei Stallatmosphären handelt es sich um heterogene Mischatmosphären, d.h. mehrere Verbindungen werden als Gase oder Aerosole

gemeinsam mit unterschiedlichen Mengen Wasserdampf emittiert. Daneben treten auch nichtflüchtige Stäube und Nebel auf (Erler 1998a). Als wichtigstes Gas wäre NH_3 zu nennen, welches dem Harnstoff oder Eiweiß aus Fäkalien entstammt (enzymatisch) und einen stark basischen pH-Wert aufweist. Als weitere wichtige, in Ställen vorherrschende Gase sind Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) sowie Schwefelwasserstoff (H_2S) in die Überlegungen mit einzubeziehen (Pflanz 2007, Belie et al. 2000b). Speziell im Hinblick auf die Konzentration gasförmiger Verbindungen zeigt sich eine Abhängigkeit von Form und Volumen des Gebäudes, der Dachausführung, der Wärmedämmung, der Belüftung und der Art der Gülle- und Mistbeseitigung. In geschlossenen Stallungen stellen sich unweigerlich hohe Wasserdampfkonzentrationen ein, welche eine erhöhte Tauwassergefährdung hervorrufen. Dies ist insofern von Bedeutung, als gasförmige Chemikalien mit Wasser auf Holzoberflächen in Lösung gehen können, und es zudem zu Auswaschungsprozessen bei ablaufendem bzw. abtropfendem Wasser kommen kann. In Verbindung mit physikalischen und mechanischen Prozessen können Wechselwirkungen entstehen, welche die Schadwirkung der chemischen Verbindungen deutlich intensivieren kann.

Des Weiteren können aggressive Einflüsse von Flüssigkeiten und Feststoffen herrühren, wobei die chemische Zusammensetzung des Stallmistes abhängig von der Tierart, der Fütterung und der Lagerung ist (Belie et al. 2000b). Durchschnittlich besteht Tiermist zu 70–75 % aus Wasser sowie Mineralstoffen, Stickstoff, Phosphat, Kalium, Calcium und weiterer organischer Substanz (Wendland and Attenberger 2009, Zaehner et al. 2005, Belie et al. 2000b). Die Einflussnahme der chemischen Substanzen auf Holzbauteile ist vor allem abhängig von der Art der Chemikalie, deren Konzentration, dem Aggregatzustand, dem pH-Wert, der Umgebungstemperatur sowie der relativen Luftfeuchtigkeit. Allgemein wird in der Literatur ein pH-Wert zwischen $2 < \text{pH} < 9$ aber als unproblematisch gesehen und generell festgestellt, dass Holz von Natur aus relativ widerstandsfähig gegenüber chemischen Einflüssen ist. Es wurde aktuell noch kein nennenswerter Unterschied diesbezüglich zwischen Laub- und Nadelholzarten beschrieben (Erler 1998b). Das detaillierte Wissen um die chemischen Veränderungen der Holzmatrix durch die genannten Substanzen ist trotz der teils langen Erfahrungen mit Holz im Stallbau nicht stark ausgeprägt. So liegen hauptsächlich Untersuchungen zu Ammoniak-belastetem Holz, daneben wenige Erkenntnisse mit Bezug zum Einfluss von Schwefelwasserstoff auf Holz vor.

Hinsichtlich des Einflusses von Ammoniak auf Holz gehen die Erfahrungen zurück auf die Zeit, als Mensch und Tier noch eng in Gebäuden zusammenlebten. Der Mensch wurde auf die erhöhte Dauerhaftigkeit der durch Ammoniak veränderten Holzoberfläche aufmerksam und wusste diese für sich zu nutzen (Michaelsen and Buchholz 2009). Hieraus resultierten in der Vergangenheit einige Studien, die den Einfluss des sogenannten Holzräucherns, also das gezielte Behandeln des Holzes mit gasförmigem Ammoniak untersuchten. Ammoniak ist ein stark stechend riechendes, farbloses, wasserlösliches und zu Tränen reizendes, giftiges Gas, welches durch enzymatische Umwandlung aus den Harnstoff- und Eiweißhaltigen Exkrementen der Nutztiere entsteht (Stroh et al. 2018,

Vollmer et al. 2017). Die spezifischen Veränderungen durch NH_3 sind neben einem erhöhten pH-Wert (Bsp. Buchenspäne unbehandelt: pH 5,51; behandelt pH 7,10; (Parameswaran and Roffael 1984)), hauptsächlich die starke Farbveränderung (Dunkelfärbung), welche in direktem Zusammenhang mit dem Tanningehalt (z.B. bei Eiche) steht (Weigl 2011, Rapp and Witt 2007a). Technologisch relevante Holzeigenschaften, wie Ausgleichsfeuchte, Holzdichte, Biegefestigkeit, Biegesteifigkeit und Schlagbiegefestigkeit werden bei Eiche, Fichte und Kiefer durch die Behandlung mit Ammoniak nicht gravierend beeinträchtigt. Zwar wurde bei Eichenproben eine Reduktion des Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit festgestellt, diese wurden aber im Hinblick auf das Ausmaß als technologisch vernachlässigbar gewertet und spielen daher in der Verwendung und Verarbeitung der Hölzer keine große Rolle (Parameswaran and Roffael 1984, Weigl et al. 2009, Rapp and Witt 2007a). Es kommt erst nach längerer, intensiver Einwirkung von NH_3 zu einem Abbau von Lignin, Hemicellulosen und Cellulose (Weigl et al. 2012). Diese werden durch alkalische Hydrolyse löslich, was den in geräucherten Hölzern gefundenen erhöhten Extaktgehalt erklären kann. Geräucherte Holzarten, wie z.B. Eiche werden gerne zur Innenraumgestaltung (Furnier für Möbel) eingesetzt. Daher ist aus Emissionsmessungen bekannt, dass sich durch die Reaktion mit Ammoniak holzfremde Verbindungen wie Essigsäure und Acetamid bilden, welche vom Holz in Form flüchtiger Verbindungen teils wieder abgegeben werden (Aehling et al. 2001).

Ebenso bekannt sind Einflüsse im Stallbereich durch Schwefelwasserstoff (H_2S). H_2S ist ein farbloses, giftiges, nach faulen Eiern riechendes Verrottungsgas, welches in hohen Konzentrationen zum Tod durch Lähmung des Atemzentrums führt. Es ist schwerer als Luft, neigt dadurch zur Bildung von „Seen“ am Boden und gelangt vorwiegend durch Güllebewegungen in die Stallatmosphäre (Steiner and Burkhalter 2013). Das Gas entsteht während der anaeroben bakteriellen Zersetzung von schwefelhaltigen Eiweißbestandteilen. Es stellt für Thiobazillen eine gute Energiequelle dar, welche das Gas zu elementarem Schwefel und Schwefelsäure (H_2SO_4) verstoffwechseln. Diese sogenannte biogene Schwefelsäure tritt somit lokal in hohen Konzentrationen auf, woraus sehr niedrige pH-Werte (von 1-2) auf Bauteiloberflächen resultieren können (Belie et al. 2000a, Belie et al. 2000b, Krause 2013, 2014). Diese Holzkorrosion (Mazeration) ist zumeist auf die Randbereiche der Holzteile beschränkt, ist aber stark abhängig von der Luft- und davon beeinflusst, der Materialfeuchte (Pflanz 2005).

Über Mischatmosphären aus Schwefeldioxid (SO_2), NH_3 , H_2SO_4 und H_2O -Dampf (nicht landwirtschaftlichen Ursprungs) ist bekannt, dass sie beträchtliche Anteile der Zellwandkomponenten Cellulose, Lignin und Hemicellulosen (Polyosen) so beeinträchtigen, dass sie in größeren Mengen in heißem Wasser löslich werden. Der Einfluss führt, bei Einwirkung über einen langen Zeitraum, zu starken Abbauerscheinungen an den Tracheidenwänden (Wegener and Fengel 1986, Besold 1982).

Holzartenkatalog der Holzprodukte

Die Zusammenstellung stellt eine Auswahl der relevanten Holzeigenschaften dar. Tabelle 4 fasst die wichtigsten Charakteristika vergleichend zusammen. Auch die Dauerhaftigkeitsklassen (für Kernholz) sind noch einmal inkludiert.

Ein interessantes Meinungsbild hinsichtlich der Verwendbarkeit verschiedener Holzarten konnte aus den im Rahmen der in AP3 durchgeführten Umfrageergebnisse gesehen werden. So zeigte sich im Hinblick auf den Einsatz für nicht konstruktive Zwecke, dass Wissen unter den Umfrageteilnehmern hinsichtlich der Verwendbarkeit etlicher Holzarten existiert. Hervorzuheben ist allerdings, dass mit Ausnahme der Fichte auch viele Umfrageteilnehmer angeben, die Einsetzbarkeit nicht beurteilen zu können. So wird beispielsweise einerseits die Douglasie (wie alle anderen genannten Nadelhölzer auch) mehrheitlich positiv bewertet, andererseits sind ihre Eigenschaften auch bei vielen Teilnehmern nicht ausreichend bekannt. Mit Abstand am wenigsten beurteilbar war für die Umfrageteilnehmer die Holzart Robinie. Der Holzartenkatalog enthält Daten zu: Fichte (*Picea abies*), Tanne (*Abies alba*), Kiefer (*Pinus sylvestris*), Lärche (*Larix decidua*), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*), Buche (*Fagus sylvatica*), Eiche (*Quercus petraea*, *Quercus robur*), Pappel (Aspe: *Populus tremula*; Silberpappel: *Populus alba*; Schwarzpappel: *Populus nigra*), Robinie (*Robinia pseudoacacia*).

Tabelle 4 Zusammenfassung der für den Stallbau interessanten Holzarten und stallspezifische Eigenschaften

Holzart	Dauerhaftigkeits-Klasse nach DIN EN 350	Beispiel Einbausituation (nicht tragend)	Holzartenspezifische Besonderheiten (im Hinblick auf die Verwendung im Stall)	Überwiegende Bewertung der Holzarten im nicht konstruktiven durch die Landwirte
Fichte	4 (wenig dauerhaft)	Trennwände, Türen von Innenboxen, Schalungen, Tore, Abdeckungen		sehr geeignet
Tanne			Wurde früher beim Stallbau die Tanne der Fichte vorgezogen: gilt als wesentlich unempfindlicher gegen Kot und Harn (Kaller 2004), harzfrei sowie geruchs- und geschmacks-neutral; wird erfahrungsgemäß von Rindern nicht angebissen (ÖKL-BAUEN)	sehr geeignet / eher geeignet
Kiefer	3-4 (wenig bis mäßig dauerhaft)	Trennwände, Türen im geschützten Außenbereich	Im Holz vorhandene Terpene gelten teils als giftig für Pferde (nicht für Rinder); es sind keine dokumentierten Nachweise über Vergiftungen durch das Anknabbern von Boxenwänden etc. bekannt (Rosenthal et al. 2010, Grosser 2007).	sehr geeignet / eher geeignet
Lärche		Stalltüren, Außenstellen, Tränken, regelmäßig durch Spritzwasser befeuchtet	Empfohlen bei Verbiss-Gefahr (Rosenthal et al. 2010, Grosser and Ehmke 2012).	sehr geeignet
Douglasie	3 (mäßig dauerhaft)		Einsatz als Bretter und Bohlen für Schweineställe und Gülletanks empfohlen (Grosser and Teez 1998a).	sehr geeignet / eher geeignet
Buche	5 (nicht dauerhaft)	Trennwände, Türen von Innenboxen, nicht der Bewitterung ausgesetzt	Angaben über entstehende Schmierfilme. Welcher Natur diese Schmierfilme sind, ist nicht näher kommentiert; keine Untersuchungen diesbezüglich in der Literatur zu finden (ÖKL-BAUEN).	eher ungeeignet/ ungeeignet

Pappel		Abdeckungen, nicht bewitterte Verschalungen; Giebel- und Stützenverkleidung	Als Opferholz für Verbiss; wird auch für Boxen in Reit- und Pferdeställen als geeignet erachtet (Grosser and Teez 1998c).	eher ungeeignet/ ungeeignet
Eiche	2 (dauerhaft)	Ungeschützte, horizontal liegende Bauteile im Außenbereich ohne Mistkontakt	Mit Ammoniak gebeiztes Eichenholz wird als Räuchereiche bezeichnet. In früheren Zeiten wurde das Räuchern von Holz zum Schutz gegen den Abbau von Pilzen und Insekten angewendet (Ehmke and Grosser 2014).	sehr geeignet
Robinie	1-2 (sehr dauerhaft)		Vermeintliche Toxizität für Tiere beruht vermutlich auf gemeinsamer Nennung von Holz und Rinde sowie unbelegten Verweisen auf Vergiftungen durch Annagen (Uhlig et al. 2008). Wissenschaftliche Untersuchungen weisen explizit die Rinde, nicht aber das Holz als ursächlich für Vergiftungen bei Pferden aus (Benthien et al. 2018).	unzureichende Kenntnisse

Die folgende Zusammenstellung stellt eine Auswahl der jeweiligen Holzeigenschaften dar.

Fichte (*Picea abies*)

Das Holz der Fichte ist gleichmäßig hell, mit zumeist gelblichweißer Farbe und harzigem Geruch. Es handelt sich um geradfaseriges Nadelholz ohne Kernfärbung (nicht zu unterscheidendes Splint- und Kernholz, sog. Reifholzbaum). Es ist als mittelschwer einzustufen, besitzt gute Festigkeitseigenschaften, schwindet nur mäßig, zeichnet sich durch gutes Stehvermögen aus und lässt sich natürlich sowie technisch rasch und ohne Probleme trocknen. Der bei der Trocknung stattfindende Hoftüpfelverschluss bedingt ein schlechtes Eindringvermögen von Flüssigkeiten, was einerseits in einer sich nur sehr langsam einstellenden höheren Holzfeuchte als auch in einer schlechten Tränkbarkeit resultiert (mechanische Vorbehandlung nötig). Daher kann, obwohl das Holz von geringer natürlicher Dauerhaftigkeit (DHK 4, wenig dauerhaft) ist, bei zügiger Feuchtigkeitsabführung eine ausreichend lange Gebrauchsdauer angenommen werden. Fichtenholz ist chemisch kaum reaktiv und Eisenmetalle unterliegen keiner Korrosion, verursachen jedoch bei feuchtem Holz eine schwache Grauverfärbung. Gegenüber schwachen Säuren und Laugen zeigt sich Fichte annähernd resistent (Richter and Ehmke 2017). Fichte wird im Stallbau vielfältig, aber hauptsächlich für Trennwände und Türen von Innenboxen sowie für Schalungen, Tore und Abdeckungen eingesetzt. Es wird allgemein verwendet in Form von Baurundholz, Bauschnittholz, Brettschichtholz, Balkenschichtholz und Brettsperrholz sowie Furniersperr- oder Furnierschichtholz, OSB-Platten und Faserplatten (Egle 2002).

Tanne (*Abies alba*)

Die Tanne wird wegen der weißen bis silbergrauen Farbe ihrer Rinde auch Weiß- oder Silbertanne genannt. Das Holz ist matt, zumeist gelblichweiß und kann einen grau-violetten oder bläulichen Schimmer zeigen. Im Gegensatz zum gelblich leicht glänzenden Holz der Fichte wirkt das Tannenholz eher stumpf. Sie gehört wie die Fichte zu den Reifholzbäumen, besitzt im Gegensatz aber keinen Harzgeruch. Dies erklärt sich durch die fehlenden Harzkanäle, wie sie für das Holz von Fichte, Kiefer, Lärche und Douglasie charakteristisch sind. Auch Harzgallen weist das Holz keine auf. Relativ häufig bildet die Tanne einen Naßkern mit stark erhöhten Holzfeuchtegehalten des Kernholzes aus (bis zu 220 %). Das Holz der Tanne unterscheidet sich nicht nur in seinem Aussehen, sondern auch in seinen Werkstoffeigenschaften nur wenig von dem der Fichte. Tannenholz gilt als etwas spröder und filziger und daher etwas weniger gut zu bearbeiten; auch splittet es leichter. Insgesamt liefert die Tanne ein weiches, leicht bis mittelschweres, elastisches Holz mit einem günstigen (nur mäßigem) Schwindverhalten. Nach der Trocknung besitzt es ein gutes Stehvermögen und arbeitet weniger als Fichte. Es ist mäßig gut, aber insbesondere bei Nasskernausbildung ausreichend imprägnierbar und wie Fichtenholz nur wenig dauerhaft (DHK 4). Allerdings wird der Tanne gegenüber der Fichte überall dort eine bessere Eignung unterstellt, wo Holz ständiger oder wechselnder Feuchte ausgesetzt ist. Tanne wird zumeist zusammen mit Fichte als Mischsortiment unter der Bezeichnung „Fichte/Tanne“ angeboten. Das Holz der Tanne lässt sich im Prinzip für die gleichen Zwecke wie das der Fichte verwenden, wird aber für Verwendungszwecke vorgezogen, bei denen der Harzgehalt der Fichte störend wirkt oder bei denen eine hohe Beständigkeit gegen Säuren und Alkalien gewünscht wird. Bevorzugt wird es deshalb z. B. für die Herstellung von Behältern für die chemische Industrie (Grosser 2004). Früher hat man die Tanne beim Stallbau der Fichte wohl sogar deutlich vorgezogen, weil es als wesentlich unempfindlicher gegen Kot und Harn beschrieben wird (Kaller 2004). Tannenholz wird, da es harzfrei sowie geruchs- und geschmacksneutral ist, erfahrungsgemäß von Rindern nicht angebissen (ÖKL-BAUEN). Als Begründung für den heute feststellbaren Nutzungswandel hin zum Fichteholz kann möglicherweise die heute geringere Verfügbarkeit des Tannenholzes angeführt werden.

Kiefer (*Pinus sylvestris*)

Die Kiefer gehört zu den obligatorischen Farbkernbaumarten mit deutlichem Farbunterschied zwischen dem meist relativ breiten (2-10cm) Splintholz und dem gelblich-roten Kernholz. Ein besonderes Kennzeichen stellen die in größerer Anzahl vorhandenen Harzkanäle dar, welche deutlich größer als bei Fichte, Lärche und Douglasie sind. Die Kiefer liefert ein mittelschweres und mäßig hartes Holz, welches gute Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften aufweist, nur mäßig schwindet, ein gutes Stehvermögen besitzt, unproblematisch zu trocknen und gut zu tränken ist. Das Kernholz der Kiefer ist wenig bis mäßig dauerhaft (DHK 3 bis 4), somit der Witterung ohne Erdkontakte ausgesetzt von befriedigender Beständigkeit.

Kiefernholz reagiert trotz seines hohen Extraktgehaltes chemisch nur in geringem Umfang. So werden Eisenmetalle nicht korrodiert, verursachen aber in Verbindung mit

Feuchte eine schwache graue Holzverfärbung. Gegen Chemikalien, vor allem gegen verdünnte Säuren, ist Kiefernholz sehr widerstandsfähig. Nach der Fichte stellt die Kiefer das wichtigste einheimische Nadelholz dar. Die im Kiefernholz vorhandenen Terpene werden teils als giftig für Pferde (nicht für Rinder) erachtet. Nachweise für dokumentierte Terpenvergiftungen an Pferden durch das Anknabbern von Boxenwänden etc. konnten keine gefunden werden (Grosser 2007, Rosenthal et al. 2010) .

Lärche (*Larix decidua*)

Der Querschnitt durch den Stamm einer Lärche zeichnet sich durch einen ausgesprochen schmalen hellfarbigen Splint aus, welcher vielfach kaum über 2 cm misst. Die obligatorische Verkernung setzt nach 8-10 Jahren bereits sehr früh ein und erzeugt einen deutlich vom Splintholz abgesetztem Farbkern. Die Lärche liefert das schwerste und zugleich härteste einheimische Nadelholz (mit Ausnahme der Eibe) mit guten elasto-mechanischen Eigenschaften. Sie zählt zu den nur mäßig schwindenden Holzarten und zeigt nach der Trocknung bei geradfaserigem Wuchs und nicht zu breiten Jahrringen ein gutes bis befriedigendes Stehvermögen. Allerdings neigt die Lärche stärker als Fichte oder Kiefer zu Drehwuchs und bedarf einer sorgfältigen Trocknung, da es stärker zu Hirn- und Seitenrissen wie auch zum Verwerfen neigt. Das Kernholz der Lärche gilt wie das der Kiefer und Douglasie als mäßig dauerhaft (DHK 3-4), wird aber allen anderen europäischen Farbkernhölzern in der Praxis oft bevorzugt im Hinblick auf seine allgemeine Widerstandsfähigkeit und seine Haltbarkeit. Es ist schwer tränkbar und gilt als teilweise chemisch reaktiv. Vor allem bekannt ist die Eisen-Gerbstoff-Reaktion, welche insbesondere in der Außenverwendung fleckige, graue bis blauschwarze Holzverfärbungen hervorruft. Lärchenkernholz ist in hohem Maße resistent gegenüber Chemikalien; so gilt es als beständig gegen Alkalien und insbesondere aber gegen Säuren. Im Stallbau wird die Lärche teils für Einbausituationen empfohlen, an welchen die Gefahr für ein Anknabbern von Bedeutung ist (Ehmcke G., Grosser, D. 2012, Rosenthal M. et al. 2010). Als Besonderheit enthält Lärchenholz das wasserlösliche Polysaccharid Arabinogalactan welches auch als Futteradditiv bekannt ist (Nikolaevna et al. 2012).

Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*)

Analog zu Kiefer und Lärche besteht zwischen Splint- und Kernholz ein ausgeprägter Farbunterschied (Kernholzbaum). Das Kernholz ist gelblich – rötlich - braun und dunkelt zu braun- bis dunkelrot (farblich ähnlich der Lärche) nach. Douglasienholz ist mittelschwer und im Vergleich zu anderen Nadelhölzern ziemlich hart. Es besitzt ein gutes Schwindverhalten, zeichnet sich nach unproblematischer Trocknung durch ein ausgesprochen gutes Stehvermögen aus, zeigt gute Festigkeits- und Elastizitätseigenschaften. Das Kernholz ist von mäßiger natürlicher Dauerhaftigkeit (DHK 3-4) und ist schwer tränkbar. Es besteht eine ausgeprägte korrodierende Wirkung gegenüber Eisenmetallen, so treten in Kontakt mit Eisen blaugraue Reaktionsverfärbungen auf. Im Übrigen gilt das Kernholz als ziemlich beständig gegen schwache Säuren (außer Essigsäure) und Alkalien. Aufgrund seiner guten technologisch-mechanischen Eigenschaften und der be-

riedigenden natürlichen Dauerhaftigkeit einerseits sowie seines dekorativen, lärchen-ähnlichen Aussehens andererseits wird es gleichermaßen als Bau- und Konstruktionsholz für tragende Bereiche als auch für solche mit dekorativen Funktionen eingesetzt. Im landwirtschaftlichen Bereich werden gerne Bretter und Bohlen für Schweineställe und Gülletanks aus dieser Holzart genommen (Grosser and Teez 1998c, Rosenthal M. et al. 2010, Grosser and Teez 1998a).

Buche (*Fagus sylvatica*)

Die Buche gehört zu den Baumarten mit fakultativer Farbkernbildung. Wenn keine Verkerbung auftritt, sind Splint- und Kernholz von einheitlicher blass-gelblicher Färbung und nicht visuell zu unterscheiden. Wenn durch äußere Einflüsse ein Farbkern gebildet wird, zeichnet sich dieser in Intensität der Färbung, Form und Ausmaß als unregelmäßiger, rotbrauner Farbkern, sog. Rotkern oder Falschkern aus. Diese Entwicklung setzt meist im höheren Baumalter ab etwa 80 Jahren, standörtlich bedingt früher oder später ein, kann aber auch durch Verletzungen im Kronenbereich und Lufteindringung in die Kernholzzonen ausgelöst werden. Rotkerniges Buchenholz unterscheidet sich hinsichtlich des Trocknungs- und Imprägnierverhaltens von unverkerntem Holz, weitere verwendungstechnisch relevante, technologische Unterschiede bestehen keine. Die Buche liefert ein ausgesprochen hartes, zähes, wenig elastisches, homogenes und schweres, der Eiche im Gewicht noch leicht überlegenes Holz auf, mit ausgesprochen guten Festigkeitswerten und einer sehr hohen Abriebfestigkeit. Weniger gut ist dagegen das Schwind- und Quellverhalten, verbunden einem nur mäßig guten Stehvermögen bei Feuchtewechseln, auf die das Buchenholz sehr rasch und intensiv reagiert (schnelle Feuchteaufnahme im unverkernten Zustand). Buchenholz bedarf einer schonenden Trocknung und ist nur von geringer natürlicher Dauerhaftigkeit (DHK5), aber unverkernt sehr gut zu tränken. Es ist chemisch kaum reaktiv. So werden Eisenmetalle werden nicht korrodiert, verursachen aber umgekehrt in Verbindung mit Feuchtigkeit eine schwach graue Verfärbung des Holzes. Von der Rotbuche zu unterscheiden ist die Hain- oder Weißbuche, die nicht nur einer anderen botanischen Familie (Corylaceae) angehört, sondern auch ein in Aussehen und technischen Eigenschaften stark unterschiedliches Holz liefert (Grosser and Teez 1998b, Rosenthal M. et al. 2010). Buchenholz soll im Stallbau laut Angaben der Plattform für landwirtschaftliches Bauen (ÖKL-BAUEN) aufgrund eines entstehenden Schmierfilms nicht verwendet werden. Welcher Natur dieser Schmierfilm ist, wird allerdings nicht näher kommentiert und es lassen sich auch keine Untersuchungen diesbezüglich in der Literatur finden.

Eiche (*Quercus petraea*, *Quercus robur*)

Holzanatomisch lassen sich die beiden einheimischen Eichenarten *Quercus petraea* und *Quercus robur* nur in wenigen Fällen voneinander unterscheiden und werden unter dem Namen Eiche zusammengefasst. Eichenholz zeichnet sich, neben den sehr guten mechanisch-technologischen Kennwerten durch seine honig-gelbbraunen Farbtöne aus. Die Eiche zählt zu den Bäumen mit regelmäßiger, obligatorischer Farbkernbildung. Ihr

Holz ist hart, hat ausgezeichnete Festigkeitseigenschaften und weist einen hohen Abnutzungswiderstand, gutes Stehvermögen und ein gutes Schwindverhalten auf. Es sollte schonend getrocknet werden, da neben Rissen und Verwerfungen auch ungewollte Verfärbungen auftreten können. Das Kernholz der Eiche hat eine hohe natürliche Dauerhaftigkeit (DHK 2). Es gilt unter Wasser und anaeroben Bedingungen als nahezu unbegrenzt haltbar und als schlecht tränkbar (Kernholz). Frisch geschlagenes Eichenholz hat einen säuerlichen Geruch, der auf den hohen Anteil an Gerbstoffen im Holz und in der Rinde zurückzuführen ist. In Verbindung mit Feuchtigkeit und unter Anwesenheit von Sauerstoff wirkt Eiche korrodierend auf Eisenmetalle. Umgekehrt verursacht die Reaktion von Eisen mit den im Eichenholz enthaltenen Gerbstoffen und zum Teil auch mit anderen phenolischen Holzinhaltstoffen blaugraue bis schwarze Verfärbungen. Mit Ammoniak gebeiztes Eichenholz wird als Räuchereiche bezeichnet. In früheren Zeiten wurde das Räuchern von Holz zum Schutz gegen den Abbau von Pilzen und Insekten angewendet. Heute ist es heute aus ästhetischen Gründen gefragt (Ehmcke G., Grosser, D. 2014) (DIN EN 350, 2016).

Pappel (Aspe: *Populus tremula*; Silberpappel: *Populus alba*; Schwarzpappel: *Populus nigra*)

Von der Gattung *Populus* dienen in Deutschland drei als Nutzholzerzeuger: die Schwarzpappel, die Weiß- oder Silberpappel und die Aspe oder Zitterpappel. Die in den Wäldern und auf Abraumhalden angebauten „Wirtschaftspappeln“ stellen in der Regel keine reinen Arten, sondern Kreuzungen dar, deren Vielfalt nur noch schwierig unterschieden werden kann. Mit Ausnahme der Aspe, welche zu den Bäumen mit „verzögerter Kernholzbildung“ gehört, sind bei alle Pappeln Splint- und Kernholz farblich voneinander unterschieden. Während das Holz der Aspe gelblichweiß ist, besitzen die Weiß- und Graupappeln einen rötlichgelben Kern. Die Schwarzpappel und deren Hybriden haben in frischem Zustand einen hell grünlich-braunen Kern, der zu einem schwach rotbraunen Ton verblasst. In der praktischen Holzverwendung wird üblicherweise nicht zwischen den verschiedenen Pappelarten und -sorten unterschieden. Das Holz der Pappeln ist sehr weich, mit niedrigen Festigkeitswerten und gehört zu den leichtesten unter den einheimischen Laubholzarten. Es schwindet nur mäßig und besitzt nach der Trocknung ein gutes Stehvermögen. Auffallend hoch im Bezug zur Holzdichte ist der Abnutzungswiderstand des Holzes, es gilt zudem als splitter-fest. Die Trocknung wirft im Allgemeinen keine Probleme auf: aufgrund der hohen Anfangsfeuchtigkeit ist es jedoch recht langsam auf die Gebrauchsfeuchtigkeit herunter zu trocknen. Der Witterung ausgesetzt, ist Pappelholz nur von geringer Dauerhaftigkeit (DHK 5). Das Kernholz gilt als schwer- das Splintholz als leicht tränkbar. Allerdings zeigt das Holz diesbezüglich ein ungewöhnlich hohes Ausmaß an Variabilität (DIN EN 350). Es ist sehr vielseitig verwendbar und wird auch für Boxen in Reit- und Pferdeställen als geeignet erachtet.

Robinie (*Robinia pseudoacacia*)

Die Robinie bildet als Kernholzbaum einen vom schmalen Splintholz scharf abgesetzten gelblichgrünen Farbkern aus. Seine zahlreichen positiven Eigenschaften machen es zu

einer wertvollen einheimischen Holzart. Es zählt zu den schwersten unter den europäischen Nutzhölzern. Es ist sehr hart, sehr zäh und zeichnet sich durch ausgezeichnete Festigkeitswerte und überdurchschnittlichen Abnutzungswiderstand aus. Es schwindet und arbeitet nur wenig, trocknet aber nur langsam aus und neigt zum Werfen und Verziehen. Daher ist es nach dem Einschnitt sorgfältig und luftig überdacht zu stapeln. Des Weiteren zeichnet sich das Holz durch eine ungewöhnlich hohe natürliche Dauerhaftigkeit (DHK 1-2) aus, gilt aufgrund der stark verthyllten Gefäße im Kernholz als schwer tränkbar. Im Holzhandel steht Robinienholz kaum in größeren Partien zur Verfügung, und wird in der heimischen Forstwirtschaft noch nicht wirtschaftliche angebaut. Vielfach wird die Robinie als Falsche oder Unehchte Akazie bezeichnet und darf nicht mit den echten Akazien verwechselt werden (Grosser and Teez 1998a) (Richter and Risse 2020). Seine Verwendung im Stallbau bietet sich aufgrund der genannten Eigenschaften an. Allerdings herrschen verbreitet Bedenken aufgrund einer vermeintlichen Toxizität für Tiere. Dies beruht vermutlich auf einer wiederkehrenden, gemeinsamen Nennung von Holz und Rinde sowie unbelegten Verweisen auf Vergiftungen durch Annagen (Muehlenthanler U. 2010, Landolt et al. 1997). Verschiedene wissenschaftliche Untersuchungen legen aber nahe, dass die Rinde ursächlich für Vergiftungen ist (Uhlig et al. 2008, Keller and Dewitz 1969) weisen explizit die Rinde, nicht aber das Holz der Robinie als giftig für Pferde aus (Benthien et al. 2018).

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1. Probenraum zur Beaufschlagung mit der Modellatmosphäre	5
Abbildung 2. Probekörper aus Holzwerkstoffplatten (links: Seitenansicht, mittig: Draufsicht) sowie rechts: Schulterstabproben für die Zugscherversuche	6
Abbildung 3. links: FTIR-Spektrum der Oberfläche einer Pappelprobe nach 4-wöchiger Lagerung in NH ₃ -Atmosphäre	9
Abbildung 4. REM Aufnahmen nach 20 Wochen in NH ₃ - Atmosphäre in 2.09 × 10 ³ - facher Vergrößerung: von oben nach unten: Pappel, Fichte, Kiefer	10
Abbildung 5. Vergleich der ATR- Spektren von Douglasie vor und nach intensiver Behandlung mit 15 %-iger Peressigsäure	12
Abbildung 6. Boxplot Zugscherversuche: Vergleich zwischen beaufschlagten Proben (NH ₃) und ihren Referenzen (REF)	13
Abbildung 7. Beispiele für Realproben aus landwirtschaftlichen Gebäuden	14

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1. Oberflächen pH-Werte nach 4, 20 und 35 Wochen Belastungszeit sowie die zugehörigen Referenzoberflächen: Pappel (DVG: Deutsche Veterinärmedizinischen Gesellschaft), Probenherkunft: FUB; Pappel (TUM), Probenherkunft: HFM	9
Tabelle 2. Oberflächen pH-Werte nach 35-wöchiger NH ₃ Beaufschlagung mit einer zwischenzeitlichen Desinfektion im Vergleich zu desinfizierten Referenzen	11
Tabelle 3. Überblick über Dauerhaftigkeitsklassen und Beispielhafte Einbausituationen ausgewählter Holzarten	18
Tabelle 4. Zusammenfassung der für den Stallbau interessanten Holzarten und Stallspezifische Eigenschaften	21

QUELLENVERZEICHNIS

- Aehling K, Weidlich S, Zoennchen E (2001) Untersuchungen zum Emmissionsverhalten geraucherter Eiche. *Holztechnologie* 52:24–28
- Anonymous Robinie – Blatt 101. Johann Heinrich von Thuehnen- Institut, Berlin.
- Augusta, U (2007) Untersuchung der natürlichen Dauerhaftigkeit wirtschaftlich bedeutender Holzarten bei verschiedener Beanspruchung im Außenbereich. Dissertation, Universität Hamburg
- Belie N de, Lenehan JJ, Braam CR, Svennerstedt B, Richardson M, Sonck B (2000a) Durability of Building Materials and Components in the Agricultural Environment, Part III: Concrete Structures. *Journal of Agricultural Engineering Research* 76(1):3–16. doi: 10.1006/jaer.1999.0520
- Belie N de, Richardson M, Braam CR, Svennerstedt B, Lenehan JJ, Sonck B (2000b) Durability of Building Materials and Components in the Agricultural Environment: Part I, The agricultural environment and timber structures. *Journal of Agricultural Engineering Research* 75(3):225–241. doi: 10.1006/jaer.1999.0505
- Benthien JT, Höpken M, Melcher E, Gäckler S, Ohlmeyer M (2018) Zur Dauerhaftigkeit von Stallbohlen für die Pferdehaltung. Thünen Working Paper, Braunschweig
- Berthold D (2022) Brettschichtholz aus Robinie-Hartholz für mehr Klimaschutz in der Bauindustrie und Windkraftindustrie sowie klimaresistente Zukunftswälder. Accessed 21 Sep 2023
- Besold G (1982) Systematische Untersuchung aggressiver Gase auf Fichtenholz. Dissertation, Universität München
- Clausen A (2010) *Wood Handbook*, Chapter 14: Biodeterioration of Wood
- DIN EN 350 (2016) Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Prüfung und Klassifizierung der Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten gegen biologischen Angriff; Deutsche Fassung EN 350:2016. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin. Accessed 26 Feb 2021
- Dietsch P, Jiang Y, Winter S (2018) Landwirtschaftliches Bauen mit Holz – vorbeugender chemischer Holzschutz zwangsläufig notwendig ? 24. Internationales Holzbauforum
- DIN EN 350 DIN EN 350 Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Prüfung und Klassifizierung der Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten gegen biologischen Angriff;. DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Accessed 09 Oct 2023
- Egle J (2002) Informationsdienst Holz. Dauerhafte Holzbauten bei chemisch-aggressiver Beanspruchung. *Holzbauhandbuch*, München
- Egle J (2003) Dauerhaftigkeit von Holz bei chemisch-aggressiver Beanspruchung
- Ehmcke G, Grosser, D (2012) Das Holz der Lärche. Eigenschaften und Verwendung. *LWF Wissen*(69):65–71
- Ehmcke G, Grosser, D (2014) Das Holz der Eiche – Eigenschaften und Verwendung. *LWF Wissen*(75)
- Erler K Modifikationsfaktor aggressive Medien- Vorschlag für eine Ergänzung des CIP-Model-Codes. In: *Bauforschung Baupraxis*, vol 280, pp 5–7
- Erler K (1998) Korrosion von Vollholz und Brettschichtholz. *Bautechnik* 75(8):530–538. doi: 10.1002/bate.199804090
- Fengel D, Wegener G (1984) *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. DeGryter, Berlin
- Früh B (2011) Hygienemanagement in der Bioschweinehaltung. Merkblatt
- Grosser D (2004) Das Holz der Tanne- Eigenschaften und Verwendung. *LWF Wissen*(45)
- Grosser D (2007) Das Holz der Kiefer- Eigenschaften und Verwendung. *LWF Wissen*(57)
- Grosser D, Ehmcke G (2012) Das Holz der Lärche- Eigenschaften und Verwendung. *LWF Wissen*(69)
- Grosser D, Teetz W (1998c) Nr. 14. Pappel. Einheimische Nutzhölzer (Loseblattsammlung). Absatzförderungsfonds der deutschen Forstwirtschaft

- Grosser D, Teez W (1998a) Blatt No.5: Douglasie. Informationsdienst Holz, Einheimische Nutzhölzer (Loseblattsammlung). Informationsdienst Holz, Einheimische Nutzhölzer (Loseblattsammlung) Absatzförderungsfonds der deutschen Forstwirtschaft
- DIN 68800-2 (2012) Holzschutz. Normenausschuss Holzwirtschaft und Möbel (NHM) im DIN Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN. Accessed 26 Feb 2021
- DIN 68800-1 (2019) Holzschutz –. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin. Accessed 26 Feb 2021
- Jiang Y, Dietsch P, Oberhardt F, Simon J (2018) Landwirtschaftliche Nutzgebäude in Holzbauweise ohne vorbeugenden chemischen Holzschutz (Gebrauchsklasse 0 (GK 0)) - Besondere bauliche Maßnahmen in Anlehnung an DIN 68800
- Kaller U (2004) Baum des Jahres 2004. Weisstanne (*Abies alba*). http://www.baumdoktor.com/cms/index.php?option=com_content&view=article&id=74&Itemid=83&lang=de. Accessed 17.10.22
- Keller H, Dewitz W (1969) Vergiftungen bei 9 Pferden durch Rinde der „Falschen Akazie“ (*Robinia pseudoacacia*). *Deutsche Tierärztl Wschr*(76):115–116
- Knauf M, Frühwald A (2020) Marktpotenziale von Laubholzprodukten aus technisch-wirtschaftlicher und marktstruktureller Sicht (LaubholzProduktmärkte). Reinbek:224
- Koch G (2010) Die pH-Werte neu eingeführter Handelshölzer. *Holzzentralblatt*(9):229
- Krause D (2013) Holzschäden an tragenden Bauteile durch aggressive Chemikalien- ein Praxisbericht
- Krause D (2014) Holzschäden an Dachtragwerken von Biogasanlagen – Ausnahme oder Regel?
- Landolt G, Feige K, Schoeberl M (1997) Vergiftung bei Pferden durch die Rinde der „Falschen Akazie“ (*Robinia pseudoacacia*). *Schweiz Arch Tierheilk*(139):363–366
- Mariño RA, Carreira XC, Fernández ME, Fernandez-Rodriguez C (2009) Durability of timber structures in agricultural and livestock buildings. *Biosystems Engineering*(104):152–160
- Michaelsen H, Buchholz R (2009) Vom Färben des Holzes : Holzbeizen von der Antike bis in die Gegenwart ; Literatur, Geschichte, Technologie, Rekonstruktion, 2000 Rezepturen. Imhof, Petersberg
- Muehlenthanler U (2010) Eine Baumart gibt zu diskutieren. Mit Robinie in die Zukunft – oder den Neophyten bekämpfen? *Wald und Holz* 6:35–38
- Neuhaus H (2017) Ingenieurholzbau. Grundlagen - Bemessung - Nachweise - Beispiele, 4. Auflage. Lehrbuch. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden
- Niemz P (2005) Physik des Holzes. ETH Zurich
- Nikolaevna N, Nikolaevna E, Viktorovna N, Alekseevich Y, Anatolievich V (2012) Polysaccharides from Larch Biomass. In: Verma MS, Gu FX (eds) 1,3-Beta-Glucans: Drug Delivery and Pharmacology. INTECH Open Access Publisher
- ÖKL-BAUEN Holzarten. Fichte und Tanne. Typische Anwendungsmöglichkeiten. <https://oeklbauen.at/cms/baustoffe/holz/holzarten.php>. Accessed 17.10.22
- Parameswaran N, Roffael E (1984) Kenntnisstand und Untersuchungsergebnisse zur Wirkung von Ammoniak auf Holzspäne. *Eur. J. Wood Prod.* 42(9):327–333. doi: 10.1007/BF02607134
- Pflanz W (2007) Tier- und umweltgerechte Haltungsverfahren in der Schweinehaltung: Gesamtheitliche Bewertung innovativer Schweinemastverfahren für Baden-Württemberg, Hohenheim
- Rabe C (2008) Einfluss verschiedener Gasatmosphären auf das Wachstum holzzeretzender Pilze. Dissertation, Albert Ludwig Universität
- Rapp A, Witt P (2007a). Raeuchereiche, Teil 1 Herstellung , Materialeigenschaften- und was passiert bei zu hohem Restammoniakgehalt. Boden Wand Decke
- Richter K, Ehmke G (2017) Das Holz der Fichte – Eigenschaften und Verwendung. *LWF Wissen*(80)

