

# FORSCHUNGSBERICHT

W. A. Günthner · S. Winter ·  
C. Ludwig · P. Glaser

Wirtschaftliche und ökologische Potenziale  
von Hochregallagern aus Holz



# Forschungsbericht

zu dem IGF-Vorhaben

**Wirtschaftliche und ökologische Potenziale von Hochregallagern aus Holz**

der Forschungsstellen

Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München

und

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München

Das IGF-Vorhaben 17959 N der Forschungsgemeinschaft Intralogistik / Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL) e.V. wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Herausgegeben von:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Willibald A. Günthner

**fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Technische Universität München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © **fml** – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Printed in Germany 2016

ISBN: 978-3-941702-64-6

**fml** – Lehrstuhl für  
Fördertechnik Materialfluss Logistik  
Technische Universität München  
Boltzmannstr. 15  
85748 Garching  
Tel.: + 49.89.289.15921  
Fax: + 49.89.289.15922  
[www.fml.mw.tum.de](http://www.fml.mw.tum.de)

Lehrstuhl für Holzbau und  
Baukonstruktion  
Technische Universität München  
Arcisstr. 21  
80333 München  
Tel.: + 49.89.289.22416  
Fax: + 49.89.289.23014  
[www.hb.bgu.tum.de](http://www.hb.bgu.tum.de)

# Forschungsbericht

---

## Wirtschaftliche und ökologische Potenziale von Hochregallagern aus Holz

---

### Kurzfassung

Hochregallager werden bereits seit mehr als fünfzig Jahren zur platzsparenden Lagerung großer Gütermengen auf kleiner Grundfläche eingesetzt. Bisher wurde die Regalkonstruktion hauptsächlich aus Stahlprofilen gefertigt. Seit dem Jahr 2005 werden auch Holzwerkstoffe zum Bau von Hochregallagerkonstruktionen verwendet.

Im vorliegenden Forschungsprojekt werden Vor- und Nachteile der Holzbauweise im Vergleich zur konventionellen Stahlbauweise für verschiedene Einsatzszenarien aufgezeigt, untersucht und bewertet. Zudem werden neue Konstruktionsmöglichkeiten erarbeitet, mit welchen die Regalhöhe gesteigert und der Materialbedarf gesenkt werden kann. Ziel ist es Informationen für potenzielle Hersteller und Betreiber von Hochregalen aus Holz zu generieren und dadurch bestehende Hürden zu nehmen, welche einer größeren industriellen Verbreitung im Wege stehen.

Zu diesem Zweck werden zunächst bestehende Holz-Hochregale näher betrachtet sowie Hersteller und Betreiber zu ihren Erfahrungen befragt. Auf diese Weise wird der aktuelle Wissensstand aufgenommen. Anschließend werden die Regalwerkstoffe Holz und Stahl sowie deren Eigenschaften unter verschiedenen atmosphärischen Bedingungen untersucht. Dadurch soll ermittelt werden, für welche Lagergüter sowie Umgebungen die beiden Werkstoffe optimal eingesetzt werden können. Nachfolgend werden neue modulare Holz-Hochregal-Konstruktionen konzipiert und in einem Konstruktionskatalog zusammengefasst. Anhand eines Bewertungsschemas werden die verschiedenen Bauteilaufbauten ganzheitlich im Hinblick auf Vor- und Nachteile für den Einsatz in der Regalstruktur beurteilt. Im Anschluss werden Methoden der Modellierung und Berechnung vorgestellt. Eine anhand der Beurteilung selektierte Konstruktionsweise wird für den Vergleich mit bestehenden Stahl- und Holzbauweisen bemessen und diesen anschließend gegenübergestellt. Dabei soll die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit der drei Bauweisen verglichen und so die Stärken und Schwächen dieser in den genannten Aspekten sichtbar gemacht werden.

Im Zuge der durchgeführten Recherchen konnte gezeigt werden, dass automatisch bediente Hochregale in Silobauweise in Industrie und Handel derzeit am weitesten verbreitet sind. Aus diesem Grund wurden die weiteren Arbeiten auf diese Bauform konzentriert. Bezüglich der möglichen Einsatzszenarien wurde ermittelt, dass Hochregale aus Holz besonders für aggressive Lageratmosphären geeignet sind. Bei den Konstruktionskonzepten wurden neben dem bisher üblichen Brettschichtholz auch erstmals Brettsperrholzbauteile eingesetzt. Dieser flächige Holzwerkstoff erleichtert die Einführung von Steherstößen, durch welche die Transportlänge der Steher massiv gesenkt werden und die maximale Regalhöhe gesteigert werden kann. Während der Berechnung der ausgewählten Konzepte wurden verschiedene Verbindungsmittel und Bauteilformen variiert, um die strengen Verformungsvorgaben erfüllen zu können. Anschließend wurde durch Ökobilanzierungen die bessere ökologische Nachhaltigkeit der Holzbauweisen bewiesen. Betreffend der ökonomischen Nachhaltigkeit liegt die Stahlbauweise unter normaler Lageratmosphäre vorne. Bei aggressiven Lagerbedingungen sind hingegen die Holzbauweisen wirtschaftlicher.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist erreicht worden.



**Inhaltsverzeichnis**

Kurzfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis .....	III
1 Einleitung.....	1
1.1 Einführung.....	1
1.2 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung .....	1
1.3 Forschungsziel.....	2
1.3.1 Angestrebte Forschungsergebnisse.....	2
1.3.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse.....	3
1.3.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels .....	3
2 Abkürzungsverzeichnis .....	5
3 Stand der Forschung und Technik.....	7
3.1 Lagereinrichtungen für Stückgüter .....	7
3.2 Hochregallager.....	8
3.2.1 Allgemeines .....	8
3.2.2 Bauformen und Aufbau.....	8
3.2.3 Regalbedienung.....	10
3.2.4 Ladeeinheiten .....	12
3.2.5 Hochregallagergebäude .....	12
3.3 Rechtliche Vorgaben und Randbedingungen.....	13
3.3.1 Öffentliches Baurecht .....	13
3.3.2 Inverkehrbringen von Hochregalen.....	15
3.3.3 Betreiben von Hochregalen .....	16
3.4 Normen und Richtlinien für Hochregallager.....	17
3.4.1 Allgemeines .....	17
3.4.2 Bemessung.....	19
3.4.3 Freiräume, Verformungen, Toleranzen .....	19
3.4.4 Inspektion .....	19
3.4.5 Brandschutz.....	20

3.5	Eigenschaften der Regalwerkstoffe .....	21
3.5.1	Allgemeines.....	21
3.5.2	Stahl.....	21
3.5.3	Holz.....	22
3.5.4	Gegenüberstellung Stahl und Holz .....	26
3.6	Regalkonstruktion bestehender Hochregallagerbauten .....	27
3.6.1	Allgemeines.....	27
3.6.2	Hochregale aus Stahl.....	30
3.6.3	Hochregale aus Holz.....	33
3.7	Brand im Hochregal .....	37
3.7.1	Allgemeines.....	37
3.7.2	Brandausbreitung im ungeschützten Lager.....	37
3.7.3	Brandschutz von Hochregalen.....	38
3.7.4	Brandschutztechnische Besonderheiten von Hochregallagern aus Holz..	40
4	Marktanalyse .....	41
4.1	Vorgehen und Ziel der Marktanalyse .....	41
4.2	Auswertung von Lagerstatistiken.....	41
4.2.1	Allgemeines.....	41
4.2.2	Inbetriebnahmen .....	41
4.2.3	Gesamtabmessungen für Palettenhochregallager.....	44
4.2.4	Charakteristika der Ladeeinheiten für die konstruktive Planung.....	47
4.2.5	Zusammenfassung der geometrisch und konstruktionsrelevanten Lagerdaten .....	48
4.2.6	Branchen und Lagergüter .....	49
4.3	Gründe für die Holzbauweise.....	50
4.4	Durchgeführte Befragungen.....	51
4.4.1	Vorgehen und Ziele .....	51
4.4.2	Herstellerbefragung .....	51
4.4.3	Betreiberbefragungen .....	52