- Richter K, Risse M (2020) Das Holz der Robinie – Eigenschaften und Verwendung. LWF Wissen(84)
- Rosenthal M, Bäucker E, Bues C (2010) Holzaufbau und Tränkbarkeit. Zum Einfluss der Mikrostruktur des Holzes auf das Eindringverhalten von Flüssigkeiten. Holz-Zentralblatt 34:852–854
- Rosenthal M, Baeucker E, Bues CT (2010) Holzaufbau und Tränkbarkeit : Zum Einfluss der Mikrostruktur des Holzes auf das Eindringverhalten von Flüssigkeiten. Holz-Zentralblatt(34):852–854
- Schmidt D, Dederich L, Niedermeyer J (2015) Holzbau Handbuch. Holzschutz- Bauliche Massnahmen. Informaionsdienst Holz, Berlin
- Steiner B, Burkhalter B (2013) Gefahren durch Schadgase in Gülle. UFA REVUE:24–25
- Stockinger C, Stark G, Weiß J (2001) Landwirtschaftliche Betriebsgebäude in Holz. Informationsdienst Holz, München
- Stroh K, Winkler G, Koehler J (2018) Ammoniak und Ammonium, Helmbrechts
- Svajlenka J, Kozlovska M, Posivakova T (2019) Specifics and Application of Wooden Constructions in the Agricultural Sector. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 603(2):22019. doi: 10.1088/1757-899X/603/2/022019
- Švajlenka J, Kozlovská M, Pošiváková T (2019) Analysis of the indoor environment of agricultural constructions in the context of sustainability. Environmental monitoring and assessment 191(8):489. doi: 10.1007/s10661-019-7608-8
- Svennerstedt B Durability of building materials and components in agricultural environment. In: Proceedings CIB World Building Congress 1998
- Uhlig A, Grosche, A., Hoop, M., Schusser G (2008) Robinien als Ursache für Vergiftungen beim Pferd. Tierärztliche Praxis. Ausgabe G, Grosstiere/Nutztiere 36
- Vollmer A, RÖMPP-Redaktion, Sitzmann H, Steinbrecht K (2017) Ammoniak. Thieme Gruppe
- Wegener G, Fengel D (1986) Untersuchungen zur Beständigkeit von Holzbauteilen in aggressiven Atmosphären. Eur. J. Wood Prod. 44(6):201–206. doi: 10.1007/BF02611992
- Weigl M (2011) Veränderung von Holzeigenschaften durch industrielle Prozesse. Dissertation, Universitaet fuer Bodenkultur
- Weigl M, Müller U, Wimmer R, Hansmann C (2012) Ammonia vs. thermally modified timber—comparison of physical and mechanical properties. Eur. J. Wood Prod. 70(1-3):233–239. doi: 10.1007/s00107-011-0537-z
- Weigl M, Pöckl J, Grabner M (2009) Selected properties of gas phase ammonia treated wood. Eur. J. Wood Prod. 67(1):103–109. doi: 10.1007/s00107-008-0301-1
- Wendland M, Attenberger E (2009) Wirtschaftsdünger und Gewässerschutz. Lagerung und Ausbringung von Wirtschaftsdüngern in der Landwirtschaft. LfL- Information, Wolnzach
- Zaehner M, Keck M, Hilty R (2005) Ammoniak-Emissionen von Rindviehställen. Minderung beim Bau und Management. FAT Berichte

Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen Bauen mit Holz - von der Planung bis zum Rückbau (ZukunftLaWiBau)

**Schlussbericht über o.g. Forschungsvorhaben
gefördert unter dem Kennzeichen: 2220HV036
im Rahmen „Landwirtschaftliches Bauen mit Holz“ des Förderprogramms „Nachwach-
sende Rohstoffe“ des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL)**

TEIL G: Ressourcenpotenzial

Technische Universität München (TUM)
TUM School of Life Sciences
Holzforschung München (HFM)
Lehrstuhl für Holzwissenschaft
Forschungsbereich Stoffstrommanagement

Projektbearbeitung:

Prof. Dr. Gabriele Weber-Blaschke (TUM-HFM)
Sabine Helm (TUM-HFM)

INHALTSVERZEICHNIS

Begriffe und Definitionen	4
Abkürzungsverzeichnis.....	5
TEIL G: Ressourcenpotenzial	6
Kurzfassung.....	6
1 Problemstellung, Kenntnisstand und Zielsetzung	8
1.1 Problemstellung.....	8
1.2 Kenntnisstand und Forschungslücke	8
1.3 Zielsetzung und Fragestellung.....	12
2 Methodik.....	13
2.1 Vorgehensweise	13
2.2 Charakterisierung landwirtschaftlicher Betriebe (AP 3.1)	13
2.3 Ermittlung des Ressourcenpotentials und der Holzverwendung (AP 3.2)	14
2.3.1 Auswertung der Bundeswaldinventur.....	14
2.3.2 Onlineumfrage bei Landwirten und Landwirtinnen	14
2.3.3 Befragung von Landesvertretern im Arbeitskreis Bauen, Energie, Technik der Landwirtschaftskammer Berlin	15
2.4 Analyse und Bewertung der (regionalen) Wertschöpfungsketten (AP 3.3).....	15
2.4.1 Definition der Begriffe Wertschöpfungskette und Wertschöpfung	15
2.4.2 Definition der Regionalität.....	17
2.4.3 Analyse von landwirtschaftlichen Holzbauprojekten und involvierten Akteuren der Holzwertschöpfungskette	17
2.4.4 Effekte landwirtschaftlicher Holzbauprojekte in der Region.....	20
2.5 Ressourcenpotenziale, Optimierungsmöglichkeiten und Umsetzbarkeit von landwirtschaftlichen Holzbauprojekten auf regionaler Ebene (AP3.4)	23
3 Ergebnisse	24
3.1 Charakterisierung landwirtschaftlicher Betriebe (AP3.1)	24
3.1.1 Regionalspezifische Unterschiede landwirtschaftlicher Betriebsverhältnisse ..	24
3.1.2 Analyse landwirtschaftlicher Betriebe mit Holzbauerfahrung.....	25
3.2 Ermittlung des Ressourcenpotenzials und der Ressourcenverwendung (AP3.2)	28
3.2.1 Waldbesitzverhältnisse	28
3.2.2 Holzvorräte unterschiedlicher Baumarten im Privatwald	32
3.2.3 Verwendung und Beurteilung der Eignung bestimmter Holzarten beim landwirtschaftlichen Bauen	32
3.2.4 Holzverwendung in den ausgewählten Holzbauprojekten.....	34
3.3 Analyse und Bewertung der (regionalen) Wertschöpfungsketten (AP3.3).....	35

3.3.1	Verfügbarkeit von Akteurinnen und Akteuren der Wertschöpfungskette Holz .	35
3.3.2	Einflussfaktoren für die Umsetzung landwirtschaftlicher Holzbauprojekte	37
3.3.3	Hemmnisse bei der Verwendung von eigenem Holz.....	39
3.3.4	Erfolgsfaktoren bei der Verwendung von eigenem Holz.....	41
3.4	Effekte landwirtschaftlicher Holzbauprojekte in der Region (AP3.3).....	41
3.4.1	Art und Anzahl involvierter Akteure der Holzwertschöpfungskette	42
3.4.2	(Regionale) Wertschöpfung beim landwirtschaftlichen Bauen mit Holz.....	43
3.4.3	Transportaufwand beim landwirtschaftlichen Bauen mit eigenem und zugekauftem Holz	44
4	Schlussfolgerungen und Empfehlungen (AP3.4)	46
	Abbildungsverzeichnis.....	49
	Tabellenverzeichnis.....	52
	Quellenverzeichnis	53

BEGRIFFE UND DEFINITIONEN

Wertschöpfungskette: Eine geordnete Abfolge von Verfahrensschritten, welche die Stufen der Herstellung von Produkten darstellen. Jeder einzelne Verfahrensschritt verbraucht Rohstoffe und Energien, emittiert Stoffe, bietet Beschäftigung und Einkommen und erzeugt Sach- und Geldwerte.

Wertschöpfung: Die Bruttowertschöpfung, im Bericht auch als «Wertschöpfung» bezeichnet, entspricht der Differenz aus dem Bruttoproduktionswert und den Vorleistungen. Der Bruttoproduktionswert wiederum entspricht dem Gesamtumsatz (ohne Umsatzsteuer) ergänzt um Bestandsveränderungen und selbsterstellte Anlagen.

Regionalität: Akteure der Wertschöpfungskette werden in diesem Bericht als «regional» eingestuft, wenn die Distanz (schnellste Straßenverbindung) zum Holzbauprojekt unter oder gleich 50 km beträgt.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BWS	Bruttowertschöpfung
WP	Wertschöpfungsprozent

TEIL G: RESSOURCENPOTENZIAL

KURZFASSUNG

Holz als Baustoff vereint die Vorteile einer nachwachsenden, regional verfügbaren und klimaschonenden Ressource. Um den landwirtschaftlichen Holzbau zu fördern, ist es notwendig eine fundierte Informationsgrundlage zu den bestehenden Rahmenbedingungen in Deutschland zu schaffen. Ziel in Teil G ist es, das vorhandene Ressourcenpotenzial zu bestimmen, Einflussfaktoren auf die Umsetzung von Bauvorhaben zu identifizieren und Effekte des (regionalen) landwirtschaftlichen Holzbaus zu untersuchen.

Mithilfe von Statistik- und Literaturanalysen sowie einer Online-Umfrage wurden landwirtschaftliche Betriebe charakterisiert und Ressourcenpotenziale für das landwirtschaftliche Bauen mit Holz ermittelt. Bestehende Wertschöpfungsketten wurden am Beispiel bereits realisierter Holzbauprojekte hinsichtlich Struktur und Einflussfaktoren analysiert und ökonomische, ökologische und soziale Auswirkungen quantifiziert.

Landwirtschaftliche Betriebe unterscheiden sich regionalspezifisch. In den östlichen Bundesländern gibt es kleinere, aber dafür größere landwirtschaftliche Betriebe mit höherem Tierbestand und auch größerer Fläche. Entsprechend variabel sind die Anforderungen an den Bau landwirtschaftlicher Gebäude und an die Funktionalität der Wertschöpfungskette. Die Ergebnisse der Online-Umfrage zeigen, dass eine sehr hohe Zufriedenheit hinsichtlich der landwirtschaftlichen Holzbauerfahrung besteht. Landwirtinnen und Landwirte, die mit eigenem Holz gebaut haben, beurteilen ihre Erfahrungen noch etwas positiver als solche, die mit zugekauftem Holz gebaut haben.

Grundsätzlich steht für das landwirtschaftliche Bauen in Deutschland regionales, häufig auch betriebseigenes Holz zur Verfügung. Mehr als die Hälfte (53%) der landwirtschaftlichen Betriebe besitzen eigene Wälder. Die durchschnittliche Größe des landwirtschaftlichen Waldbesitzes unterscheidet sich zudem zwischen unterschiedlichen Regionen und der Betriebsformen. Bundesweit haben mehr als ein Drittel der landwirtschaftlichen Betriebe weniger als 2 ha eigenen Wald zur Verfügung. Die Holzvorräte verschiedener Baumarten im Privatwald unterscheiden sich ebenfalls regionalspezifisch. Im Norden und Osten Deutschlands dominiert die Kiefer, im Süden, Westen und in der Mitte dominiert die Fichte. Die Ergebnisse der Online-Umfrage und auch die Analyse landwirtschaftlicher Holzbauprojekte zeigen, dass die im landwirtschaftlichen Bauen verwendete Hauptbaumart die Fichte ist, häufig auch als Schadholzsortiment.

Die Funktionalität und Verfügbarkeit regionaler Akteure der Holz-wertschöpfungskette spielt eine wichtige Rolle bei der Umsetzung landwirtschaftlicher Holzbauprojekte. Eine kompetente Bauberatung, frühzeitige Planung und die Zusammenarbeit mit regional verfügbaren Akteuren der Holz-Wertschöpfungskette sind zentrale Einflussfaktoren für die Umsetzung von landwirtschaftlichen Holzbauprojekten.

Das am häufigsten genannte Hemmnis, warum Landwirtinnen und Landwirte ihren eigenen Wald nicht als Rohstofflieferant nutzen, ist die fehlende finanzielle Rentabilität. Mehr als ein Drittel der Befragten gab an, dass die agrarbauförderlichen Bedingungen bei der Erbringung von Eigenleistung sie davon abhielten das eigene Holz zu nutzen.

Im Zuge der detaillierten Analyse ausgewählter Holzbauprojekte wurde als häufiges Argument gegen die Verwendung von eigenem Holz die fehlende Förderung innerhalb der Agrarinvestitionsförderung genannt.

Erfolgsfaktoren beim Einsatz von eigenem Holz sind die frühzeitige Einplanung der Nutzung von eigenem Holz und die Bereitschaft zur Einbringung von Eigenleistung bei der Organisation, Koordinierung und Durchführung des Bauvorhabens.

Die Verwendung von eigenem Käferholz bietet meist eine qualitativ hochwertige und finanziell vorteilhafte Verwertungsmöglichkeit.

Die detaillierte Analyse ausgewählter Holzbauprojekte zeigt, dass die Verwendung von eigenem oder regionalem Holz vorteilhafte Effekte hinsichtlich einer ressourceneffizienten und nachhaltigen Verwendung erzielt. Der geringere Transportaufwand regionaler Akteure reduziert die transportbedingten Umweltbelastungen. Die Einbindung einer größeren Zahl an verschiedenen regionalen Akteuren festigt die ländlichen Strukturen des Cluster Forst und Holz und sichert Arbeitsplätze und Einkommen in der Region. Durch die Verwendung von eigenem und regionalem Holz verbleibt ein größerer Teil der Wertschöpfung im ländlichen Raum und stärkt die regionale Wirtschaftskraft.

Aufgrund großer Unterschiede zwischen einzelnen Regionen in Deutschland sollte die Förderung landwirtschaftlicher Betriebe hinsichtlich Planung und Umsetzung von Holzbauprojekten regional- und betriebsspezifisch erfolgen.

1 PROBLEMSTELLUNG, KENNTNISSTAND UND ZIELSETZUNG

1.1 Problemstellung

Traditionell ist die Holzbauquote bei landwirtschaftlichen Gebäuden im Gegensatz zu Wohngebäuden hoch. Während im Wohnungsbau die Holzbauquote in den letzten 20 Jahren jedoch kontinuierlich von 8,8% auf 12,5% Anteil am umbauten Raum gestiegen ist, ist sie bei landwirtschaftlichen Gebäuden zwischen 2010 und 2018 um 11,1% Prozentpunkte auf einen Tiefstwert von 17,8% gesunken (Abbildung 1). Erst in den letzten 3 Jahren stieg die Holzbauquote wieder an und erreichte 2021 etwa das Niveau des Jahres 2000 (24,7%) (Destatis 2021a, 2022a).

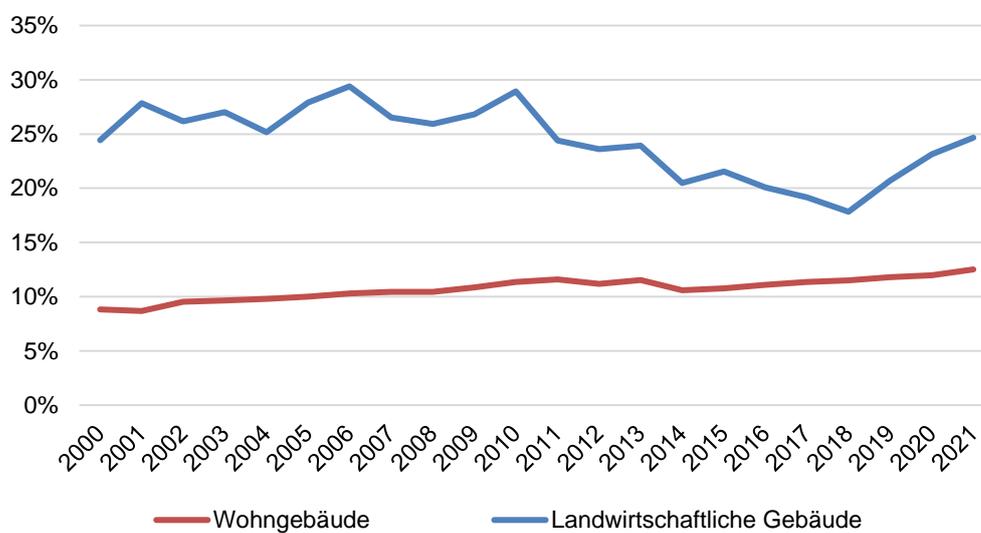
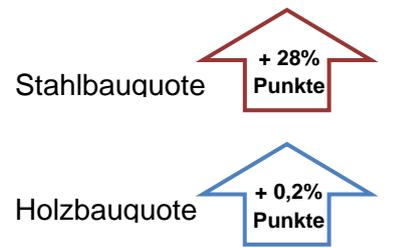
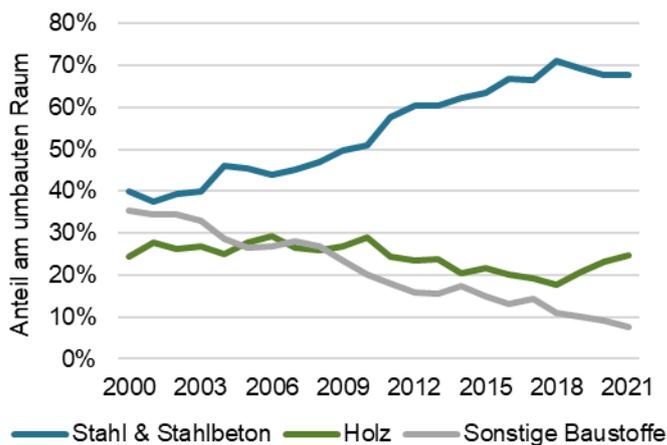


Abbildung 1: Entwicklung der Holzbauquoten fertiggestellter Wohngebäude und landwirtschaftlicher Betriebsgebäude in Deutschland von 2000 bis 2021 bezogen auf den Bruttorauminhalt (Destatis 2021a); Holzbauquote = Anteil am Bruttorauminhalt mit vorwiegend verwendetem Baustoff Holz für die Tragekonstruktion

1.2 Kenntnisstand und Forschungslücke

Abbildung 2 zeigt, dass der Anteil am umbauten Raum fertiggestellter landwirtschaftlicher Gebäude aus Stahl und Stahlbeton deutlich zugenommen hat (+27,7%-Punkte), wohingegen der Anteil von Holzgebäuden stagniert (+0,2%-Punkte) und der Anteil von Gebäuden aus sonstigen Baustoffen (Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton, Leichtbeton, Bims etc.) abgenommen hat (-26,4%-Punkte) (Destatis 2021a, 2022a).



Ø Gebäudegröße (2021)

Stahl: 5.460 m³

Holz: 2.960 m³

Abbildung 2: Entwicklung der Baustoffquoten fertiggestellter landwirtschaftlicher Betriebsgebäude in Deutschland von 2000 bis 2021 (Destatis 2022b, 2022a); Baustoffquote = Anteil am Bruttorauminhalt mit vorwiegend verwendetem Baustoff für die Tragekonstruktion

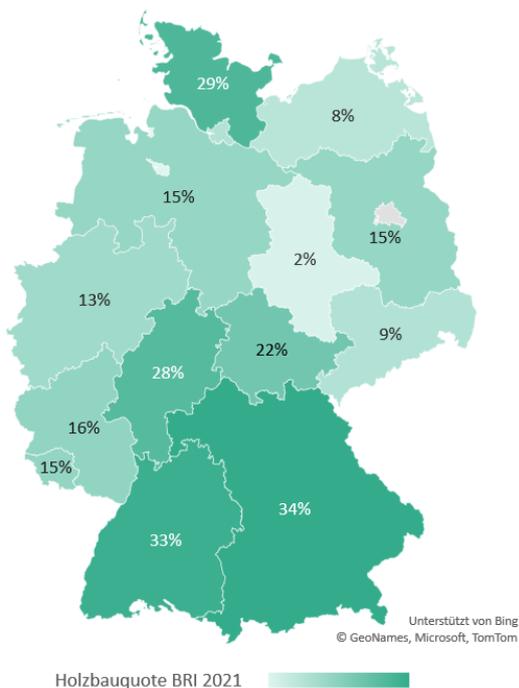


Abbildung 3: Holzbauquote 2021 fertiggestellter landwirtschaftlicher Betriebsgebäude entsprechend des Anteils am umbauten Raum (Bruttorauminhalt, BRI) nach Bundesländern (Destatis 2022a); Holzbauquote = Anteil am Bruttorauminhalt mit vorwiegend verwendetem Baustoff Holz für die Tragekonstruktion

Aus Abbildung 3 und 4 lassen sich folgende Informationen ableiten:

Abbildung 3:

- Zwischen den einzelnen Bundesländern gibt es erhebliche Unterschiede in der Holzbauquote
- Mit Ausnahme von Schleswig-Holstein gibt es im Süden tendenziell höhere Holzbauquoten als im Norden

Abbildung 4:

- In allen Bundesländern dominiert der Stahlbau deutlich
- Zwischen 2015 und 2021 ist in Niedersachsen und Baden-Württemberg die Holzbauquote zugunsten der Stahlbauquote leicht zurückgegangen
- Moderate Anstiege der Holzbauquote finden sich in Sachsen, Nordrhein-Westfalen, Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein und Bayern

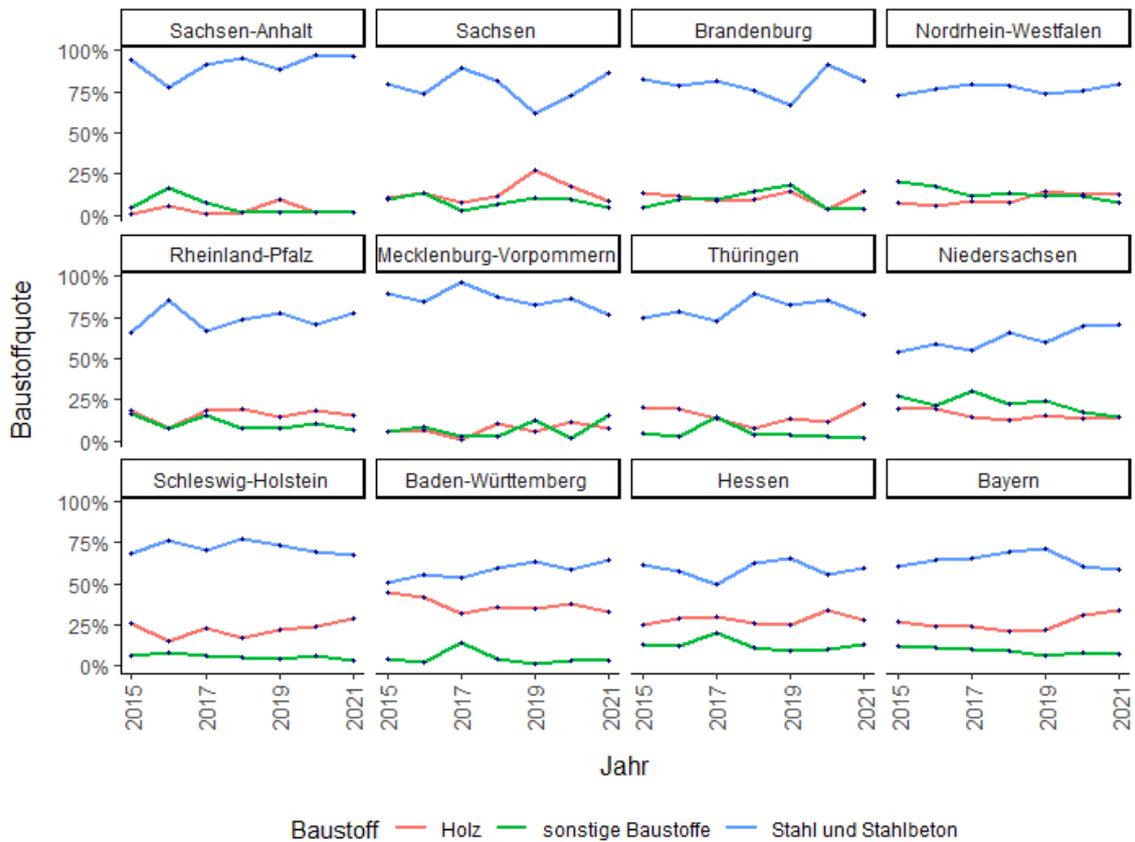


Abbildung 4: Entwicklung der Baustoffquoten fertiggestellter landwirtschaftlicher Betriebsgebäude in den einzelnen Bundesländern (ausgenommen Stadtstaaten und Saarland) von 2015 bis 2021 (Destatis 2021a, 2022b, 2022a); Baustoffquote = Anteil am Bruttorauminhalt mit vorwiegend verwendetem Baustoff für die Tragekonstruktion

Einen möglichen Einflussfaktor auf die Entwicklungen der unterschiedlichen Baustoffquoten spielt vermutlich der bereits seit Jahrzehnten voranschreitende Agrarstrukturwandel. Eine kontinuierlich sinkende Anzahl an Betrieben bewirtschaftet mit weniger Arbeitskräften aber steigendem Kapitaleinsatz größere Flächen pro Betrieb (Nowack et al. 2019). Allein in den letzten 10 Jahren ist die Anzahl landwirtschaftlicher Betriebe um 12% zurückgegangen und gleichzeitig die durchschnittliche Betriebsfläche um 13% gestiegen (Abbildung 5). Tendenziell geht damit auch ein Bedarf an immer größeren landwirtschaftlichen Betriebsgebäuden einher.

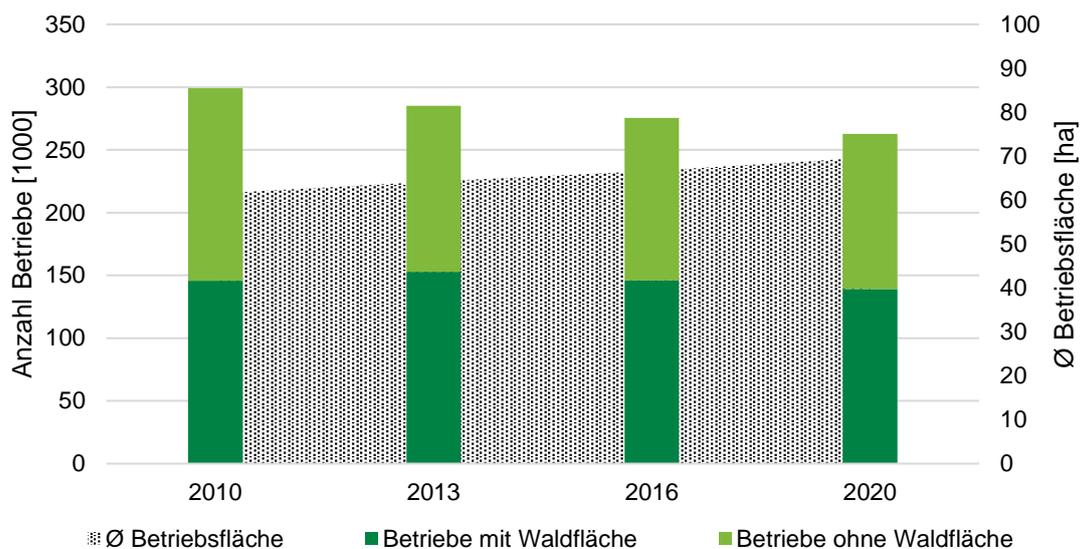


Abbildung 5: Entwicklung der Anzahl an landwirtschaftlichen Betrieben mit und ohne Waldfläche und der durchschnittlichen Fläche pro Betrieb in Deutschland zwischen 2010 und 2020 (Destatis 2019, 2011, 2014, 2017, 2021c)

Der jährlich fertiggestellte umbaute Raum landwirtschaftlicher Gebäude ist in den letzten 20 Jahren um gut 22% und die Anzahl der Gebäude um 47% zurückgegangen. Die durchschnittliche Größe landwirtschaftlicher Gebäude ist um 48% gestiegen (Destatis 2021a). Dieser Trend hin zu größeren landwirtschaftlichen Gebäuden wird vor allem von Gebäuden aus Stahl und Stahlbeton getragen. Die durchschnittliche Größe dieser Gebäude ist in den letzten 20 Jahren um 46% gestiegen. Bei Holzgebäuden hat sich der durchschnittlich umbaute Raum lediglich um 12% erhöht (Abbildung 6, Säulen). Die Kosten je m³ umbauten Raum sind bei Holzgebäuden bis 2017 im Durchschnitt um 3 € höher als bei Stahlgebäuden. Seit 2018 klafft diese Lücke mit durchschnittlich 10 € Mehrkosten deutlich weiter auf (Abbildung 6, Linien). Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Kosten in € je m³ umbauten Raum auch von der Größe der Gebäude beeinflusst werden, da der zunehmende Rauminhalt nicht mit gleichermaßen erhöhtem Materialeinsatz einhergeht. Die Preisdifferenz steigt entsprechend mit der Differenz der Gebäudegröße. Die genauen Ursachen für die Entwicklung der Holzbauquote bei landwirtschaftlichen Gebäuden wurden bislang nicht wissenschaftlich untersucht. Es ist anzunehmen, dass eine Vielzahl an Faktoren dafür verantwortlich ist und dass es große regionale Disparitäten gibt.

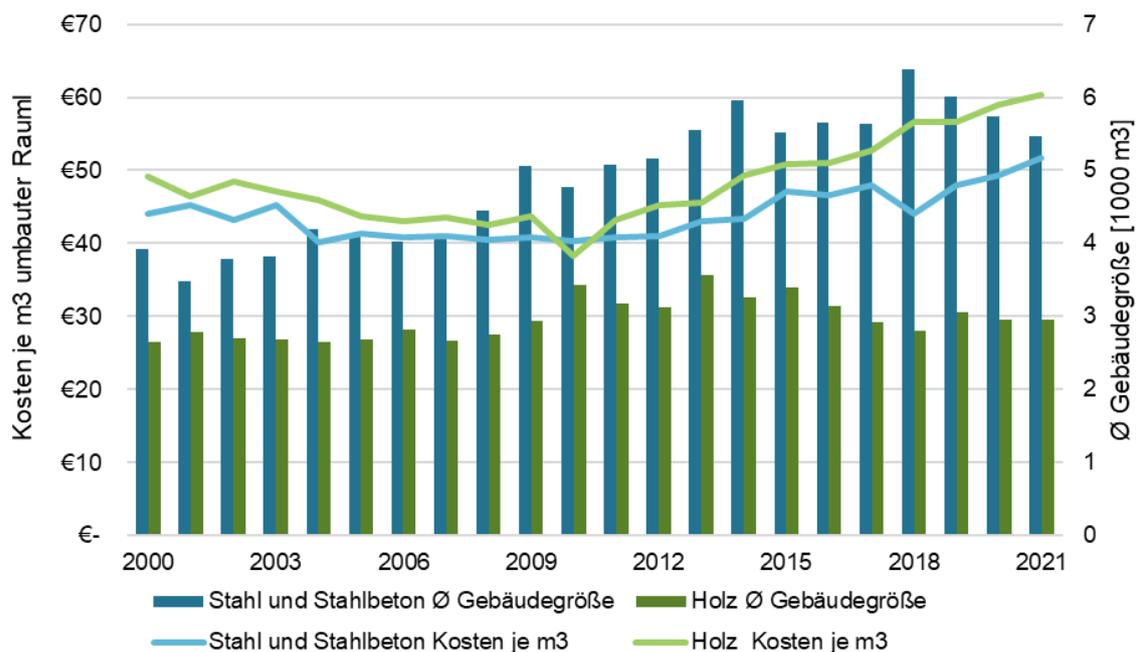


Abbildung 6: Entwicklung der Kosten je m³ umbauten Raum (Primärachse) und der durchschnittlichen Größe fertiggestellter landwirtschaftlicher Betriebsgebäude (Sekundärachse) in Deutschland mit Stahl/Stahlbeton bzw. Holz als vorwiegend verwendetem Baustoff von 2000 bis 2021 (Destatis 2021a, 2022a)

1.3 Zielsetzung und Fragestellung

Um im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung zielgerichtete Empfehlungen geben zu können, ob und wie die landwirtschaftliche Holzbauquote erhöht werden kann, ist es notwendig Einflussfaktoren zu identifizieren und Erfolgsfaktoren abzuleiten, sowie Effekte des (regionalen) Holzbaus zu untersuchen.

Dabei werden folgende Fragen untersucht:

- I. Besitzen landwirtschaftliche Betriebe eigenen Wald? Wie sind diese Betriebe charakterisiert?
- II. Steht in (diesen) Wäldern geeignetes Holz zum Bauen von landwirtschaftlichen Gebäuden zur Verfügung? Welches Holz wird verwendet?
- III. Welche Hemmnisse bzw. Erfolgsfaktoren für landwirtschaftliches Bauen mit Holz, insbesondere mit dem Eigenen, gibt es?
- IV. Sind die Wertschöpfungsketten und ihre Akteure zum Bauen von landwirtschaftlichen Gebäuden in der Region vorhanden? Welche ökonomischen, ökologischen und sozialen Effekte werden durch das landwirtschaftliche Bauen mit Holz in der Region erzielt?
- V. Welche Empfehlungen können für Landwirtinnen und Landwirte sowie für Akteure der Holzertschöpfungskette abgeleitet werden?

2 METHODIK

2.1 Vorgehensweise

Um die oben genannten Fragen beantworten zu können, werden in Teil G (Arbeitspaket 3) landwirtschaftliche Betriebe charakterisiert und Ressourcenpotentiale, insbesondere des eigenen bäuerlichen Waldes, für das landwirtschaftliche Bauen mit Holz ermittelt. Bestehende Wertschöpfungsketten werden hinsichtlich Struktur und Einflussfaktoren analysiert und die Regionalität und Wertschöpfung ausgewählter Holzbauprojekte bewertet.

Die Aufgabenstellung ist in vier Teilarbeitspakete untergliedert:

AP3.1: Charakterisierung landwirtschaftlicher Betriebe

AP3.2: Ermittlung des Ressourcenpotenzials und des Ressourcenbedarfs

AP3.3: Analyse und Bewertung der (regionalen) Wertschöpfungsketten

AP3.4: Ableitung von Empfehlungen für Potenziale, Optimierung und Umsetzbarkeit auf regionaler Ebene

2.2 Charakterisierung landwirtschaftlicher Betriebe (AP 3.1)

Die bundesweite Charakterisierung landwirtschaftlicher Betriebe nach Waldbesitz und landwirtschaftlicher Betriebsgröße in Deutschland bzw. in den einzelnen Bundesländern erfolgte über eine Analyse der Daten aus den Landwirtschaftszählungen 2010, 2013, 2016 und 2020, der Agrarstrukturerhebung 2020 und der Fachserie 3 des Statistischen Bundesamts (Destatis 2011, 2014, 2017, 2021c, 2021d).

Die Erhebungen in den Jahren 2010, 2016 und 2020 sind Totalerhebungen im Sinne des Agrarstatistikgesetzes. Im Jahr 2013 wurde eine repräsentative Stichprobenerhebung durchgeführt. Im Hinblick auf die Befragungsmethodik sind die Ergebnisse aus 2020 mit denen aus den Jahren 2016, 2013 und 2010 vergleichbar, da für die untersuchten Parameter dieselben Abschneidekriterien und Berechnungsvorschriften verwendet wurden (Destatis 2021e).

Zur Beschreibung der Waldbesitzverhältnisse in Abhängigkeit unterschiedlicher Betriebsformen wurden die Buchführungsergebnisse der Jahresabschlüsse der Haupterwerbsbetriebe für das Wirtschaftsjahr 2020/2021 verwendet, die im Rahmen des BMEL-Testbetriebsnetzes Landwirtschaft erstellt wurden (BMEL 2022). Die Auswahl der Testbetriebe erfolgt auf der Grundlage der Agrarstrukturerhebung. Vom Statistischen Bundesamt erstellte Auswahlpläne werden vom BMEL den Ländern übermittelt. Für die endgültige Auswahl der Betriebe bildet die oberste Landesbehörde für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten einen Landesausschuss (BMEL 2018).

2.3 Ermittlung des Ressourcenpotentials und der Holzverwendung (AP 3.2)

2.3.1 Auswertung der Bundeswaldinventur

Das theoretische Ressourcenpotenzial aus dem eigenen Wald wurde abgeleitet, indem die Daten des bäuerlichen Waldbesitzes (siehe Kapitel 2.2) mit den Daten der Bundeswaldinventur zu den bundeslandspezifischen Vorräten bestimmter Baumarten im Privatwald (BWI 2012) verschnitten wurden. Es wird dabei angenommen, dass sich die Strukturdaten der BWI 3 seit 2012 nicht wesentlich verändert haben und die Zusammensetzung des bäuerlichen Privatwaldes dem Privatwald im Allgemeinen entspricht. Die Daten der BWI 4 stehen noch nicht zur Verfügung.

2.3.2 Onlineumfrage bei Landwirten und Landwirtinnen

Zusätzliche Erkenntnisse zum tatsächlichen Bedarf bzw. der tatsächlichen Verwendung von (eigenem) Holz und bestimmter Baumarten bzw. Holzsortimente sowie zum Bau selbst wurden mithilfe einer bundesweiten standardisierten Online-Umfrage bei Landwirtinnen und Landwirten mit Holzbauerfahrung generiert (Abbildung 7). Der Fragebogen beinhaltet 27 Fragen mit offenen und geschlossenen sowie ordinal-, nominal- und intervallskalierten Antwortmöglichkeiten. Zur Optimierung des Fragebogens wurden ein Pretest online über die Fachzeitschrift top agrar online (www.topagrar.com) und schriftlich über das Testbetriebsnetz Kleinprivatwald der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (<https://www.lwf.bayern.de/waldbesitz-forstpolitik/beratung>) durchgeführt.

Der finale Fragebogen wurde über zwei verschiedene Umlaufkanäle an die Zielgruppe herangetragen. Zum einen über das Marktforschungsinstitut agri EXPERTS – Deutscher Landwirtschaftsverlag (DLV) GmbH (www.agri-experts.de) und zum anderen über persönliche Kontakte zu Stakeholdern der landwirtschaftlichen Bauberatung in Bayern. Die Befragung wurde zwischen Juli und September 2021 durchgeführt. Insgesamt nahmen 205 Teilnehmer:innen teil. Die Auswertung der Daten erfolgte mithilfe der Softwareprogramme Microsoft Excel 365 und RStudio 2022 in der Version 07.0-548.

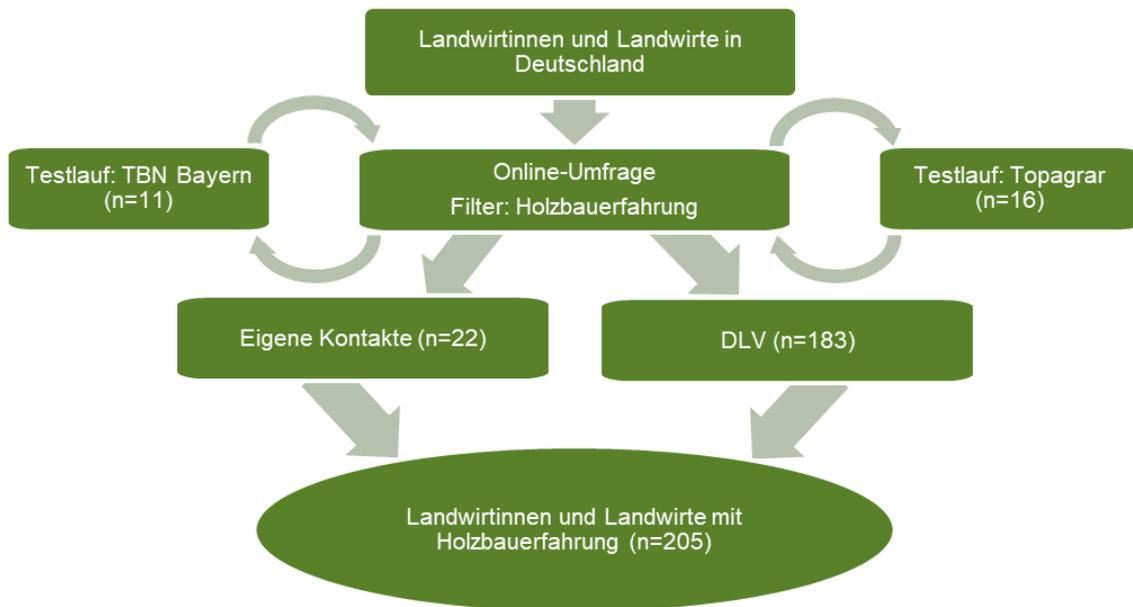


Abbildung 7: Vorgehensweise der Erstellung und Durchführung der Online-Umfrage
 TBN Bayern = Testbetriebsnetz Kleinprivatwald der Bayerischen Landesanstalt für Forstwirtschaft; DLV = agriExperts - Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH

2.3.3 Befragung von Landesvertretern im Arbeitskreis Bauen, Energie, Technik der Landwirtschaftskammer Berlin

Zur zusätzlichen Ermittlung eines generellen Stimmungsbildes zur erwarteten landwirtschaftlichen Bautätigkeit in den verschiedenen Bundesländern wurde in Zusammenarbeit mit der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) im Herbst 2020 eine Abfrage im Arbeitskreis Bauen, Energie, Technik der Landwirtschaftskammer Berlin gemacht. Dabei wurden die Ländervertreter in einem persönlichen Interview um ihre Einschätzung gebeten.

2.4 Analyse und Bewertung der (regionalen) Wertschöpfungsketten (AP 3.3)

2.4.1 Definition der Begriffe Wertschöpfungskette und Wertschöpfung

Entsprechend der Definition des Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik (2021) wird die Wertschöpfungskette definiert als eine geordnete Abfolge von Verfahrensschritten, welche die Stufen der Herstellung von Produkten darstellen. Jeder einzelne Verfahrensschritt verbraucht einerseits Rohstoffe und Energien und emittiert Stoffe, andererseits bietet er Beschäftigung und Einkommen und erzeugt Sach- und Geldwerte. Die Erzeugung von solchen Werten wird als Wertschöpfung bezeichnet.

Die Wertschöpfung dient der Analyse der Struktur und Bedeutung von Wirtschaftszweigen für die Volkswirtschaft. In den Wirtschaftswissenschaften wird die Wertschöpfung innerhalb der Methode der volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung berechnet (AK VGRDL 2021). Als Grundlage dieser Berechnungen dient das Europäische System

Volkswirtschaftlicher Gesamtrechnungen (ESVG) 2010, welches die Berechnungsmethode rechtsverbindlich festlegt und damit die Vergleichbarkeit innerhalb der Europäischen Union garantiert.

Die Bruttowertschöpfung berechnet sich laut AK VGRDL (2021) aus der Differenz des Produktionswerts und der Vorleistungen (Abbildung 8). Zieht man von der Bruttowertschöpfung die Abschreibungen ab, erhält man die Nettowertschöpfung. Als Berechnungsgrundlage in diesem Projekt wird die Bruttowertschöpfung als Indikator zur Berechnung der Wertschöpfung verwendet.

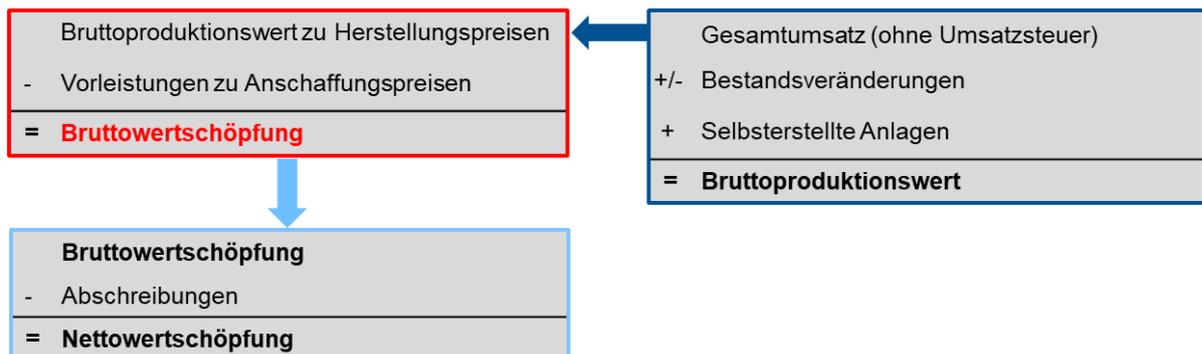


Abbildung 8: Eigene Darstellung der Berechnung der Brutto- bzw. Nettowertschöpfung nach AK VGRDL (2021)

Unter Vorleistung werden die folgenden Werte an Waren und Dienstleistung zusammengefasst (AK VGRDL 2021):

- Verbrauch an Rohstoffen und sonstigen Vorprodukten, Hilfs- und Betriebsstoffen
- Kosten für ausgeführte Lohnarbeiten durch andere Unternehmen
- Kosten für Leiharbeitnehmer
- Kosten für Reparaturen, Instandhaltungen, Installationen, Montagen u. ä.
- Mieten und Pachten
- Sonstige Kosten (abzüglich gezahlter Versicherungsprämien)

Nicht wertschöpfungswirksam nach AK VGRDL (2021) sind unentgeltliche Tätigkeiten, wie zum Beispiel Arbeiten im eigenen Haushalt oder ehrenamtliche Aktivitäten. Nichtunternehmerleistungen (Eigenleistungen, Nachbarschaftshilfe und Schwarzarbeit) hingegen erhöhen den Bruttoproduktionswert. Der Produktionswert müsste daher um eine Schätzung dieser sogenannten Nichtunternehmerleistungen erhöht werden. Da die häufig in der Baubranche eingesetzten Eigenleistungen des Landwirts jedoch im Einzelfall nur schwer quantifiziert werden können, fließen diese nicht direkt in die Berechnung der Bruttowertschöpfung des Holzbauprojektes ein, eine Einbringung von Eigenleistung wird aber gesondert ausgewiesen. Abbildung 9 zeigt die beispielhafte Wertschöpfungskette eines landwirtschaftlichen Holzbauprojektes. Die gesamte Wertschöpfung berechnet

sich über die Aufsummierung der Wertschöpfung aller beteiligten Akteure. Die Eigenleistung des landwirtschaftlichen Betriebes kann zwar nicht beziffert werden, erhöht jedoch qualitativ die regionale Wertschöpfung.

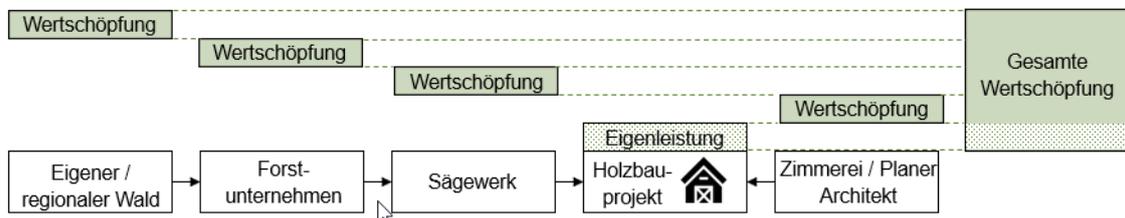


Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung einer regionalen Wertschöpfungskette eines landwirtschaftlichen Holzbauprojektes und der Zusammensetzung der gesamten Wertschöpfung über die beteiligten Akteure

2.4.2 Definition der Regionalität

Für den Begriff «Regionalität» im Sinne der Zugehörigkeit zu einer «Region» gibt es keine allgemeingültige Definition. Je nach Fachgebiet, Kontext und Ziel kann eine Region in Form eines gekennzeichneten räumlichen Bereichs) durch beispielsweise physikalische, natur-/landschaftsräumliche, historische oder politisch-administrative Grenzen definiert werden (Tauss 2011, Hensche et al. 2000, FiBL und MGH 2012).

Als pragmatische Ansatz wird in diesem Projekt eine Distanzangabe zur Definition der Region bzw. zur Definition, welche Akteure als «regional» eingestuft werden, verwendet. Dies ermöglicht die Gleichbehandlung mehrerer Holzbauprojekte in verschiedenen Regionen Deutschlands bei der ökonomischen, ökologischen und sozialen Bewertung. Heinze et al. (2014) fanden in einer Befragung von 187 Personen heraus, dass eine Distanz zwischen 51 und 100 km am häufigsten als «regional» wahrgenommen wird. Die Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestags (2016) geben für die Lebensmittelerzeugung eine Entfernung von 50 km bis 70 km an. In Anlehnung an diese Studien und in einem konservativen Ansatz werden in diesem Projekt die Akteure der Wertschöpfungskette dann als «regional» eingestuft, wenn die Distanz zum Holzbauprojekt unter oder gleich 50 km beträgt. Die Distanz entspricht der schnellsten Straßenverbindung, die mit einem Kraftfahrzeug zwischen Akteur und Holzbauprojekt zurückgelegt werden muss. Die Distanz wurde berechnet mithilfe des Online Kartendienstes Google Maps (www.google.de/maps/) von Google LLC.

2.4.3 Analyse von landwirtschaftlichen Holzbauprojekten und involvierten Akteuren der Holzertschöpfungskette

Als Vorarbeit zur Analyse der regionalen Wertschöpfungsketten für das landwirtschaftliche Bauen mit eigenem und regionalem Holz wurden im Rahmen einer Masterarbeit relevante Akteure in drei Beispielsregionen (Oberallgäu/Bayern; Vulkaneifel/Rheinland-Pfalz; Hochsauerland/Nordrhein-Westfalen) identifiziert und befragt (Dauermann 2020). Darauf aufbauend wurden beispielhafte landwirtschaftliche Bauprojekte für eine detailliertere Untersuchung ausfindig gemacht. Es wurde eine Internetrecherche durchge-

führt sowie deutschlandweit verschiedene Stakeholder wie beispielsweise Landesämter, Landesanstalten, Universitäten und andere Forschungseinrichtungen kontaktiert. Ein besonderer Fokus war die Integration von Betrieben, die mit eigenem Holz aus dem bäuerlichen Wald gebaut haben. Dadurch ergab sich ein Schwerpunkt mit Betrieben in Bayern. Durch die Unterstützung durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Dr. Steffen Pache), konnten in Sachsen weitere relevante Betriebe besichtigt und befragt werden (Tabelle 1). Aber auch in Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz fand sich je ein Betrieb, der für eine intensive Befragung zur Verfügung stand. Im Rahmen einer Projektarbeit im Modul „Aktuelle Entwicklungen in der Holzforschung“ am Lehrstuhl für Holzwissenschaft der Technischen Universität München wurden zwei weitere bayerische Betriebe besichtigt und befragt (Finnberg et al. 2023).

Für die Befragung wurden folgende Auswahlkriterien bei den Betrieben berücksichtigt:

- Errichtung eines landwirtschaftlichen Gebäudes in Holzbauweise in den letzten 10 Jahren oder aktuelle Umsetzung eines landwirtschaftlichen Holzbauprojektes (erste Schritte der Umsetzung mindestens bis zur Schnittholzbereitstellung sind bereits eingeleitet oder erfolgt),
- Bereitschaft zur Durchführung eines schriftlichen/telefonischen/persönlichen Interviews,
- Einverständnis der Veröffentlichung anonymisierter Daten im Rahmen des Projektes.

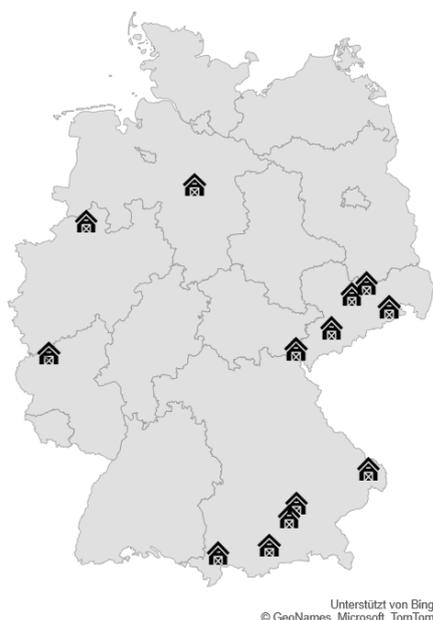


Abbildung 10: Räumliche Verteilung der befragten landwirtschaftlichen Betriebe

Die ausgewählten Betriebe wurden zunächst telefonisch kontaktiert, um die Bereitschaft zur Teilnahme an der Befragung abzufragen und gegebenenfalls gleich erste Informationen zu den Holzbauprojekten zu sammeln. Zur detaillierten Datenerhebung wurde anschließend eine auf den bereits eingeholten Informationen basierende individuelle Befragung entweder persönlich, per E-Mail oder telefonisch durchgeführt. Nach der ersten Auswertung der Befragung wurden gegebenenfalls Rückfragen oder zusätzliche Detailfragen per E-Mail oder Telefon geklärt.

Insgesamt konnten für die Befragung 13 Pilotbetriebe mit insgesamt 16 Holzbauprojekten gewonnen werden. Die räumliche Verteilung der Pilotbetriebe in Deutschland ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Nutzung der Daten musste an die Datenverfügbarkeit bzw. an die Bereitschaft der Verfügbarmachung von Daten betriebsspezifisch eingeschränkt werden.

Tabelle 1: Holzbauprojekte der befragten Betriebe und Nutzung der Daten innerhalb der Auswertung aufgrund der Datenqualität und Vollständigkeit

Betrieb Nr.	Bundesland	Holzbauprojekt	Holzbau Nr.	Fertigstellung	Erhobene Parameter			
					Erfolgsfaktoren Hemmnisse (qualitativ)	Akteure (qualitativ und quantitativ)	Transportdistanz (quantitativ)	Umsatz (quantitativ)
1	Bayern	Milchviehstall	1	2019	x	x	x	x
		Lager-/Maschinenhalle	2	2013	x	x	x	x
2	Bayern	Milchviehstall	3	2020	x	x	x	x
		Heuhalle	4	2020	x	x	x	x
3	Bayern	Kompoststall Milchviehstall	5	2021	x	x	x	x
4	Bayern	Milchviehstall	6	2022	x	x	x	x
5	Bayern	Kälberstall	7	2020	x	x	x	x
6	Niedersachsen	Schweinemaststall	8	2022	x	x	x	
		Auslauf Schweineestall	9	2021	x	x	x	
7	Sachsen	Milchviehstall	10	2022	x	x	x	
8	Sachsen	Kälberstall	11	2021	x	x	x	
9	Sachsen	Mutterkuhstall	12	2022	x	x	x	
10	Sachsen	Milchviehstall	13	2017	x	x	x	
11	Sachsen	Milchviehstall	14	2020	x	x	x	
12	Nordrhein-Westfalen	Strohlagerhalle	15	geplant 2023	x	x	x	
13	Rheinland-Pfalz	Lager-/Maschinenhalle	16	geplant 2023	x	x		

Zur Bestimmung von Einflussfaktoren auf das landwirtschaftliche Bauen mit Holz wurde nach den Gründen gefragt, warum (eigenes) Holz eingesetzt wurde. Es wurde gegebenenfalls gefragt, warum Landwirtinnen und Landwirte, die einen eigenen Wald besitzen, das eigenen Holz nicht für das Bauvorhaben verwendet haben. Alle Befragten wurden außerdem nach Erfolgsfaktoren und Hemmnissen bei der Realisierung der Holzbauvorhaben befragt. Alle direkt von den Landwirtinnen und Landwirten beauftragten Akteure wurden erfasst und anhand ihrer Distanz zum Bauprojekt in «regional» und «nicht-regional» unterteilt (siehe auch Kapitel 2.4.2). Involvierte Stallbauunternehmen wurden ebenfalls kontaktiert und deren Holzflüsse erfasst.

Zur Ableitung der quantitativen Wertschöpfung wurde der holzbezogene Gesamtumsatz (ohne Umsatzsteuer) der direkten Akteure abgefragt und entsprechend der Methodik in Kapitel 2.4.4 die regionale bzw. überregionale Wertschöpfung berechnet. Mit «holzbezogenem Umsatz» ist in diesem Fall gemeint, dass alle Umsätze, die explizit mit der

Realisierung einer Holzbaulösung verknüpft sind, in die Berechnung einfließen. Umsätze, die auch bei anderen Bauweisen angefallen wären, werden nicht betrachtet. Dazu zählen beispielsweise Aufwendungen für Bodenvorbereitungen, die Bodenplatte oder die technische Einrichtung (Elektrizität, Melkeinrichtung, Überwachung, etc.).

2.4.4 Effekte landwirtschaftlicher Holzbauprojekte in der Region

Zur quantitativen Analyse der Effekte beim landwirtschaftlichen Bauen mit Holz wurden ausgewählte ökonomische, ökologische und soziale Indikatoren aus den erfassten Parametern der untersuchten Holzbauprojekte ermittelt.

Ökonomischer Indikator: Wertschöpfung

Da es aufgrund datenschutzrechtlicher Gründe sowie Vorbehalte hinsichtlich monetärer Angaben zu Vorleistungen oder Gewinnmargen und Personalkosten schwierig war innerhalb der Befragung die Wertschöpfung aus Primärdaten zu berechnen, wurde ein vereinfachter Ansatz gewählt.

Zur Abschätzung der Wertschöpfung und Charakterisierung der Akteure der Wertschöpfungskette wird die jährlich vom Thünen-Institut veröffentlichte Clusterstatistik Forst und Holz verwendet (Thünen-Institut 2022). Diese statistischen Daten umfassen die Entwicklungen von Unternehmerzahlen, Umsatz, Beschäftigung und Bruttowertschöpfung im Cluster Forst und Holz in Deutschland und den einzelnen Bundesländern von 2000 bis 2019. Primärdaten sind unter anderem die Umsatzsteuerstatistiken und die Kostenstrukturstatistiken des Statistischen Bundesamtes. Die Unterteilung der Branchen steht im Einklang mit der Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008 (WZ 2008) des Statistischen Bundesamtes (Becher 2015, Destatis 2008). Tabelle 2 beschreibt die holzbaubezogenen Branchen im Cluster Forst und Holz entsprechend ihrer Zuordnung zu den Wirtschaftszweigen des Statistischen Bundesamtes.

Tabelle 2: Beschreibung und Klassifikation holzbaubezogener Branchen im Cluster Forst und Holz nach Becher (2015) und Destatis (2008)

Branche (Becher 2015)	Code (Destatis 2008)	Wirtschaftszweig (Destatis 2008)	Beschreibung (Destatis 2008)
Forstwirtschaft	02.10.0	Forstwirtschaft (ohne Holzeinschlag)	<ul style="list-style-type: none"> – Forstung von Stammholz: Erstaufforstung, Wiederaufforstung, Durchforstung und Waldpflege – Forstung von Niederwald, Papierholz, Feuerholz – Betrieb von Forstbaumschulen
	02.20.0	Holzeinschlag	<ul style="list-style-type: none"> – Erzeugung von Stammholz für die Holzverarbeitung – Erzeugung von Rohholz, z. B. Grubenholz, Zaunpfählen und Leitungsmasten – Sammeln und Erzeugung von Holz für die Energieerzeugung – Sammeln von Rückständen (z. B. Reisig, Schnitzeln u. ä. Brennholz), die beim Holzeinschlag anfallen, für die Energieerzeugung – Erzeugung von Holzkohle im Wald (durch traditionelle Verfahren)

	02.30.0	Sammeln von anderen wild wachsenden Erzeugnissen des Waldes	– Sammeln von wild wachsenden Erzeugnissen: Pilze, Trüffeln, Beeren, Nüsse, Balata und andere kautschukähnliche Gummiarten, Kork, Schellack und Harze, Balsame, Pflanzenhaar, Seegras, etc.
Forstwirtschaftliche Dienstleistungen	02.40.0	Erbringung von Dienstleistungen für Forstwirtschaft und Holzgewinnung	– Waldbestandsaufnahme – forstwirtschaftliche Beratungsleistungen – Holztaxierung – Waldbrandbekämpfung und -schutz – Schädlingsbekämpfung in der Forstwirtschaft – Dienstleistungen für die Holzgewinnung: – Transport von Stämmen im Wald
Sägeindustrie	16.10.0	Säge-, Hobel- und Holzimprägnierwerke	– Sägen, Hobeln und sonstiges maschinelles Bearbeiten von Holz – Säumen, Schälen und Messern von Rundholz – Herstellung von Eisenbahnschwellen aus Holz – Herstellung von Einzelteilen für Bodenbeläge aus Holz – Herstellung von Holzwolle, -mehl, -schnitzeln und -plättchen – Holz Trocknung – Imprägnieren und chemisches Behandeln von Holz mit Konservierungs- und anderen Stoffen
Holzwerkstoffindustrie	16.21.0	Herstellung von Furnier-, Sperrholz-, Holzfasern- und Holzspanplatten	– Herstellung von Furnieren, die ausreichend dünn sind zum Furnieren, zur Verarbeitung zu Sperrholz oder zu anderen Zwecken: – Herstellung von Sperrholz, Furnierplatten und ähnlichen laminierten Holzplatten und -blättern – Herstellung von OSB- und anderen Spanplatten – Herstellung von mitteldichten Faserplatten (MDF) und anderen Faserplatten – Herstellung von verdichtetem Holz – Herstellung von schichtverleimtem Holz, Pressschichtholz
Industrielles Holzbauwesen	16.22.0	Herstellung von Parketttafeln	– Herstellung von zu Dielen oder Tafeln zusammengesetzten Parkettbodenstäben, -stäbchen und -lamellen
	16.23.0	Herstellung von sonstigen Konstruktionsteilen, Fertigteilen, Ausbauteilen, und Fertigbauten aus Holz	– Herstellung von vorwiegend für den Bau bestimmten Konstruktionsteilen und Ausbauelementen aus Holz: Balken, Binder, Pfetten und Sparren, schichtverleimte und metallisch verbundene Dachstuhlkonstruktionen aus Holz, Türen, Fenster, u. a. – Herstellung vorgefertigter Gebäude oder Teile davon, vorwiegend aus Holz, z. B. Saunen – Herstellung von Mobilheimen vorwiegend aus Holz – Herstellung von Trennwänden aus Holz
Zimmerer	43.91.2	Zimmerei und Ingenieurholzprodukte	– Errichtung von Dachstühlen u. ä. Holzkonstruktionen
Holzfertigbau (ab 2009)	41.20.2	Errichtung von Fertigteilmbauten	– Errichtung von vorgefertigten Gebäuden (Fertigteilmbauten) aus selbst hergestellten oder fremd bezogenen Fertigteilmteilen auf der Baustelle

Die Angabe der regionalen bzw. überregionalen Bruttowertschöpfung beruht auf der Berechnung aus dem sogenannten Wertschöpfungsprozent und dem branchenspezifischen Umsatz, das heißt dem Anteil der Bruttowertschöpfung am Umsatz. Dieses branchenspezifische Wertschöpfungsprozent wurde für die Clusterstatistik des Thünen-Instituts in einem Top-Down Ansatz von Deutschland auf die einzelnen Bundesländer übertragen (Thünen-Institut 2022).

Zur vereinfachten Berechnung der Wertschöpfung konkreter Akteure in den untersuchten Pilotprojekten wurde dieses Wertschöpfungsprozent verwendet, um die jeweilige Wertschöpfung bestimmter Akteure abzuschätzen. Dazu wurden die Akteure der entsprechenden Branche zugewiesen und die Wertschöpfung mithilfe von Formel 1 berechnet. Da die Daten für das Wertschöpfungsprozent der Clusterstatistik des Thünen-Instituts nur bis zum Jahr 2019 reichen, wurden für Fertigstellungen nach 2019 immer das Wertschöpfungsprozent von 2019 verwendet. Teilweise sind aus datenschutzrechtlichen Gründen in einzelnen Jahren keine Daten veröffentlicht, in diesen Fällen wird das Wertschöpfungsprozent des vorherigen Jahres verwendet.

$$BWS (Akteur) = WP (Branche, Jahr) * Umsatz (Akteur) \quad \text{Formel 1}$$

BWS (Akteur)	Bruttowertschöpfung des Akteurs im Rahmen der Wertschöpfungskette des Holzbauprojektes
WP (Branche, Jahr)	Wertschöpfungsprozent der dem Akteur zugeordneten Branche im Jahr der Erbringung der Leistung im Rahmen der Wertschöpfungskette des Holzbauprojektes
Umsatz (Akteur)	Umsatz des Akteurs bezogen auf die im Pilotprojekt erbrachte Leistung im Rahmen der Wertschöpfungskette des Holzbauprojektes

Sozialer Indikator: Anzahl und Art involvierter Akteure in der Region

Als sozialer Indikator wird die Anzahl und Art direkt am Holzbauprojekt beteiligter Akteure der Holzertschöpfungskette betrachtet. Es werden Akteure folgender Art berücksichtigt:

- Forstunternehmen / Forstdienstleister
- Sägewerke / Hobelwerke (mobil / stationär)
- Transportunternehmen
- Zimmereien
- Rundholzverkäufer (z.B. WBV, regionaler Waldbesitzer)
- (Stall-)Baufirma (Generalunternehmen)

Reine Dienstleister und produzierende oder verkaufende Unternehmen werden dabei gleichberechtigt gezählt.

Ökologischer Indikator: Transportaufwand

Um regionale und überregionale Wertschöpfungsketten beim landwirtschaftlichen Holzbau hinsichtlich ökologischer Effekte beurteilen zu können, wurde als Indikator der Transportaufwand in tkm der direkten holzliefernden Akteure verwendet. Die Treibhausgasemissionen können in bekannten LCA-Datenbanken (z.B. Ecoinvent Datenbank, www.ecoinvent.org oder Gabi Datenbank, www.sphera.com) in kg CO₂.eq je tkm ausgegeben werden und korrelieren somit direkt mit dem Transportaufwand.

Zur besseren Vergleichbarkeit von Holzbauprojekten mit unterschiedlichen Holzmen gen wurde der Transportaufwand für die durchschnittliche Transportdistanz aller holzliefernden bzw. holztransportierenden Akteure für 1t Holz angegeben. Die Auswirkung der Verwendung unterschiedlicher Transportfahrzeuge kann aufgrund fehlender Daten nicht dargestellt werden.

2.5 Ressourcenpotenziale, Optimierungsmöglichkeiten und Umsetzbarkeit von landwirtschaftlichen Holzbauprojekten auf regionaler Ebene (AP3.4)

Die Ableitung von Ressourcenpotenzialen, Optimierungsmöglichkeiten und Umsetzbarkeit von landwirtschaftlichen Holzbauprojekten auf regionaler Ebene stellt die Synthese der Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen AP3.1, AP3.2 und AP3.3 dar.

3 ERGEBNISSE

3.1 Charakterisierung landwirtschaftlicher Betriebe (AP3.1)

Zur Charakterisierung landwirtschaftlicher Betriebe werden einerseits regionalspezifische Unterschiede in den Betriebsverhältnissen deutscher Landwirtinnen und Landwirte und andererseits Charakteristika von Landwirtinnen und Landwirten mit Holzbauerfahrung herausgearbeitet.

3.1.1 Regionalspezifische Unterschiede landwirtschaftlicher Betriebsverhältnisse

Im Norden, Westen und Süden Deutschlands gibt es tendenziell eine hohe Anzahl kleinerer Betriebe mit geringeren Viehbeständen (Abbildung 11 und Abbildung 12). Die durchschnittliche landwirtschaftliche Fläche je Betrieb liegt zwischen 38 ha (Bayern) und 89 ha (Schleswig-Holstein). In den östlichen Bundesländern gibt es weniger, aber dafür größere landwirtschaftliche Betriebe mit durchschnittlich zwischen 153 ha (Sachsen) und 301 ha (Mecklenburg-Vorpommern) Betriebsfläche. Entsprechend variabel sind die Anforderungen an den Bau landwirtschaftlicher Gebäude und an die Funktionalität der (regionalen) Wertschöpfungskette (Destatis 2021b, 2021c, 2021f).

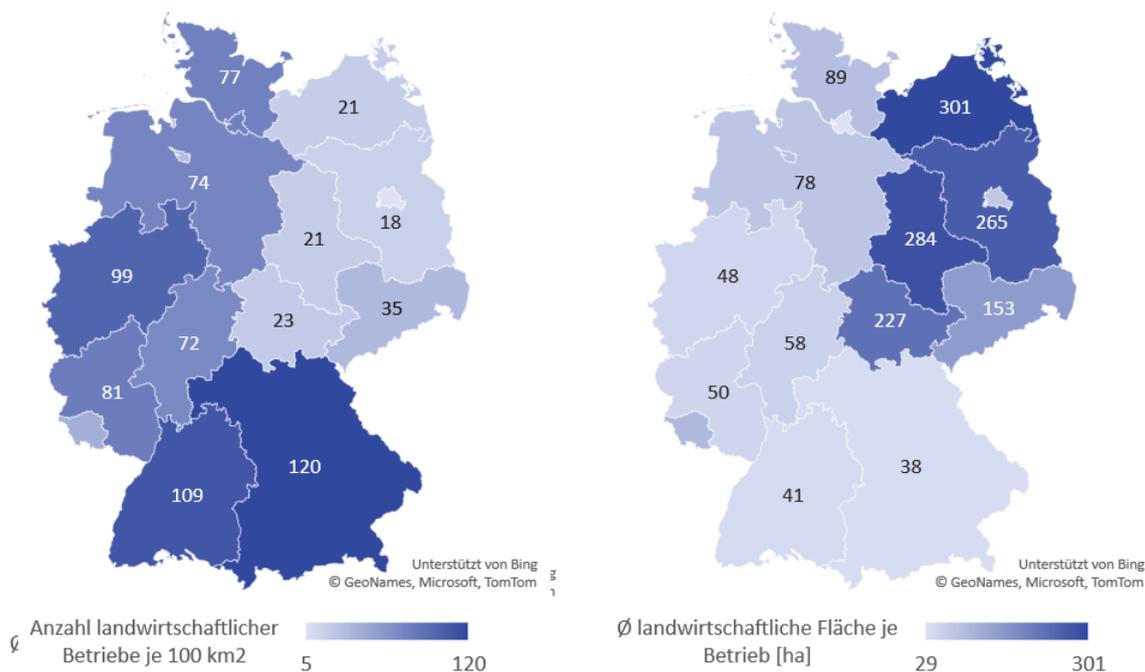


Abbildung 11: Anzahl landwirtschaftlicher Betrieb je 100 km² (links) und durchschnittliche landwirtschaftliche Betriebsfläche je Betrieb (rechts) im Jahr 2020 (Destatis 2021b, 2021c, 2021f)

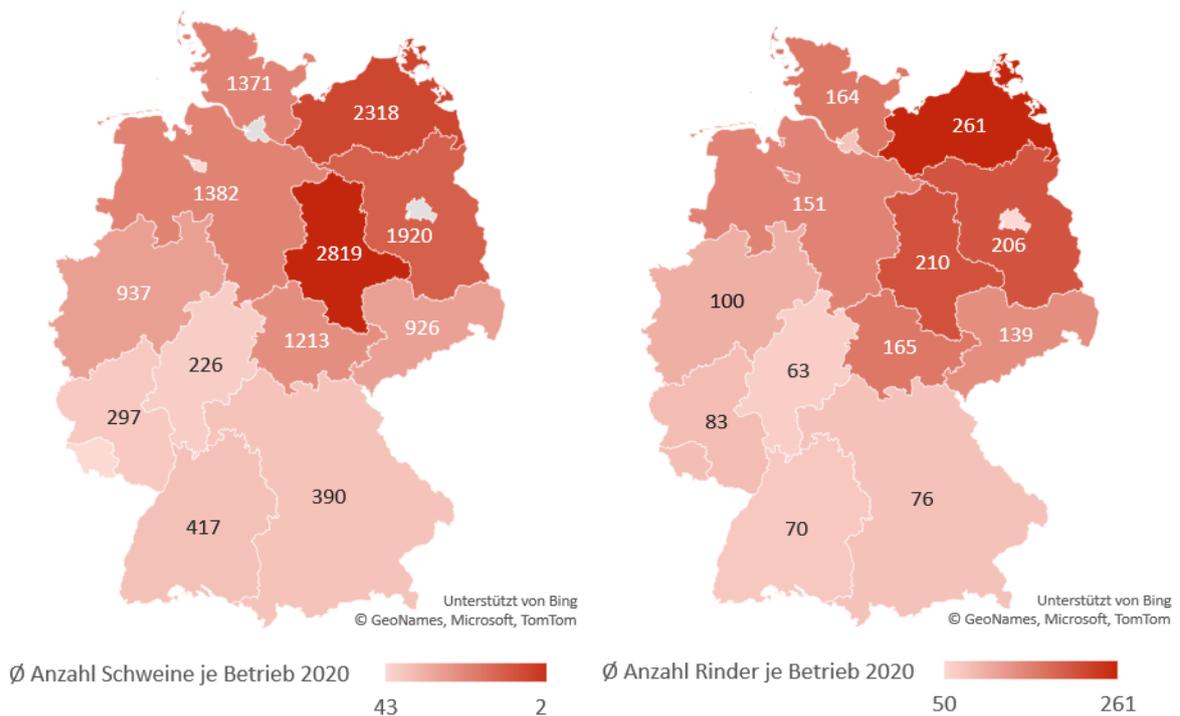


Abbildung 12: Durchschnittliche Anzahl an Schweinen je Schweinehaltungsbetriebe (links) und durchschnittliche Anzahl an Rindern je Rinderhaltungsbetrieb (rechts) im Jahr 2020 (Destatis 2021b, 2021c, 2021f)

3.1.2 Analyse landwirtschaftlicher Betriebe mit Holzbauerfahrung

Bei der online-Befragung zur Analyse der Holzbauerfahrung landwirtschaftlicher Betriebe haben 205 Landwirtinnen und Landwirte mit Holzbauerfahrung online teilgenommen. Knapp die Hälfte der Teilnehmer:innen (49 %) gab an mit eigenem Holz gebaut zu haben (Abbildung 13). Der Großteil aller Teilnehmer:innen stammt aus Bayern. Die überwiegende Mehrheit der Landwirtinnen und Landwirte, die mit eigenem Holz gebaut haben, stammt ebenfalls aus Bayern (Abbildung 13).

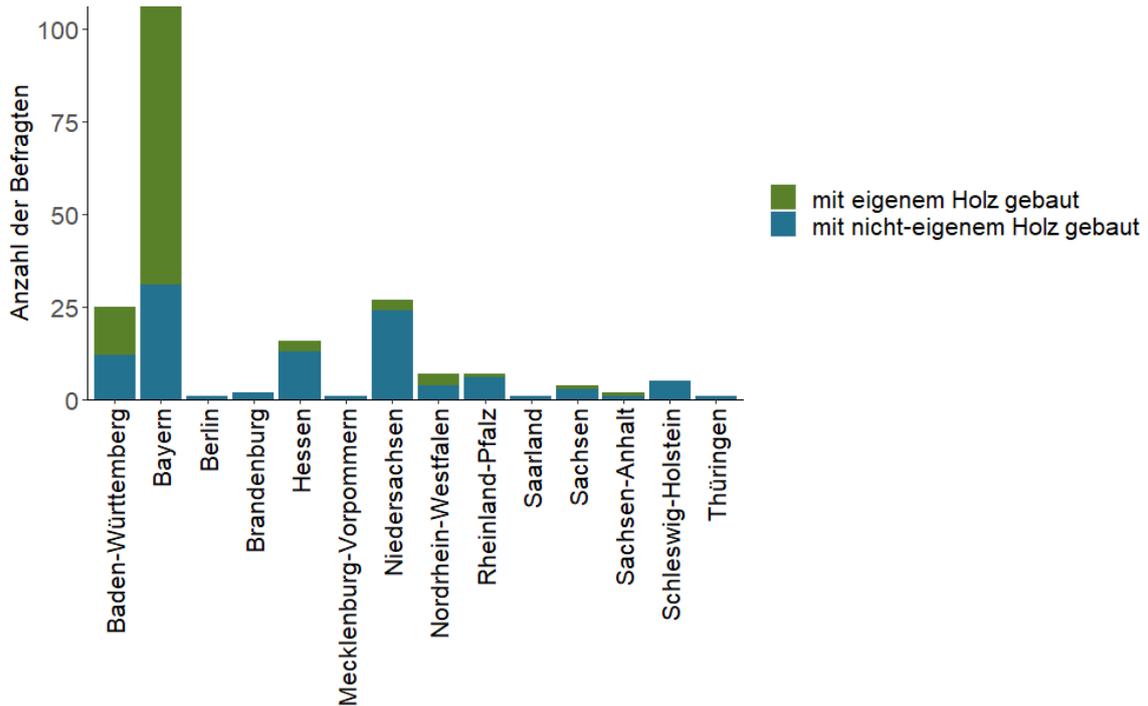


Abbildung 13: Anzahl der teilnehmenden Landwirtinnen und Landwirte der Online-Umfrage, welche mit eigenem bzw. nicht eigenem Holz gebaut haben, je Bundesland

Viele der befragten Landwirtinnen und Landwirte (35%) haben bereits Holzbauerfahrung aus der Umsetzung von mehr als drei, 37% von zwei bis drei Gebäuden und 28% von einem Gebäude. Die am häufigsten genannten Gebäudetypen sind Scheunen, Lagerhallen und Maschinenhallen (70% der Nennungen). Ställe wurden weniger häufig gebaut (14 % der Nennungen).

Knapp 80% der Teilnehmer:innen gaben an eigenen Wald zu besitzen, 62% von ihnen haben das eigene Holz mindestens schon einmal für betriebliche Bauprojekte genutzt (Abbildung 14). Insgesamt gibt es damit 100 Teilnehmer:innen, die Bauernfahrung mit eigenem Holz besitzen und 105 Teilnehmer:innen, die mit zugekauftem Holz gebaut haben. Grundsätzlich besteht eine sehr hohe Zufriedenheit hinsichtlich der Holzbauerfahrung. Landwirtinnen und Landwirte, die mit eigenem Holz gebaut haben, beurteilen ihre Erfahrungen positiver als solche, die mit zugekauftem Holz gebaut haben.