---

4.5	Datenanalyse bestehender Holz-Hochregale .....	53
4.5.1	Vorgehen und Ziel der Datenanalyse.....	53
4.5.2	Planungs-, Montage- und Projektlaufzeit .....	54
4.5.3	Regalgesamtabmessungen .....	56
4.5.4	Brandschutzeinrichtungen.....	58
4.5.5	Robustheit .....	59
4.5.6	Gebäudetechnik .....	69
4.5.7	Inspektion .....	69
4.5.8	Sachversicherung .....	70
4.6	Systemgrenze des Forschungsprojekts .....	72
4.6.1	Faktoren und Ziele der Systemgrenzdefinition .....	72
4.6.2	Definition der Systemgrenze.....	72
5	Mögliche Einsatzszenarien für Holz-Hochregallager .....	75
5.1	Motivation und Vorgehensweise.....	75
5.2	Einsatzgrenzen der Regalwerkstoffe .....	75
5.2.1	Mechanische Zerstörung .....	76
5.2.2	Temperatur .....	76
5.2.3	Feuchtigkeit .....	76
5.2.4	Biologische Einflüsse.....	79
5.2.5	Chemische Einflüsse .....	80
5.2.6	Hygieneanforderungen .....	83
5.2.7	Lagerung von Gefahrstoffen .....	85
5.2.8	Zusammenfassung .....	86
5.3	Betrachtung spezieller Lagergüter und -atmosphären .....	86
5.3.1	Vorgehensweise.....	86
5.3.2	Nahrungs- und Futtermittelindustrie.....	87
5.3.3	Papierindustrie.....	88
5.3.4	Chemieindustrie.....	89
5.3.5	Einflüsse durch Außenatmosphäre.....	89

5.3.6	Zusammenfassung.....	91
6	Konzeption potenzieller Regalkonstruktionen für Holzhochregallager.....	93
6.1	Allgemeines.....	93
6.2	Anforderungen an die Regalkonstruktion .....	93
6.3	Festlegung von Randbedingungen .....	94
6.3.1	Allgemeines.....	94
6.3.2	Gesamtabmessung der Hochregallager in Silobauweise .....	95
6.3.3	Logistische und geometrische Anforderungen des Lagerguts .....	95
6.3.4	Restriktionen und Ziele bezüglich Transportierbarkeit und Herstellbarkeit	99
6.4	Entwurfsgrundlagen .....	101
6.4.1	Allgemeines.....	101
6.4.2	Lastenheft .....	101
6.4.3	Ermittlung von Fachfreimaßen und Fachgrößen.....	103
6.5	Zusammenstellung und Bewertung möglicher Bauteilaufbauten .....	104
6.5.1	Auswahl und Vorgehen bei der Bewertung.....	104
6.5.2	Darstellung der verschiedenen Bauteilaufbauten und Bewertung.....	108
6.6	Auswahl und Darstellung von Systemen für Hochregallager aus Holz.....	120
6.7	Fazit.....	123
7	Berechnung von Hochregallagern aus Holz.....	125
7.1	Allgemeines.....	125
7.2	Einwirkungen.....	125
7.2.1	Gängige Einwirkungen im Bauwesen .....	125
7.2.2	Spezielle Einwirkungen und Imperfektionen bei automatisch bedienten Hochregallagern in Silobauweise.....	125
7.2.3	Gegenüberstellung und Bewertung des Einflusses der Einwirkungen ....	130
7.3	Lastfallkombinationen, Nachweiskonzept und Besonderheiten .....	132
7.3.1	Allgemeines / Grundlagen der Bildung der Lastfallkombinationen.....	132
7.3.2	Lastfallkombinationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	132
7.3.3	Lastfallkombinationen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.....	134

7.3.4	Vorgehen und Bildung der Lastfallkombinationen für Hochregallager aus Holz .....	134
7.4	Modellbildung und Methoden der Berechnung .....	138
7.4.1	Allgemeines .....	138
7.4.2	Regelungen für die Gesamtsystemanalyse von Hochregallager aus Holz .....	138
7.4.3	Modellbildung .....	139
7.4.4	Bemessung .....	144
7.5	Besonderheiten und Anforderungen der Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....	147
7.5.1	Normative Regelung der Grenzwerte .....	147
7.5.2	Auswertung einer Parameterstudie zur Lagergesamtgeometrie .....	149
7.5.3	Fazit .....	156
7.6	Zusammenstellung einer Konzeptions- und Berechnungsanleitung für Hochregallager aus Holz .....	156
8	Untersuchung der Nachhaltigkeit .....	159
8.1	Einführung und Untersuchungsziel .....	159
8.2	Bewertungsgegenstand .....	160
8.3	Festlegung der Systemgrenze .....	160
8.4	Funktionales Äquivalent .....	161
8.5	Lebenszyklusphasen .....	162
8.6	Szenarien .....	163
8.7	Ökologische Nachhaltigkeit .....	163
8.7.1	Motivation und Vorgehensweise .....	163
8.7.2	Quantifizierung der Hochregallebenszyklen .....	164
8.7.3	Auswahl und Modellierung der Umweltdaten .....	170
8.7.4	Berechnete Umweltauswirkungen .....	174
8.8	Ökonomische Nachhaltigkeit .....	179
8.8.1	Motivation und Vorgehensweise .....	179
8.8.2	Vergleich des Invest. ....	179

8.8.3	Lebenszykluskosten.....	183
9	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick .....	187
9.1	Zusammenfassung.....	187
9.2	Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten .....	189
9.3	Ausblick.....	190
10	Literaturverzeichnis .....	191
11	Abbildungsverzeichnis .....	203
12	Tabellenverzeichnis .....	209
13	Anhang .....	211
13.1	Emissionsberechnung.....	211
13.2	Daten zu Inflation und Preissteigerungen .....	213
	Konstruktionskatalog.....	K-1

## 1 Einleitung

### 1.1 Einführung

Das Thema Nachhaltigkeit erfreut sich stark wachsender Beliebtheit innerhalb unserer Gesellschaft. Mehr und mehr Menschen beginnen damit sich über die Herkunft und die Umweltauswirkungen der von ihnen gekauften Produkte Gedanken zu machen. Beeinflusst durch diesen sogenannten Megatrend [May-2008] ändern sich zunehmend das Kaufverhalten sowie die allgemeine Wertauffassung und nehmen dadurch die Industrie in die Pflicht, ebenfalls diesen Entwicklungen zu folgen. Zahlreiche Unternehmen haben daher unterschiedliche Programme gestartet, um die Umweltauswirkungen ihrer Produkte und ihres Betriebs zu reduzieren.

Auch im Bereich der Intralogistik werden unter dem Slogan „green logistics“ Anstrengungen unternommen, um die Nachhaltigkeit der Prozesse und Anlagen zu verbessern. Bisherige Überlegungen zielten dabei vor allem auf die Einsparung bzw. Rückgewinnung von Energie ab. Einige Firmen wollen aber nun einen Schritt weiter gehen und beschäftigen sich auch mit den Umweltauswirkungen der von ihnen eingesetzten Werk- und Baustoffe. So wird in der Regaltechnik seit dem Jahr 2005 teilweise der nachwachsende Baustoff Holz an Stelle von Stahl als Konstruktionswerkstoff verwendet. Dieser Werkstoff bindet während seines Wachstums Kohlenstoffdioxid aus der Luft, weshalb man Holz als biogenen Kohlenstoffspeicher bezeichnen kann [Hol-2010, S. 6]. Nach [Ehl-2001, S. 2] ist CO<sub>2</sub> für ca. 50% des Treibhauseffektes verantwortlich. Eine Reduzierung des Kohlenstoffdioxidgehaltes der Luft wäre daher in Bezug auf die Eindämmung der fortschreitenden Klimaerwärmung besonders wichtig.

Holz bietet noch andere Vorteile wie seine natürliche Beständigkeit gegenüber aggressiven Medien sowie sein berechenbares Verhalten im Brandfall.

Aus diesen und anderen Gründen wurden in Europa bereits acht Hochregallager aus Holz errichtet. Diese Anlagen sind, aufgrund begrenzter Planungszeit sowie Ressourcen, wenig optimiert und haben größtenteils immer noch Prototypencharakter. Das vorhandene Know-how bei Hochregallagern aus Holz liegt derzeit konzentriert bei drei mittelständischen Holzbauunternehmen, welche nur beschränkte Mittel zu Forschung und Entwicklung zur Verfügung haben. Für andere Firmen der Branche ist es aufgrund der Neuheit und Komplexität des Themas aufwandsintensiv ebenfalls in diesem Bereich Fuß zu fassen.