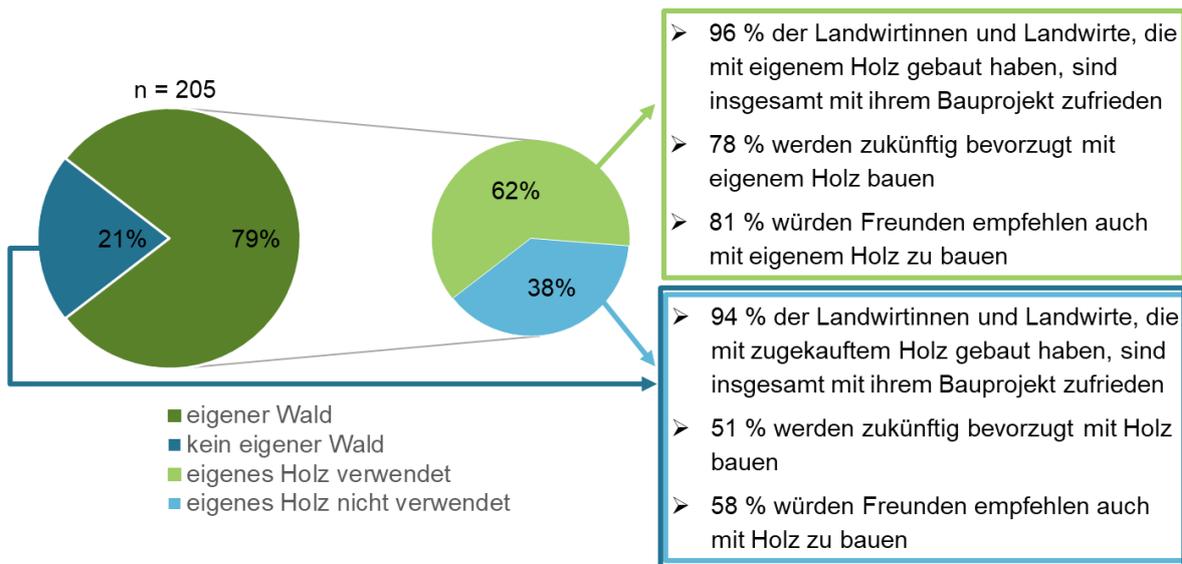


Abbildung 14: Anteil der teilnehmenden Landwirtinnen und Landwirte nach Waldbesitz und der Verwendung von eigenem Holz und Gesamtbeurteilung der landwirtschaftlichen Holzbauprojekte von denjenigen, die mit eigenem Holz gebaut haben.

Hinsichtlich der zukünftig geplanten landwirtschaftlichen Bautätigkeit gaben 43% der Befragten an, innerhalb der nächsten fünf Jahre weitere Bautätigkeiten zu planen. 28% planen in diesem Zeitraum keine weiteren Bautätigkeiten und weitere 28% sind unentschieden.

Die Abfrage unter Ländervertretern im Arbeitskreis Bauen, Energie, Technik der Landwirtschaftskammer zur Ermittlung eines generellen Stimmungsbildes zur erwarteten landwirtschaftlichen Bautätigkeit zeigt eine eher verhalten-pessimistische Sicht. Aufgrund restriktiver Entwicklungen in der Agrarpolitik (Glyphosat-Verbot, strengere Auflagen im Gewässerschutz und in der Düngeverordnung, neue Verordnungen zum Insektenschutz) und unsicherer Marktentwicklungen (u.a. starker Anstieg beim Konsum von Lebensmitteln aus zertifiziert umweltverträglicher Erzeugung („Biosiegel“), Milchpreisverfall im konventionellen Sektor) erwarten die Ländervertreter für die nächsten Jahre eine äußerst niedrige Investitionsbereitschaft und Bautätigkeit der landwirtschaftlichen Betriebe. Es gibt jedoch Unterschiede zwischen den Bundesländern: In Niedersachsen wird das Stimmungsbild mit tiefschwarzen Farben gezeichnet, in Bayern, insbesondere in Südbayern, liegen derzeit zahlreiche Anträge auf Baugenehmigung großer landwirtschaftlicher Gebäude an den Landratsämtern vor. Die Abfrage zeigt, dass eine vertiefte Analyse nur auf regionaler Ebene anhand einiger weniger Fallbeispiele möglich ist.

3.2 Ermittlung des Ressourcenpotenzials und der Ressourcenverwendung (AP3.2)

Zur Erfassung des Ressourcenpotenzials wurden statistische Daten ausgewertet und miteinander verschnitten. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf dem bäuerlichen Wald, da Landwirtinnen und Landwirte traditionell sehr häufig im Besitz von eigenem Wald sind und damit die Möglichkeit besteht, das eigene Holz im Rahmen regionaler Kreisläufe als Baumaterial zu nutzen.

3.2.1 Waldbesitzverhältnisse

Etwa 43% der deutschen Wälder sind in Privatbesitz. Ein Drittel (32%) davon ist im Besitz landwirtschaftlicher Betriebe. Der bäuerliche Waldbesitz entspricht damit knapp einem Siebtel (14%) der gesamten Waldfläche Deutschlands (Abbildung 15). Der Anteil an bäuerlichem Privatwald in den einzelnen Bundesländern schwankt zwischen 31% (Schleswig-Holstein: 51 Tsd. ha) und 2% (Saarland: 1 Tsd. ha). Die größten bäuerlichen Waldflächen finden sich in Bayern mit 550 Tsd. ha (22% Anteil) und Niedersachsen mit 174 Tsd. ha (19% Anteil) (Abbildung 16) (Destatis 2021c, 2021d, 2022c). In Bayern steht aufgrund der Größe des Bundeslandes und des allgemein sehr hohen Waldaufkommens in Kombination mit einem hohen Anteil an bäuerlichem Besitz 39% des gesamten deutschen bäuerlichen Waldes.

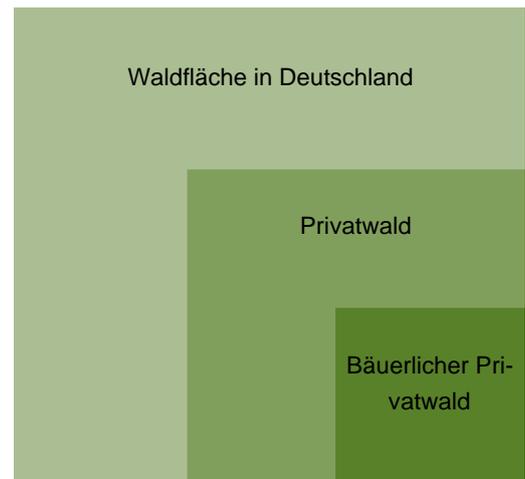


Abbildung 15: Waldbesitz in Deutschland (Destatis 2022, 2021c)

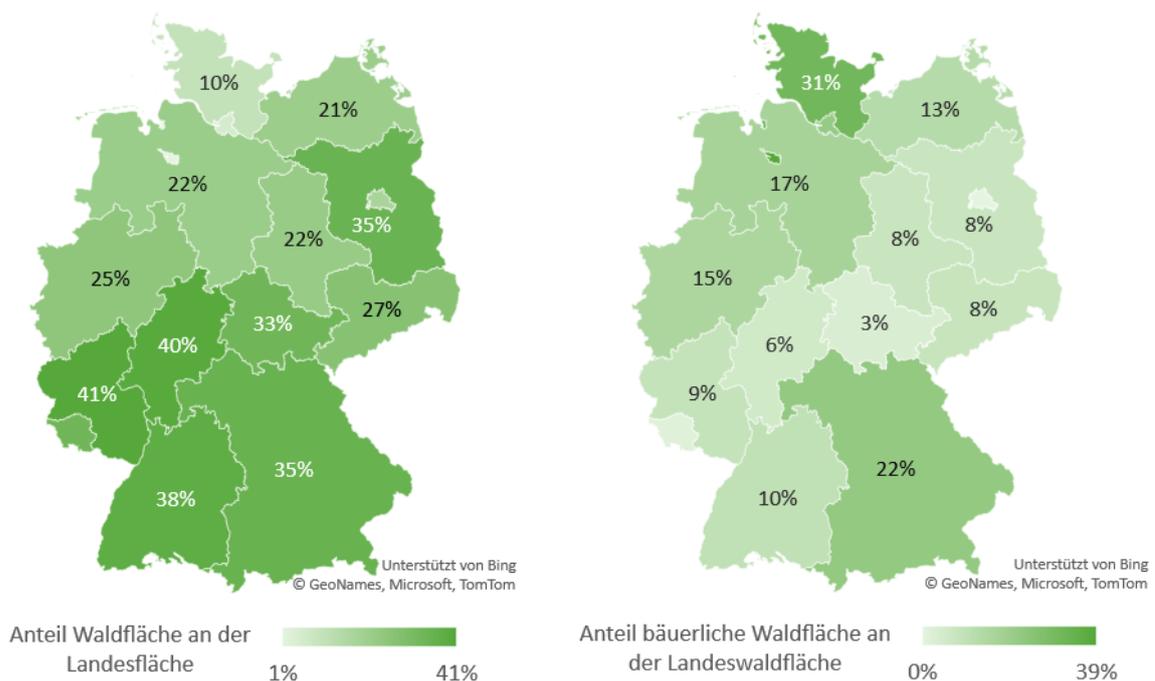


Abbildung 16 Anteil der Waldfläche an der Fläche des jeweiligen Bundeslandes (links) und Anteil der bäuerlichen Waldfläche an der Waldfläche des jeweiligen Bundeslandes (rechts) im Jahr 2020 (Destatis 2021b, 2021c)

Im Jahr 2020 gab es in Deutschland 262.776 Agrarbetriebe, 139.149 davon besaßen Waldflächen. Deutschlandweit besitzen damit rund 53% der landwirtschaftlichen Betriebe eigene Waldflächen (Destatis 2021d). Abhängig von der landwirtschaftlichen Betriebsform und der Region schwankt die Waldbesitzgröße in den einzelnen Bundesländern zwischen 6 ha und 36 ha (Ø 10 ha) (Destatis 2021c).

In Bayern und Baden-Württemberg gibt es verhältnismäßig viele Landwirtinnen und Landwirte mit durchschnittlich eher kleinerem Waldbesitz (Ø 6 - 8 ha). In Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und den Stadtstaaten besitzt eine geringere Anzahl an Landwirtinnen und Landwirten deutlich größere Waldflächen (Ø 25 - 36 ha) (Abbildung 17).

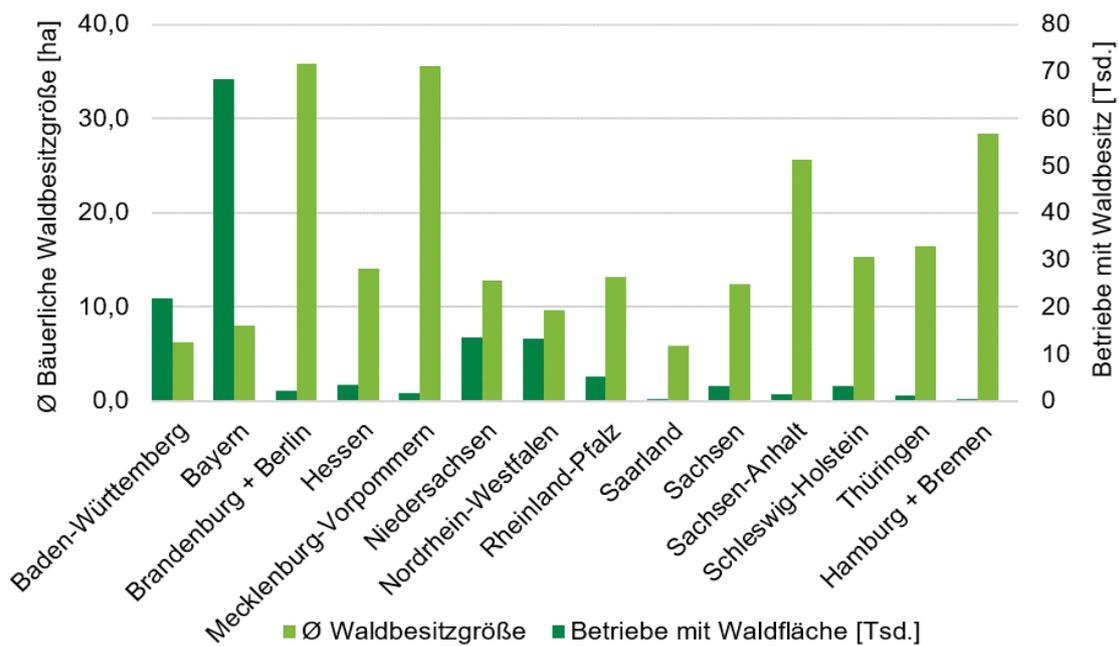


Abbildung 17: Durchschnittliche bäuerliche Waldbesitzgröße und Anzahl an landwirtschaftlichen Betrieben mit Waldfläche nach Bundesländern im Jahr 2020 (Destatis 2021c)

Die Waldbesitzgröße ist auch abhängig von der Betriebsform. Aus den Buchführungsergebnissen des BMEL-Testbetriebsnetzes Landwirtschaft für Haupterwerbsbetriebe geht hervor, dass in den meisten Bundesländern Milchviehbetriebe die größten Waldflächen besitzen (Abbildung 18)(BMEL 2022)(BMEL 2022) . Ausnahmen sind jedoch insbesondere Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen, in denen Ackerbaubetriebe mit Abstand die größten Waldflächen besitzen. Die großen Unterschiede in der Waldbesitzgröße nach Region und Betriebsform sind vermutlich auf naturräumliche Voraussetzungen und kulturgeschichtliche Hintergründe zurückzuführen.

Bundesweit haben mehr als ein Drittel der landwirtschaftlichen Betriebe weniger als 2 ha eigenen Wald zur Verfügung. 92% der landwirtschaftlichen Betriebe besitzen Waldflächen unter 20 ha (Abbildung 19). Während 62% der Landwirtinnen und Landwirte Kleinstprivatwaldflächen der Größenordnung < 5 ha mit einem Anteil von insgesamt 12% des bäuerlichen Waldes besitzen, sind 35% der Waldflächen im Besitz von weniger als 1% der Landwirtinnen und Landwirte in der Größenordnung ≥ 100 ha. Diese Waldbesitzgrößenverteilung hat sich innerhalb der vergangenen 10 Jahre dahingehend verändert, dass es Waldflächenverluste von 0,4 bis 12 % in allen Größenklassen bis 50 ha gab. Innerhalb der Größenklasse 50 bis 100 ha gab es Waldflächenzugewinne von einem Prozent und in der Größenklasse ≥ 100 ha Zugewinne von 22% (Destatis 2011, 2021c, 2017).

Im Kleinstprivatwald wurde entsprechend den Daten der BWI zwischen 2002 und 2012 nur 70% des Holzuwachses abgeschöpft, die Holznutzung lag ein Fünftel unter dem Bundesdurchschnitt (Hennig and Petra 2018).

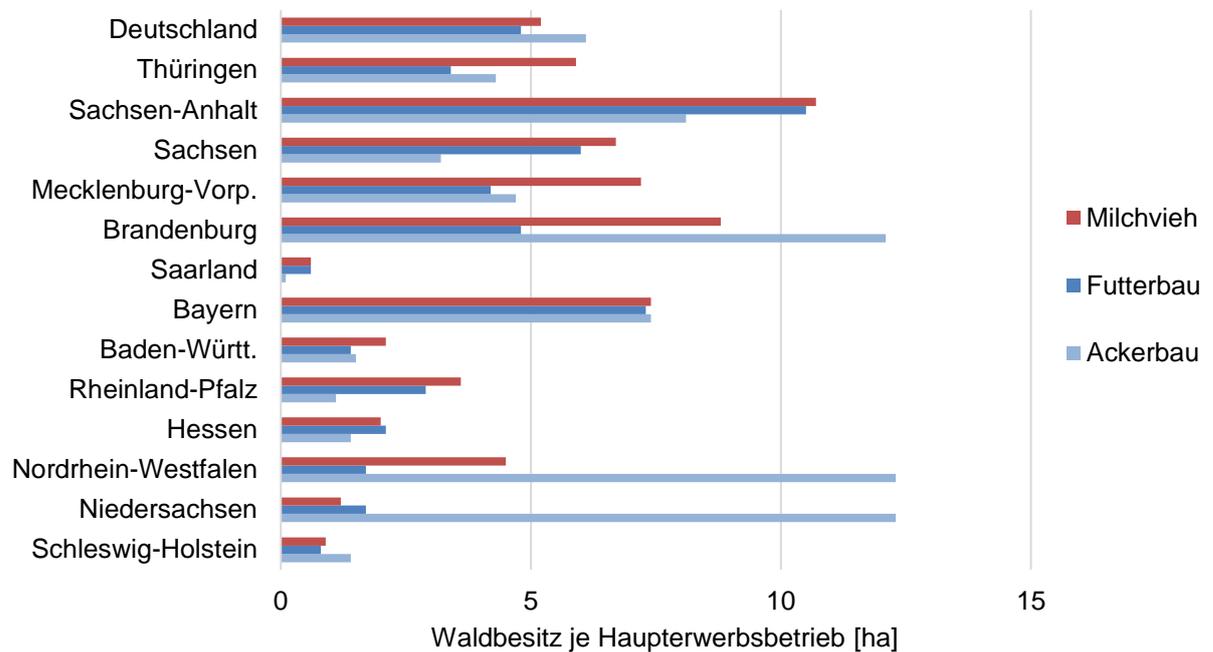


Abbildung 18: Durchschnittliche Waldbesitzgröße der Haupterwerbsbetriebe des BMEL-Testbetriebsnetzes Landwirtschaft nach Bundesland und Betriebsform (BMEL 2022)

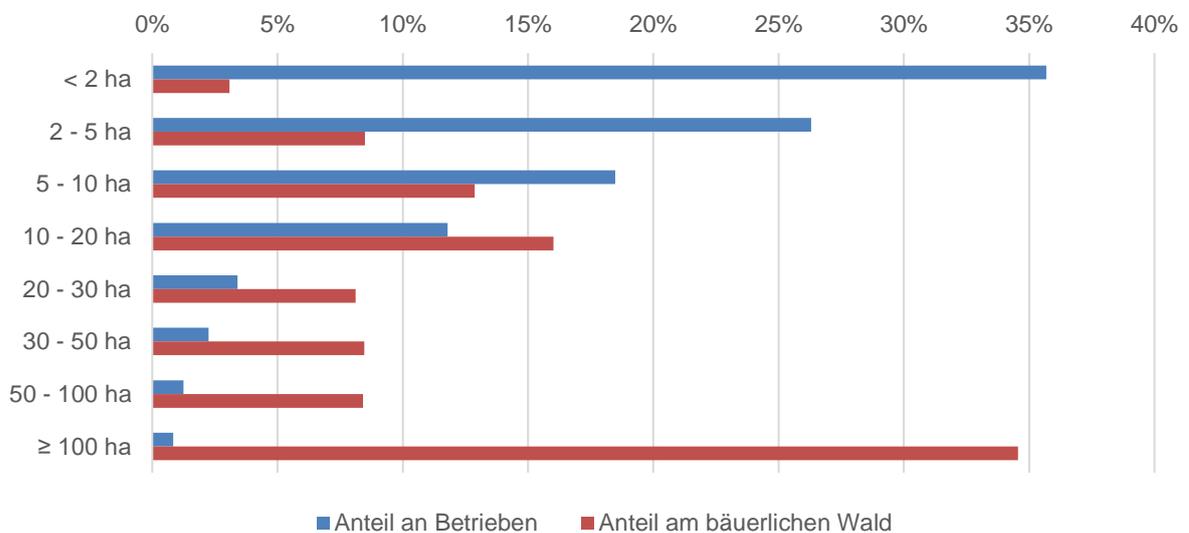


Abbildung 19: Relative Anteile landwirtschaftlicher Betriebe und bäuerlicher Wald in Abhängigkeit der Waldbesitzgrößenklasse (Destatis 2021d, 2021c)

3.2.2 Holzvorräte unterschiedlicher Baumarten im Privatwald

Die Holzvorräte verschiedener Baumarten im Privatwald unterscheiden sich regional-spezifisch (Abbildung 20). Im Norden und Osten Deutschlands dominiert die Kiefer. Im Süden, Westen und in der Mitte dominiert die Fichte und es gibt verhältnismäßig hohe Buchenvorräte. Potenzial für den landwirtschaftlichen Holzbau bietet auch der hohe Tannenanteil in Baden-Württemberg sowie der hohe Eichenanteil in Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen. Die Lärche erreicht in Niedersachsen und Nordrhein-Westfalen nennenswerte Anteile (BWI 2012).



Abbildung 20: Holzvorräte in m³ Erntefestmeter ohne Rinde ausgewählter Baumarten im Privatwald (BWI 2012)

Die Größe der Kreisdiagramme spiegelt den relativen Anteil am Gesamtvorrat je Bundesland bezogen auf die ausgewählten Baumarten wider

3.2.3 Verwendung und Beurteilung der Eignung bestimmter Holzarten beim landwirtschaftlichen Bauen

Die Ergebnisse der Online-Umfrage zeigen, dass die im landwirtschaftlichen Bauen verwendete Hauptbaumart die Fichte ist, unabhängig davon, ob eigenes oder zugekauftes Holz verwendet wird (Abbildung 21). Schadholzsortimente (Frisches und gelagertes Käferholz) stammen bis auf wenige Ausnahmen aus dem eigenen Wald. Die am zweit- und dritthäufigsten eingesetzten Baumarten sind Kiefer und Lärche, die Kiefer öfter bei eigenem Holz, die Lärche hingegen öfter bei zugekauftem Holz. Weißtanne, Douglasie und Eiche spielen nur untergeordnete Rollen. Auffällig ist, dass Douglasie und auch Eiche für das landwirtschaftliche Bauen überwiegend zugekauft werden, Weißtanne und andere Holzarten (Buche, Erle und Esche) hingegen nur als eigenes Holz verwendet werden.

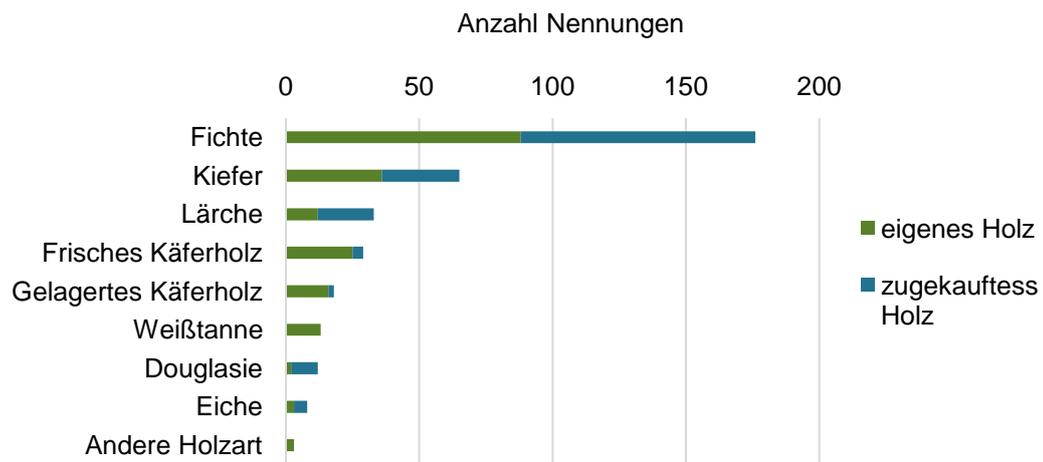


Abbildung 21: Anzahl der Nennungen verwendeter Baumarten und -sortimente beim größten landwirtschaftlichen Holzbauprojekt aus eigenem (n=100) und zugekauftem (n=105) Holz bei der Online-Umfrage

Alle Landwirtinnen und Landwirte beurteilen die Eignung unterschiedlicher Baumarten für konstruktive und nicht-konstruktive Zwecke sehr ähnlich (Abbildung 22). Nadelbäume, insbesondere Fichte, aber auch Eiche und Robinie werden mehrheitlich als geeignet, Buche und Pappel hingegen häufiger als ungeeignet bezeichnet. Auch Käferholz wird für konstruktive, wie nicht-konstruktive Zwecke deutlich häufiger als geeignet als ungeeignet bezeichnet. Auffällig viele Enthaltungen bei der Eignungsbeurteilung sind bei Robinie, Buche und gelagertem Käferholz zu finden. Für konstruktive Zwecke gibt es zudem hohe Meinungsenthaltungen bei frischem Käferholz und der Weißtanne. In der Online-Umfrage fielen bei 81% der Landwirtinnen und Landwirte mit eigenem Wald in den letzten 5 Jahren durchschnittlich 183 fm an Käferholz an (Median: 50 fm). Bezogen auf die Waldbesitzgröße entspricht das durchschnittliche 22 fm Käferholz je ha Wald in den letzten 5 Jahren. 15% der Befragten machten keine Angaben zum Käferholzanfall, und nur 4% gaben an, kein Käferholz gehabt zu haben.

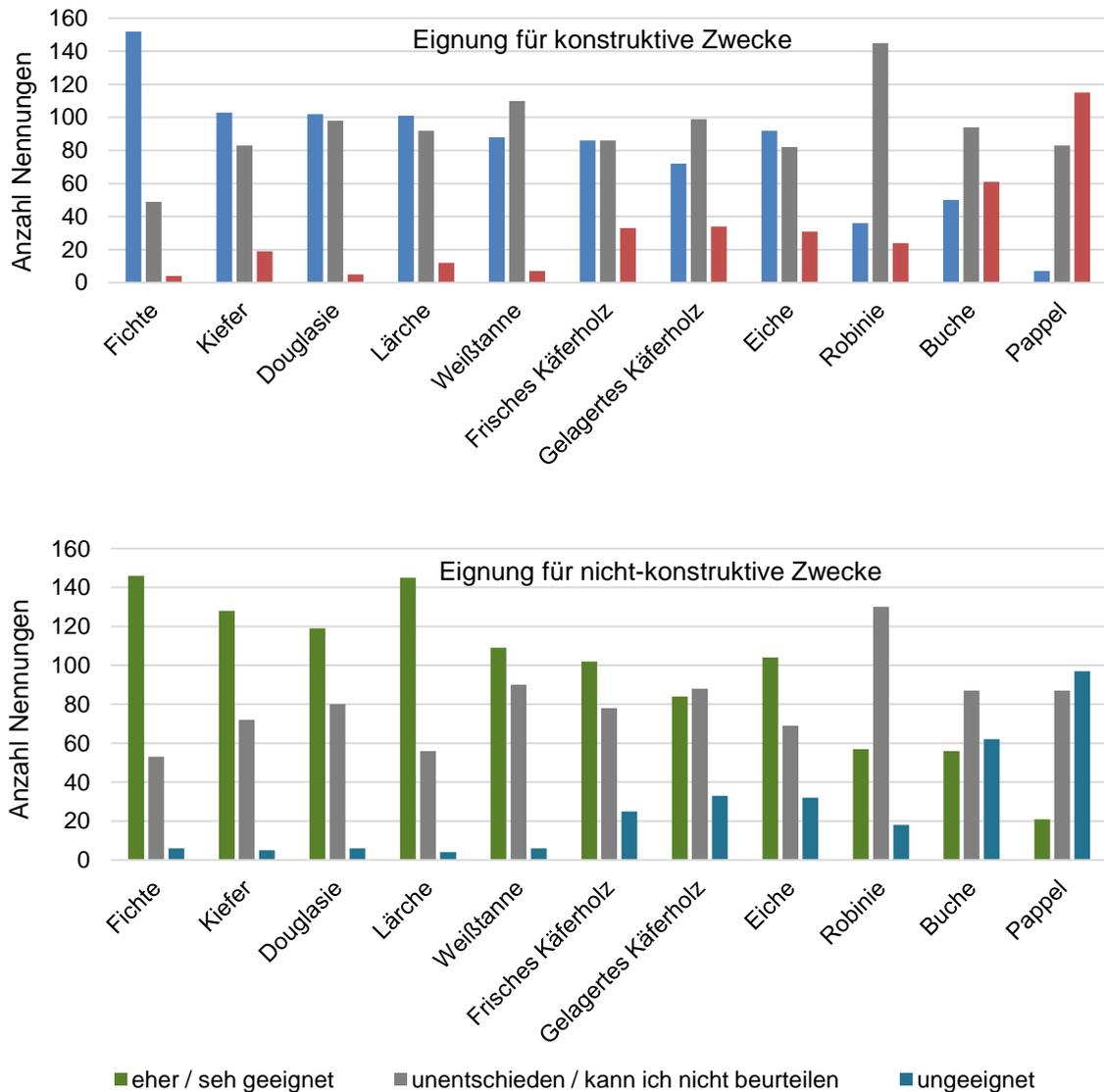


Abbildung 22: Beurteilung der Eignung unterschiedlicher Baumarten und -sortimente für konstruktive (oben) und nicht-konstruktive (unten) Einsatzzwecke bei der Online-Umfrage

3.2.4 Holzverwendung in den ausgewählten Holzbauprojekten

Tabelle 3 zeigt die Verwendung der jeweiligen Holzart für die untersuchten Holzbauprojekte und ob es sich dabei ganz oder teilweise um Schadholz gehandelt hat.

Im Einklang mit den Ergebnissen der Online-Umfrage (Kapitel 3.2.3) ist auch hier die dominierende Baumart die Fichte. Danach kommen ebenso Lärche und Kiefer, wobei die Lärche häufiger als die Kiefer eingesetzt wurde.

Auffällig ist, dass mit einer Ausnahme (Bauprojekt Nr. 6) in allen Projekten, bei denen auch eigenes oder regionales Holz eingesetzt wurde, Käferholz oder sonstiges Schad-

holz verwendet wurde. Begründet wird der Einsatz des Käferholzes damit, dass die eigene Verwendung eine kosteneffiziente und werterhaltende Möglichkeit der Holzverwertung darstellt. Bei einem alternativen Verkauf der eigenen Kalamitäten hätte man finanzielle Einbußen aufgrund von geringeren Rundholzpreisen hinnehmen müssen.

Tabelle 3: Beschreibung der 16 Holzbauprojekte hinsichtlich Holzbauprojekt, Nutzung von eigenem / regionalem Holz und verwendeter Holzart

Be- trieb Nr.	Bau- pro- jekt Nr.	Holzbauprojekt	Einsatz von ei- genem ¹ /regio- nalem ² Holz	Eingesetzte Holzart *Einsatz nur für Schalung	Einsatz von Käferholz /Schadholz
1	1	Milchviehstall	nein	Fichte, Lärche*	nein
	2	Lager-/Maschinen- halle	ja ¹	Fichte	ja
2	3	Milchviehstall	ja ²	Fichte	ja
	4	Heuhalle	ja ¹	Fichte	ja
3	5	Milchviehstall	ja ¹	Fichte, Lärche*	ja
4	6	Kompoststall Milchvieh	ja ¹	Fichte, Lärche*	nein
5	7	Kälberstall	ja ¹	Fichte	ja
?	8	Schweinemaststall	nein	Fichte, Lärche*	nein
6	9	Auslauf Schweine- stall	ja ¹	Kiefer, Fichte*	ja
7	10	Milchviehstall	ja ¹	Fichte, Kiefer	ja
8	11	Kälberstall	nein	Fichte	nein
9	12	Mutterkuhstall	nein	Fichte	nein
10	13	Milchviehstall	nein	Fichte	nein
11	14	Milchviehstall	nein	Fichte	nein
12	15	Strohlagerhalle	ja ¹	Fichte	ja
13	16	Lager-/Maschinen- halle	ja ¹	Fichte	ja

3.3 Analyse und Bewertung der (regionalen) Wertschöpfungsketten (AP3.3)

Zur Bewertung der Wertschöpfungsketten wird einerseits die regionalspezifische Verfügbarkeit relevanter Akteure herausgearbeitet und andererseits aus den Umfrageergebnissen und der Analyse landwirtschaftlicher Holzbauprojekte wichtige Einflussfaktoren bei der Umsetzung von landwirtschaftlichen Holzbauprojekten identifiziert.

3.3.1 Verfügbarkeit von Akteurinnen und Akteuren der Wertschöpfungskette Holz

Aus der jährlich vom Thünen-Institut veröffentlichten Clusterstatistik Forst und Holz (Thünen-Institut 2022) wurden unter anderem die Entwicklungen von Unternehmerzahlen, Umsatz und Beschäftigung der Branchen Forstwirtschaft, Sägeindustrie, Zimmerer,

Holzwerkstoffindustrie, Industrielles Holzbauwesen und Holzfertigbau in Deutschland und den einzelnen Bundesländern von 2000 bis 2019 analysiert.

Die Anzahl an Zimmereien, Forstwirtschaftsbetrieben und Holzwerkstoffherstellern hat in Deutschland in den letzten 20 Jahren tendenziell zugenommen (Abbildung 23).

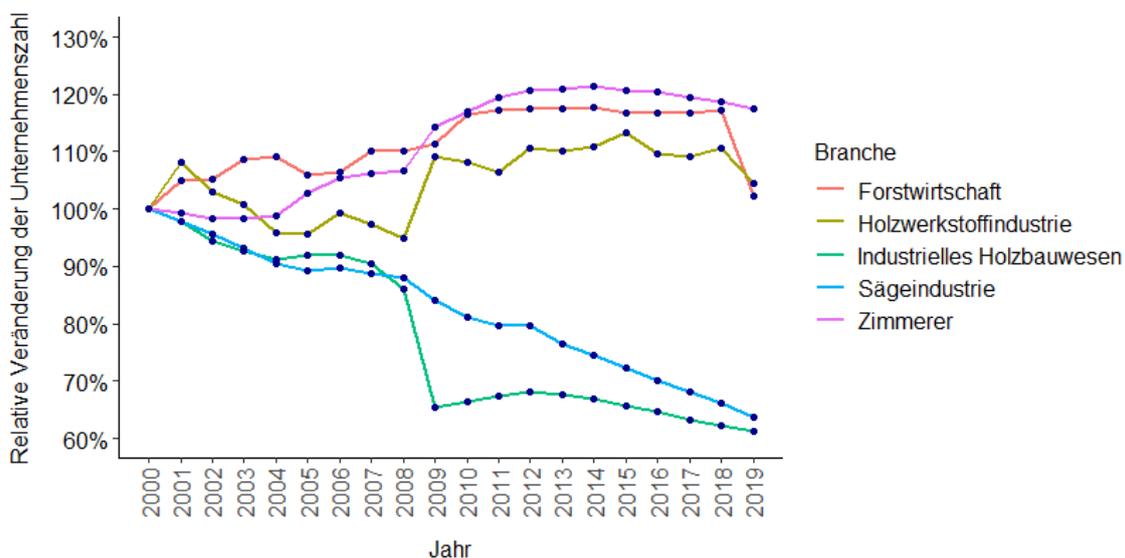


Abbildung 23: Relative Veränderung der Unternehmerzahl ausgewählter Branchen der Holz-wertschöpfungskette in Deutschland 2000 – 2019, bezogen auf das Jahr 2000 (Thünen-Institut 2022).

Den größten Zuwachs verzeichneten Zimmereien mit einem Plus von 28%, das entspricht einem Zugewinn von knapp 2.000 Betrieben. In der Sägeindustrie und beim Industriellen Holzbauwesen ist die Anzahl an Betrieben stark zurück gegangen. Die Anzahl an Sägewerken und industriellen Holzbauunternehmen sank zwischen 2000 und 2019 um gut ein Drittel, das entspricht einem Verlust von rund 1.500 Sägewerken bzw. 4.700 industriellen Holzbauunternehmen. Holzfertigbaubetriebe werden erst seit dem Jahr 2009 in der Clusterstatistik des Thünen-Instituts erfasst, die Anzahl an Betrieben hat sich seit der Erfassung etwas mehr als verdoppelt und liegt im Jahr 2019 bei knapp 2.000 Betrieben (Thünen-Institut 2022).

Die tatsächliche regionale Verfügbarkeit der Betriebe unterscheidet sich stark in den jeweiligen Bundesländern (Abbildung 24). Im Süden Deutschlands gibt es viele Sägewerke, insbesondere in Bayern und Baden-Württemberg. Die meisten Zimmereien finden sich, ausgenommen der Stadtstaaten, in Baden-Württemberg, Schleswig-Holstein und Bayern.

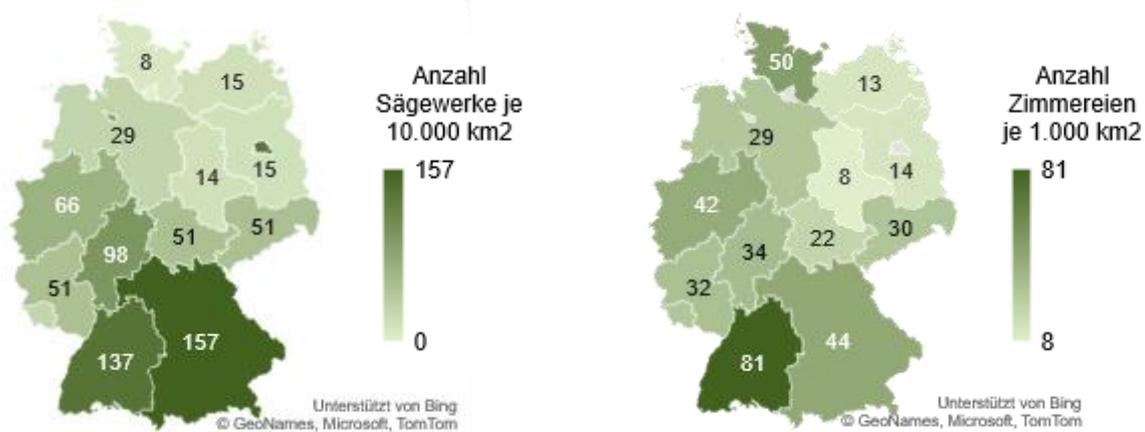


Abbildung 24: Aufkommen an Sägewerken und Zimmereien je 1.000 bzw. 10.000 km² Fläche in den einzelnen Bundesländern (bei Zimmereien ohne Stadtstaaten) im Jahr 2019 bzw. 2014 für Sachsen-Anhalt und 2018 für Mecklenburg-Vorpommern (Thünen-Institut 2022)

Die hohe Relevanz regionaltypischer Unterschiede zeigt auch die Vorstudie zu regionalen Wertschöpfungsketten in den drei deutschen Landkreisen Oberallgäu/Bayern, Hochsauerlandkreis/NRW und Vulkaneifelkreis/RLP, die im Jahr 2020 im Rahmen einer Masterarbeit als qualitative Analyse durch Befragung relevanter Akteure durchgeführt wurde (Dauermann 2020). Als wichtige, genauer zu analysierende Erfolgsfaktoren für funktionierende regionale Wertschöpfungsketten wurden dabei neben quantitativen Parametern, wie Kosteneffizienz des Bauvorhabens und Größe des Bauobjekts, insbesondere qualitative Aspekte wie Werthaltungen, Einstellungen und persönliche Beziehungen zu beauftragten Unternehmen sowie die traditionelle Baukultur als wegweisend im Entscheidungsprozess identifiziert. Festgestellt wurde auch, dass in zwei Beispielsregionen gar keine funktionierenden regionalen Wertschöpfungsketten mehr vorhanden sind.

3.3.2 Einflussfaktoren für die Umsetzung landwirtschaftlicher Holzbauprojekte

Bei der Online-Umfrage zur Identifikation von Einflussfaktoren bei der konkreten Umsetzung landwirtschaftlicher Holzbauprojekte haben 205 in den Landwirtinnen und Landwirte mit Holzbauerfahrung teilgenommen. 100 Befragte haben mit eigenem Holz und 105 Befragte mit zugekauftem Holz gebaut.

Bewertung von Akteuren in der Wertschöpfungskette aus Sicht der Landwirtinnen und Landwirte

Abbildung 25 zeigt die Ergebnisse zur Beurteilung von Akteuren innerhalb der Wertschöpfungsketten aus der Online-Umfrage. Eine hohe Anzahl an Enthaltungen, das heißt der Personen, die mit „Kann ich nicht beurteilen“ oder „Nicht zutreffend“ geantwortet haben, deutet darauf hin, dass die landwirtschaftliche Bauberatung und die Bauplanung bei einigen Holzbauprojekten nicht involviert waren. Dort, wo die Befragten ein Urteil fällen, antworten knapp die Hälfte, dass sie die Bauberatung nicht oder eher nicht

unterstützt hat. Nur 36% geben an, durch die Bauplanung bei ihrem Holzbauprojekt unterstützt worden zu sein. Bei der Bauplanung geben 18% der Befragten an, «keine» oder «eher keine» Unterstützung bekommen zu haben. Mit großer Mehrheit wird die Haltung der Zimmerer und Sägewerke gegenüber dem Holzbauprojekt, von jenen Landwirtinnen und Landwirten, die mit eigenem Holz gebaut haben, als positiv bzw. erfreut wahrgenommen.

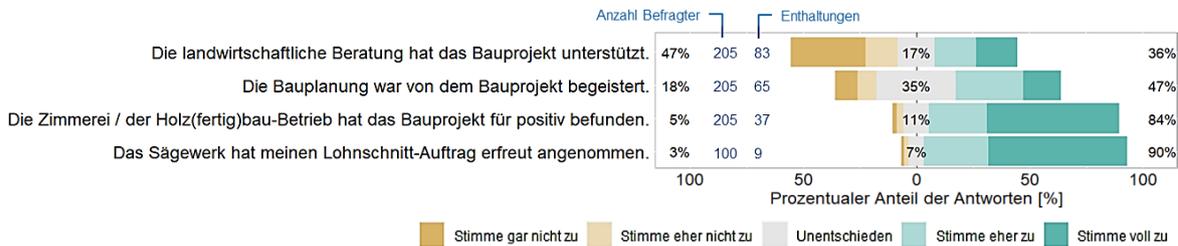


Abbildung 25: Ergebnisse zur Beurteilung von **Akteuren** innerhalb der Wertschöpfungsketten beim landwirtschaftlichen Bauen mit Holz bei der Online-Umfrage.

205 Umfrageteilnehmende: 100 Befragte, die mit eigenem Holz und 105 Befragte, die mit zugekauftem Holz gebaut haben. Frage 4 wurde nur Teilnehmenden gestellt, die mit eigenem Holz gebaut haben. In blau dargestellt ist die entsprechende Anzahl der Befragten je Frage, sowie die Anzahl der Enthaltungen, das heißt der Landwirtinnen und Landwirte, die mit „Kann ich nicht beurteilen“ oder „Nicht zutreffend“ geantwortet haben.

Bewertung von Prozessen in der Wertschöpfungskette aus Sicht der Landwirtinnen und Landwirte

Abbildung 26 zeigt die Ergebnisse zur Beurteilung von Prozessen innerhalb der Wertschöpfungsketten aus der Online-Umfrage. Es fällt auf, dass die abgefragten Prozesse mit einer Ausnahme für die meisten Landwirtinnen und Landwirte (zwischen 85% und 93%) unproblematisch und reibungslos verliefen. Das mit Abstand am häufigsten genannte Hemmnis (38%) waren Schwierigkeiten hinsichtlich der Agrarbauförderung für das Holzbauprojekt. Auch gab es hier die meisten Enthaltungen (21%). Möglicherweise ist dies darauf zurückzuführen, dass innerhalb des Agrarinvestitionsförderprogramms (AFP) die Verwendung von eigenem Holz und allgemein Eigenleistungen beim Stallbau nicht als förderfähig anerkannt werden. Schlüsselt man die Ergebnisse jedoch weiter auf, zeigt sich, dass bei den Landwirtinnen und Landwirten, die mit eigenem Holz gebaut haben, 33% und bei denen, die mit zugekauftem Holz gebaut haben, 43% Schwierigkeiten mit der Agrarbauförderung hatten. Auf die detaillierten Problemstellungen im Zusammenhang mit der Agrarbauförderung wurde in der Befragung nicht weiter eingegangen. Am häufigsten genannte Probleme innerhalb der Holz-Wertschöpfungskette waren das Finden eines geeigneten Sägewerks (8%) bzw. einer geeigneten Zimmerei (7%). Die Bereitstellung des eigenen Holzes im Wald, der Transport und die Verarbeitung durch Sägewerke, Zimmerer und Holzfertigbaubetriebe wurde nur von 1% bis 4% als problematisch angesehen (Abbildung 26).

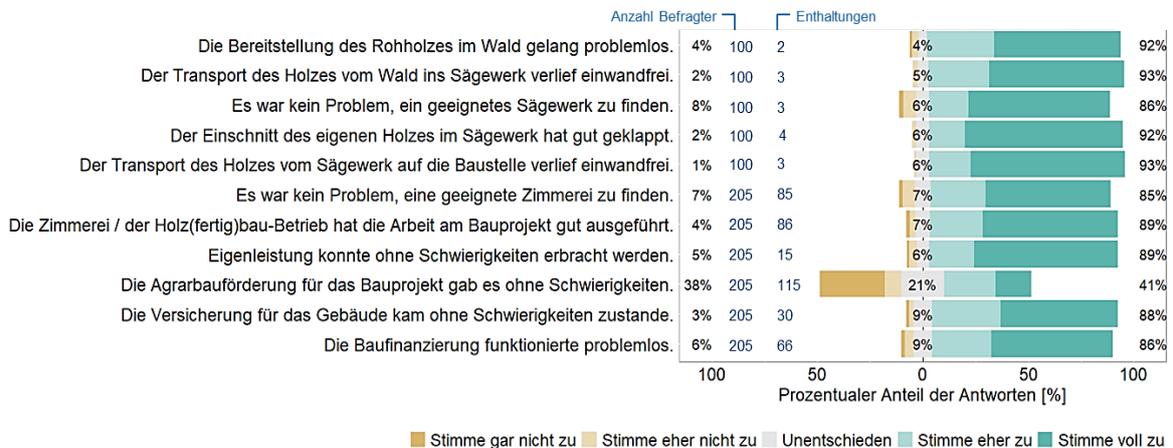


Abbildung 26: Ergebnisse zur Beurteilung von **Prozessen** innerhalb der Wertschöpfungsketten beim landwirtschaftlichen Bauen mit Holz bei der Online-Umfrage. 205 Umfrageteilnehmende: 100 Befragte, die mit eigenem Holz und 105 Befragte, die mit zugekauftem Holz gebaut haben. Frage 1-5 wurde nur Teilnehmenden gestellt, die mit zugekauftem Holz gebaut haben. In blau dargestellt ist die entsprechende Anzahl der Befragten je Frage, sowie die Anzahl der Enthaltungen, das heißt der Landwirtinnen und Landwirte, die mit „Kann ich nicht beurteilen“ oder „Nicht zutreffend“ geantwortet haben.

3.3.3 Hemmnisse bei der Verwendung von eigenem Holz

In der Online-Umfrage wurden diejenigen, die ihr eigenes Holz nicht für ihr Holzbauprojekt nutzten, nach der Ursache gefragt (Abbildung 27). Das am häufigsten genannte Hemmnis, warum die Landwirtinnen und Landwirte ihren eigenen Wald nicht als Rohstofflieferant nutzen, ist bei 62% der Befragten die fehlende finanzielle Rentabilität. Weitere häufig genannte Hemmnisse waren Schwierigkeiten bei der Bringung (53%), hohe technische Anforderungen an das Bauholz (Normierung, Trocknung) (49%-50%) und das Fehlen qualitativ geeigneter Bäume bzw. Baumarten und Sortimente im eigenen Wald (41% - 47%). Mehr als ein Drittel der Befragten (35%) gab an, dass die agrarbauförderlichen Bedingungen bei der Erbringung von Eigenleistung sie von der Nutzung des eigenen Holzes abgehalten haben. Vermutlich ist dies darauf zurückzuführen, dass innerhalb des Agrarinvestitionsförderprogramms (AFP) die Verwendung von eigenem Holz und Eigenleistung beim Stallbau nicht als förderfähig anerkannt wird. Knapp ein Drittel der Befragten (29% - 33%) gaben an, dass kein Lohnschnitt in nahegelegenen Sägewerken angeboten wird, bzw. diese Sägewerke die notwendigen Schnittholzsortimente nicht produzieren können. Für ein Fünftel der Befragten war zudem die geringe Ausbeute in den nahegelegenen Sägewerken ein Hemmnis. 28% wissen nicht, wie sie die notwendige Eigenleistung erbringen könnten und ebenfalls 28% haben gar nicht erst an die Verwendung des eigenen Holzes gedacht.

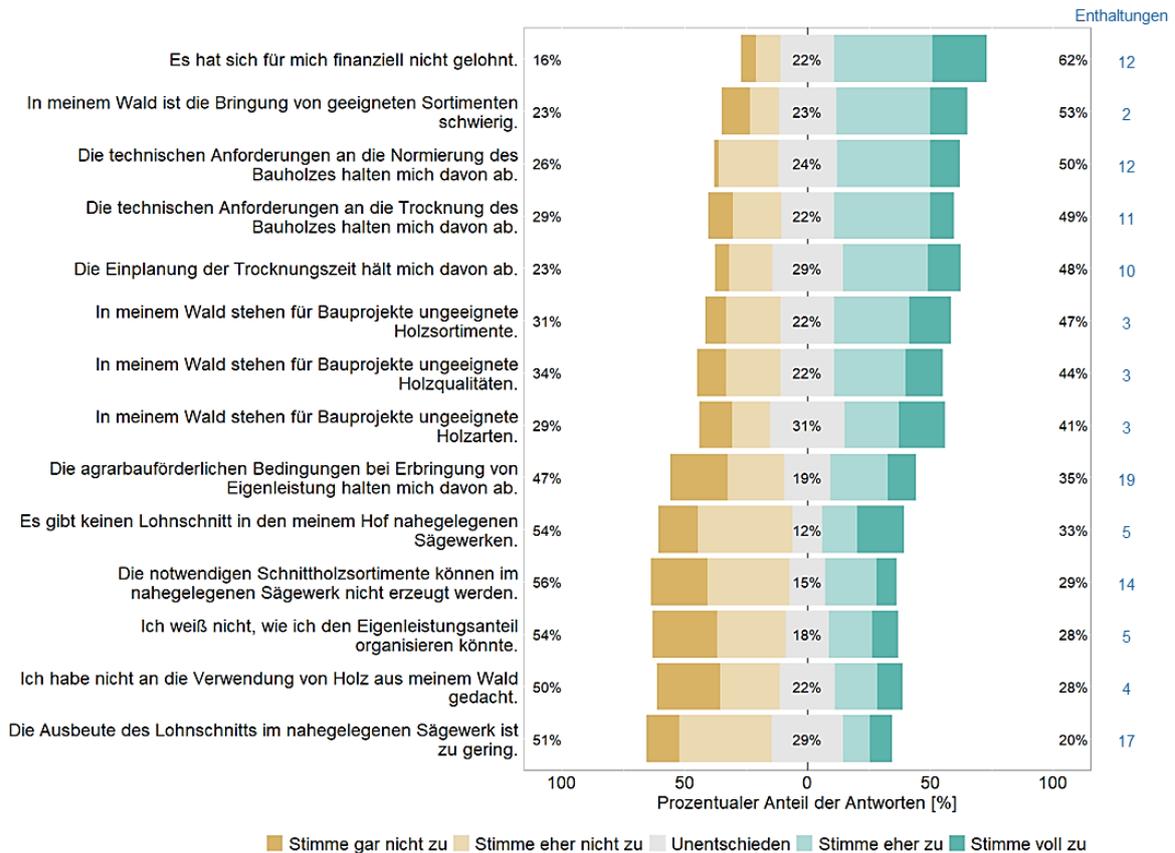


Abbildung 27: Ergebnisse zur Beurteilung von Hemmnissen bei der Online-Umfrage, wenn Landwirtinnen und Landwirte ihren eigenen Wald nicht als Baustofflieferant für ihr Holzbauprojekt genutzt haben.

Insgesamt wurden 62 Teilnehmende befragt, die einen eigenen Wald besitzen, ihr Holzbauprojekt aber mit zugekauftem Holz verwirklicht haben. Die Anzahl der Enthaltungen spiegelt Personen wider, die mit „Kann ich nicht beurteilen“ geantwortet haben.

Im Zuge der detaillierten Analyse der 16 ausgewählten Holzbauprojekte in Deutschland wurden die Landwirtinnen und Landwirte auch nach Hemmnissen bei der Umsetzung ihrer Bauprojekte gefragt (Eigene Erhebungen & Seminararbeit von Finnberg et al. (2023)). Folgende Gründe wurden genannt, warum der eigene Wald nicht als Baustofflieferant beim Stallbau genutzt wurde:

- Keine Förderung für eigenes Holz innerhalb des Agrarinvestitionsförderprogramms (AFP)
- schlechter Waldstandort, schlechte Holzqualitäten
- kein Sägewerk in der Nähe verfügbar, welches einen entsprechenden Lohnschnittauftrag annehmen würde
- keine Gewährleistung beim Einsatz für eigenes Holz ohne Festigkeitssortierung durch Bauträger
- Stallbaufirma bietet keine Option der Nutzung des eigenen Holzes an
- Hoher Arbeitsaufwand, hohe Erbringung von Eigenleistung notwendig

Prinzipiell stellt eigenes Holz eine günstigere Alternative zu anderen Lösungen dar. Dies ist jedoch auch stark abhängig von den aktuellen Holzpreisen. Ein weiterer maßgeblicher Nachteil ist, dass innerhalb des Agrarinvestitionsförderprogramms (AFP) die Verwendung von eigenem Holz und Eigenleistung im Allgemeinen beim Stallbau nicht als förderfähig anerkannt wird.

Eigenes Holz wird aus diesen Gründen bevorzugt für kleinere Bauprojekte wie Sanierungsmaßnahmen oder den Neubau von Maschinenhallen oder Lagerhallen als kosteneffizienter Baustoff eingesetzt. Die Verfügbarkeit nahegelegener Sägewerke mit Lohnschnittangebot ist zusätzlich ein Nadelöhr bei der Verwendung von eigenem Holz. Zwei der befragten Landwirtinnen und Landwirte haben sich, um eigenes Holz nutzen zu können, eine eigene Säge angeschafft und bieten nunmehr selbst in der Region Lohnschnitt für Dritte an.

3.3.4 Erfolgsfaktoren bei der Verwendung von eigenem Holz

In der Online-Umfrage wurde als besonderer Vorteil des eigenen Holzes die einfache Handhabung, die Möglichkeit der Rückbaubarkeit und Wiederverwendung, die Möglichkeit der thermischen Verwertung des Altholzes und die besondere Eigenleistungsfreundlichkeit genannt.

Im Zuge der detaillierten Analyse der 16 beispielhaften Holzbauprojekte in Deutschland wurden von den Landwirtinnen und Landwirte folgende Erfolgsfaktoren am häufigsten genannt:

- Frühzeitige Einplanung der Nutzung von eigenem Holz durch Absprache mit beteiligten Zimmerern und/oder Stallbaufirmen
- Planung der Bereitstellung der Holzprodukt-Stückliste mit ausreichend Vorlauf, um den Holzeinschlag in den notwendigen Qualitäten (Dimensionen, Oberfläche) und Quantitäten, sowie den Einschnitt und die Trocknung planmäßig und rechtzeitig durchführen zu können
- Bereitschaft zur Einbringung von Eigenleistung bei der Organisation, Koordination und Durchführung des Bauvorhabens
- Schaffung einer qualitativ hochwertigen und finanziell vorteilhaften Verwendungsmöglichkeit durch die Nutzung von eigenem Käferholz

3.4 Effekte landwirtschaftlicher Holzbauprojekte in der Region (AP3.3)

Um regionale Effekte zu erfassen, wurden 13 Landwirtinnen und Landwirte mit insgesamt 16 landwirtschaftlichen Holzbauprojekten in unterschiedlichen Regionen Deutschlands interviewt und quantitative Daten zur Beteiligung holzbauspezifischer Akteure erfasst (Abbildung 28). Daraus lassen sich ökonomische Effekte in den Regionen mittels

Wertschöpfung, soziale Effekte mittels Art und Anzahl involvierter Akteure sowie ökologische Effekte mittels Transportaufwand ermitteln.

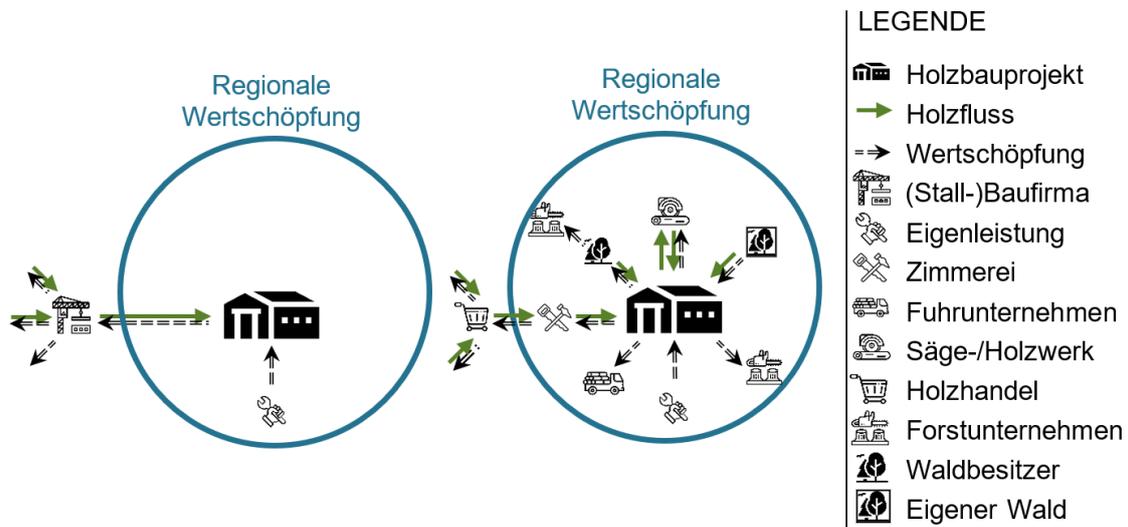


Abbildung 28: Schematische Darstellung der Holz- und Wertschöpfungsflüsse bei landwirtschaftlichen Holzbauprojekten, die über einen Generalunternehmer (links) und in Eigenregie über regionale Akteure (rechts) abgewickelt wurden.

3.4.1 Art und Anzahl involvierter Akteure der Holzwertschöpfungskette

Tabelle 4 zeigt die projektspezifischen direkt involvierten Akteure nach Art und Anzahl. Grün hinterlegt sind regionale und blau hinterlegt nicht-regionale Akteure (siehe auch 2.4.2 Definition der Regionalität). Die Anzahl und Art der involvierten Akteure sind stark abhängig vom Einsatz des eigenen oder regionalen Holzes. Wird eigenes oder regionales Holz verwendet, liegt die durchschnittliche Anzahl der Akteure im Schnitt bei 3,7. Wird Holz ausschließlich von sonstigen Quellen, in den meisten Fällen von der Baufirma oder dem Generalunternehmer, zugekauft, ist dieser auch der einzige beteiligte Akteur beim holzbezogenem Bauprozess. Ausnahme ist hier Bauprojekt Nr. 1, bei dem zusätzlich ein regionaler Zimmerer beauftragt wurde, obwohl kein eigenes oder regionales Holz eingesetzt wurde. Der Einsatz von eigenem bzw. regionalem Holz vervielfacht die Anzahl an Akteuren in etwa um den Faktor 3. Zusätzlich wird deutlich, dass alle direkt beauftragten Akteure mit Ausnahme der Baufirmen und Generalunternehmen aus der Region stammen. Bei den Baufirmen handelt es sich bis auf eine Ausnahme um überregionale Unternehmen.

Tabelle 4: Involvierte regionale (grün hinterlegt) und nicht-regionale (blau hinterlegt) Akteure beim Einsatz von eigenem / regionalem oder sonstigem zugekauftem Holz in den 16 untersuchten Holzbauprojekten
(Eigenen Erhebungen, Finnberg et al. (2023))

Be- trieb Nr.	Bau- pro- jekt Nr.	Einsatz von eigenem ¹ / regiona- lem ² Holz	Holzbezogene Akteure [Anzahl]								
			Forstun- terneh- mer	Säge- werke	Zim- me- rer	Rund- holz- ver- käufer	Trans- portun- terneh- men	Bau- firma / Gene- ralun- terneh- mer	Summe Akteure bei Einsatz von eigenem/ regionalem Holz	Summe Akteure bei Einsatz von sonstigem zugekauft- en Holz	
1	1	nein			1				1		2
	2	ja ¹	1	1	1					3	
2	3	ja ²		2	3	1	1			7	
	4	ja ¹	1	1	1	1	1			5	
3	5	ja ¹	1	1	1				1	4	
4	6	ja ¹		1					1	2	
5	7	ja ¹		1	2					3	
?	8	nein							1		1
6	9	ja ¹	1	1	1					3	
7	10	ja ¹		3		2			1	6	
8	11	nein							1		1
9	12	nein							1		1
10	13	nein							1		1
11	14	nein							1		1
12	15	ja ¹	1	1	1					3	
13	16	ja ¹			1					1	
Ø Anzahl Akteure, wenn eigenes/regionales Holz eingesetzt wurde									3,7		
Ø Anzahl Akteure, wenn sonstiges zugekauftes Holz eingesetzt wurde										1,2	

3.4.2 (Regionale) Wertschöpfung beim landwirtschaftlichen Bauen mit Holz

Die Verteilung der holzbezogenen Wertschöpfung unterscheidet sich nach der Art und Höhe des Umsatzes des Holzbauprojektes sowie der Anzahl involvierter regionaler Akteure (siehe auch Kapitel 3.4.1). Für sieben Holzbauprojekten konnten quantitative Daten erfasst werden. Insgesamt wurden vier Milchviehställe sowie zwei Hallen und ein Kälberstall untersucht (Tabelle 5). Der holzbezogene Umsatz spiegelt in etwa die Größe des Bauprojektes wider. Mit Ausnahme der Heuhalle sind die Milchviehställe deutlich größere Bauvorhaben, bei denen eine insgesamt höhere Wertschöpfung erzielt wird. Der Anteil der regionalen Wertschöpfung an der gesamten Wertschöpfung ist bei den zwei kleinsten Bauprojekten (Nr. 2 und 7) und der Heuhalle mit 100% am größten. 99% regionale Wertschöpfung erreicht auch der Milchviehstall (Bauprojekt Nr. 3), bei dem die meisten regionalen Akteure involviert sind. Die zwei Milchviehställe, bei denen nur ein

regionaler Akteur involviert ist, weisen den geringsten Anteil an regionaler Wertschöpfung auf, sowohl an der gesamten Wertschöpfung als auch am Umsatz. Insgesamt zeigt sich, dass größere und komplexere Gebäude wie Milchviehställe durchschnittlich eine höhere regionale Wertschöpfung erzielen. Der Anteil der regionalen Wertschöpfung am Umsatz ist jedoch im Schnitt deutlich geringer als bei einfacheren Gebäuden.

Auch große Bauobjekte, die über Generalunternehmen abgewickelt werden, können die absolute regionale Wertschöpfung deutlich erhöhen, indem zusätzlich zum Generalunternehmen einzelne regionale Akteure, beispielsweise Zimmereien, in den Bau miteinbezogen werden.

Nicht enthalten in diesen Berechnungen ist die erbrachte Eigenleistung der Betriebe beim Bau. Grundsätzlich ist der Bau von landwirtschaftlichen Gebäuden eigenleistungsfreundlich, und die Erbringung von Eigenleistung in erheblichem Umfang ist nicht ungewöhnlich (Blenk et al. 2013, Simon et al. 2017). Bei vier Bauprojekten konnte aufgrund der von den Landwirtinnen und Landwirten geschätzten eingebrachten Arbeitsstunden grob die Höhe der erbrachten Eigenleistung abgeschätzt werden. Es wurden zwischen 17 Tsd. € und 53 Tsd. € eingebracht, das entspricht Anteilen von 5% bis 39% am gesamten Umsatz und erhöht dadurch nochmal die regionale Wertschöpfung deutlich.

Tabelle 5: Holzbezogener Umsatz und (regionale) Wertschöpfung (WS) ohne Eigenleistung in Abhängigkeit der Art des Holzbauprojektes von 7 untersuchten Holzbauprojekten, bei denen quantitative Daten erfasst wurden. (Eigene Erhebungen, Seminararbeit von Finnberg et al. (2023))

Be- trieb Nr.	Bau- projekt Nr.	Holzbaupro- jekt	Anzahl Akteure regional / Bau- firma	Umsatz [€]	WS gesamt [€]	WS regional [€]	Anteil WS regional an WS gesamt	Anteil WS regional an Umsatz
1	1	Milchviehstall	1 / 1	310.500	87.607	15.332	18%	5%
	2	Lager-/Ma- schinenhalle	3	8.600	3.131	3.131	100%	36%
2	3	Milchviehstall	7	122.212	45.942	45.602	99%	37%
	4	Heuhalle	5	170.118	64.160	64.160	100%	38%
3	5	Milchviehstall	3 / 1	344.069	126.561	93.309	74%	27%
4	6	Kompoststall Milchvieh	1 / 1	135.000	45.502	7.500	16%	6%
5	7	Kälberstall	3	9.000	3.337	3.337	100%	37%
Ø regionale WS für Milchviehställe							76.403 €	
Ø regionale WS für Hallen & Kälberstall							23.543 €	
Anteil reg. WS an Umsatz Milchviehställe							17,7%	
Anteil reg. WS an Umsatz Hallen & Kälberstall							37,6%	

3.4.3 Transportaufwand beim landwirtschaftlichen Bauen mit eigenem und zugekauftem Holz

Tabelle 6 zeigt den projektspezifischen Transportaufwand direkt involvierter regionaler und nicht regionaler Akteure (siehe auch 2.4.2 Definition der Regionalität). Grundsätzlich ist der Transportaufwand regionaler Akteure deutlich geringer als bei nicht regionalen

Akteuren. Im Schnitt reduziert sich der Transportaufwand um 95% von 264 tkm auf 12 tkm.

Der Transportaufwand der involvierten Akteure ist abhängig davon, ob eigenes oder zugekauft Holz verwendet wird. Wird eigenes Holz verwendet, sind vermehrt regionale Akteure beteiligt und der Transportaufwand liegt im Schnitt bei 31 tkm. Wird Holz ausschließlich von sonstigen Quellen, in den meisten Fällen von der Baufirma oder dem Generalunternehmer, zugekauft, liegt der durchschnittliche Transportaufwand bei 256 tkm und die weiteste Entfernung bei 710 tkm. Nur Betrieb Nr. 2 erreicht bei Bauprojekt Nr. 3, obwohl kein eigenes Holz eingesetzt wurde, durch den Zukauf von ausschließlich regionalem Holz einen verringerten durchschnittlichen Transportaufwand.

Tabelle 6: Durchschnittlicher Transportaufwand beim Einsatz von eigenem / regionalem oder sonstigem zugekauftem Holz in den 16 untersuchten Holzbauprojekten. (Eigenen Erhebungen, Finnberg et al. (2023))

Be- trieb Nr.	Bau- projekt Nr.	Einsatz von eigenem ^{1)/} regionalem ²⁾ Holz	Ø Transportaufwand [tkm]		
			Regionale Akteure	Nicht-regionale Akteure	Alle Akteure
1	1	nein	7,0	107	57,0
	2	ja ¹⁾	7,7	-	7,7
2	3	ja ²⁾	17,0	301,0	57,6
	4	ja ¹⁾	18,8	-	18,8
3	5	ja ¹⁾	7,5	130,0	32,0
4	6	ja ¹⁾	12,0	205,0	108,5
5	7	ja ¹⁾	10,3	-	10,3
	8	nein	-	710,0	710,0
6	9	ja ¹⁾	12,7	-	12,7
7	10	ja ¹⁾	14,8	217,0	48,5
8	11	nein	-	325,0	325,0
9	12	nein	-	359,0	359,0
10	13	nein	-	7,0	7,0
11	14	nein		276,0	276,0
12	15	ja ¹⁾	11,0	-	11,0
13	16	ja ¹⁾	NA	-	NA
Ø Transportaufwand regionaler Akteure					12
Ø Transportaufwand nicht-regionaler Akteure					264
Ø Transportaufwand, wenn eigenes/regionales Holz eingesetzt wurde					31
Ø Transportaufwand, wenn sonstiges zugekauftes Holz eingesetzt wurde					256

4 SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNGEN (AP3.4)

Schlussfolgernd auf Basis der erzielten Ergebnisse werden, die in Kapitel 1 abgeleiteten Fragestellungen beantwortet:

I. **Besitzen landwirtschaftliche Betriebe eigenen Wald? Wie sind diese Betriebe charakterisiert?**

Etwas mehr als die Hälfte aller deutschen landwirtschaftlichen Betriebe besitzen eigene Wälder. Der bäuerliche Waldbesitz entspricht einem Siebtel der gesamten Waldfläche Deutschlands. Die durchschnittliche Waldbesitzgröße ist abhängig von der landwirtschaftlichen Betriebsform und der Region. Im Mittel liegt sie bei 10 ha. Die Waldbesitzgröße ist auch abhängig von der Betriebsform. In den meisten Bundesländern besitzen Milchviehbetriebe die größten Waldflächen. Ausnahmen sind jedoch insbesondere Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen, in denen Ackerbaubetriebe mit Abstand die größten Waldflächen besitzen.

Die durchschnittliche landwirtschaftliche Fläche je Betrieb sowie die Betriebsdichte je Fläche schwankt stark zwischen den einzelnen Bundesländern. Entsprechend variabel sind die Anforderungen an den Bau landwirtschaftlicher Gebäude und an die Funktionalität der (regionalen) Wertschöpfungskette.

II. **Steht in (diesen) Wäldern geeignetes Holz zum Bauen von landwirtschaftlichen Gebäuden zur Verfügung? Welches Holz wird verwendet?**

62% des bäuerlichen Privatwaldes ist Kleinprivatwald mit besonders hohem ungenutztem Holzressourcenpotenzial, welches zur Sicherung der regionalen Rohstoffversorgung beim Bauen mit Holz mobilisiert werden könnte. Der Anteil an bäuerlichem Privatwald in den einzelnen Bundesländern schwankt zwischen 2% und 31%. Die größten bäuerlichen Waldflächen finden sich in Bayern mit 550 Tsd. ha und Niedersachsen mit 174 Tsd. ha. Die Holzvorräte verschiedener Baumarten im Privatwald sind regionalspezifisch. Im Norden und Osten Deutschlands dominiert die Kiefer, im Süden, Westen und in der Mitte Deutschlands hingegen dominiert die Fichte und es gibt verhältnismäßig hohe Buchenvorräte. Die Ergebnisse der im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Online-Umfrage sowie auch die Analyse ausgewählter Holzbauprojekte zeigen, dass die im landwirtschaftlichen Bauen verwendete Hauptbaumart die Fichte ist, unabhängig davon, ob eigenes oder zugekauft Holz verwendet wird. Die am nächsthäufigsten eingesetzten Baumarten sind Kiefer und Lärche, danach folgen frisches und gelagertes (Fichten-)Käferholz.

III. Welche Hemmnisse bzw. Erfolgsfaktoren für landwirtschaftliches Bauen mit Holz, insbesondere mit dem eigenem, gibt es?

In der Online-Umfrage war das am häufigsten genannte Hemmnis, warum Landwirtinnen und Landwirte ihren eigenen Wald nicht als Rohstofflieferant nutzen, die fehlende finanzielle Rentabilität. Weitere häufig genannte Hemmnisse aus der Umfrage und der Analyse der Holzbauprojekte waren Schwierigkeiten bei der Bringung, hohe technische Anforderungen und das Fehlen qualitativ geeigneter Bäume bzw. Baumarten und Sortimente im eigenen Wald. Die Befragten gaben zudem an, dass die agrarbauförderlichen Bedingungen bei der Erbringung von Eigenleistung sie von der Nutzung des eigenen Holzes abgehalten haben, da innerhalb des Agrarinvestitionsförderprogramms die Verwendung von eigenem Holz beim Stallbau nicht als förderfähig anerkannt wird. Weitere Hemmnisse waren die fehlende Option, über Stallbaufirma eigenes Holz einsetzen zu können, und das hohe Maß an notwendiger Eigenleistung.

Die Verfügbarkeit regionaler holzbaukompetenter Akteure der Wertschöpfungskette Holz oder überregional tätiger Holzbauunternehmen sind zentrale Bedingungen für den erfolgreichen Einsatz von eigenem bzw. regionalem Holz. Weitere Erfolgsfaktoren sind die frühzeitige Einplanung der Nutzung von eigenem Holz und die Bereitschaft zur Einbringung von Eigenleistung bei der Organisation, Koordination und Durchführung des Bauvorhabens. Die Verwendung von eigenem Käferholz bietet eine qualitative hochwertige und finanziell vorteilhafte Nutzungsmöglichkeit.

IV. Sind die Wertschöpfungsketten und ihre Akteure zum Bauen von landwirtschaftlichen Gebäuden in der Region vorhanden? Welche ökonomischen, ökologischen und sozialen Effekte werden durch das landwirtschaftliche Bauen mit Holz in der Region erzielt?

Die regionale Verfügbarkeit von Akteuren der Wertschöpfungskette Holz unterscheidet sich stark zwischen Branchen und Regionen. In der Sägeindustrie und beim Industriellen Holzbauwesen ist die Anzahl an Betrieben in Deutschland stark zurück gegangen. Die Anzahl an Zimmereien, Forstwirtschaftsbetrieben und Holzwerkstoffherstellern hat in Deutschland in den letzten 20 Jahren tendenziell zugenommen. Die Anzahl an Holzfertigbetrieben hat sich zwischen 2009 und 2019 etwas mehr als verdoppelt. Im Süden Deutschlands gibt es viele Sägewerke, die meisten Zimmereien finden sich, ausgenommen der Stadtstaaten, in Baden-Württemberg, Schleswig-Holstein und Bayern. Aus der Online-Umfrage geht hervor, dass die Verfügbarkeit von geeigneten Sägewerken und Zimmereien zu den am häufigsten genannten Problemen bei der Umsetzung von landwirtschaftlichen Holzbauprojekten zählt und bei ca. einem Drittel der Befragten einen Grund darstellt, warum statt eigenem Holz zugekauft Holz verwendet wurde.

Die detaillierte Analyse ausgewählter Holzbauprojekte zeigt, dass die Verwendung von eigenem oder regionalem Holz vorteilhafte Effekte hinsichtlich einer ressourceneffizienten und nachhaltigen Verwendung erzielt. Der geringere Transportaufwand regionaler Akteure reduziert die transportbedingten Umweltbelastungen. Die Einbindung einer größeren Zahl an verschiedenen regionalen Akteuren festigt die ländlichen Strukturen des Cluster Forst und Holz und sichert Arbeitsplätze und Einkommen in der Region. Durch die Verwendung von eigenem und regionalem Holz verbleibt ein größerer Teil der Wertschöpfung im ländlichen Raum und stärkt die regionale Wirtschaftskraft. Die absolute regionale Wertschöpfung hängt jedoch stark von der Größe des Bauobjektes ab. Auch große Bauobjekte, die über Generalunternehmen abgewickelt werden, können die regionale Wertschöpfung deutlich erhöhen, indem zusätzlich zum Generalunternehmen einzelne regionale Akteure, beispielsweise Zimmereien, in den Bau miteinbezogen werden.

V. Welche Empfehlungen können für Landwirtinnen und Landwirte sowie für Akteure der Holz-Wertschöpfungskette abgeleitet werden?

Die Verwendung des eigenen Holzes beim landwirtschaftlichen Bauen stellt eine ressourceneffiziente Lösung mit hohem Potenzial dar. Der Einsatz von eigenem oder regionalem Holz erzielt zusätzliche ökonomische, ökologische und soziale Vorteile. Kleinere Bauprojekte (z.B. Lagerhallen, Maschinenhallen) lassen sich leichter mit eigenem oder regionalem Holz realisieren als größere und komplexere Bauprojekte (z.B. Ställe). Auch andere aus dem eigenen oder regionalen Wald verfügbare Holzarten als Fichte eignen sich für den landwirtschaftlichen Holzbau und sollten einsatzzweckspezifisch (für konstruktive oder nicht-konstruktive Zwecke) in Erwägung gezogen werden (siehe TEIL E HYGIENE und TEIL F HOLZPRODUKTE). Käferholz eignet sich meist genauso wie herkömmliches Schnittholz als Bauholz und kann für eigene oder regionale Bauvorhaben werterhaltend eingesetzt werden. Durch Aufklärung und Wissenstransfer hinsichtlich des Einsatzes anderer Baumarten als Fichte sowie Käferholz als Bauholz können vorhandene Ressourcenpotenziale für die stoffliche Nutzung erschlossen werden.

Für die Verwendung des eigenen Holzes muss die regionale Verfügbarkeit und die Funktionalität bzw. Kompetenz notwendiger Akteure des Cluster Forst und Holz gewährleistet sein. Zur Gewährleistung der Rentabilität des Einsatzes von eigenem Holz bei der Umsetzung des Agrarinvestitionsförderungsprogramms (AFP) ist die Anerkennung der Förderfähigkeit der Bereitstellung von eigenem Holz notwendig.