### 1.2 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung

Seit die ersten Hochregallager in der Mitte des 20. Jahrhunderts realisiert wurden, waren diese in konstruktiver und wirtschaftlicher Sicht einem fortlaufenden Optimierungsprozess ausgesetzt. Derzeitiger Standard sind Hochregallager mit Lagerstrukturen aus komplex geformten kaltgewalzten Stahlprofilen, welche eine Dicke von nur wenigen Millimetern aufweisen. Weitere Optimierungen im Bereich Stahl-Hochregallager finden kaum mehr statt, da durch allgemeine fortlaufende Entwicklungen das technisch mögliche Limit weitestgehend erreicht ist. In der Vergangenheit wurden vereinzelt auch Hochregallager aus Stahlbeton gefertigt. Diese Bauweise konnte sich jedoch aus Kostengründen nicht durchsetzen.

Die von Unternehmen im Laufe der Weiterentwicklungen von Stahl-Hochregalen aufgebaute Expertise wurde in Richtlinien und Normen zusammengefasst. Diese Erkenntnisse dienen nun

als Grundlage für Neuplanungen und erlauben es auch weniger erfahrenen Planern Anlagen auszulegen.

Die Realisierung der bestehenden Holz-Hochregale war mit einigen Schwierigkeiten bzw. Unsicherheiten verbunden, denn im Gegensatz zu Stahl sind für den Einsatz von Holz in der Lagertechnik keine Normen oder Richtlinien verfügbar. Der Werkstoff Holz wird zwar in den bestehenden Regelwerken nicht ausgeschlossen, aber auch nicht erwähnt. Für Planer ist es folglich sehr schwierig ein neues Material wie Holz für diesen speziellen Anwendungsfall einzusetzen. Auch Baubehörden und Prüfengeure verhalten sich gegenüber der Holzbauweise meist restriktiv, da ihnen zur Bewertung die nötige Informationsgrundlage fehlt. Die vorherrschenden Unsicherheiten werden erfahrungsgemäß mit hohen Sicherheitsbeiwerten abgedeckt, weshalb davon auszugehen ist, dass im Bereich der Holz-Hochregallager großes Optimierungspotenzial vorliegt.

Bei der Konstruktion und Bemessung von Hochregalen sind nicht die Tragfähigkeit, sondern die strengen Verformungsvorgaben und somit der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit maßgebend. Besonders kritisch ist dieser Umstand bei gebäudeträgenden Regalen, da hier große Windlasten auf die Fassade und damit auf die Regalkonstruktion wirken. Derzeit werden die Regalsteher aus Steifigkeitsgründen in einem Stück gefertigt, für welche ein aufwendiger Transport zur Baustelle nötig ist.

Ein Holzhochregal bedeutete bei den bestehenden Ausführungen einen teils erheblichen finanziellen Mehraufwand im Vergleich zur konventionellen Stahlbauweise. Bisher konnten bezüglich der Wirtschaftlichkeit noch keine aussagekräftigen Vergleiche durchgeführt werden, da bei den meisten Regalen von Beginn an nur in Holz geplant wurde. Die ökonomische Unsicherheit sowie die erhöhten Kosten in Folge der geringen Optimierung stellen einen großen Wettbewerbsnachteil für Hochregale aus Holz dar, wodurch auch die immer noch relativ geringe Anlagenzahl erklärt werden kann.

Die Tatsache, dass Holz ökologische Vorteile gegenüber anderen üblichen Baustoffen aufweist, wurde bereits mehrfach wissenschaftlich bewiesen. Jedoch ist noch völlig unklar, wie viel Kohlendioxid, Energie und andere Stoffe durch den Einsatz von Holz bei Hochregalkonstruktionen eingespart werden können. Eine Quantifizierung des ökologischen Nutzens der Holzbauweise ist Voraussetzung für eine breite industrielle Anwendung, da auf diese Weise die möglichen Mehrkosten gerechtfertigt werden können.

### **1.3 Forschungsziel**

#### **1.3.1 Angestrebte Forschungsergebnisse**

Das übergeordnete Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts ist die Erarbeitung einer breiten Wissensbasis bezüglich Hochregalen aus Holz für zukünftige Hersteller sowie Betreiber. Zu diesem Zweck sollen die Vor- und Nachteile dieser alternativen Bauweise aufgezeigt und mit jenen der konventionellen Stahlbauweise verglichen werden, um so eine fundierte Entscheidungsgrundlage für die Planung neuer Anlagen zu schaffen. Untersucht werden dabei Aspekte wie Brandschutz, rechtliche Vorgaben sowie Beständigkeit gegenüber Feuchtigkeit und aggressiven Medien. Aus den gewonnenen Informationen sollen anschließend geeignete Ein-

satzszenarien für Hochregale aus Holz abgeleitet werden, in denen die Stärken des natürlichen Werkstoffs optimal genutzt werden können. Ebenfalls betrachtet wird die ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit. Dafür sind die Erstellung von Ökobilanzen sowie die Berechnung von Lebenszykluskosten entlang des vollständigen Regallebenszyklus geplant. Außerdem sollen mögliche Einflüsse der Holzbauweise auf umgebende Systeme und Komponenten von Hochregalen überprüft werden, um nötige Anpassungsarbeiten und deren Ausmaß zu identifizieren. Zusätzlich sind bestehende Konstruktionskonzepte zu verbessern sowie neue Konzepte zu erstellen. Ziel ist es Hochregale aus Holz zu standardisieren und modular aufzubauen. Für die Konzeption und Bemessung wird eine Anleitung zur Verfügung gestellt, um den Planungsvorgang zu erleichtern. Auf diese Weise können Unsicherheiten bei der Planung von Holz-Hochregalen beseitigt und ihre Wettbewerbsfähigkeit gesteigert werden.

### **1.3.2 Innovativer Beitrag der angestrebten Forschungsergebnisse**

Die angestrebten Forschungsergebnisse sollen dazu beitragen neue Einsatzszenarien für Holz-Hochregale zu erschließen, indem die Eigenschaften des nachwachsenden Regalwerkstoffs bei verschiedenen üblichen Lageratmosphären überprüft werden. Des Weiteren wird aufgezeigt für welche Lagergüter und Umgebungen der Einsatz auch aus ökonomischer und ökologischer Sicht sinnvoll ist. Diese Informationen sollen Planer und Bauherren von zukünftigen Anlagen bei ihrer Entscheidungsfindung unterstützen.

Bezüglich des konstruktiven Aufbaus wird erstmalig ein modularer Ansatz gewählt. Ziel ist es die Module zu standardisieren und möglichst einfach zu gestalten, um die Wirtschaftlichkeit der Holzbauweise zu erhöhen und den Transportaufwand zu reduzieren. Für die geometrische Strukturierung der funktionsbedingten Fachmaße wird ein auf MS Excel basiertes Berechnungstool entwickelt, welches in der Planungsphase unterstützt. Die erarbeiteten Erkenntnisse zur Konstruktion und Bemessung sollen die derzeitigen Unsicherheiten nehmen und zur Optimierung der Holz-Hochregale beitragen.

Die Projektergebnisse können als Basis für die Anpassung von bestehenden Normen und Richtlinien dienen, welche den alternativen Regalwerkstoff momentan nicht berücksichtigen.

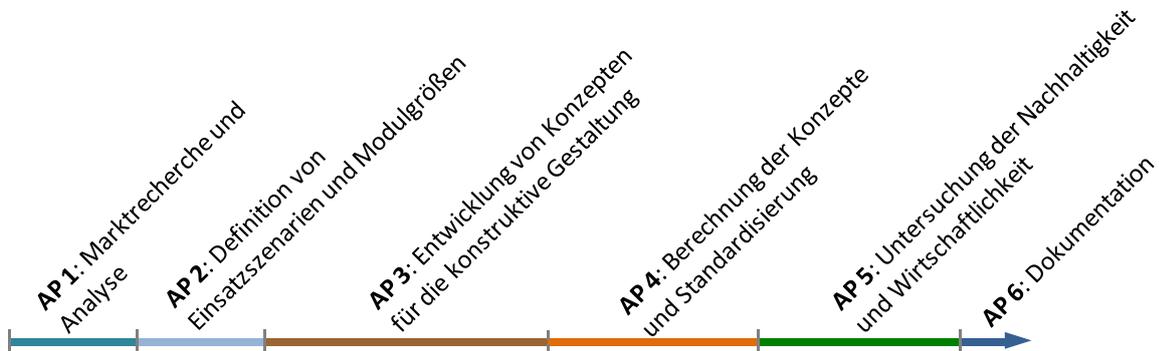
### **1.3.3 Lösungsweg zur Erreichung des Forschungsziels**

Die angesprochenen Inhalte werden in 6 aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen AP erarbeitet (siehe Abbildung 1). In AP1 wird der aktuelle Stand der Technik im Bereich der Holz-Hochregale ermittelt. Dies geschieht durch Hersteller- sowie Betreiberbefragungen und Literaturrecherchen. Auf diese Weise soll eine Wissensbasis für die weiteren Arbeiten entstehen. Anschließend werden in AP2 die Eigenschaften der Regalwerkstoffe Holz und Stahl unter verschiedenen Lageratmosphären untersucht, um festzustellen welcher Werkstoff unter welchen Bedingungen sinnvoll eingesetzt werden kann. Des Weiteren werden Modulgrößen anhand der funktionalen Randbedingungen definiert aus denen die späteren Konstruktionen modular aufgebaut werden. In Arbeitspaket AP3 werden verschiedene Konstruktionskonzepte entwickelt, wobei ein besonderes Augenmerk auf die einfache Herstellung und den Transport gelegt wird. Die Bemessung ausgewählter Konzepte erfolgt in AP4. Hier wird auch die nötige Standardisierung der Module vorgenommen. Die ökonomische sowie die ökologische Nachhaltigkeit werden in AP5 durch die Berechnung von Ökobilanzen und Lebenszykluskosten untersucht. Dadurch soll ermittelt werden welche Hochregalbauweise für welchen Einsatzfall

## 1 Einleitung

---

aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht am besten geeignet ist. Abgeschlossen werden die Arbeiten durch eine ausführliche Dokumentation der durchgeführten Arbeiten sowie Ergebnisse.



**Abbildung 1: Arbeitspakete des Forschungsprojekts**

**2 Abkürzungsverzeichnis**

abZ	allgemeine bauaufsichtliche Zulassung
AKL	automatisches Kleinteilelager
AP	Arbeitspaket
BG	Beanspruchungsgrad
BSH	Brettschichtholz
BSP	Brettsperrholz
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
EPD	Umweltproduktdeklaration
FSH	Furnierschichtholz
HRL	Hochregallager
LAM	Lastaufnahmemittel
LE	Ladeeinheit
MBO	Musterbauordnung
MIndBauRL	Muster-Industriebau-Richtlinie
NKL	Nutzungsklasse
PHR	Palettenhochregallager
RBG	Regalbediengerät
VdS	Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.
ZiE	Zustimmung im Einzelfall



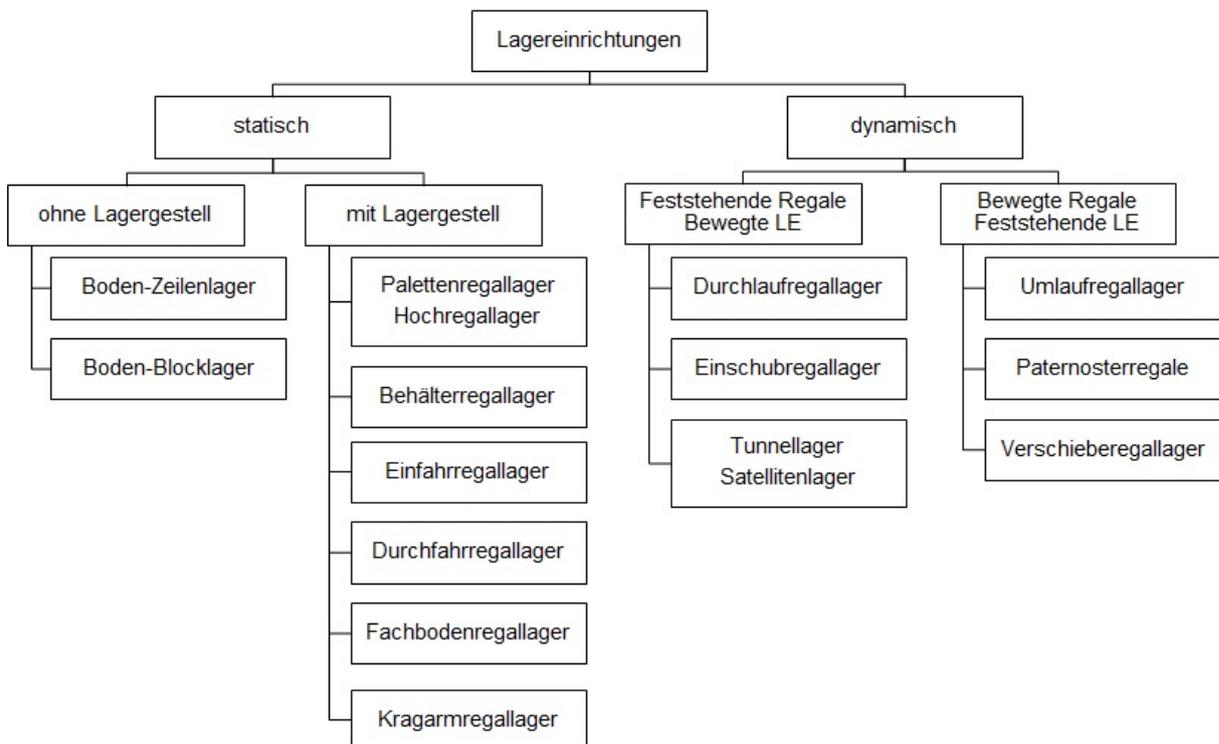
### 3 Stand der Forschung und Technik

#### 3.1 Lagereinrichtungen für Stückgüter

*Christopher Ludwig*

Lagereinrichtungen für Stückgüter werden in statische und dynamische Systeme eingeteilt (vgl. Abbildung 2). In dynamischen Lagern ist entweder das Lagergut oder das Lagergestell in Bewegung, wobei die jeweils andere Komponente fest steht. Bei statischen Lagern findet keine Bewegung statt. Hier gibt es Lagereinrichtungen mit und ohne Regalkonstruktion. Letztere werden auch als Bodenlager bezeichnet, da die Ladeeinheiten direkt auf dem Boden platziert werden. Je nach Stapelfähigkeit der Lagergüter können diese bis zu einer gewissen Höhe übereinander platziert werden. Bei Lagereinrichtungen mit Lagergestell werden die Lagergüter in mehreren Ebenen in einer Regalkonstruktion gelagert. Die Gestelle unterscheiden sich dabei unter anderem nach Größe und Gewicht der Lagergüter, nach Art der Ladehilfsmittel sowie nach der Regalbedienung.

Paletten- bzw. Hochregale sind die am häufigsten eingesetzte Lagereinrichtung mit Lagergestell in Industrie und Handel [Hom-2007, S. 64]. Sie dienen zur platzsparenden Stückgutlagerung mittels Ladehilfsmittel. Hochregallager stellen eine Spezialform des Palettenregals dar und werden nachfolgend beschrieben.



**Abbildung 2: Einteilung Lagereinrichtungen nach [Gün-2015, S. 4-2ff.]**

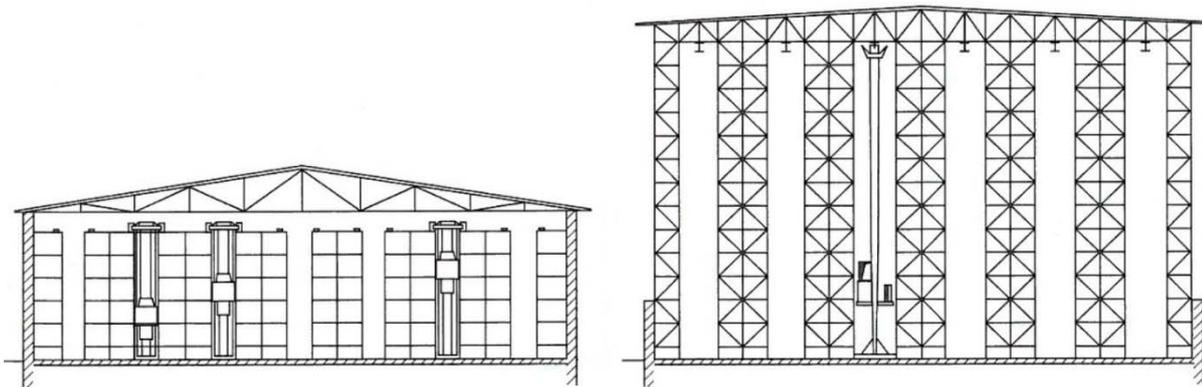
## 3.2 Hochregallager

*Christopher Ludwig*

### 3.2.1 Allgemeines

Für den Begriff „Hochregallager“ existieren mehrere Definitionen. Unterschiedlich ist dabei die definierte Entfernung zwischen dem Fußboden und der Oberkante des höchstgelegenen Lagerguts, ab der ein Lagergestell als „Hochregal“ zu bezeichnen ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird in weiterer Folge die Höhen-Definition nach VDI 3564 verwendet, welche eine Höhe von 9 Metern festlegt [VDI-3564].