Durch die großen regionalen Unterschiede ist zur Förderung des landwirtschaftlichen Holzbaus eine regionalspezifische Herangehensweise notwendig.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Entwicklung der Holzbauquoten fertiggestellter Wohngebäude und landwirtschaftlicher Betriebsgebäude in Deutschland von 2000 bis 2021 bezogen auf den Bruttorauminhalt (Destatis 2021a); Holzbauquote = Anteil am Bruttorauminhalt mit vorwiegend verwendetem Baustoff Holz für die Tragekonstruktion	8
Abbildung 2: Entwicklung der Baustoffquoten fertiggestellter landwirtschaftlicher Betriebsgebäude in Deutschland von 2000 bis 2021 (Destatis 2022b, 2022a); Baustoffquote = Anteil am Bruttorauminhalt mit vorwiegend verwendetem Baustoff für die Tragekonstruktion	9
Abbildung 3: Holzbauquote 2021 fertig- gestellter landwirtschaftlicher Betriebsgebäude entsprechend des Anteils am umbauten Raum (Bruttorauminhalt, BRI) nach Bundesländern (Destatis 2022a); Holzbauquote = Anteil am Bruttorauminhalt mit vorwiegend verwendetem Baustoff Holz für die Tragekonstruktion	9
Abbildung 4: Entwicklung der Baustoffquoten fertiggestellter landwirtschaftlicher Betriebsgebäude in den einzelnen Bundesländern (ausgenommen Stadtstaaten und Saarland) von 2015 bis 2021 (Destatis 2021a, 2022b, 2022a); Baustoffquote = Anteil am Bruttorauminhalt mit vorwiegend verwendetem Baustoff für die Tragekonstruktion	10
Abbildung 5: Entwicklung der Anzahl an landwirtschaftlichen Betrieben mit und ohne Waldfläche und der durchschnittlichen Fläche pro Betrieb in Deutschland zwischen 2010 und 2020 (Destatis 2019, 2011, 2014, 2017, 2021c).....	11
Abbildung 6: Entwicklung der Kosten je m ³ umbauten Raum (Primärachse) und der durchschnittlichen Größe fertiggestellter landwirtschaftlicher Betriebsgebäude (Sekundärachse) in Deutschland mit Stahl/Stahlbeton bzw. Holz als vorwiegend verwendetem Baustoff von 2000 bis 2021 (Destatis 2021a, 2022a).....	12
Abbildung 7: Vorgehensweise der Erstellung und Durchführung der Online-Umfrage.	15
Abbildung 8: Eigene Darstellung der Berechnung der Brutto- bzw. Nettowertschöpfung nach AK VGRDL (2021).....	16
Abbildung 9: Beispielhafte Darstellung einer regionalen Wertschöpfungskette eines landwirtschaftlichen Holzbauprojektes und der Zusammensetzung der gesamten Wertschöpfung über die beteiligten Akteure.....	17
Abbildung 10: Räumliche Verteilung der befragten landwirtschaftlichen Betriebe	18
Abbildung 11: Anzahl landwirtschaftlicher Betrieb je 100 km ² (links) und durchschnittliche landwirtschaftliche Betriebsfläche je Betrieb (rechts) im Jahr 2020 (Destatis 2021b, 2021c, 2021f)	24

Abbildung 12: Durchschnittliche Anzahl an Schweinen je Schweinehaltungsbetriebe (links) und durchschnittliche Anzahl an Rindern je Rinderhaltungsbetrieb (rechts) im Jahr 2020 (Destatis 2021b, 2021c, 2021f)	25
Abbildung 13: Anzahl der teilnehmenden Landwirtinnen und Landwirte der Online-Umfrage, welche mit eigenem bzw. nicht eigenem Holz gebaut haben, je Bundesland	26
Abbildung 14: Anteil der teilnehmenden Landwirtinnen und Landwirte nach Waldbesitz und der Verwendung von eigenem Holz und Gesamtbeurteilung der landwirtschaftlichen Holzbauprojekte von denjenigen, die mit eigenem Holz gebaut haben.	27
Abbildung 15: Waldbesitz in Deutschland (Destatis 2022, 2021c).....	28
Abbildung 16 Anteil der Waldfläche an der Fläche des jeweiligen Bundeslandes (links) und Anteil der bäuerlichen Waldfläche an der Waldfläche des jeweiligen Bundeslandes (rechts) im Jahr 2020 (Destatis 2021b, 2021c).....	29
Abbildung 17: Durchschnittliche bäuerliche Waldbesitzgröße und Anzahl an landwirtschaftlichen Betrieben mit Waldfläche nach Bundesländern im Jahr 2020 (Destatis 2021c).....	30
Abbildung 18: Durchschnittliche Waldbesitzgröße der Haupterwerbsbetriebe des BMEL-Testbetriebsnetzes Landwirtschaft nach Bundesland und Betriebsform (BMEL 2022)	31
Abbildung 19: Relative Anteile landwirtschaftlicher Betriebe und bäuerlicher Wald in Abhängigkeit der Waldbesitzgrößenklasse (Destatis 2021d, 2021c)	31
Abbildung 19: Holzvorräte in m ³ Erntefestmeter ohne Rinde ausgewählter Baumarten im Privatwald (BWI 2012)	32
Abbildung 21: Anzahl der Nennungen verwendeter Baumarten und -sortimente beim größten landwirtschaftlichen Holzbauprojekt aus eigenem (n=100) und zugekauftem (n=105) Holz bei der Online-Umfrage	33
Abbildung 22: Beurteilung der Eignung unterschiedlicher Baumarten und -sortimente für konstruktive (oben) und nicht-konstruktive (unten) Einsatzzwecke bei der Online-Umfrage.....	34
Abbildung 23: Relative Veränderung der Unternehmerzahl ausgewählter Branchen der Holzwertschöpfungskette in Deutschland 2000 – 2019, bezogen auf das Jahr 2000 (Thünen-Institut 2022).....	36
Abbildung 23: Aufkommen an Sägewerken und Zimmereien je 1.000 bzw. 10.000 km ² Fläche in den einzelnen Bundesländern (bei Zimmereien ohne Stadtstaaten) im Jahr 2019 bzw. 2014 für Sachsen-Anhalt und 2018 für Mecklenburg-Vorpommern (Thünen-Institut 2022).....	37

Abbildung 25: Ergebnisse zur Beurteilung von Akteuren innerhalb der Wertschöpfungsketten beim landwirtschaftlichen Bauen mit Holz bei der Online-Umfrage.....	38
Abbildung 26: Ergebnisse zur Beurteilung von Prozessen innerhalb der Wertschöpfungsketten beim landwirtschaftlichen Bauen mit Holz bei der Online-Umfrage.....	39
Abbildung 27: Ergebnisse zur Beurteilung von Hemmnissen bei der Online-Umfrage, wenn Landwirtinnen und Landwirte ihren eigenen Wald nicht als Baustofflieferant für ihr Holzbauprojekt genutzt haben.	40
Abbildung 27: Schematische Darstellung der Holz- und Wertschöpfungsflüsse bei landwirtschaftlichen Holzbauprojekten, die über einen Generalunternehmer (links) und in Eigenregie über regionale Akteure (rechts) abgewickelt wurden.	42

TABELLENVERZEICHNIS

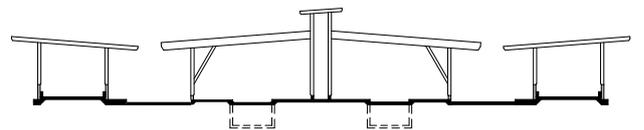
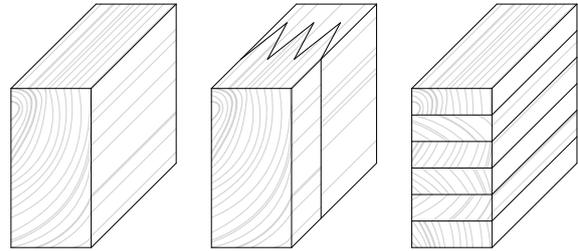
Tabelle 1: Holzbauprojekte der befragten Betriebe und Nutzung der Daten innerhalb der Auswertung aufgrund der Datenqualität und Vollständigkeit	19
Tabelle 2: Beschreibung und Klassifikation holzbaubezogener Branchen im Cluster Forst und Holz nach Becher (2015) und Destatis (2008).....	20
Tabelle 3: Beschreibung der 16 Holzbauprojekte hinsichtlich Holzbauprojekt, Nutzung von eigenem / regionalem Holz und verwendeter Holzart	35
Tabelle 4: Involvierte regionale (grün hinterlegt) und nicht-regionale (blau hinterlegt) Akteure beim Einsatz von eigenem / regionalem oder sonstigem zugekauftem Holz in den 16 untersuchten Holzbauprojekten.....	43
Tabelle 5: Holzbezogener Umsatz und (regionale) Wertschöpfung (WS) ohne Eigenleistung in Abhängigkeit der Art des Holzbauprojektes von 7 untersuchten Holzbauprojekten, bei denen quantitative Daten erfasst wurden. (Eigene Erhebungen, Seminararbeit von Finnberg et al. (2023)).....	44
Tabelle 6: Durchschnittlicher Transportaufwand beim Einsatz von eigenem / regionalem oder sonstigem zugekauftem Holz in den 16 untersuchten Holzbauprojekten.....	45

QUELLENVERZEICHNIS

- AK VGRDL (2021) Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen der Länder (VGRDL). Methodenbeschreibung ESVG2010 / Revision 2019. Stand 2021, Stuttgart
- Becher G (2015) Clusterstatistik Forst und Holz: Tabellen für das Bundesgebiet und die Länder 2000 bis 2013. Thünen Working Paper 48, Hamburg
- Blenk M, Goblirsch G, von Huene A, Schulze A (2013) Regionale Wertschöpfung. In: LfL (ed) Landwirtschaft Bauen in regionalen Kreisläufen. Landwirtschaftliche Nutzgebäude in Holzbauweise. Interreg IV Bayern-Österreich 2007-2013
- BMEL (2018) Buchführung der Testbetriebe. Grundlagen zur BMEL - Testbetriebsbuchführung
- BMEL (2022) Die wirtschaftliche Lage der landwirtschaftlichen Betriebe. Buchführungsergebnisse der Testbetriebe des Wirtschaftsjahres 2020/2021, Bonn
- BWI (2012) Dritte Bundeswaldinventur (2012). Ergebnisdatenbank.
<https://bwi.info/start.aspx>
- Dauermann A (2020) Evaluierung der Wertschöpfungskette landwirtschaftliches Bauen mit regionalem Holz. Masterarbeit, Technische Universität München
- Destatis (2008) Klassifikation der Wirtschaftszweige 2008 (WZ 2008), Wiesbaden
- Destatis (2011) Betriebe mit Waldflächen. Landwirtschaftszählung / Agrarstrukturerhebung 2010. Fachserie 3 Reihe 2.1.1, Wiesbaden
- Destatis (2014) Betriebe mit Waldflächen. Landwirtschaftszählung / Agrarstrukturerhebung 2013. Fachserie 3 Reihe 2.1.1, Wiesbaden
- Destatis (2017) Betriebe mit Waldflächen. Landwirtschaftszählung / Agrarstrukturerhebung 2016. Fachserie 3 Reihe 2.1.1, Wiesbaden
- Destatis (2019) Baugenehmigungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden nach überwiegend verwendetem Baustoff - Lange Reihen ab 1980 - 2018
- Destatis (2021a) Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach überwiegend verwendetem Baustoff. Lange Reihen ab 2000
- Destatis (2021b) Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung - Fachserie 3 Reihe 5.1 - 2020, Wiesbaden
- Destatis (2021c) Bodennutzung der Betriebe (Landwirtschaftlich genutzte Flächen). Fachserie 3 Reihe 3.1.2, Wiesbaden
- Destatis (2021d) Bodennutzung der Betriebe (Struktur der Bodennutzung). Fachserie 3 Reihe 2.1.2, Wiesbaden
- Destatis (2021e) Methodische Grundlagen der Landwirtschaftszählung 2020. Fachserie 3 Reihe 2 S. 6
- Destatis (2021f) Viehhaltung der Betriebe. Landwirtschaftszählung 2020. Fachserie 3 Reihe 2.1.3, Wiesbaden
- Destatis (2022a) Baufertigstellungen für Wohn- und Nichtwohngebäude nach Gebäudeart und überwiegend verwendetem Baustoff. Neubau und konventionelle Bauart 2015 - 2021, Wiesbaden
- Destatis (2022b) Statistik der Baufertigstellungen im Hochbau nach Jahren, Wiesbaden

- Destatis (2022c) Strukturhebung der Forstbetriebe. Waldfläche: Bundesländer, Jahre, Waldeigentumsarten. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Wald-Holz/_inhalt.html
- FiBL und MGH (2012) Entwicklung von Kriterien für ein bundesweites Regionalsiegel. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. FiBL Deutschland e. V.; MGH Gutes aus Hessen GmbH und FiBL Deutschland e.V., Frankfurt am Main
- Finnberg C, Hirt F, Klein I, Jenuwein K (2023) Landwirtschaftliches Bauen mit eigenem Holz. Projektarbeit im Modul „Aktuelle Entwicklungen in der Holzforschung“, Technische Universität München
- Heinze K, Xouridas S, Gebhardt B, Becker T (2014) Verbraucherpräferenzen gegenüber regionalen Produkten: Ein Vergleich von West- und Ostdeutschland. Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft, Band 92, Heft 1, Mai 2014. doi: 10.12767/buel.v92i1.35
- Hennig, Petra (2018) Holznutzung im Kleinprivatwald. AFZ-Der Wald 2018(5):12–15
- Hensche H-U, Ullrich-Jäker H, Wildraut C (2000) Leitfaden zur Stärkung regionaler Vermarktungspotenziale
- Nowack W, Schmid JC, Grethe H (2019) Wachsen oder weichen!? Eine Analyse der agrarstrukturellen Debatte im Kontext der EU-Agrarpolitik nach 2020. GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society 28(4):356–364. doi: 10.14512/gaia.28.4.7
- Simon J, Stötzel P, Dietl H, Helm S, Lubenau C, Richter K, Weber-Blaschke G (2017) Klimafreundlich Bauen in regionalen Kreisläufen. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (ed) Landwirtschaft im Klimawandel
- Tauss S (2011) Region. In: Lewinski-Reuter V, Lüddemann S (eds) Glossar Kulturmanagement, 1. Aufl. VS Verl. für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, pp 311–318
- Thünen-Institut (2022) Clusterstatistik Forst & Holz. <https://www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/clusterstatistik-forst-holz/>. Accessed 23 Mar 2022
- Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestags (2016) Zum Begriff der Regionalität bei der Lebensmittelerzeugung. Dokumentation WD 5 - 3000 – 022/16
- Wissenschaftlicher Beirat für Waldpolitik (2021) Die Anpassung von Wäldern und Waldwirtschaft an den Klimawandel. Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft, Berlin

ANHANG



PLANUNGSLEITFADEN

Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen Bauen mit Holz – von der Planung bis zum Rückbau (ZukunftLaWiBau)

Inhaltsverzeichnis

EINLEITUNG	3
TEIL A: WIRTSCHAFTLICHE TRAGKONSTRUKTIONEN	4
TEIL B: DAUERHAFTE KONSTRUKTIONEN	12
TEIL C: DESIGN FOR REUSE	16
TEIL D: LCA GEBÄUDE	20
TEIL E: HYGIENE	22
TEIL F: HOLZPRODUKTE	29
TEIL G: RESSOURCENPOTENZIAL	31

EINLEITUNG

Die Verwendung von Holz im landwirtschaftlichen Bauen steht in einer sehr langen Tradition. In den letzten Jahrzehnten hat die Bedeutung von Holz in diesem Bereich gegenüber anderen Baumaterialien abgenommen. Mit dem Projekt „Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen Bauen mit Holz – von der Planung bis zum Rückbau (ZukunftLaWiBau)“ wird daher das Ziel verfolgt, technische und wirtschaftliche Informationen und Erfolgsfaktoren für das landwirtschaftliche Bauen in Holzbauweise zur Verfügung zu stellen.

Hierzu wurden Planungsgrundlagen für landwirtschaftliche Gebäude in Form eines umfassenden Typenkatalogs für landwirtschaftliche Nutzgebäude zur Tier- und Lagerhaltung erarbeitet. Darüber hinaus wurden die Wirtschaftlichkeit und Dauerhaftigkeit von landwirtschaftlichen Gebäuden betrachtet, die Datenbasis zu Klima- und Ressourcenschutz der landwirtschaftlichen Bauten aus Holz dargestellt sowie Fragestellungen der Rückbaubarkeit adressiert. Zudem wurden aktuelle Fragestellungen der Hygiene und Holzprodukte berücksichtigt, Möglichkeiten zur Nutzung des Potenzials des vorhandenen Holzes vorgeschlagen und regionale Wertschöpfungsketten in ländlichen Räumen angesprochen.

Dieser Leitfaden fasst die Ergebnisse zusammen.

Eine ausführliche Beschreibung und Erläuterung der einzelnen Teile ist im Abschlussbericht des Projektes ZukunftLaWiBau nachzulesen.

Das Projekt wurde durch die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) unter dem Förderkennzeichen 2220HV036 gefördert.

Ein Verbundprojekt von Ruhr-Universität Bochum, Technische Universität München, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft Freising, Freie Universität Berlin und Friedrich-Loeffler-Institut Insel Riems.

© 2023

TEIL A:

WIRTSCHAFTLICHE TRAGKONSTRUKTIONEN

*Ferdinand Oberhardt, Georgia Perdikouri, Jochen Simon
Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Landwirtschaftliches Bauwesen*

BESTANDSANALYSE UND HARMONISIERUNG

Bei der Planung landwirtschaftlicher Nutzgebäude sind die Bewirtschaftungsform, das Tierwohl, rechtliche Vorgaben, die Wirtschaftlichkeit und deren Einfügung in die (Kultur)Landschaft in Einklang zu bringen. Die Abmessungen für Stallanlagen, Reit-, Lager- und Maschinenhallen ergeben sich aus den verfahrensspezifischen Funktionsflächen und -maßen sowie der Anzahl der gehaltenen Tiere, Lagermengen bzw. untergestellten Maschinen und Geräte. Für Stallanlagen sind diese in gesetzlichen Vorgaben, Leitlinien, Beratungsempfehlungen sowie Vorgaben zur Investitionsförderung hinterlegt. Für Maschinen- und Lagerhallen sind Anzahl und Größe der Maschinen, das Normungswesen, betriebsspezifische Erntemengen und Lagerformen bzw. der Lagerbedarf an Betriebsmitteln maßgebend. Darüber hinaus sind für die Bewirtschaftung Verkehrsflächen für das Personal, Maschinen und Geräte notwendig. Im Vergleich zeigt sich, dass die vielfältigen Vorgaben zwischen den einzelnen Verfahren nicht aufeinander abgestimmt sind. Davon abgesehen findet ein ständiger Wandel auf Grund aktueller Praxiserfahrungen und wissenschaftlichen Erkenntnissen zur Ethologie, Haltung und Zucht von Nutztieren, dem allgemeinen technischen Fortschritt bis hin zum Strukturwandel in der Landwirtschaft statt. Dieser bedingt für die Betriebe häufig eine Vergrößerung der bewirtschafteten Flächen, der Anzahl der gehaltenen Tiere und damit auch der Lager- und Stallkapazitäten. Gleichzeitig findet eine Spezialisierung bis hin zur Auslagerung von Arbeitsvorgängen statt. Von baulicher Seite werden diese vielfältigen Anforderungen bundesweit mit standardisierten Hallenkonstruktionen aus dem Gewerbebau beantwortet, die von Generalunternehmern in Stahl-, Beton- und Holzbauweise, z. T. auch als Mischkonstruktionen, angeboten werden. Untersuchungen z. B. für den Stallbau zeigen, dass mit alternativen Baukonzepten durch verringerte Spannweiten bzw. Bauvolumina und einem damit einhergehenden reduzierten Materialbedarf bzw. Herstellungsaufwand deutliche Einsparungen beim Investitionsbedarf, bei gleichem bis höherem Tierwohl, erreicht werden können. Diese Erkenntnisse geben Anlass, alternative Baukonzepte in der Praxis zu analysieren und hinsichtlich ihrer Wettbewerbsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit weiterzuentwickeln. Diese wird dadurch erhöht, dass die Maße zwischen den Verfahren so weit als möglich bzw. sinnvoll aufeinander abgestimmt werden, um am Ende höhere Stückzahlen im Abbund von baugleichen Teilen aus Holz zu erzielen.

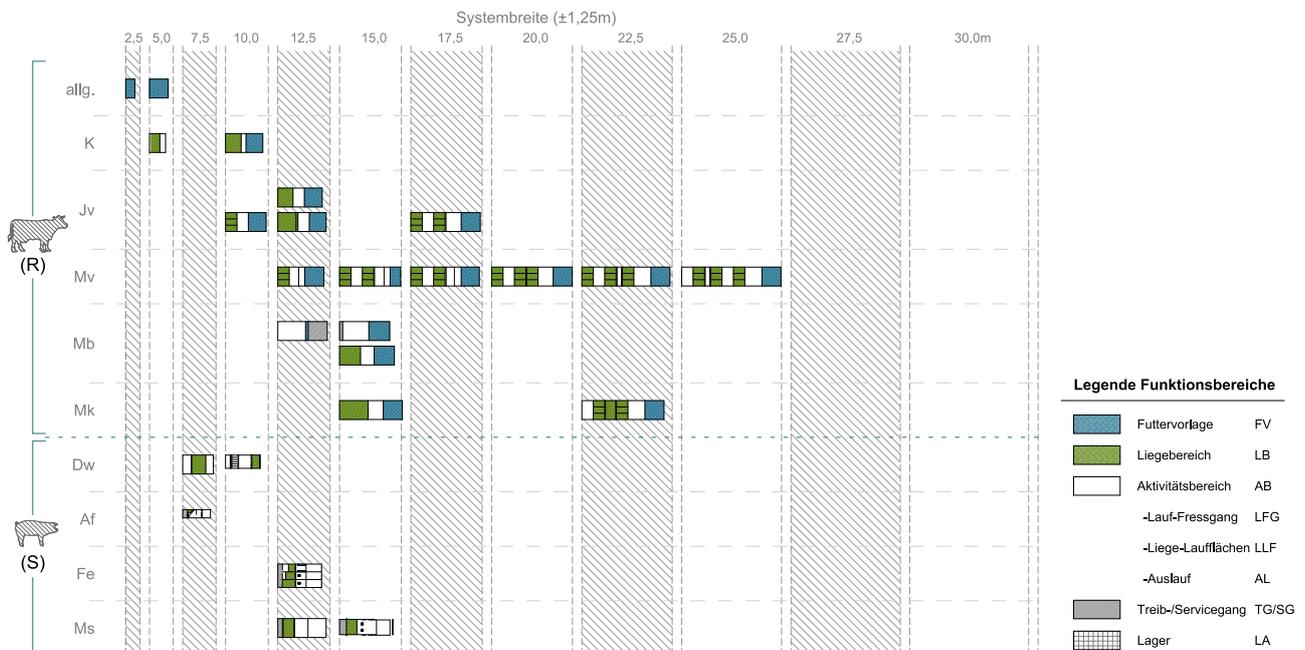


Abbildung 1: Ausschnitt aus Gesamtmatrix zur Zuordnung der kleinsten Funktionseinheiten für Stallanlagen, Reit-, Lager- und Maschinenhallen in Maßsystem $x * 2,50 \text{ m} (\pm 1,25 \text{ m})$

Im ersten Schritt sind aus (inter)nationalen Beratungsunterlagen und Veröffentlichungen typische Grundrisse für Stallanlagen (Rinder-, Schweine-, Kleinwiederkäuer-, Geflügel- und Pferdehaltung), Bewegungsanlagen (Reithallen), Lagerhallen (Getreide-, Kartoffel- bzw. Zwiebel-, Dünger-, Heu- und Hackschnitzzellager) sowie Maschinenhallen gesammelt worden (Tabelle 1). Diese werden hinsichtlich der kleinsten Funktionseinheit analysiert, die sich in der Tierhaltung z. B. aus dem Aktivitätsbereich (Liege- und Bewegungsflächen), Einrichtungen zur Futter- und Wasseraufnahme sowie den Verkehrsflächen für Stallpersonal, Maschinen, Fütterungs- und Entmistungstechnik ergeben. Nach Anpassung auf die aktuellen Anforderungen für Funktionsflächen und Maße werden diese nach deren Systembreite sortiert. Die Abstufung der Maße in 2,50 m-Schritten erfolgt in Anlehnung an das im Bauwesen normativ eingeführte Oktametersystem (zzgl. einem Korridor von $\pm 1,25 \text{ m}$). In der Kombination mit Tragwerken ergeben sich daraus Spannweitengruppen. Zur Erreichung gleicher Spannweiten innerhalb der Gruppen kann bei der baulichen Umsetzung eine Harmonisierung der Funktionsflächen und -maße erfolgen. Als Ergebnis zeigt sich eine Häufung der Maße für die kleinsten Funktionseinheiten bei 9 m, 12 m, 16 m und 25 m. Größere Gebäudebreiten sind auch im Holzbau möglich. Hier ist aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und bei Stallanlagen der Erweiterbarkeit bzw. Stallklimaführung, abzuwägen, ob kleinteiligere Gebäude nicht z. T. erhebliche wirtschaftliche und funktionale Vorteile bringen.

Rinder – Milchvieh
(R-Mv)

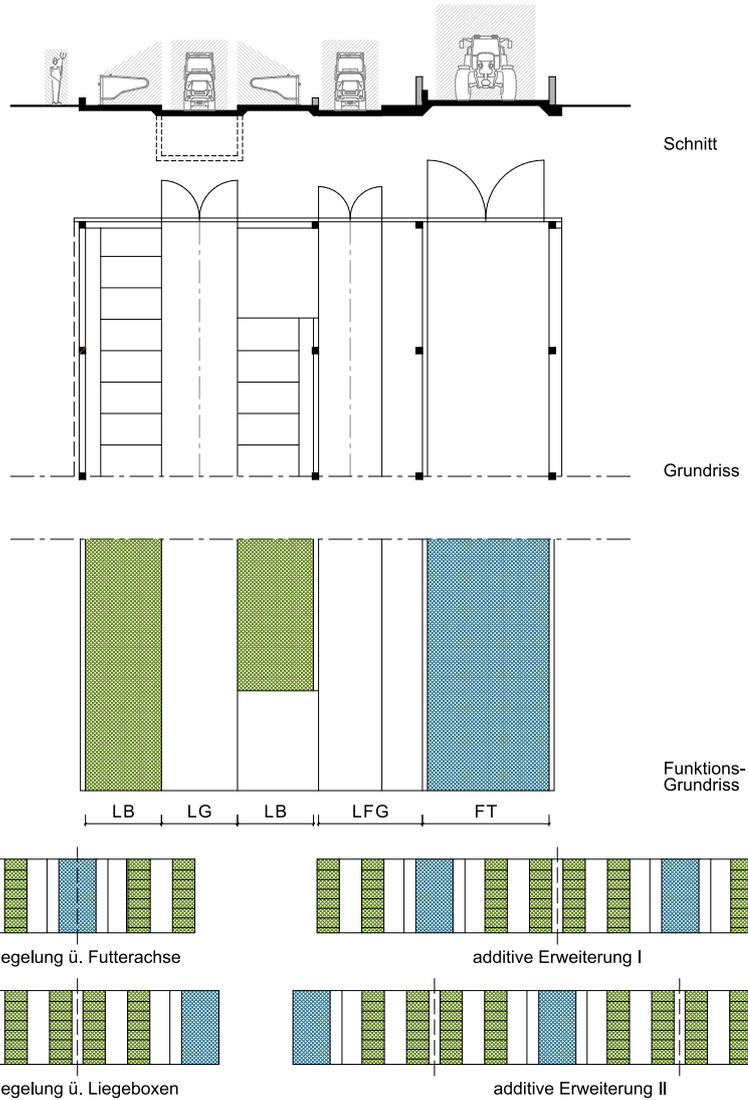


Abbildung 2: Beispiel für eine kleinste Funktionseinheit (2-reihiger Liegeboxen-Laufstall für Milchvieh) in Grundrissen und Schnitt, mit Erweiterungsschritten

Das Beispiel zeigt einen zweireihigen Milchviehstall als kleinste Funktionseinheit mit den Funktionsbereichen Liegeboxenreihen, Lauf- bzw. Fressgang und Futtertisch (Abbildung 2). Diese Funktionseinheit kann durch Addition, Spiegelung und Kombinationen mit anderen Funktionseinheiten zu Stallanlagen weiterentwickelt werden. Aus der Bewirtschaftung durch das Stallpersonal, mit Maschinen und Geräten sowie der Nutzung durch die Tiere ergeben sich notwendige Lichtraumprofile, die nicht durch konstruktive Bauteile aus dem Tragwerk (z. B. Stützen, Streben) beeinträchtigt werden dürfen.

TRAGWERKE, STATISCHE BERECHNUNG UND HOLZVERWENDUNG

Um für die jeweiligen Verfahren und Abmessungen spezifische Tragwerke in Holzbauweise zu etablieren, sind wirtschaftlich umsetzbare Tragkonstruktionen unabdingbar. Im ersten Schritt sind insg. 50 Tragwerksvarianten über die Statiksoftware FRILO vordimensioniert und hinsichtlich der Querschnitte des Kipp-Punktes analysiert worden. Letzterer entspricht der Spannweite, ab welcher aus statischen Gründen neben Vollholz (VH) auch Brettschichtholz (BSH) verwendet werden muss.

Tragwerke

- **Bauweise:** Skelettbauweise [Sk]
- **Ausrichtung Primärkonstruktion:** Quer [Q]
- **Trag-Systeme & Varianten:**
 - Stütze-Binder-System [StüB]
 - > 1 bzw. 2 Strebe(n) Innen [1StrI / 2StrI], 1 bzw. 2 Strebe(n) Aussen [1StrA / 2StrA]
 - > 1 bzw. 2 eingespannte Stütze(n) [1eStü / 2eStü]
 - Rahmen [R]
 - > 2 Gelenk Rahmen [2G]
 - > 3 Gelenk Rahmen [3G-F], 3-Gelenk-Rahmen | 1 hüftig [3G-1H]
- **Dachform:**
 - Pulldach [PD]
 - Satteldach [SD]
- **Bindervarianten:**
 - Einfacher Binder [EBD]
 - Geteilter Binder [GBD]

Annahmen Statik:

- Bodenschneelast: $sk = 2,12 \text{ kN/m}^2$
- Windlast: Windzone 2 – Mischkategorie Binnenland
- Gebäudehülle: 3-seitig geschlossen, eine Traufseite offen
- Dachaufbau: Holzschalung, Konter-, Traglattung, Wellfaserzementplatten
- Achsmaß: 5,20 m

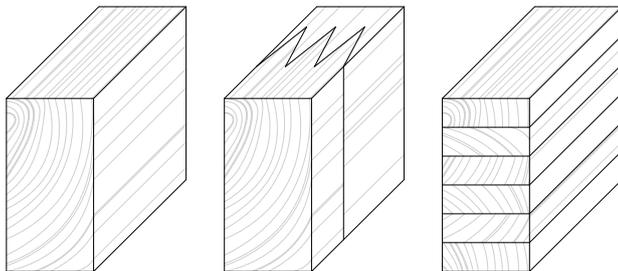


Abbildung 3: Vollholz [VH], Konstruktionsvollholz [KVH] und Brettschichtholz [BSH]

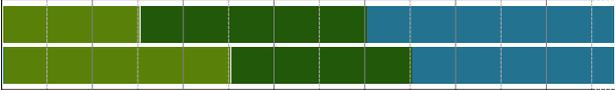
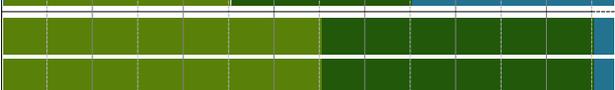
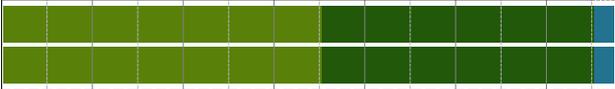
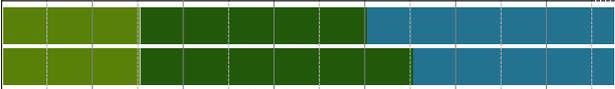
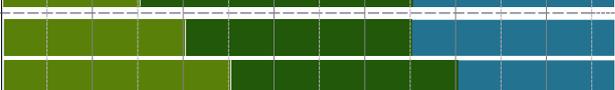
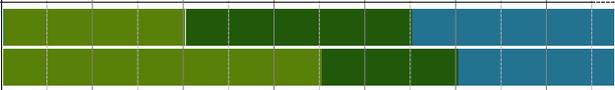
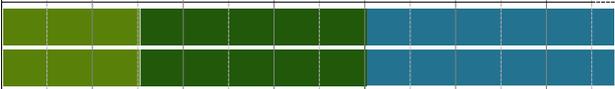
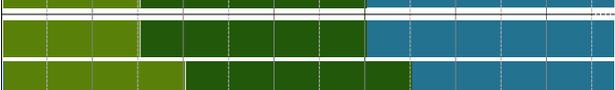
Holzbauprodukte (Abbildung 3):

- Nadelvollholz [VH]: Kerngetrennter Einschnitt, Technisch getrocknet¹, Güte C24
- Konstruktionsvollholz [KVH]: Güte C24
- Querschnitte GBD: $b/h \leq 12/38 \text{ cm}$ bzw. Querschnitte EBD: $b/h \leq 20/32 \text{ cm}$
- Brettschichtholz [BSH]: Güte GI24c / GI32c
- Querschnitte beschränkt²: $b/h \leq 24/60 \text{ cm}$ | bei GBD: $b/h \leq 16/60 \text{ cm}$
- Querschnitte unbeschränkt³: $b/h \geq 24/60 \text{ cm}$

¹ Empfehlung (zur Vermeidung von vorbeugend chemischer Schutzbehandlung) siehe DIN 68800-2:2022-02, Abs. 7.10

² Querschnitte nach Lagerliste ³ Nicht im Rahmen der statischen Vordimensionierung über FRILO gerechnet

Tabelle 1: Ausschnitt aus Tabelle für Tragwerkskonstruktionen (Skelettbauweise, Ausrichtung Primärkonstruktion quer) mit Auswertung der Kipp-Punkte Vollholz zu Brettschichtholz

Variante	Dachform	Piktogramm und Bindervariante	Spannweite													
			0,00	1,25	2,50	3,75	5,00	6,25	7,50	8,75	10,00	11,25	12,50	13,75	15,00	16,25
1 Strebe innen [1StrI]	[PD]															
																
2 Streben innen [2StrI]	[PD]															
	[SD]															
1 eingespannte Stütze [1eSt]	[PD]															
	[SD]															
2 eingespannte Stützen [2eSt]	[SD]															
3 Gelenke [3G] einhüftig [1H] Gelenk am First [F]	[PD]															
	[SD]															
				b/h ≤ 12/38 cm bzw. 20/32 cm alle Bauteile aus Nadelvollholz												
				h ≤ 60 cm mind. ein Bauteil aus Brettschichtholz												
			[PD] - Pultdach [SD] - Satteldach													

Die Berechnungen der erforderlichen Querschnitte im Rahmen der statischen Vordimensionierung wurden für die Spannweitengruppen 5,00 m, 7,50 m, 10,00 m, 12,50 m und 15,00 m durchgeführt. In Anlehnung an den Korridor von ±1,25 m ist für die Berechnung jeweils die obere Grenze der Gruppe maßgeblich. Im Ergebnis zeigt sich, dass der Kipp-Punkt bei der Verwendung von VH zu BSH beschränkt und von BSH beschränkt zu unbeschränkt vom angenommenen Tragwerk abhängig ist (z. B. 1StrI-PD-EBD zu 2StrI-PD-EBD). Darüber hinaus lassen sich mit einem geteiltem Binder, bei gleicher Holzgüte und gleichem Tragwerk, tendenziell höhere Spannweiten erzielen (z. B. 1StrI-PD-EBD zu 1StrI-PD-GBD). Aus den errechneten Querschnitten lässt sich auch der Holzbedarf ermitteln. Dessen Minimum liegt in der Gesamtwertung, innerhalb der jeweiligen Spannweitengruppen, im Mittel bei ca. 66 %. Der Holzbedarf in Abhängigkeit zu den verwendeten Holzbauprodukten bildet die Grundlage für die Kostenermittlung der jeweiligen Tragwerke.

KOSTENERMITTLUNG

Die Baukosten für ein Tragwerk ergeben sich aus den Material-, Bearbeitungs-, Transport- und Montagekosten sowie einem Gewinnzuschlag. Die Materialkosten beinhalten die Kosten für Holzbauprodukte und Verbindungsmittel. Deren Güte und Menge werden durch den Tragwerkstyp und die Spannweite bestimmt. Die Bearbeitungskosten setzen sich aus Zuschnitt, Abbund und die Vorbereitung der Holzbauteile sowie das Ein-/Anbringen der Verbindungsmittel zusammen. Bei den Transportkosten wurde eine Anlieferung im Radius von ca. 100 km per Sattelzug angenommen. Die Montagekosten bestehen aus dem Aufwand für Zusammenbau und Aufstellen auf der Baustelle.

Tabelle 2: Holzbedarfs- und Kostenvergleich von 4 Tragwerken mit 12,00 m Spannweite

2Strl-PD	1eStü-Tr-PD	1eStü-li-SD	3G-F-SD
~ 1,70 m ³ / Binder ~ 2.300 € / Binder	~ 1,95 m ³ / Binder ~ 3.200 € / Binder	~ 2,40 m ³ / Binder ~ 3.500 € / Binder	~ 2,35 m ³ / Binder ~ 4.900 € / Binder
alle Preise Netto, Stand 2023			

Im Ergebnis zeigt sich, dass der Investitionsbedarf von folgenden, sich teilweise gegenseitig beeinflussenden, Faktoren abhängig ist:

- Tragwerkstyp und Bindervariante
- Spannweite
- Dachform
- Holzgüte
- Holzbauprodukte
- Verbindungsmittel

Dies kann exemplarisch an den in Tabelle 3 dargestellten Tragwerkstypen gezeigt werden. Für die ausgewählte Spannweite entsteht eine Kostendifferenz von ca. 210 %. Speziell im Holzbau ist es bei Tragwerken mit einfachen Bauteilgeometrien und zimmermannsmäßigen Holzverbindungen (z. B. Versätze, Zangen) möglich, einen deutlich höherer Eigenleistungsanteil – sowohl beim Abbund als auch bei der Montage – zu realisieren. Im Rahmen der Kostenermittlung wurde dieser nicht berücksichtigt.

TYPENKATALOG FÜR LANDWIRTSCHAFTLICHE NUTZGEBÄUDE IN HOLZBAUWEISE

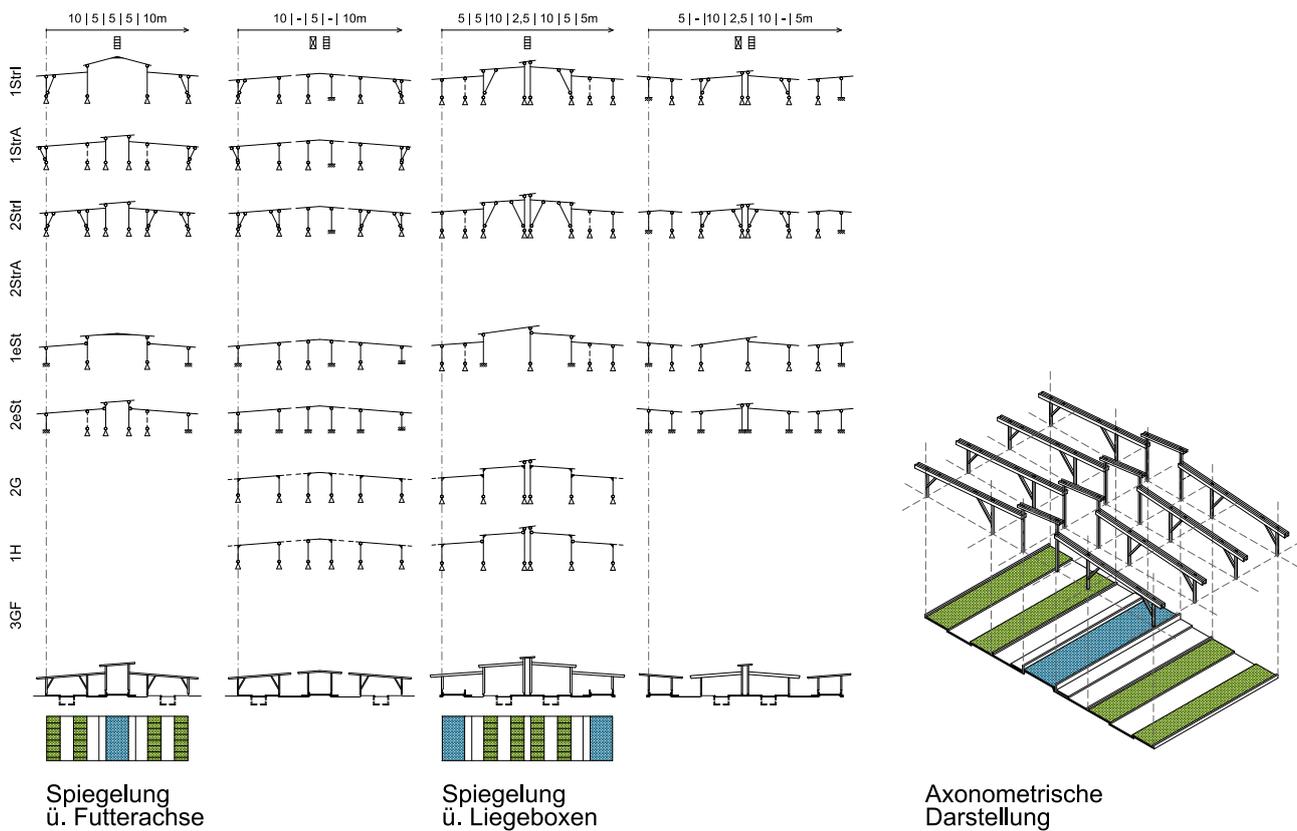


Abbildung 4: Ausschnitt aus einer Seite des Typenkatalogs mit Abstimmung zwischen Grundrissen (hier Erweiterungen) und Tragwerksvarianten, axonometrische Darstellung.

Nach der Einteilung und Harmonisierung der Funktionseinheiten in Gruppen mit gleichen Systemmaßen werden die im Zuge der statischen Vordimensionierung untersuchten Tragwerke auf ihre Kompatibilität mit den verfahrensspezifisch einzuhaltenden Lichtraumprofilen überprüft. Bei Stallanlagen müssen darüber hinaus Fragen der Biosicherheit sowie eine, hinsichtlich der Luftführung optimale Gebäudegeometrie berücksichtigt werden. Neben den möglichen Tragwerksvarianten entsteht insb. bei Stallanlagen durch die Bauweise (ein- bzw. mehrhäusig) und die Möglichkeit, Spannweite durch einen, auf die Nutzung abgestimmten Einbau von zusätzlichen Stützen zu reduzieren, ein umfassender Typenkatalog mit einer großen Vielfalt an zukunftsweisenden Gebäudevarianten in Holzbauweise (Abbildung 4).

SCHNITTSTELLE CAD/CNC

Maike Breitfeld, Hugo Wirthensohn. Holzforum Allgäu

Der Prozess der computergestützten Produktion im Holzbau beginnt in der Regel mit der architektonischen Planung des Gebäudes mittels CAD-Programmen (Abbildung 5). In dieser Phase werden die Funktion, die Abmessungen bzw. Geometrie, das Erscheinungsbild und auch die baulich-technische Ausführung des Gebäudes – in der Regel als 2D-Projekt – planerisch erarbeitet. In den meisten Fällen werden erst danach die Ausführungspläne an den Zimmererbetrieb weitergegeben. Dort werden die Daten für die voll automatisierte Fertigung einzelner Bauteile (Balken, Bretter, Platten, Verbindungsmittel etc.) oder ganzer Baugruppen wie Wände, Decken- und Dach-Elemente erneut über eine Holzbausoftware eingegeben bzw. erzeugt. Kern dieses Planungsschrittes ist ein 3D-Modell, mit dessen Objektinformationen über eine entsprechende CNC-Software die Abbundmaschinen angesteuert werden können. Die Weiterleitung der Daten eines 2D-Modells aus der CAD-Software erfolgt bisher in geometrie-orientierten Formaten wie DXF bzw. DWG. Diese Übergabe ist mit erheblichen Verlusten an Informationen verbunden. Um den Planungs- und Abbundprozess für individuelle Holzbaulösungen zu beschleunigen, und damit wirtschaftlicher zu gestalten, ist bereits vom Architekten mit der Rohbauplanung ein 3D-Modell zu erstellen. Um die entsprechenden Objektinformationen für die Umsetzung in einer Holzbausoftware zu übergeben, wird zunehmend das IFC-Format verwendet. Dieses bietet den großen Vorteil, nicht nur die Geometrie eines Gebäudes bzw. der Bauteile abbilden zu können, sondern auch den Datentransfer für wesentliche strukturelle Informationen zu gewährleisten, was einen effizienten BIM-Prozess ohne wiederkehrende Eingabe von bereits erzeugten digitalen Daten ermöglicht.