Hochregallager können in zwei Bauweisen unterteilt werden, in freistehende Regale und in Regale in Silobauweise. Freistehende Hochregale werden in einer selbsttragenden Halle errichtet und sind nur durch ihr Eigengewicht, das Gewicht der Lagergüter und Kräften aus beispielsweise der Regalbedienung belastet. Regale in Silobauweise hingegen tragen selbsttätig das Dach sowie einen Teil der Fassade und stellen daher das Tragwerk des Lagergebäudes dar (siehe Abbildung 3). Aus diesem Grund müssen neben den Belastungen des freistehenden Regals äußere Einwirkungen aus z. B. Wind und Schnee bei der Bemessung des Hochregals berücksichtigt werden.



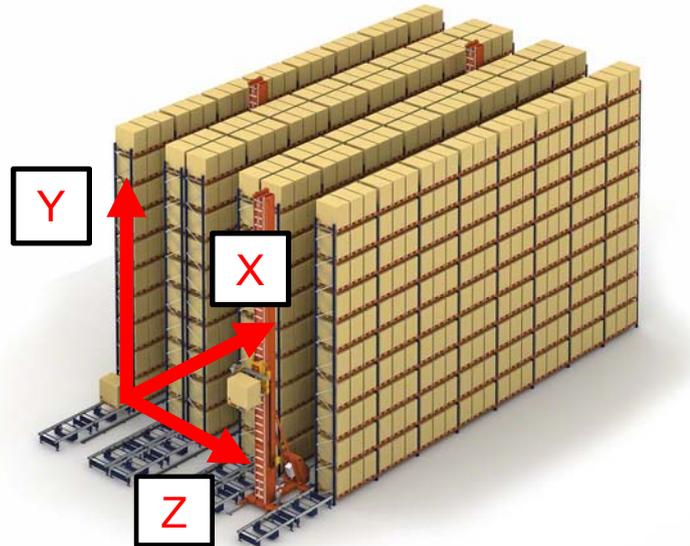
**Abbildung 3: Bauformen von Hochregalen, links freistehendes Regal und rechts Regal in Silobauweise, in Anlehnung an [Gün-2007, S. 192]**

Durch die hohe Bauweise ist es möglich große Gütermengen auf einer nur geringen Grundfläche zu lagern. Diese Art der Lagereinrichtung wird vor allem in Gegenden mit begrenzten Platzverhältnissen oder hohen Grundstückspreisen bevorzugt. Durch den modularen Aufbau der Konstruktion sind nahezu beliebige Abmessungen möglich, wobei bis dato die maximale Bauhöhe für Stahl-HRL etwa 55 Meter beträgt [Hom-2007, S. 65]. Ab einer Bauhöhe von ca. 18 Metern wird bevorzugt die Silobauweise ausgeführt [Gün-2007, S. 192]. Hochregallager verfügen über Lagerkapazitäten zwischen einigen Tausend und mehreren Hunderttausend Stellplätzen.

### 3.2.2 Bauformen und Aufbau

Das Lagergestell bzw. die Regalkonstruktion ist bei Hochregallagern zeilenförmig aufgebaut, d. h. das Regal besitzt Regalreihen mit dazwischen liegenden Gängen, welche auch Gassen genannt werden. Die Gassen dienen zur Regalbedienung und erlauben den Zugriff auf die einzelnen Lagergüter. Abbildung 4 zeigt das Modell eines Hochregallagers inklusive globalem

Koordinatensystem. Die Ganglängsrichtung wird als X-Achse und die Gangquerrichtung als Z-Achse bezeichnet. In Y-Richtung (vertikal) ist das Regal in Ebenen aufgeteilt. Die Regalfächer am Fußpunkt des Regals befinden sich in Ebene 0, die direkt darüberliegenden Fächer in Ebene 1. Somit erfolgt eine durchlaufende Nummerierung von unten nach oben.

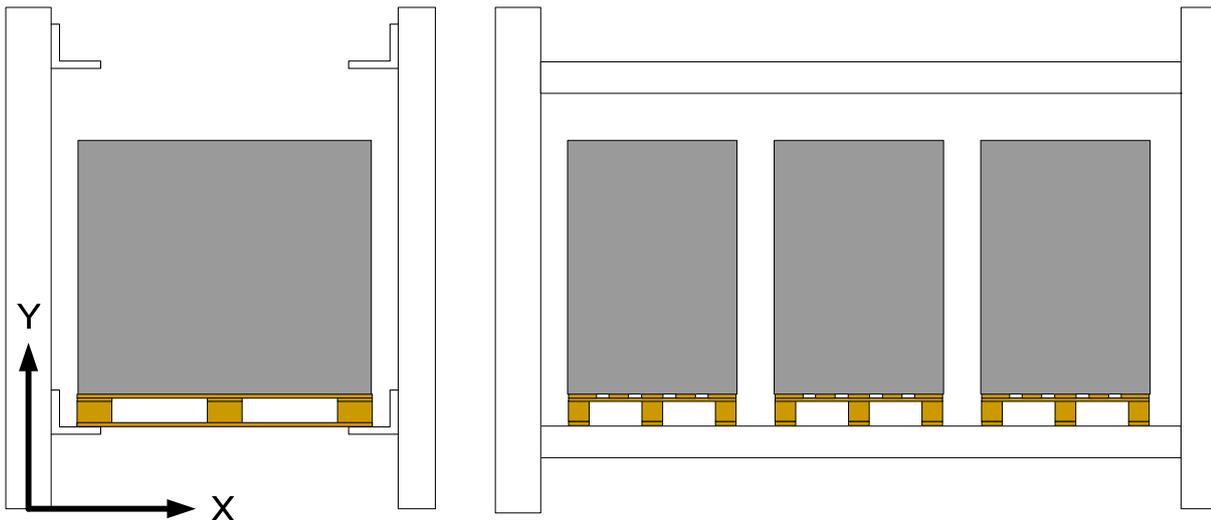


**Abbildung 4: Koordinatensystem im Hochregal, in Anlehnung an [Mec-2016]**

Eine Regalzeile entsteht durch Aneinanderreihen von Regalfächern in X- und Y-Richtung, wodurch nahezu beliebige Regalgesamtabmessungen erreicht werden können. Grenzen können im Bereich der Regalhöhe durch behördliche Vorgaben (z. B. max. Bauhöhe nach Bebauungsplan), statische Bemessung sowie wirtschaftliche Faktoren entstehen. Auch die geforderte Umschlagsleistung kann limitierend sein, da diese mit steigenden Regalgesamtabmessungen abnimmt.

Ein Paletten- bzw. Hochregal besteht grundsätzlich aus zwei Bauteiltypen: den vertikalen Stehern und den horizontalen Traversen. Letztere werden auch Palettenträger genannt, da auf ihnen die Ladeeinheiten platziert werden. Zusätzlich werden Aussteifungselemente verwendet, die zur Erzeugung einer notwendigen Gesamtsteifigkeit der Regalkonstruktion erforderlich sind.

Je Regalfach können eine oder mehrere Ladeeinheiten nebeneinander in X-Richtung angeordnet werden. Man spricht hier von Ein- oder Mehrplatzlagerung. Bei der Einplatzlagerung befindet sich in jedem Regalfach nur jeweils eine Ladeeinheit, welche mit ihrer Längsseite parallel zur Regalgasse auf zwei Quertraversen steht (siehe Abbildung 5 linke Seite). Diese Bauform kann somit auch als Quereinlagerung bezeichnet werden, da die Palette nach ihrer Querrichtung eingelagert wird. Die Einplatzlagerung wird vor allem für schwere Ladeeinheiten angewandt [Hom-2007, S. 65]. Im Gegensatz dazu stehen bei der Mehrplatzlagerung mehrere Ladeeinheiten in einem Fach. Diese ruhen auf zwei Längstraversen oder auf zwei auf den Längstraversen montierten Querträgern (Tiefenauflagen). Durch die Einlagerung in Palettenlängsrichtung wird diese Bauform als Längseinlagerung betitelt. Im Laufe der Entwicklung und Optimierung von Hochregalen hat sich die Mehrplatzlagerung mit drei Paletten je Fach (kurz 3-Platzlagerung) als wirtschaftlichste Bauform etabliert (siehe Abbildung 5 rechte Seite).



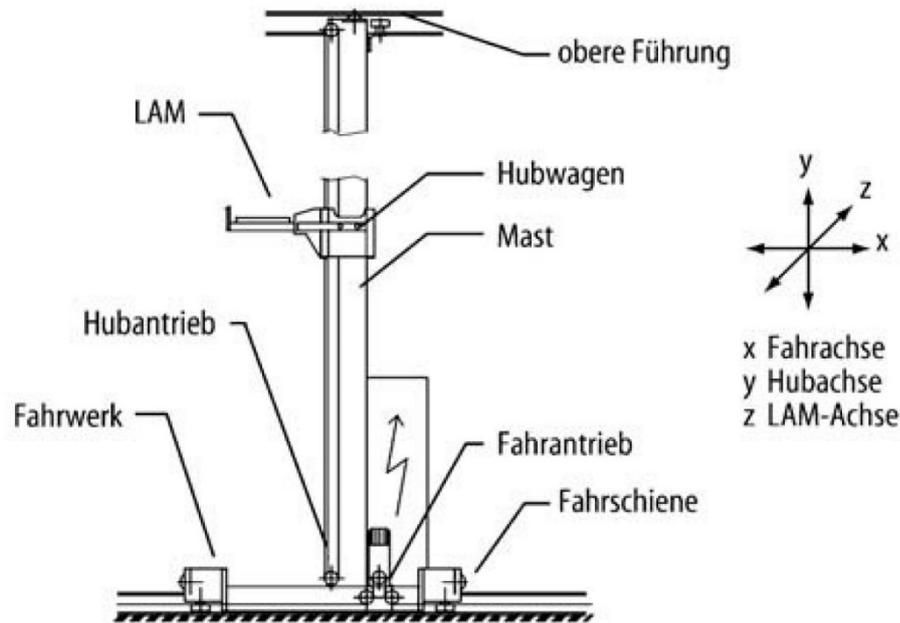
**Abbildung 5: Bauformen von Regalfächern, links Einplatz-/Quereinlagerung, rechts Mehrplatz-/Längseinlagerung als 3-Platzlagerung**

In Z-Richtung (Lagertiefe) kann je Regalgasse und Seite entweder einfach- oder doppeltief gelagert werden. Bei doppeltiefer Lagerung stehen zwei Ladeeinheiten hintereinander, wodurch ein noch besserer Volumennutzungsgrad erreicht wird. Es muss jedoch immer zuerst die vordere Ladeeinheit aus- oder umgelagert werden, um zur dahinter liegenden zu gelangen.

#### 3.2.3 Regalbedienung

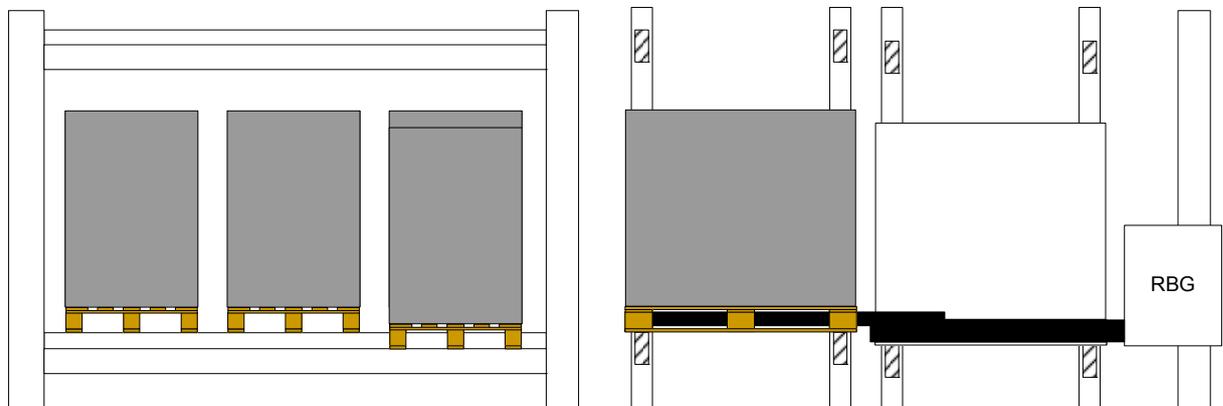
Zur Ein-, Aus- oder Umlagerung von Lagergütern können abhängig von der Regalhöhe verschiedene Fördermittel verwendet werden, welche entweder manuell oder automatisch bedient werden. Bis zu einer Höhe von 16 Metern ist es möglich Hochregalstapler einzusetzen [Hom-2007, S. 65ff.]. Diese Flurförderzeuge besitzen eine seitliche Lastaufnahme, wodurch eine Drehung des Staplers entfällt und die Lagergangbreite minimiert werden kann. Regalbediengeräte sind schienengebundene Unstetigförderer. Sie werden für größere Höhen bis zu den genannten 55 Metern realisiert. Aufgrund der limitierten Bedienhöhe von Hochregalstaplern sowie der meist höheren Bauhöhe von Hochregalen sind in der Praxis hauptsächlich automatische Regalbediengeräte im Einsatz. Diese werden von EDV-basierten Lagerverwaltungssystemen gesteuert.

Regalbediengeräte bestehen aus einem Mastteil, einem Lastaufnahmemittel LAM, einem Hub- und einem Fahrwerk sowie einer Führungs- und einer Fahrschiene (siehe Abbildung 6). Der Mastteil ist gewöhnlich aus einem oder zwei Stahlhohlprofilen aufgebaut und ist das Verbindungsstück zwischen Fahr- und Führungsschiene. Auf ihm kann das Hubwerk in vertikaler Richtung verfahren und somit alle Regalfachebenen in Y-Richtung anfahren. Das Lastaufnahmemittel, welches am Hubwerk montiert ist, ist für die Übergabe der Ladeeinheiten zwischen Regalfach und Regalbediengerät zuständig.



**Abbildung 6: Aufbau Regalbediengerät [Arn-2008, S. 685]**

Bei Palettenhochregalen ist eine tragende Lastaufnahme üblich. Die Palette wird hierbei über Teleskopgabeln aus dem Regal gehoben. Bedingt durch die Bauform der Teleskopgabeln müssen bei doppeltiefer Lagerung die Ladeeinheiten im hinteren Regalfach etwas höher platziert werden. Dies wird meist durch höher angeordnete Palettenträger erreicht (siehe Abbildung 7). Es sind jedoch auch erhöhte Querauflagen möglich.



**Abbildung 7: doppeltiefe Lagerung, Höhenversatz der Regalfächer, Vorder- und Seitenansicht**

Die Fahrschiene befindet sich am Fußpunkt des Regalbediengeräts und nimmt die vertikalen und horizontalen Kräfte auf, welche durch das Eigengewicht, die Last und die Fahrtbewegung entstehen. Sie wird an der Betonbodenplatte verankert, wodurch keine Kraftübertragung zum Regal stattfindet. Am Kopfende des Masts verläuft die Führungsschiene. Sie dient zur seitlichen Stabilisation und nimmt nur horizontale Kräfte in Gangquerrichtung (Z-Achse) auf. Die Führungsschiene ist an Regalquerträgern, welche die Regalzeilen in Z-Richtung verbinden, befestigt und leitet die auftretenden Kräfte vom Regalbediengerät direkt an die Regalkonstruktion weiter. Diese müssen bei der Bemessung berücksichtigt werden. Durch die Schie-

nenfahrt sind Regalbediengeräte meist gassengebunden. Es gibt jedoch auch vereinzelt Systeme bei denen ein Gassenwechsel durch Umsetzwagen oder spezielle Schienenführung möglich ist.

#### **3.2.4 Ladeeinheiten**

In der Logistik werden einzelne Stückgüter zu einer größeren Einheit zusammengeschlossen, um diese besser handhaben zu können. Neben dem Zusammenfassen ist zudem eine definierte Schnittstelle zwischen den Stückgütern und den Materialflussmitteln notwendig. Dies ist vor allem bei automatisierten Materialflüssen, wie in einem automatischen Hochregallager, wichtig. Diese Schnittstelle wird durch die Verwendung von Ladehilfsmitteln realisiert. In der Regaltechnik werden dazu meist tragende Ladehilfsmittel in Form von genormten Paletten verwendet. Teilweise kommen aber auch umschließende Ladehilfsmittel wie Gitterboxen oder an das Lagergut angepasste Ladehilfsmittel zum Einsatz. Die Stückgüter bilden zusammen mit dem Ladehilfsmittel eine Ladeeinheit.