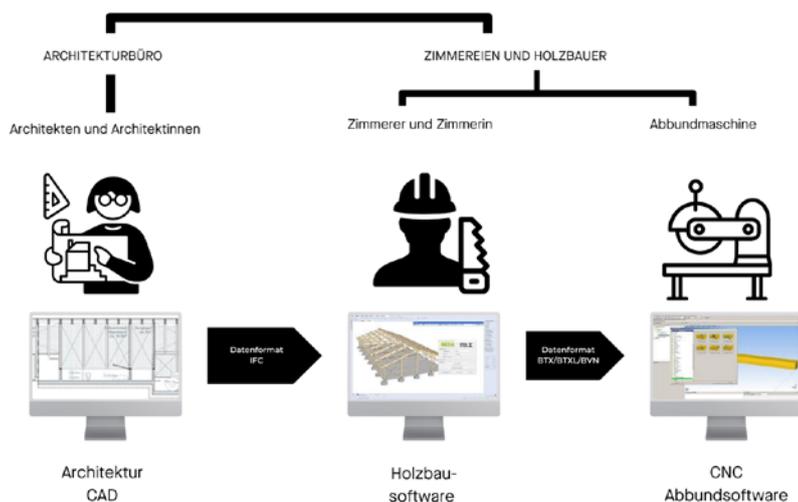


Abbildung 5: Ablaufschema für die Planung von baulichen Anlagen in Holzbauweise von der CAD-Planung über die Holzbausoftware bis zur CNC-Abbundsoftware

TEIL B:

DAUERHAFTE KONSTRUKTIONEN

Alex Fröhlich, Max Hartmann, Stephan Ott, Anna Wagner
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TUM School of Engineering and Design,
Technische Universität München

SCHUTZMASSNAHMEN

Die zu erwartenden Schadensmechanismen, welche in landwirtschaftlichen Gebäuden auf die tragende Konstruktion einwirken, lassen sich in drei Kategorien einteilen: mechanischer, chemischer und biologisch-physikalischer Angriff. Dementsprechend wurden zu jeder Kategorie Themenkarten entwickelt, die einen kurzen Überblick über die Problemstellungen und mögliche Maßnahmen geben. Bei allen Themenkarten ist die Zielsetzung dieselbe: Ein dauerhafter Schutz vor Schäden durch baulich/ konstruktive Maßnahmen. Darauffolgend werden die grundsätzlichen Gefährdungen und die entsprechenden baulichen Maßnahmen genannt und gegebenenfalls beispielhafte Details skizziert. Weitere alternative Maßnahmen werden im Schlussbericht ergänzt.

Die Themenkarten sind als erste, schnelle Orientierungshilfe gedacht, und sollen zeigen, dass einfache und effektive Maßnahmen existieren. Im Planungsprozess sind darüber hinaus alle entsprechenden eingeführten technischen Baubestimmungen, insbesondere die DIN 68800-2:2022-02 zu beachten.

Im Schlussbericht zu diesem Forschungsprojekt sind weitere Fließdiagramme zum Arbeitsablauf auf der Baustelle und den benötigten Maschinen und Werkzeugen dargestellt, welche den Landwirten eine schnelle Einschätzung ermöglichen, wie viel Eigenleistung während der Errichtungsphase eingebracht werden kann.

Darüber hinaus sind im Schlussbericht für alle wichtigen Knotenpunkte des Tragwerks mögliche Verbindungsarten aufgelistet und jeweils Vor- und Nachteile in Bezug auf Konstruktion, Wirtschaftlichkeit und Recyclingfähigkeit untersucht. Zudem wurde der Widerstand der jeweiligen Verbindung gegen die besonderen Beanspruchungen (mechanisch, chemisch und biologisch-physikalisch) in landwirtschaftlichen Hallen bewertet. Im Laufe der Untersuchung hat sich herausgestellt, dass, unabhängig von der Verbindungsart, durch Opferbretter ein einfacher und effektiver Schutz gegen sämtliche Angriffe gewährleistet ist. Abgesehen von den Stützenfußpunkten, können die meisten Knoten auch ohne zusätzliche Maßnahmen umgesetzt werden.

Abschließend lässt sich festhalten, dass korrekt geplante und ausgeführte landwirtschaftliche Hallen aus Holz eine dauerhafte und nachhaltige Alternative zu Stahl- und Stahlbetonhallen sind.

Mechanischer Angriff

Zielsetzung:

→ Dauerhafter Schutz vor mechanischen Schäden durch bauliche / konstruktive Maßnahmen



Grundsätzliche Gefährdungen:

1. Verbiss und Scheuern durch Vieh
2. Anprall in Verkehrswegen
3. Abnutzung (bspw. in Verkehrswegen)
4. Unvorhergesehene Lasteinwirkungen (Bewuchs, etc.)



Grundsätzliche (bauliche) Maßnahmen:

1. Aufstellung außerhalb der Gefahrenbereiche *Vieh* oder *Verkehr*



Besondere (bauliche) Maßnahmen:

- Konstruktionsprinzipien aus Simon et al. (2019)
- Opferbretter oder Blechverkleidungen zur Vermeidung von direktem Kontakt
→ Anprallschutz, Verbisschutz
- Betonsockel erhöhen



Details:

Opferbretter und erhöhter Betonsockel

Abbildung 6: Themenkarte zum mechanischen Angriff auf tragende Bauteile

Chemischer Angriff

Zielsetzung:

→ Dauerhafter Schutz vor chemischen Schäden durch bauliche/konstruktive Maßnahmen



Grundsätzliche Gefährdungen:

1. Schäden durch Reaktion mit Ammoniak (Fäkalien)
2. Schäden durch Desinfektion
3. Tausalzangriff



Grundsätzliche (bauliche) Maßnahmen:

1. Aufstellung außerhalb der Gefahrenbereiche mit *chemischem Angriff*



Besondere (bauliche) Maßnahmen:

- Konstruktionsprinzipien aus Simon et al. (2019)
- Opferbretter oder Blechverkleidungen zur Vermeidung von direktem Kontakt der Chemikalie mit tragenden Elementen
- Betonsockel erhöhen



Details:

Opferbretter und erhöhter Betonsockel

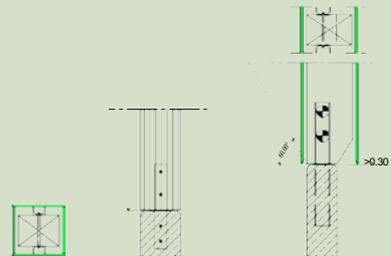


Abbildung 7: Themenkarte zum chemischen Angriff auf tragende Bauteile

Biologisch-Physikalischer Angriff

Zielsetzung:

→ Dauerhafter Schutz durch bauliche / konstruktive Maßnahmen vor feuchteinduzierten Schäden



Grundsätzliche Gefährdungen:

1. Schäden durch Feuchtigkeit
 - Schädlinge und Pilzbefall
2. Schäden durch Bewuchs
3. Schäden durch Sonneneinstrahlung



Grundsätzliche (bauliche) Maßnahmen:

1. Schutz vor Feuchte bei Transport, Lagerung und Montage
2. Einbau trockenen Holzes ($u \leq 20\%$)
3. Schutz vor Niederschlägen und Spritzwasser
4. Schutz vor nutzungsbedingter Feuchte (z.B. durch Spritzwasser)
5. Schutz vor Feuchte aus angrenzenden Baustoffen
6. Schutz vor unzuträglicher Feuchteerhöhung durch Tauwasser



Besondere (bauliche) Maßnahmen:

Für GK 0

- Konstruktionsprinzipien aus Simon et al. (2019)
- Rechnerischer Nachweis des Tauwasserschutzes

GK 1 → GK 0 (Insektenzugang)

- a) Technisch getrocknetes Holz
- b) Kontrollierbarkeit sicherstellen

GK 2 → GK 0 (Tauwassergefahr)

Verstärkte Belüftungsmaßnahmen

GK 3.1 → GK 0 (Bewitterung)

Verstärkte Belüftungsmaßnahmen.

1. Beschränkung der Querschnittsabmessungen
2. Verwendung von technisch getrocknetem Holz
3. Gehobelte Oberflächen
4. Kein Stauwasser, direktes Abführen von Niederschlägen
5. Abdecken von Hirnholz und nicht vertikal stehenden Bauteilen

Abbildung 8: Themenkarte zum biologisch-physikalischen Angriff auf tragende Bauteile

TEIL C: DESIGN FOR REUSE

Zsofia Varga

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, TUM School of Engineering and Design,
Technische Universität München

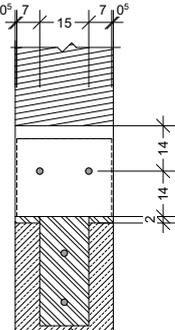
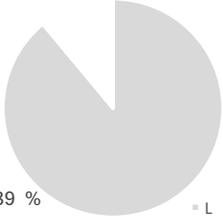
DETAILKATALOG VERBINDUNGSMITTEL ZUR ERHÖHUNG DER STOFFLICHEN VERWERTBARKEIT VON HOLZ

Um eine Recyclingfähigkeit der landwirtschaftlichen Hallen und im Detail eine **gleichwertige stoffliche Verwertung des Materials Holz** zu bewerten, soll die **Lösbarkeit** der einzelnen Detailpunkte aufgezeigt werden.

Dafür wurden die Detailpunkte von sechs Modulbauhallen der selben Spannweite wie der kleinen Halle, des Modulbausystems Grub-Weihenstephan (ILT4c Institut für Landtechnik und Tierhaltung) aufgenommen und bewertet. Im vorliegenden Detailkatalog sind die Detailpunkte mit der höchsten Lösbarkeit abgebildet. Dabei wurden die Detailpunkte «Anschluss Stützenfußpunkt», «Anschluss Strebe-Stütze», «Anschluss Stütze-Binder» sowie «Anschluss Strebe-Binder» bewertet. Der Tabelle 3 sind die jeweilige Position (erste Spalte), die Art der Verbindungsmittel (zweite Spalte), Detailzeichnung (dritte Spalte) sowie die Bewertung der Lösbarkeit der Detailpunkte (vierte Spalte) zu entnehmen.

Die Lösbarkeit der Detailpunkte beträgt 100%, wenn die Fügungen zwischen Bauteilen und Verbindungsmitteln am Detailpunkt vollständig ohne Schädigung voneinander getrennt werden können. Der vollständige Katalog über die verschiedenen Möglichkeiten zur Ausführung der Detailpunkte und ihre Bewertung hinsichtlich der Lösbarkeit ist dem Schlussbericht zu entnehmen.

Tabelle 3: Bewertung der Lösbarkeit der Detailpunkte

Position des Details	Art der Verbindungsmittel	Detail	Bewertung Lösbarkeit L der Verbindungsmittel und Bauteile voneinander [%]
Anschluss Stützenfußpunkt an Stahlbetonsstütze befestigt	Schlitzblech seitlich an Beton befestigt		 <p>89 % = L</p>

Beim «Anschluss Stützenfußpunkt an Stahlbetonstütze befestigt» können die Bauteile und Verbindungsmittel nicht vollständig ohne Schädigung voneinander gelöst werden. Das Schlitzblech ist durch Stabdübel an der Holzstütze befestigt. Die Stabdübel können im Idealfall ausgetrieben werden; Holzstütze und Schlitzblech könnten auseinandergezogen werden und wären somit voneinander gelöst. Das Schlitzblech ist durch eingeklebt Verbindungsmittel an der Betonstütze befestigt. Die Schrauben können nicht ohne Schädigung der Betonstütze und der Schrauben gelöst werden. Somit ist eine Lösbarkeit der Verbindungsmittel und Bauteile bei diesem Detailpunkt nicht zu 100% gegeben.

Bei der Betrachtung des «Anschluss Strebe-Stütze» hingegen kann zunächst die Mutter gelöst, der Bolzen im Idealfall ausgetrieben werden. Stütze, Strebe und Bolzen wären wieder zu 100% ohne Schädigung voneinander gelöst.

Durch die Tabelle wird den Planenden die Möglichkeit gegeben, für bestimmte Detailpunkte eine passende Ausführung zu finden. Mittels einer hohen Lösbarkeit der Detailpunkte kann vermutlich ein schnellerer Rückbau der landwirtschaftlichen Halle erfolgen.

Prinzipiell sollte der Querschnitt der Vollholzbauteile, um eine Weiterverwertung der Holzbauteile zu gewährleisten, um 3 mm abgeschliffen werden. Dadurch wären biologische und chemische Einwirkungen auf die Holzbauteile beseitigt (AP 4). Bei der Verwertung ersetzen Abfälle Materialien oder sie werden soweit aufbereitet, dass sie Materialien, die eine bestimmte Funktion erfüllt hätten, ersetzen, § 3 Abs. 23 Kreislaufwirtschaftsgesetz (Bundesministerium der Justiz 2012). Bauteile, der Modulbauhalle, die sich bis 1,5 m über der Geländeoberkante befinden, müssen für eine Weiterverwertung noch intensiver bearbeitet werden. Nähere Erläuterungen dazu folgen im nachfolgenden Kapitel.

Da die Holzstützen nach dem Rückbau der Konstruktion nicht an einem anderen Standort ohne eine weitere Bearbeitung wieder aufgestellt werden können, ist davon auszugehen, dass eine Wiederverwendung nicht stattfindet.

Nach der Richtlinie 2008/98/ EG ist Wiederverwendung so definiert, dass Erzeugnisse oder ihre Bestandteile wieder für den ursprünglichen Zweck eingesetzt werden können. (Europäisches Parlament und Rat 2008) Der ursprüngliche Zweck wäre im vorliegenden Fall der Einsatz als gleichwertige landwirtschaftliche Halle.

Die Holzbauteile können demnach, als nächste Stufe des Recyclings, weiterverwertet werden. Eine Verwertung kann, wenn sie nicht endgültig ist, gleichwertig oder minderwertig stofflich sein. Unter einer gleichwertigen stofflichen Verwertung versteht man in Anlehnung an §3(23a) KrWG die Weiterverwertung der Holzstütze in Form von beispielsweise einer kürzeren Stütze. Eine minderwertige stoffliche Verwertung wäre in Anlehnung an das VDI 2243 (VDI 2243, 2002) eine Weiterverarbeitung der Holzstütze zu einem anderen Produkt beispielsweise einer Spanplatte. Als nächsten Schritt des Downcyclings könnten die Holzbauteile endgültig stofflich verwertet werden, z.B. in Form von Sägespänen oder endgültig energetisch verwertet werden, wenn die thermische Energie bei der Verbrennung des Materials als Heizenergie genutzt wird.

DEFINITION BEREICH WIEDERVERWERTBARER BAUTEILE ZUR ERMITTLUNG DER RECYCLINGMENGEN- UND POTENZIALE

Carina Hartmann, Özlem Özdemir, Annette Hafner
 Lehrstuhl Ressourceneffizientes Bauen, Ruhr-Universität Bochum

Für den Anteil und den Bereich der wiederverwendbaren Bauteile kann keine pauschale Aussage getroffen werden, da die Art der Kontamination von der Nutzung der Halle sowie Einflussfaktoren wie Schmutz, Staub, Kot und oberflächlichen Ablagerungen abhängig ist. Generell kann allerdings davon ausgegangen werden, dass ab einer Höhe über 1,50 m Oberkante des Fußbodens eine geringere Belastung vorliegt und somit mit weniger Aufwand zur Wieder- oder Weiterverwertung zu rechnen ist. Wohingegen das Material bis zu der 1,50 m Grenze gesondert geprüft werden und wahrscheinlich mit einem höheren Aufwand aufgearbeitet werden muss. Durch Reinigung und Desinfektion kann ein hygienisch unbedenklicher Zustand für eine Wieder- oder Weiterverwertung hergestellt werden. Ergänzende Informationen sind in Teil E aufgeführt.

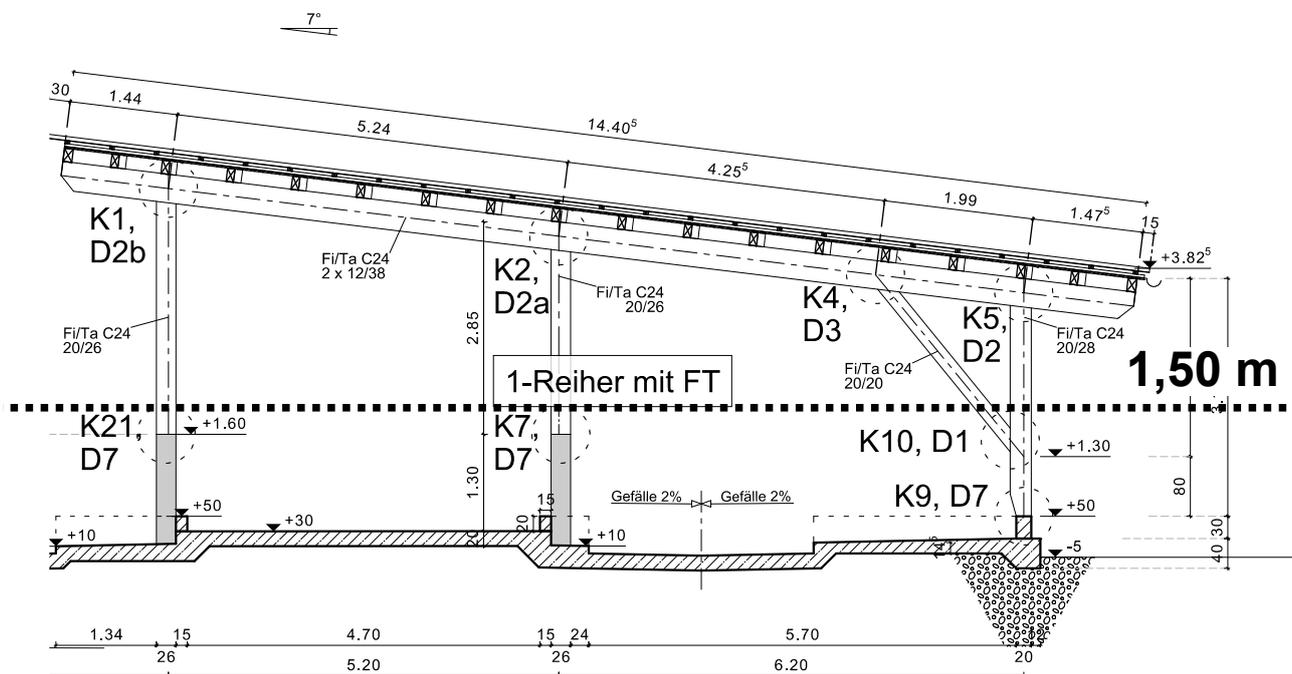


Abbildung 9: Querschnitt «landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite» mit Angabe 1,50 m Grenze

TEIL D: LCA GEBÄUDE

*Carina Hartmann, Özlem Özdemir, Annette Hafner
Lehrstuhl Ressourceneffizientes Bauen, Ruhr-Universität Bochum*

Eine bestehende Herausforderung zur ökologischen Bewertung ist das Fehlen einer breiten Datenbasis von landwirtschaftlichen Gebäuden. Diese ist notwendig, um die Daten für die Berechnung der Treibhausgasemissionen der Konstruktion und des Produktspeichers Kohlenstoff in Holzprodukten nutzbar zu machen und damit die Anforderungen an das landwirtschaftliche Bauen im 21. Jahrhundert im Hinblick auf den Klimaschutz quantifizieren zu können.

Diese emissions- und klimabezogenen Daten können Landwirte und Landwirtinnen, insbesondere kleinere, regional arbeitende Betriebe dabei unterstützen, bei Umsetzungen neuer Gebäude wieder mit Holz zu bauen. Außerdem können Wirtschaft (und Politik) die Ergebnisse verwenden, um die Nutzung von Holz sowie die Ressourceneffizienz im landwirtschaftlichen Bauen und somit die allgemeine Holzbauquote zu steigern. Planende können auf eine verbesserte Entscheidungsgrundlage zurückgreifen.

Die dafür notwendigen, belastbaren Angaben zu Ökobilanzen explizit für das landwirtschaftliche Bauen werden hier dargestellt.

Methodik:

Die Systemgrenzen für die Ökobilanzierung wurden wie folgt konform der Norm DIN EN 15978 festgelegt: Für die Module innerhalb der Gebäudebewertung wurden die Module A1-A3 (Herstellung), die Module B2 (Instandhaltung) und B4 (Austausch, Ersatz), die Module C3/C4 (Abfallbewirtschaftung und Entsorgung) und separat das Modul D (Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze) festgelegt. Die Grenze der Gebäudebetrachtung liegt bei der Unterkante der Fundamentplatte (Bsp. Entfall eines Güllekellers) und Ausschluss Nebengebäude (Bsp. Entfall Anbauten) um eine Vergleichbarkeit innerhalb der Gebäude zu gewährleisten. Für den Betrachtungszeitraum werden 50 Jahre angenommen. Als Grundlage für die Ökobilanzierungen wird die Datenbank ÖKOBAUDAT herangezogen.

ERGEBNISSE:

Treibhausgasminderungspotential (Gebäude):

Das Treibhausgasminderungspotential im Gebäudebereich stellt die Reduktion von Treibhausgasemissionen dar, die entsteht, wenn anstelle eines konventionellen Gebäudes ein funktional äquivalentes Holzgebäude gebaut wird. Grundlage sind normkonforme Berechnungen von Ökobilanzen auf Produkt und Gebäudeebene.



Treibhausgasminderungspotenzial
auf Gebäudeebene liegt zwischen 5 und 37%

Quelle: Comparative LCA study of wood and mineral non-residential buildings
in Germany and related substitution potential (Hafner and Özdemir 2022)

Tabelle 4: Treibhausgasemissionen (GWP) in kg CO₂-Äq/m² BGF für einen Standardstall und ein äquivalentes Holztragwerk für beispielhafte Gebäude mit kleiner und großer Spannweite

	GWP gesamt, Modul A+C	
		
Kleine Spannweite	333 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF	301 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF
Große Spannweite	188 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF	172 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF

Kohlenstoffspeicher:

Der Kohlenstoffspeicher zeigt die Speicherung des biogenen Kohlenstoffs in den Holzprodukten, dargestellt in CO₂ (Treibhauspotential (GWP biogen, mit negativem Vorzeichen) auf. Dieser ist über die Lebensdauer des Gebäudes gebunden.

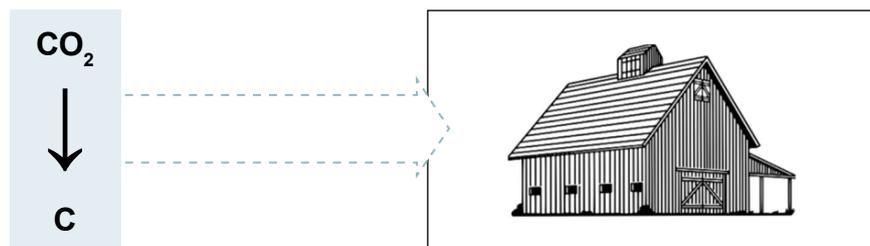


Tabelle 5: Kohlenstoffspeicher in kg CO₂-Äq/m² BGF für einen Standardstall und ein äquivalentes Holztragwerk für beispielhafte Gebäude mit kleiner und großer Spannweite

GWP biogen, Modul A	
	
0 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF*	-131,7 kg CO ₂ -Äq/m ² BGF*

*ermittelt am Beispiel Halle mit kleiner Spannweite

TEIL E: HYGIENE

Marie-Christin Mattauch, Anika Friese, Uwe Rösler
 Institut für Tier- und Umwelthygiene, Freie Universität Berlin
 Martin Oettler, Nicolai Denzin, Franz J. Conraths
 Institut für Epidemiologie, Friedrich-Loeffler-Institut

Allgemeine aktuelle rechtliche Grundlagen (Stand: Juni 2023)

Zahlreiche EU-Gesetzgebungen beschäftigen sich im Rahmen der Tiergesundheit mit der Reinigung und Desinfektion in der Tierhaltung. Diese vorgeschriebene EU-Gesetzgebung muss in das nationale Recht des jeweiligen Mitgliedstaats umgesetzt werden. Dabei besteht die Möglichkeit, die EU-Vorgaben zu spezifizieren.

EU-Recht		
Zulassung	Zulassung von Desinfektionsmitteln für den Tierseuchenbereich	<p>Biozid(product)verordnung (Verordnung (EU) 528/2012)</p> <ul style="list-style-type: none"> – Inhalt: Regelungen zum Verkauf, zur Abgabe und zur Verwendung von Biozidprodukten in der EU – vor Verwendung eines Wirkstoffes zunächst Genehmigungsverfahren durch die EU, anschließend Zulassungsverfahren des Biozidproduktes im Mitgliedsstaat oder EU-weit – zuständige Behörde in Deutschland: Bundesstelle für Chemikalien an der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2022)
Anwendung	Allgemeine und spezifische Maßnahmen zur Verhütung und Bekämpfung von Tierseuchen	<p>EU-Tiergesundheitsrechtsakt (VO (EU) 2016/429, Animal Health Law)</p> <p>mit nachgeordneten Rechtsakten (delegierte Rechtsakte und Durchführungsrechtsakte) gültig ab 04/2021</p> <ul style="list-style-type: none"> – „Basisverordnung“ → ersetzte ca. 450 alte Rechtsvorschriften – Inhalt: Vorschriften zur Prävention und Bekämpfung von Tierseuchen – Übertragung größerer Eigenverantwortung auf Tierhalter:innen, Unternehmer:innen, Tierärztinnen und Tierärzte und zuständige Behörden – Tierseucheneinstufung in Teil I – Präventions- u. Bekämpfungsmaßnahmen in Teil III – zugeordnete delegierte Verordnung (EU) 2020/687 zur Prävention und Bekämpfung bestimmter gelisteter Tierseuchen – Durchführungsrechtsakte für bestimmte Tierseuchen (ASP, KSP) (Stockmann 2021)
	Regelungen ökol./biol. Produktion	<p>Verordnung (EU) 2018/848 („Ökobasis-Verordnung“)</p> <ul style="list-style-type: none"> – Inhalt: spezifische Regelungen zur Reinigung und Desinfektion in der ökologischen/ biologischen Produktion – Vorschriften zur Anwendung bestimmter Reinigungs- und Desinfektionsmittel

Abbildung 10: Rechtsgrundlagen der EU zur Reinigung und Desinfektion in der Tierhaltung

Nationale Regelungen

Die Genehmigung und Zulassung von Desinfektionsmitteln für den Tierseuchen- und Lebensmittelbereich ist im deutschen Chemikaliengesetz geregelt

Anwendung	Maßnahmen zur Reinigung und Desinfektion im Tierstall bei Tierseuchenfreiheit	<p>Tierschutz–Nutztierhaltungsverordnung (TierSchNutztV)</p> <ul style="list-style-type: none">– Inhalt: Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere bei ihrer Haltung– allgemeine Regelung: Gebäudeteile, Ausrüstung und Geräte sind in angemessenen Abständen zu reinigen und erforderlichenfalls zu desinfizieren– tierartsspezifische Regelungen zur Desinfektion bei der Haltung von Legehennen, Masthühnern, Ferkeln und Kaninchen
	Maßnahmen zur Reinigung und Desinfektion im Tierstall bei Tierseuchenfreiheit	<p>Schweinehaltungshygieneverordnung (SchHaltHygV)</p> <ul style="list-style-type: none">– Inhalt: hygienische Anforderungen für die Haltung von Schweinen– tierartsspezifische Regelungen zur baulichen Voraussetzung, Ausstattung und Gestaltung des Stalls, um eine hygienische Haltung und ein hygienisches Transportieren der Schweine zu garantieren– außerdem Festlegung von Zeitpunkten zur Reinigung und Desinfektion von Gerätschaften, Schutzkleidung, Maschinen, etc.– Besonderheiten zu hygienischen Aspekten der Freilandhaltung
Anwendung	Allgemeine und spezifische Maßnahmen zur Verhütung und Bekämpfung von Tierseuchen	<p>Empfehlungen für Hygienemaßnahmen bei der Haltung von Wiederkäuern</p> <ul style="list-style-type: none">– Inhalt: Leitfaden mit betrieblichen Hygienemaßnahmen für wiederkäuerhaltende Betriebe– beschreibt risikobasierte und betriebsspezifische Basishygiene mit genauen Reinigungs- und Desinfektionsmaßnahmen– beinhaltet spezifische Maßnahmen beim Ausbruch von Krankheiten– schreibt Verantwortung für betriebseigene Hygiene dem/der Tierhalter:in zu (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2014)
		<p>Tiergesundheitsgesetz (TierGesG)</p> <ul style="list-style-type: none">– Inhalt: Vorbeugung und Bekämpfung von Tierseuchen– ermächtigt das BMEL Mittel und Verfahren zur Desinfektion im Falle einer Tierseuche fallspezifisch festzulegen– daraus entstand die Richtlinie des Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft über Mittel und Verfahren für die Durchführung der Desinfektion bei bestimmten Tierseuchen → nicht rechtlich bindende Empfehlung, nach der die zuständige Behörde die Desinfektion im Tierseuchenfall anweisen kann
		<p>Viehverkehrsverordnung (ViehVerkV)</p> <ul style="list-style-type: none">– Inhalt: Schutzmaßnahmen vor Tierseuchenverschleppung im Viehverkehr– legt spezifische Reinigungs- und Desinfektionsmaßnahmen für Transportmittel, Flächen, Räume und Gerätschaften fest
Anwendung	Allgemeine und spezifische Maßnahmen zur Verhütung und Bekämpfung von Tierseuchen	<p>Spezialverordnungen für spezifische anzeigepflichtige Tierseuchen</p> <ul style="list-style-type: none">– Inhalt: pro Verordnung spezifische Handlungsanweisungen für die jeweilige Tierseuche

Abbildung 11: Rechtsgrundlagen der EU zur Reinigung und Desinfektion in der Tierhaltung

Spezielle aktuelle rechtliche Grundlagen für Holz (Stand: Juni 2023)

- keine Richtlinien für gesonderte Behandlung bei vorbeugender Desinfektion
- Umschreibung von Holz in den Richtlinien zur Desinfektion im Tierseuchenfall:

Richtlinie des BMEL über Mittel und Verfahren für die Durchführung der Desinfektion bei bestimmten Tierseuchen

- „brennbare Gegenstände werden der thermischen Verwertung zugeführt“ – Abschnitt Reinigung
- „brennbare Gegenstände von geringem Wert sind zu verbrennen“ – Abschnitt Bovine Virus Diarrhoe

- **die Entscheidung über die im tierseuchenspezifischen Fall anzuwendende Desinfektion liegt beim Veterinäramt**
- die Ergebnisse des Projekts werden aktuell in den entsprechend verantwortlichen Ausschüssen und Gremien diskutiert

Abbildung 12: Vorgaben zur Reinigung und Desinfektion von Holz in der Tierhaltung

Auswahl eines geeigneten Desinfektionsmittels

Die chemische Desinfektion ist das Mittel der Wahl zur Erregerinaktivierung im Tierstall (Böhm 2008). Zur Auswahl für eine erfolgreiche Desinfektion stehen Grundchemikalien oder Handelspräparate. Für den Tierseuchenfall müssen und für die Routinedesinfektion sollten die Handelspräparate die Handelspräparate durch die Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft (DVG) auf ihre Wirksamkeit geprüft und in der DVG-Desinfektionsmittelliste für den Tierhaltungsbereich veröffentlicht sein (Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e.V. (DVG) 2022). Auf Desinfektionsmittellisten aus dem humanmedizinischen Bereich sollte beim Desinfizieren von Stalloberflächen verzichtet werden. Die Auswahl des Desinfektionsmittels erfolgt entsprechend nachstehendem Schema:

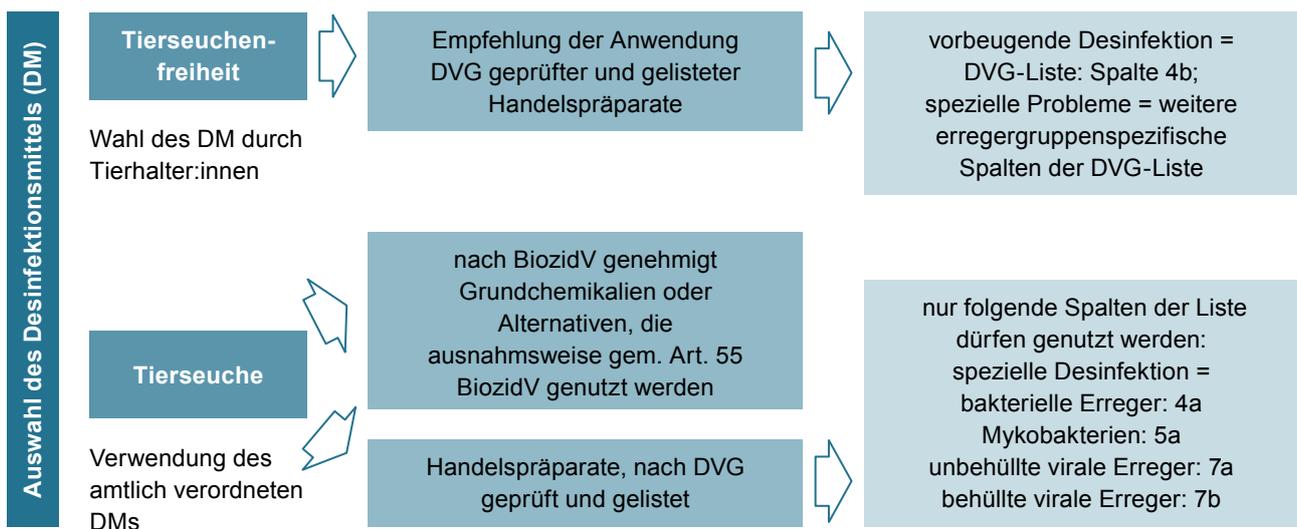


Abbildung 13: Auswahl eines geeigneten Desinfektionsmittels im Tierhaltungsbereich

Durchführung der Reinigung und Desinfektion im Stall

Vor der Desinfektion muss zunächst eine **Reinigung** erfolgen. Diese gliedert sich in die nachfolgenden Arbeitsschritte (Strauch and Böhm 2002, Stoy 1983):



Abbildung 14: Ablauf der Stallreinigung

Um die wirksame Desinfektion des Tierstalls zu gewährleisten, sind folgende Punkte zu beachten (Bodenschatz 2012, Gauly et al. 2016, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft 2023):

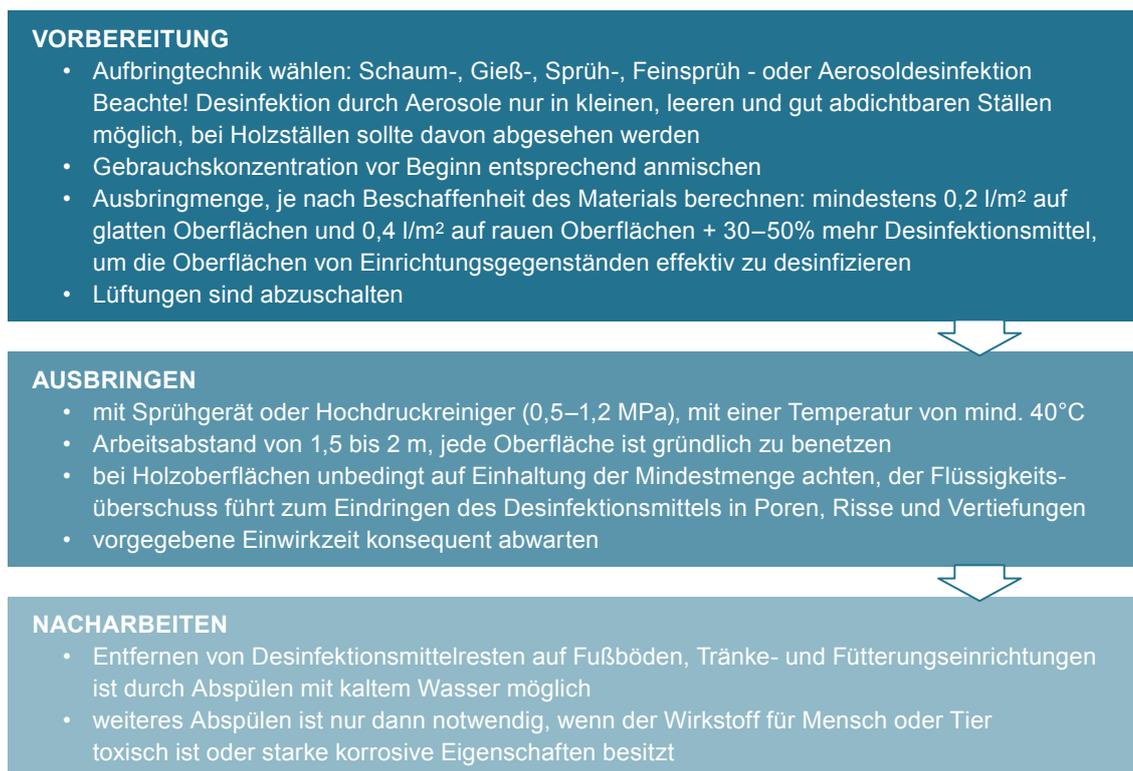


Abbildung 15: Ablauf der Stalldesinfektion

Einflussfaktoren einer erfolgreichen Desinfektion

Viele Faktoren können die Wirksamkeit des Desinfektionsmittels beeinflussen. Einige davon sind in folgender Grafik aufgeführt (Müller and Schlenker 2021, Strauch and Böhm 2002, Gauly et al. 2016, Wales et al. 2021, Bremer 2003):

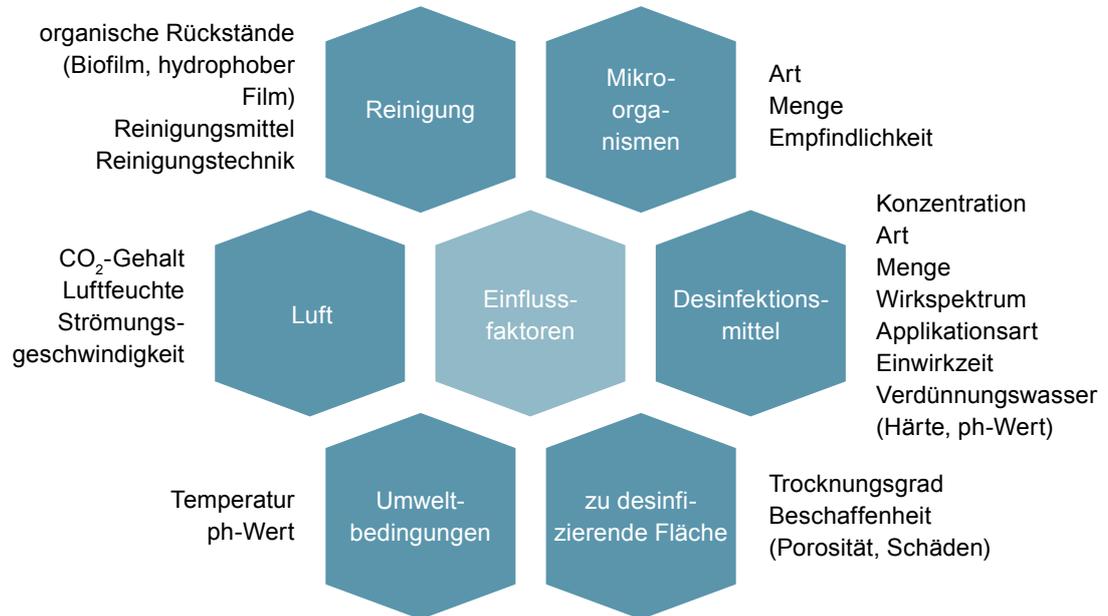


Abbildung 16: Einflussfaktoren einer erfolgreichen Desinfektion

Untersuchungsergebnisse

Es wurden Desinfektionsversuche unter Laborbedingungen durchgeführt. Diese erfolgten in Anlehnung an europäische und nationale Richtlinien zur Testung von Desinfektionsmitteln für den Teilbereich Tierhaltung. Dabei wurden die Desinfektionswirkungen von Peressigsäure, Ameisensäure und Glutaraldehyd auf Holzoberflächen untersucht. Als Prüfoberflächen dienten Fichten- und Kiefernholz als klassische Bauhölzer sowie Pappelholz als Referenz. Diese wurden mit repräsentativen bakteriellen und viralen Erregern kontaminiert und anschließend desinfiziert. Die Untersuchungen zeigten, dass eine Desinfektion von intakten, feingesägten Holzoberflächen mit geringer Rautiefe möglich ist. Die Wahl des Desinfektionsmittels ist dabei jedoch entscheidend. Peressigsäure stellte unabhängig von der Holzart und vom Erreger unter den getesteten Umweltbedingungen (10°C, -10°C) ein wirksames Desinfektionsmittel für Holzoberflächen dar. Ausführliche Informationen zu den durchgeführten Untersuchungen und zur Wirksamkeit anderer Wirkstoffe auf verschiedenen Hölzern können dem Schlussbericht entnommen werden.

Zusammenfassung

Besonderheiten der Reinigung und Desinfektion von Holz:

- abgenutzte, verschlissene oder verwitterte Holzteile sind auszutauschen
- sorgfältige Reinigung (Verbundteile!) mit verlängerten Einweich- u. Abtrocknungszeiten (+ca. 50%)
- Applikationsmenge des Desinfektionsmittels von 0,4 l/m² darf nicht unterschritten werden
- Peressigsäure zur effektiven Desinfektion von intaktem, feingesägtem Bauholz mit geringer Rautiefe empfohlen; andere Wirkstoffe können bei bestimmten Erregern, Hölzern und milden Temperaturen ebenfalls wirksam sein (siehe Schlussbericht)

Abbildung 17: Besonderheiten der Reinigung und Desinfektion von Holz

POTENTIELLE CHEMISCHE EINFLUESSE AUF HOLZ(BAU)TEILE

Regina Wanschura, Elisabeth Windeisen-Holzhauser, Klaus Richter

Lehrstuhl für Holzwissenschaft, TUM School of Life Sciences, Technische Universität München

Die potentiellen Belastungen sind aufgrund der vielfältigen Einbausituationen **physikalischer/mechanischer** (Biss, Tritt, Abrieb, statische oder dynamische Kräfte, Sorption, Quellen und Schwinden, UV-Strahlung, Temperaturschwankungen), **biologischer** (Bakterien, Pilze, Insekten) und **chemischer** Natur (Inhaltsstoffe der Stallatmosphäre, Mist/Gülle, Desinfektionsmittel).

Bei Stallatmosphären handelt es sich um heterogene Mischatmosphären, d.h. mehrere Verbindungen werden als Gase oder Aerosole gemeinsam mit unterschiedlichen Mengen Wasserdampf emittiert. Daneben treten auch nichtflüchtige (trockene) Stäube auf (Erler 1998). Als wichtigstes Gas ist Ammoniak (NH₃) zu nennen, welches als Zersetzungsprodukt aus Exkrementen entsteht, die Harnstoff und Proteine beinhalten (Belie et al. 2000, Pflanz 2007). Des Weiteren werden Desinfektionsmittel zu Reinigungszwecken eingesetzt.

Um etwaige Veränderungen innerhalb des kurzen Beobachtungszeitraumes messbar zu machen, wurden sowohl (1) Labor- als auch (2) Feldversuche durchgeführt. Für die Laborversuche wurden kleine Holzproben einer extremen, in der normalen Stallumgebung nicht auftretenden Ammoniak-Atmosphäre ausgesetzt. Die so erzielten Ergebnisse können als eine Art Worst-Case-Szenario betrachtet werden und folglich nur im Vergleich mit Feldversuchen für den Realfall interpretiert werden. Für die Feldversuche wurden in ausgewählten Ställen an verschiedenen, durch Tierkontakt belasteten Bauteilen mittels einer Rasierklinge Proben der Holzart Fichte genommen.

(1) Laborversuche

Einfluss des NH₃-Gases auf die Holzarten Buche, Douglasie, Fichte, Kiefer, Pappel und auf Mehrschichtplatten aus Buche sowie Fichte/Kiefer:

- Der pH-Wert der nativen, unbehandelten Referenz-Holzoberflächen liegt im schwach sauren Bereich (pH 3,9–4,9). Direkt nach der NH₃-Belastung steigt der pH-Wert der Oberfläche zwar stark ins Basische an, sinkt aber nach einer Lagerzeit von 3 Wochen in Umgebungsatmosphäre wieder ab und verbleibt im schwach Basischen (pH 7,8–8,4). Ein Einfluss auf das Tier ist daher nicht zu erwarten. Die Holzstruktur wird durch die intensive (in der Stallumgebung nicht vorkommende) NH₃-Belastung oberflächlich angegriffen: neben einer starken Dunkelfärbung der Probe, kann elektronenmikroskopisch ein Aufquellen der Zellwände festgestellt werden.
- Die Untersuchung des zur Verklebung genutzten Phenolharzes aus handelsüblichen Mehrschichtplatten zeigte keinen Einfluss des gasförmigen NH₃ im Worst-case-Szenario (Mehrschichtplatte aus Furnieren: Buchen- sowie eine Mischung aus Kiefern- und Fichtenfurnieren).

Erfassung der Desinfektionsmittelwirkung auf Buche, Douglasie, Fichte, Kiefer, Pappel:

- Die Oberflächen pH-Werte der nativen, unbehandelten Referenzen werden durch die (nach dem Trocknen) verbliebene Säure des Desinfektionsmittels (Ameisensäure und Peressigsäure) deutlich unter ihren natürlichen pH-Wert abgesenkt (pH 2,9–4,3).
- Die abwechselnde Belastung der Proben mit NH_3 und Ameisensäure oder Peressigsäure auf der Oberfläche führt zu einem Absenken des Oberflächen pH-Wertes in den schwach sauren bis neutralen Bereich (pH 5,5–7,1).
- Ein mit Peressigsäure durchgeführter Belastungsversuch lässt darauf schließen, dass es hierdurch zwar zu Abbauerscheinungen an der Holzmatrix kommt, diese aber erst bei unrealistisch hohen Konzentrationen (15%ige Peressigsäure) und gleichzeitig sehr langen Einwirkzeiten mikroskopisch auffällig in Erscheinung treten: Bei den empfohlenen Konzentrationen kommt es selbst bei 50-facher Desinfektionswiederholung nur vereinzelt zu oberflächlichen, mikroskopisch nachweisbaren Schäden.

(2) Feldversuche

- Die Untersuchung der Proben aus den Feldversuchen zeigt, dass selbst bei stark belasteten Hölzern (in diesem Fall Fichte, bodenliegend im Kälberstall seit über 10 Jahren) der Einfluss oberflächlich ist. Auf der Rückseite eines Schnittes mit der Rasierklinge ($< 0,5$ mm) konnte spektroskopisch keine Veränderung der Holzmatrix mehr nachgewiesen werden.
- Ebenso konnten keine Emissionen aus den Hölzern, welche sich auf eine Wechselwirkung mit dem NH_3 -Gas (wie beispielsweise Acetamid) in der Stallatmosphäre zurückführen ließen, in den Proben der Feldversuche bestimmt werden.

TEIL F:

HOLZPRODUKTE

Regina Wanschura, Elisabeth Windeisen-Holzhauser, Klaus Richter

Lehrstuhl für Holzwissenschaft, TUM School of Life Sciences, Technische Universität München

KONVENTIONELL IM STALLBAU GENUTZTE UND POTENTIELL NUTZBARE HOLZPRODUKTE UND HOLZARTEN

Es werden konstruktive Vollholzprodukte wie Baurundholz, Bauschnittholz, Brettschichtholz und Balkenschichtholz sowie konstruktive Holzwerkstoffe wie Bau-Furniersperrholz, Furnierschichtholz, Brettsperrholz, OSB-Platten oder Faserplatten verwendet. In der Regel werden für überdachte Anwendungen technisch getrocknete Sortimente genutzt (Stockinger et al. 2001, Egle 2002)

Im Stallbau in Deutschland werden hauptsächlich die Holzarten Fichte (Tanne), Kiefer, Lärche, Douglasie und Eiche eingesetzt. In allen baunahen Bereichen werden überwiegend einheimische Nadelholzarten (Fichte, Tanne, Kiefer und Lärche) verwendet, da diese ausreichend verfügbar sind, ein geringeres spezifisches Gewicht als die meisten Laubholzarten haben und hervorragende Bearbeitungsmöglichkeiten aufweisen.

Bisher wird Laubholz (z.B. Buche, Eiche, Ahorn) nur in geringerem Umfang genutzt (Egle 2002, Stockinger et al. 2001, Neuhaus 2017). Laubbaumarten mit zukünftigem Potential für bauliche Anwendungen wären neben der Buche und Eiche beispielsweise die Edelkastanie und Robinie. Besonders auch Holzwerkstoffe auf Basis von Laubhölzern haben trotz der technischen Herausforderungen bei Herstellung und Bearbeitung in den letzten Jahren zunehmend Aufmerksamkeit erhalten. Es ist davon auszugehen, dass die Wertschöpfung bei Laubbaumarten sich zudem durch Fortschritte in Sortier- und Klebstofftechnologie in den nächsten Jahren verbessern wird (Knauf, M. Fruehwald, A. 2020) Eine weitere Möglichkeit, um die Einsatzdauer von Holzprodukten im landwirtschaftlichen Bau zu erhöhen, stellen bekannte Holzschutzverfahren oder Holzmodifikationen dar (Bsp. Räuchern, thermische oder chemische Verfahren wie Acetylierung, Furfurylierung). Ob sich die Nutzung dieser Produkte im Stallbau wirtschaftlich lohnt, muss allerdings gesondert betrachtet werden. Der Einsatz von chemischen Holzschutzmaßnahmen mit konventionellen Schutzmitteln zum Zweck der Erhöhung der Widerstandsfähigkeit gegen biotischen Abbau stellt aufgrund der hohen Toxizität, die vielen dieser Mittel zu eigen ist, keine Alternative dar (Jiang et al. 2019) .

Tabelle 6: Konventionelle und potentielle Holzarten für den Stallbau

Holzart	Dauerhaftigkeitsklasse nach DIN EN 350	Beispiel Einbausituation (nicht tragend)	Holzartenspezifische Besonderheiten (im Hinblick auf die Verwendung im Stall)
Fichte	4	Trennwände, Türen von Innenboxen, Schalungen, Tore, Abdeckungen	Die Tanne wurde früher beim Stallbau der Fichte vorgezogen. Sie gilt als wesentlich unempfindlicher gegen Kot und Harn (Kaller 2004), ist harzfrei sowie geruchs- und geschmacks-neutral; sie wird erfahrungsgemäß von Rindern nicht angebissen (ÖKL-BAUEN).
Tanne			
Kiefer	3–4	Trennwände, Türen im geschützten Außenbereich	Im Holz vorhandene Terpene gelten teils als giftig für Pferde (nicht für Rinder); es sind keine dokumentierten Nachweise über Vergiftungen durch das Anknabbern von Boxenwänden etc. bekannt (Grosser 2007, Rosenthal et al. 2010a, Grosser, Rosenthal et al. 2010b, Grosser and Ehmke 2012a).
Lärche		Stalltüren, Außenstellen, Tränken, regelmäßig durch Spritzwasser befeuchtet	Empfohlen bei Verbiss-Gefahr (Rosenthal et al. 2010a, Grosser and Ehmke 2012b).
Douglasie	3		Einsatz als Bretter und Bohlen für Schweineställe und Gülletanks empfohlen (Grosser, D., Teez, W. 1998).
Buche	5	Trennwände, Türen von Innenboxen, nicht der Bewitterung ausgesetzt	Angaben über entstehende Schmierfilme. Welcher Natur diese Schmierfilme sind, ist nicht näher bekannt (ÖKL-BAUEN).
Pappel		Abdeckungen, nicht bewitterte Verschalungen; Giebel- und Stützenverkleidung	Als Opferholz für Verbiss; wird auch für Boxen in Reit- und Pferdeställen als geeignet erachtet (Grosser, D., Teez, W. 1998c)
Eiche	2	Ungeschützte, horizontal liegende Bauteile im Außenbereich ohne Mistkontakt	Mit Ammoniak gebeiztes Eichenholz wird als Räuchereiche bezeichnet. In früheren Zeiten wurde das Räuchern von Holz zum Schutz gegen den Abbau von Pilzen und Insekten angewendet (Ehmke and Grosser 2014)
Robinie	1–2		Vermeintliche Toxizität für Tiere beruht auf gemeinsamer Nennung von Holz und Rinde sowie unbelegten Verweisen auf Vergiftungen durch Verbiss (Uhlig et al. 2008). Untersuchungen weisen explizit die Rinde, nicht aber das Holz als ursächlich für Vergiftungen bei Pferden aus (Benthien et al. 2018).

TEIL G:

RESSOURCENPOTENZIAL

Sabine Helm, Gabriele Weber-Blaschke

Forschungsbereich Stoffstrommanagement, Holzforschung München, TUM School of Life Science, Technische Universität München

HOLZRESSOURCENPOTENZIAL FÜR UND IN LANDWIRTSCHAFTLICHEN BETRIEBEN

Waldbesitz in Deutschland

Etwa 43% der deutschen Wälder sind in Privatbesitz. Ein Drittel (32%) davon ist im Besitz landwirtschaftlicher Betriebe. Der bäuerliche Waldbesitz entspricht damit knapp einem Siebtel (14%) der gesamten Waldfläche Deutschlands (Abbildung 18). Der Anteil an bäuerlichem Privatwald in den einzelnen Bundesländern schwankt zwischen 31% (Schleswig-Holstein: 51 Tsd. ha) und 2% (Saarland: 1 Tsd. ha). Die größten bäuerlichen Waldflächen finden sich in Bayern mit 550 Tsd. ha (22% Anteil) und Niedersachsen mit 174 Tsd. ha (19% Anteil) (Destatis 2021b, 2021c, 2022).



Abbildung 18: Waldbesitz in Deutschland (Destatis 2022, 2021c)

Größe und Holzvorräte des bäuerlichen Privatwaldes

Mehr als die Hälfte (53%) der landwirtschaftlichen Betriebe besitzen eigene Wälder. Abhängig von der landwirtschaftlichen Betriebsform und der Region schwankt die durchschnittliche Waldbesitzgröße in den einzelnen Bundesländern zwischen 6 ha und 36 ha (Ø 10 ha) (Destatis 2021b). Die Holzvorräte verschiedener Baumarten im Privatwald sind ebenfalls regionalspezifisch. Im Norden und Osten Deutschlands dominiert die Kiefer. Im Süden, Westen und in der Mitte Deutschlands dominiert die Fichte und es gibt verhältnismäßig hohe Buchenvorräte (BWI 2012).

Fazit und Handlungsempfehlungen

- Grundsätzlich steht für das landwirtschaftliche Bauen in Deutschland regionales, häufig auch betriebseigenes Holz zur Verfügung.
- Die Verwendung anderer Baumarten als Fichte für den konstruktiven und auch nicht-konstruktiven Bereich bietet regionalspezifische Potenziale.
- Durch die regionalen Unterschiede ist zur Förderung des landwirtschaftlichen Holzbaus eine regionalspezifische Herangehensweise notwendig.

ERFOLGSFAKTOREN FÜR FUNKTIONIERENDE WERTSCHÖPFUNGSKETTEN

Berücksichtigung landwirtschaftlicher Betriebsverhältnisse

Im Norden, Westen und Süden Deutschlands gibt es tendenziell eine hohe Anzahl kleinerer Betriebe mit geringeren Viehbeständen. Die durchschnittliche landwirtschaftliche Fläche je Betrieb liegt zwischen 38 ha (Bayern) und 89 ha (Schleswig-Holstein). In den östlichen Bundesländern gibt es weniger, aber dafür größere landwirtschaftliche Betriebe mit durchschnittlich zwischen 153 ha (Sachsen) und 301 ha (Mecklenburg-Vorpommern) Betriebsfläche. Entsprechend variabel sind die Anforderungen an den Bau landwirtschaftlicher Gebäude und an die Funktionalität der (regionalen) Wertschöpfungskette (Destatis 2021a, 2021b, 2021d).

Verfügbarkeit von Akteuren und Akteurinnen der Wertschöpfungskette Holz

Für die Verarbeitung und Nutzung regionaler Holzrohstoffe ist eine ausreichende Verfügbarkeit und Funktionalität relevanter Akteure der Wertschöpfungskette nötig. In Deutschland sank die Anzahl an Sägewerken zwischen 2000 und 2019 um gut ein Drittel, das entspricht einem Verlust von rund 1.500 Sägewerken. Die Zahl der Zimmereibetriebe stieg um 18 % an (Thünen-Institut 2022). Die Verfügbarkeit der Betriebe unterscheidet sich jedoch nach Region (Abbildung 19). Im Süden gibt es viele Sägewerke, insbesondere in Bayern und Baden-Württemberg. Die meisten Zimmereien finden sich in Baden-Württemberg, Schleswig-Holstein und Bayern.

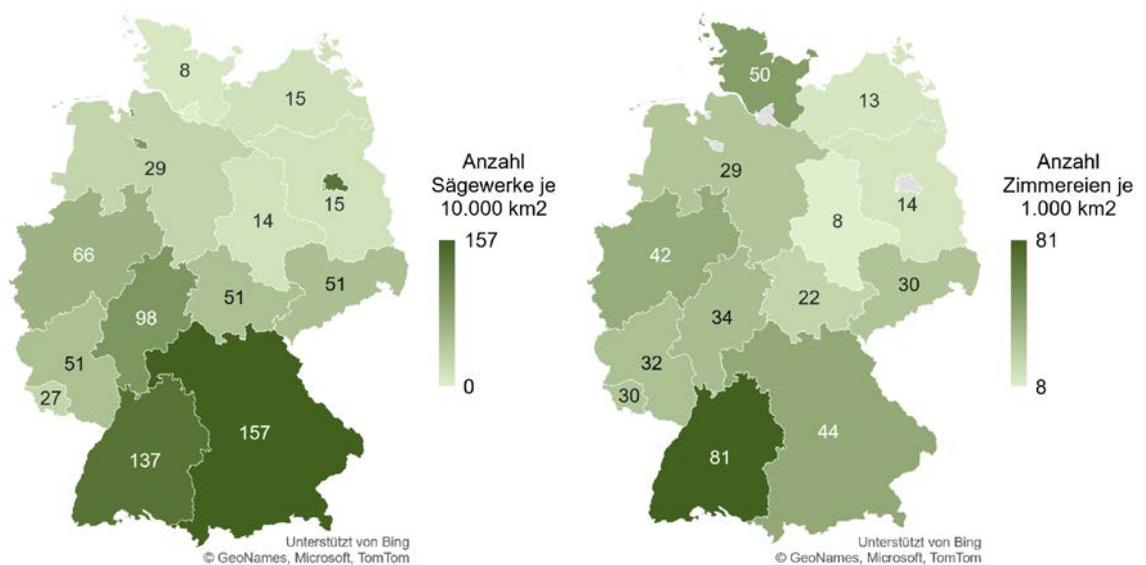


Abbildung 19: Aufkommen an Sägewerken und Zimmereien je 1.000 bzw. 10.000 km² Fläche in den einzelnen Bundesländern (bei Zimmereien, ohne Stadtstaaten) im Jahr 2019 bzw. 2014 für Sachsen-Anhalt und 2018 für Mecklenburg-Vorpommern (Thünen-Institut 2022)

Einflussfaktoren für die Umsetzung landwirtschaftlicher Holzbauprojekte

Zur Identifikation von Einflussfaktoren wurden 205 in der Landwirtschaft tätige Personen mit Holzbauerfahrung online befragt. Knapp die Hälfte der Befragten (49%) gaben an, mit eigenem Holz gebaut zu haben. Meistgenannte Hemmnisse bei der Umsetzung landwirtschaftlicher Holzbauten sind fehlende Unterstützung durch die Bauberatung und Bauplanung sowie Probleme mit der Agrarbauförderung. Schwierigkeiten hinsichtlich der Wertschöpfungskette waren die Verfügbarkeit geeigneter Sägewerke und Zimmereien. Gründe warum die Landwirtinnen und Landwirte ihren eigenen Wald nicht als Rohstofflieferanten nutzen, sind vor allem fehlende finanzielle Rentabilität, Schwierigkeiten bei der Bringung, hohe technische Anforderungen an das Bauholz und das Fehlen qualitativ geeigneter Bäume bzw. Baumarten im eigenen Wald. Mehr als ein Drittel der Befragten gab an, dass die agrarbauförderlichen Bedingungen bei der Erbringung von Eigenleistung sie von der Nutzung des eigenen Holzes abhalten.

Effekte landwirtschaftlicher Holzbauprojekte auf die (regionale) Wertschöpfung

Um die Effekte auf die (regionale) Wertschöpfung zu erfassen, wurden 16 landwirtschaftliche Holzbauprojekte in unterschiedlichen Regionen Deutschlands detailliert analysiert. Soziale Effekte wurden mittels Art und Anzahl involvierter Akteure, ökonomische Effekte in den Regionen mittels Wertschöpfung sowie ökologische Effekte mittels Transportaufwand abgeleitet.

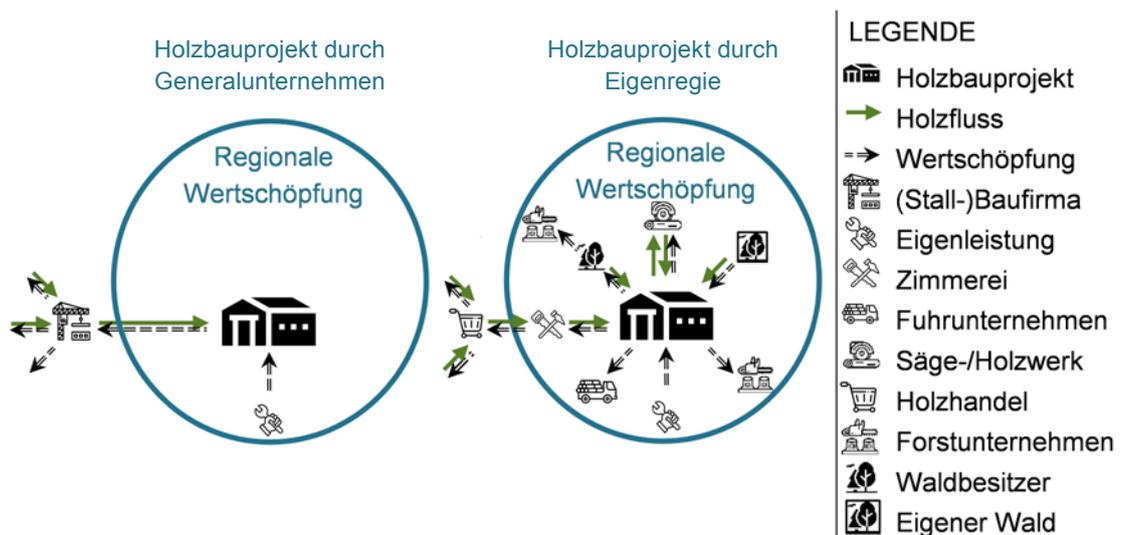


Abbildung 20: Beispielhafte Darstellung der Holz- und Wertschöpfungsflüsse bei landwirtschaftlichen Holzbauprojekten, die durch einen Generalunternehmer (links) und durch Eigenregie mit regionalen Akteuren und der Nutzung von eigenem / regionalem Holz (rechts) abgewickelt wurden.

Die Anzahl und Art der involvierten Akteure sind stark abhängig vom Einsatz eigenen oder regionalen Holzes (Abbildung 20). Wird eigenes oder regionales Holz verwendet, liegt die mittlere Anzahl der Akteure bei den untersuchten Holzbauprojekten bei 3,7, wenn Holz zugekauft wird bei 1,2. Wird die Holzbeschaffung in Eigenregie bzw. über eine ortsansässige Zimmerei geplant, wird in der Regel eigenes oder regionales Holz eingekauft und vor Ort verarbeitet.

Der Anteil der regionalen Wertschöpfung an der gesamten Wertschöpfung, wenn mindestens drei regionale Akteure beteiligt sind, liegt in den untersuchten Holzbauprojekten zwischen 74% und 100%. Wenn nur ein Generalunternehmen involviert ist, liegt der Anteil zwischen 16% und 18%. Große Bauobjekte, die über Generalunternehmen abgewickelt werden, können jedoch die absolute regionale Wertschöpfung deutlich erhöhen, indem zusätzlich zum Generalunternehmen einzelne regionale Akteure, beispielsweise Zimmereien in den Bau miteinbezogen werden.

Wird eigenes Holz verwendet, sind vermehrt regionale Akteure beteiligt und der Transportaufwand liegt bei den untersuchten Holzbauprojekten im Schnitt bei 31 tkm. Wird Holz ausschließlich zugekauft, in den meisten Fällen von einem Generalunternehmen, liegt der durchschnittliche Transportaufwand bei 256 tkm, die weiteste Entfernung bei 710 km.

Fazit und Handlungsempfehlungen

- Die Verwendung von eigenem Holz beim landwirtschaftlichen Bauen bietet eine ressourceneffiziente Lösung mit hohem Potenzial.
- Kleinere Bauprojekte (z.B. Lagerhallen, Maschinenhallen) lassen sich leichter als große und komplexe Bauprojekte (z.B. Viehställe) mit eigenem / regionalem Holz realisieren.
- Zur Gewährleistung der Rentabilität des Einsatzes von eigenem Holz bei der Umsetzung des Agrarinvestitionsförderungsprogramms (AFP) ist die Anerkennung der Förderfähigkeit der Bereitstellung von eigenem Holz notwendig.
- Wichtige Erfolgsfaktoren beim landwirtschaftlichen Holzbau sind kompetente und regional verfügbare Akteure der Wertschöpfungskette sowie Unterstützung und fachliche Expertise der Bauberatung und -planung.
- Bauen mit eigenem / regionalem Holz erhöht durch die Einbindung einer Vielzahl an Akteuren und Akteurinnen die regionale Wertschöpfung, sichert Arbeitsplätze und Einkommen in ländlichen Regionen und fördert durch geringeren Transportaufwand den Klimaschutz.

LITERATURVERZEICHNIS

- Belie N de, Richardson M, Braam CR, Svennerstedt B, Lenehan JJ, Sonck B (2000)
Durability of Building Materials and Components in the Agricultural Environment: Part I, The agricultural environment and timber structures. *Journal of Agricultural Engineering Research* 75(3):225–241. doi: 10.1006/jaer.1999.0505
- Benthien JT, Höpken M, Melcher E, Gäckler S, Ohlmeyer M (2018)
Zur Dauerhaftigkeit von Stallbohlen für die Pferdehaltung. Thünen Working Paper, Braunschweig
- Bodenschatz W (2012)
Kompaktwissen Desinfektion: Das Handbuch für Ausbildung und Praxis. Behr's Verlag DE
- Böhm (2008)
Skriptum Tierseuchendesinfektion. Reinigung und Desinfektion im Tierseuchenfall, Hohenheim
- Bremer P (2003)
Untersuchungen zur viruziden Wirksamkeit von chemischen Desinfektionsmitteln bei verschiedenen Temperaturen. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Gießen
- BWI (2012) Dritte Bundeswaldinventur (2012). Ergebnisdatenbank. <https://bwi.info/start.aspx>
- Destatis (2021a)
Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung - Fachserie 3 Reihe 5.1 - 2020, Wiesbaden
- Destatis (2021b)
Bodennutzung der Betriebe (Landwirtschaftlich genutzte Flächen). Fachserie 3 Reihe 3.1.2, Wiesbaden
- Destatis (2021c)
Bodennutzung der Betriebe (Struktur der Bodennutzung). Fachserie 3 Reihe 2.1.2, Wiesbaden
- Destatis (2021d)
Viehhaltung der Betriebe. Landwirtschaftszählung 2020. Fachserie 3 Reihe 2.1.3, Wiesbaden
- Destatis (2022)
Strukturerhebung der Forstbetriebe. Waldfläche: Bundesländer, Jahre, Waldeigentumsarten. https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Wald-Holz/_inhalt.html
- Deutsche Veterinärmedizinische Gesellschaft e.V. (DVG) (2022)
DVG-Desinfektionsmittelliste für den Tierhaltungsbereich. <https://www.desinfektion-dvg.de/index.php?id=2150>. Accessed 29 Sep 2022
- Dietsch P, Jiang Y, Winter S (2018a)
Landwirtschaftliches Bauen mit Holz – vorbeugender chemischer Holzschutz zwangsläufig notwendig?
- Dietsch P, Jiang Y, Winter S (2018b)
Landwirtschaftliches Bauen mit Holz – vorbeugender chemischer Holzschutz zwangsläufig notwendig?
24. Internationales Holzbau-Forum IHF 2018
- Egle J (2002a)
Dauerhafte Holzbauten bei chemisch-aggressiver Beanspruchung. Informationsdienst Holz 2002
- Egle J (2002b)
Informationsdienst Holz. Dauerhafte Holzbauten bei chemisch-aggressiver Beanspruchung. Holzbauhandbuch, München
- Ehmke G, Grosser D (2014)
Das Holz der Eiche – Eigenschaften und Verwendung
- Erler K Modifikationsfaktor aggressive Medien- Vorschlag für eine Ergänzung des CIP-Model-Codes.
In: *Bauforschung Baupraxis*, vol 280, pp 5–7
- Erler K (1998)
Korrosion von Vollholz und Brettschichtholz. *Bautechnik* 75(8):530–538. doi: 10.1002/bate.199804090
- Gauly M, Hoy S, Krieter J (2016)
Nutztierhaltung und -hygiene, 2. überarb. Aufl.
- (2012) Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG). KrWG

Grosser D
Das Holz der Kiefer- Eigenschaften und Verwendung. LWF Wissen

Grosser D (2007)
Das Holz der Kiefer. Eigenschaften und Verwendung 57:67–72

Grosser D, Ehmke G (2012a)
Das Holz der Lärche- Eigenschaften und Verwendung. LWF Wissen, Freising

Grosser D, Ehmke G (2012b)
Das Holz der Lärche- Eigenschaften und Verwendung. LWF Wissen, Freising

Grosser, D. , Teez, W. (1998c)
Nr. 14. Pappel. Einheimische Nutzhölzer (Loseblattsammlung).

Grosser,D., Teez,W. (1998)
Blatt No.5: Douglasie. Informationsdienst Holz, Einheimische Nutzhölzer (Loseblattsammlung).
Absatzförderungsfonds der deutschen Forstwirtschaft

Hafner A, Özdemir Ö (2022)
Comparative LCA study of wood and mineral non-residential buildings in Germany and related substitution potential.
Eur. J. Wood Prod. doi: 10.1007/s00107-022-01888-2

DIN 68800-2:2022-02
Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin

ILT 4 c Insitut für Landtechnik und Tierhaltung Pläne Modulbausystem Grub-Weihenstephan 2-Reiher, 1-Reiher mit Futtertisch, Technikgebäude

Jiang Y, Dietsch P, Winter S (2019)
Landwirtschaftliche Nutzgebäude aus Holz. In: Wald und Mehr

Kaller U (2004)
Baum des Jahres 2004. Weisstanne (Abies alba). http://www.baumdoktor.com/cms/index.php?option=com_content&view=article&id=74&Itemid=83&lang=de. Accessed 17.10.22

Knauf, M. Fruehwald, A. (2020)
Laubholz-Produktmärkte aus technisch-wirtschaftlicher und marktstruktureller Sicht. Zukunftsstudie.

Müller W, Schlenker G (2021)
Kompendium der Tierhygiene: 6. Lehmanns Media

Neuhaus H (2017)
Ingenieurholzbau. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden

Office P (2008)
Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien

ÖKL-BAUEN Holzarten. Fichte und Tanne. Typische Anwendungsmöglichkeiten.
<https://oekl-bauen.at/cms/baustoffe/holz/holzarten.php>. Accessed 17.10.22

ÖKL-BAUEN Holzarten. Fichte und Tanne. Typische Anwendungsmöglichkeiten.
<https://oekl-bauen.at/cms/baustoffe/holz/holzarten.php>. Accessed 17.10.22

Pflanz W (2005)
Tier- und umweltgerechte Haltungsverfahren in der Schweinehaltung: Gesamtheitliche Bewertung innovativer Schweinemastverfahren für Baden-Württemberg

Pflanz W (2007)
Tier- und umweltgerechte Haltungsverfahren in der Schweinehaltung: Gesamtheitliche Bewertung innovativer Schweinemastverfahren für Baden-Württemberg, Hohenheim

VDI 2243 (2002)
Recyclingorientierte Produktentwicklung. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf

(2023) Richtlinie über Mittel und Verfahren für die Durchführung der Desinfektion bei bestimmten Tierseuchen

Rosenthal M, Bäucker E, Bues C (2010a)
Holzaufbau und Tränkbarkeit. Zum Einfluss der Mikrostruktur des Holzes auf das Eindringverhalten von Flüssigkeiten.
Holz-Zentralblatt 34:852–854

- Rosenthal M, Bäucker E, Bues C (2010b)
Holzaufbau und Tränkbarkeit. Zum Einfluss der Mikrostruktur des Holzes auf das Eindringverhalten von Flüssigkeiten.
Holz-Zentralblatt 34:852–854
- Simon J, Dietsch P, Winter Stefan (2019)
Landwirtschaftliches Bauen mit Holz. Leitfaden für Beispielkonstruktionen in Gebrauchsklasse 0 nach DIN 68800-2,
Freising
- Stockinger C, Stark G, Weiss J (2001a)
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude in Holz. Informationsdienst Holz, München
- Stockinger C, Stark G, Weiß J (2001b)
Landwirtschaftliche Betriebsgebäude in Holz. Informationsdienst Holz, München
- Stoy F-J (1983)
Über die Auswirkung der Hochdruckreinigung und -desinfektion mit unterschiedlichen Temperaturen.
Dissertation, Universität Hohenheim
- Strauch D, Böhm R (2002)
Reinigung und Desinfektion in der Nutztierhaltung und Veredelungswirtschaft. Enke
- Svennerstedt B Durability of building materials and components in agricultural environment.
In: Proceedings CIB World Building Congress 1998
- Thünen-Institut (2022) Clusterstatistik Forst & Holz.
<https://www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/clusterstatistik-forst-holz/>. Accessed 23 Mar 2022
- Uhlig A, Grosche, A., Hoop, M., Schusser G (2008)
Robinien als Ursache für Vergiftungen beim Pferd. Tierärztliche Praxis. Ausgabe G, Grosstiere/Nutztiere 36
- Wales AD, Gosling RJ, Bare HL, Davies RH (2021)
Disinfectant testing for veterinary and agricultural applications: A review. Zoonoses and public health 68(5):361–375.
doi: 10.1111/zph.12830

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Ausschnitt aus Gesamtmatrix zur Zuordnung der kleinsten Funktionseinheiten für Stallanlagen, Reit-, Lager- und Maschinenhallen in Maßsystem x * 2,50 m (± 1,25 m)	5
Abbildung 2: Beispiel für eine kleinste Funktionseinheit (2-reihiger Liegeboxen-Laufstall für Milchvieh) in Grundrissen und Schnitt, mit Erweiterungsschritten	6
Abbildung 3: Vollholz [VH], Konstruktions-vollholz [KVH] und Brettschichtholz [BSH]	7
Abbildung 4: Ausschnitt aus einer Seite im Typenkatalog mit Abstimmung zwischen Grundrissen (hier Erweiterungen) und Tragwerksvarianten, axonometrische Darstellung.	10
Abbildung 5: Ablaufschema für die Planung von baulichen Anlagen in Holzbauweise von der CAD-Planung über die Holzbausoftware bis zur CNC-Abbundsoftware	11
Abbildung 6: Themenkarte zum mechanischen Angriff auf tragende Bauteile	13
Abbildung 7: Themenkarte zum chemischen Angriff auf tragende Bauteile	14
Abbildung 8: Themenkarte zum biologisch-physikalischen Angriff auf tragende Bauteile	15
Abbildung 9: Querschnitt «landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner Spannweite» mit Angabe 1,50 m Grenze	19
Abbildung 10: Rechtsgrundlagen der EU zur Reinigung und Desinfektion in der Tierhaltung	22
Abbildung 11: Nationale Rechtsgrundlagen zur Reinigung und Desinfektion in der Tierhaltung	23
Abbildung 12: Vorgaben zur Reinigung und Desinfektion von Holz in der Tierhaltung	24
Abbildung 13: Auswahl eines geeigneten Desinfektionsmittels im Tierhaltungsbereich	24
Abbildung 14: Ablauf der Stallreinigung	25
Abbildung 15: Ablauf der Stalldesinfektion	25
Abbildung 16: Einflussfaktoren einer erfolgreichen Desinfektion	26
Abbildung 17: Besonderheiten der Reinigung und Desinfektion von Holz	26
Abbildung 18: Waldbesitz in Deutschland (Destatis 2022, 2021c)	31
Abbildung 19: Aufkommen an Sägewerken und Zimmereien je 1.000 bzw. 10.000 km ² Fläche in den einzelnen Bundesländern (bei Zimmereien, ohne Stadtstaaten) im Jahr 2019 bzw. 2014 für Sachsen-Anhalt und 2018 für Mecklenburg-Vorpommern (Thünen-Institut 2022)	32
Abbildung 20: Beispielhafte Darstellung der Holz- und Wertschöpfungsflüsse bei landwirtschaftlichen Holzbauprojekten, die durch einen Generalunternehmer (links) und durch Eigenregie mit regionalen Akteuren und der Nutzung von eigenem / regionalem Holz (rechts) abgewickelt wurden.	33

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Ausschnitt aus Tabelle für Tragwerkskonstruktionen (Skelettbauweise, Ausrichtung Primärkonstruktion quer) mit Auswertung der Kipp-Punkte Vollholz zu Brettschichtholz	8
Tabelle 2 Holzbedarfs- und Kostenvergleich von 4 Tragwerken mit 12,00 m Spannweite	9
Tabelle 3: Bewertung der Lösbarkeit der Detailpunkte	16
Tabelle 4: Treibhausgasemissionen (GWP) in kg CO ₂ -Äq/m ² BGF für einen Standardstall und ein äquivalentes Holztragwerk für beispielhafte landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner und großer Spannweite	21
Tabelle 5: Kohlenstoffspeicher in kg CO ₂ -Äq/m ² BGF für einen Standardstall und ein äquivalentes Holztragwerk für beispielhafte landwirtschaftliche Gebäude mit kleiner und großer Spannweite	21
Tabelle 6: Konventionelle und potentielle Holzarten für den Stallbau	30

IMPRESSUM

Forschungsprojekt: ZukunftLaWiBau –
Entwicklung zukunftsweisender Konzepte zum landwirtschaftlichen
Bauen mit Holz – von der Planung bis zum Rückbau

Beteiligte Partner:

RUB – Lehrstuhl Ressourceneffizientes Bauen

LfL – Institut für Landtechnik und Tierhaltung, Arbeitsgruppe Landwirtschaftliches Bauwesen

TUM – Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion, Holzforschung München, Lehrstuhl für Holzwissenschaft

FUB – Fachbereich Veterinärmedizin, Institut für Tier- und Umwelthygiene

FLI – Bundesforschungsinstitut für Tiergesundheit

Copyright Titelabbildungen:

Fotos: Ralf Rosin, Holzforschung München, außer re. oben: Ressourceneffizientes Bauen, RUB

Zeichnungen: Georgia Perdikouri, LfL

Grafische Gestaltung:

Valerie Kiock Graphic Design

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Leitfaden zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und
Landwirtschaft (BMEL) durch die FNR mit dem Förderkennzeichen 2220HV036 gefördert.

Projektlaufzeit: 01.03.2020 – 31.12.2023

© Oktober 2023