Das am weitesten verbreitete Ladehilfsmittel in Europa ist die Europoolpalette. Diese ist mit den Abmaßen 1200x800x144mm nach UIC 435-2 bzw. EN 13698-1 genormt und wird als mehrwegfähiges tragendes Ladehilfsmittel im europäischen Palettenpool, einem internationalen Tauschsystem, verwendet [UIC-435-2][DIN-13698-1]. Die maximal zulässige Beladung beträgt bei einer gleichmäßig verteilten Flächenlast 1500kg und 1000kg bei einer beliebig verteilten Last. Neben der Europoolpalette werden je nach Branche auch andere genormte Paletten eingesetzt. So wird im Lebensmittelbereich die Düsseldorfer Palette verwendet, welche eine nur halb so große Grundfläche wie die Europoolpalette aufweist [DIN-15146-4]. Des Weiteren sind noch die Industrie- sowie die Chemie-Palette zu nennen. Diese beiden Ladehilfsmittel unterscheiden sich in ihrem Aufbau, haben jedoch beide eine Grundfläche von 1200x1000mm [DIN-13698-2].

Die Lagergüter werden auf dem Ladehilfsmittel so platziert bzw. gestapelt, dass sie nach Möglichkeit die gesamte Grundfläche des Ladehilfsmittels ausfüllen. Wie hoch der Stapel an Gütern maximal sein darf, hängt hauptsächlich von der Stapelfähigkeit der Güter ab. Diese müssen eine ausreichende Festigkeit haben, um während der Handhabung nicht beschädigt zu werden. Die Gesamthöhe der Ladeeinheit hängt ferner noch von der Dichte des Lagerguts und von den Handhabungsgrenzen der eingesetzten Materialflussmittel ab. [Hom-2007, S. 36]

#### **3.2.5 Hochregallagergebäude**

Nach VDI-Richtlinie 2690 können automatische Hochregallagergebäude grob in zwei Bereiche eingeteilt werden: den Fördermittelbereich (auch „Vorzone“ genannt) sowie den Hochregallagerbereich [VDI-2690-1]. In ersterem werden häufig Stetigförderer wie Rollen- oder Tragkettenförderer verwendet, um die Lagergüter zum Hochregallagerbereich bzw. von diesem weg zu transportieren. Im Zuge dessen muss nach DIN EN 528 auch eine Konturkontrolle der Ladeeinheit geschehen, um etwaige Störungen durch überstehende Teile zu vermeiden [DIN-528]. Im Bereich der Vorzone können außerdem zusätzliche Tätigkeiten wie Qualitätskontrollen, Vereinzellungen, Ladeeinheitenbildung oder Kommissionierung erfolgen. Der Hochregallagerbereich beinhaltet die Hochregalkonstruktion, die Regalbediengeräte sowie alle damit verbundenen Bauelemente wie z. B. die Betonbodenplatte, die Fassade und das Dach (siehe

Abbildung 8). Für den sachgemäßen Betrieb sind zudem noch Brandschutzeinrichtungen und Gebäudetechnik (z. B. Heizung, Kühlung) erforderlich und ebenfalls Teil des Hochregallagerbereichs.

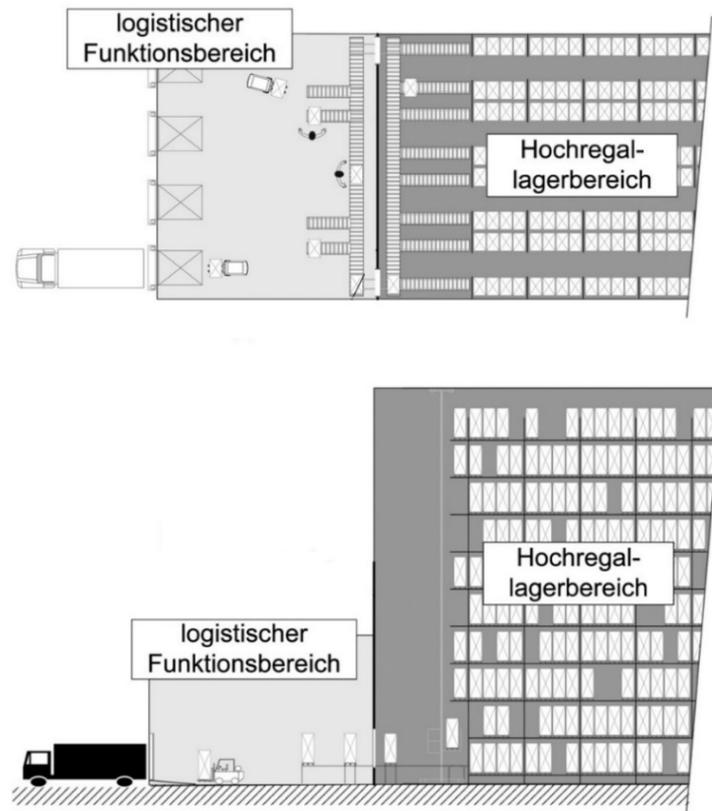


Abbildung 8: Modell eines Hochregallagers in Silobauweise, in Anlehnung an [VDI-3564]

### 3.3 Rechtliche Vorgaben und Randbedingungen

*Christopher Ludwig*

#### 3.3.1 Öffentliches Baurecht

In Deutschland regelt das öffentliche Baurecht alle rechtlichen Belange bezüglich der Errichtung, Veränderung und Beseitigung von baulichen Anlagen. Es wird dabei zwischen Bauplanungsrecht und Bauordnungsrecht unterschieden. Ersteres entscheidet darüber, was auf welchen Grundstücken aufgrund der Bauleitplanung gebaut werden darf und welche Nutzungen erlaubt sind. Die Planungshoheit über die Bauleitplanung in einem Stadt- oder Gemeindegebiet liegt bei der entsprechenden Stadt bzw. Gemeinde. Diese kann festlegen, dass bauliche Anlagen nur bis zu einer bestimmten Höhengrenze gebaut werden dürfen und kann dadurch zum Beispiel die maximale Bauhöhe von Hochregalen beschränken. Das Bauordnungsrecht stellt Anforderungen an die bauliche Anlage und dient vorrangig zur Abwehr von Gefahren. In Deutschland obliegt das Bauordnungsrecht den Bundesländern, weshalb sich die einzelnen Länderbauordnungen auch voneinander unterscheiden. Zur Vereinheitlichung der Bauordnungen wurde von der Bauministerkonferenz (ARGEBAU) die Musterbauordnung MBO erstellt, welche als eine Art Vorlage fungiert und auf der alle derzeitigen Länderbauordnungen basieren. [Sto-2009, S. 5, 22]

Auch trotz Musterbauordnung gibt es bei den Landesbauordnungen noch Unterschiede in gewissen Detailbereichen. Zur einfacheren Beschreibung der baurechtlichen Vorgaben für Hochregale werden im Folgenden die Festlegungen der Musterbauordnung beschrieben. Für länderspezifische Angaben müssen die entsprechenden Landesbauordnungen betrachtet werden.

Nach Musterbauordnung §2 Abs. 1 sind bauliche Anlagen „mit dem Erdboden verbundene, aus Bauprodukten hergestellte Anlagen“. „Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und in Stand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden.“ (§3 Abs.1 MBO). Zu deren Bau und Bemessung dürfen nach §3 Abs. 3 MBO nur die Baustoffe und technischen Regeln verwendet werden, die von der obersten Bauaufsichtsbehörde veröffentlicht werden. [ARG-2012]

Die technischen Regeln finden sich dabei in der „Liste der technischen Baubestimmungen“ und die Angaben zu den Baustoffen in den „Bauregellisten A, B, C“ [Deu-2014; Deu-2015]. Beide Listen werden vom Deutschen Institut für Bautechnik DIBt zusammengestellt und in Abstimmung mit den obersten Bauaufsichtsbehörden der Bundesländer bekannt gemacht. Eine Abweichung von diesen Regelwerken ist nur möglich, wenn durch eine andere Lösung die allgemeinen Anforderungen in gleichem Umfang erfüllt werden. Die Gleichwertigkeit muss durch bauaufsichtliche Verwendbarkeitsnachweise bzw. Zulassungen (§18 bis 20 MBO) durch das DIBt bestätigt werden [ARG-2012].

Hochregallager sind fest mit dem Erdboden verbunden und werden aus Bauprodukten hergestellt. Somit wären sie nach Musterbauordnung, egal in welcher Bauform, als bauliche Anlagen einzustufen. In einer Bekanntmachung des Deutschen Instituts für Bautechnik DIBt vom 18.12.2013 werden jedoch ausdrücklich alle Regale, welche in selbsttragenden Gebäuden aufgestellt werden und keine Erschließungsfunktion haben, von den baulichen Anlagen ausgenommen [Hep-2014]. Eine Erschließungsfunktion liegt vor, „...wenn sich Aufenthaltsflächen oder Aufenthaltsräume auf dem Regal selbst befinden oder über die Regale zu erreichen sind.“ [Hep-2014]. Dies bedeutet, nur Regale mit gebäudetrager Funktion (Silobauweise), Regale im Außenbereich und Regale die Teil der Rettungswege der baulichen Anlage (Erschließungsfunktion) sind, werden weiterhin als bauliche Anlagen bezeichnet. Alle übrigen freistehenden Regale in Gebäuden sind keine baulichen Anlagen mehr und als Einrichtungsgegenstände zu sehen. An sie werden keine baurechtlichen, sondern nur noch arbeitsrechtliche Anforderungen (siehe Kapitel 3.3.2 und 3.3.3) gestellt. Diese Regelung wird derzeit bereits angewandt und wird aller Voraussicht nach zur allgemeinen Klarstellung auch bei der nächsten Überarbeitung in die Musterbauordnung einfließen [Pat-2016b].

Da die wenigsten Palettenhochregale eine Erschließungsfunktion aufweisen wird in den weiteren Kapiteln aus Gründen der einfacheren Begrifflichkeit nur noch zwischen Hochregalen in Silobauweise (bauliche Anlage) und freistehenden Hochregalen (keine bauliche Anlage, Einrichtungsgegenstand) unterschieden.

Hochregale, die bauliche Anlagen sind, fallen unter „Sonderbauten“, da Regallager mit einer Höhe Oberkante Lagergut von mehr als 7,5m in §2 Abs.4 Pkt. 18 MBO ausdrücklich dieser

Kategorie zugeordnet werden. An Sonderbauten werden spezielle Brandschutzanforderungen gestellt, welche im Einzelfall zu prüfen und nicht explizit in der MBO beinhaltet sind. Durch die Einstufung als Sonderbau sind solche Hochregale zudem genehmigungspflichtig, d. h. es sind bautechnische Nachweise zur Erlangung einer Baugenehmigung notwendig. Die bautechnischen Nachweise müssen die Einhaltung der Anforderungen im Bereich der Standsicherheit, des Brand-, Schall-, Wärme- und Erschütterungsschutzes sicherstellen und müssen entsprechend geprüft werden. Für Sonderbauten gilt ferner, dass der Brandschutznachweis von einem Prüfsachverständigen geprüft bzw. bescheinigt werden muss. [ARG-2012]

Bei der Festlegung der Höhengrenze für die Einteilung von Regalen als Sonderbau sind die einzelnen Landesbauordnungen nicht einheitlich. Die jeweils geltende Grenze muss somit für jedes Bundesland in der entsprechenden Landesbauordnung nachgelesen werden.

„Gebäude sind selbstständig benutzbare, überdeckte bauliche Anlagen, die von Menschen betreten werden können und geeignet oder bestimmt sind, dem Schutz von Menschen, Tieren oder Sachen zu dienen.“, §2 Abs.2 MBO [ARG-2012]. Hochregale in Silobauweise genügen der genannten Definition und sind daher nach der Musterbauordnung als Gebäude (Sonderbauten) der Gebäudeklasse 4 oder 5 einzustufen [Pat-2016b].

#### **3.3.2 Inverkehrbringen von Hochregalen**

Produkte, die im Rahmen einer Geschäftstätigkeit auf dem Markt bereitgestellt werden, müssen den Sicherheitsanforderungen des Produktsicherheitsgesetzes ProdSG genügen. Da für ortsfeste Palettenhochregale keine spezielle Rechtsverordnung nach §8 Abs. 1 ProdSG vorliegt, gelten die allgemeinen Anforderungen nach §3 Abs. 2 ProdSG. Diese schreiben vor, dass das Produkt während seiner Verwendung die Sicherheit und Gesundheit von Menschen nicht gefährden darf. Dazu muss das Produkt selbst sicher sein und darf sich auch nicht auf andere Produkte negativ auswirken. Um zu überprüfen, ob das Produkt den gestellten Anforderungen entspricht, können nach §4 ProdSG entweder harmonisierte Normen oder nach §5 ProdSG andere Normen und technische Spezifikationen, die von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin bekannt gemacht wurden, verwendet werden. In §6 ProdSG werden die Hersteller von Produkten in die Pflicht genommen, zum einen mögliche Gefahren ihrer Produkte zu erkennen bzw. zu beseitigen und zum anderen die Benutzer ausreichend auf mögliche Gefahren hinzuweisen. [Bun-2011a]

Sobald Hochregale als System in Kombination mit Regalbediengeräten in Verkehr gebracht werden, unterliegen sie §3 Abs. 1 ProdSG. Die zutreffende Rechtsverordnung nach §8 Abs. 1 ist dabei die Maschinenverordnung (9.ProdSV). Darin gestellte Anforderungen gelten als erfüllt, wenn das Hochregal den Angaben harmonisierter Normen, welche im Amtsblatt der Europäischen Union bekannt gemacht wurden, entspricht. [Bun-2016b; Bun-2011b]

Auf der Homepage der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin sind Listen der Normen und Richtlinien abrufbar, die nach ProdSG und Maschinenverordnung verwendet werden können [Bun-2016a].

### 3.3.3 Betreiben von Hochregalen

Nach §5 des Arbeitsschutzgesetzes ist es die Pflicht des Arbeitgebers alle möglichen Gefährdungen der Mitarbeiter aufzuzeigen und diesen mit Maßnahmen des Arbeitsschutzes zu begegnen [Bun-2015a].

Bei Regalen erfolgt die Beurteilung der Gefährdung dabei nach der Betriebssicherheitsverordnung BetriSichV [Deu-2012].

Die Gefährdungsprüfung muss jegliche Tätigkeiten beinhalten, die mit der Verwendung des Arbeitsmittels einhergehen und hat auch die Arbeitsumgebung sowie die Arbeitsgegenstände, an denen mit dem Arbeitsmittel gearbeitet, wird zu berücksichtigen. Nach §3 Abs. 5 BetriSichV können dabei Angaben des Herstellers übernommen werden, sofern diese den eigenen Arbeitsbedingungen entsprechen. Das Ergebnis der ersten Überprüfung vor Verwendung des Arbeitsmittels muss schriftlich dokumentiert werden. Falls das Arbeitsmittel „Schäden verursachenden Einflüssen“ unterliegt, müssen nach §14 bzw. §3 Abs. 6 BetriSichV wiederkehrende Prüfungen innerhalb bestimmter Fristen, die vom Arbeitgeber bzw. der BetriSichV festgelegt werden, durchgeführt werden. Für die Festlegung der Fristen soll nach §3 Abs. 7 BetriSichV der aktuelle Stand der Technik berücksichtigt werden. Dabei muss sichergestellt sein, dass das Arbeitsmittel jeweils bis zur nächsten Prüfung sicher betrieben werden kann. Bei Änderungen am Arbeitsmittel oder bei außergewöhnlichen Ereignissen muss zudem eine sofortige zusätzliche Prüfung erfolgen. Die Prüfungen werden dabei von „befähigten Personen“ durchgeführt, welche „...durch ihre Berufsausbildung, ihre Berufserfahrung und ihre zeitnahe berufliche Tätigkeit über die erforderlichen Kenntnisse zur Prüfung von Arbeitsmitteln verfüg[en]“. [Bun-2015b]

Die Anforderungen, welche an eine befähigte Person gestellt werden, werden durch die Technischen Regeln für Betriebssicherheit TRBS 1203 konkretisiert. [TRB-1203]

Hochregale, egal welcher Bauform, zählen als Arbeitsmittel. Der Arbeitgeber hat somit die Gefahren im Bereich der Nutzung des Regals zu erfassen und durch Schutzmaßnahmen zu beseitigen. Bei der Beurteilung ist es hilfreich fachkundige Personen sowie die einzelnen Hersteller der Hochregallagerkomponenten hinzuzuziehen, denn die Hersteller kennen bereits die von ihren Produkten ausgehenden Gefahren aus den Vorgaben des Produktsicherheitsgesetzes ProdSG. Da bei Hochregalen die Sicherheit auch von der Montage abhängt, hat eine Erstprüfung durch eine zur Prüfung befähigte Person zu erfolgen. Hochregale sind im Betrieb, egal ob manuell oder automatisch bedient, schädigungsgefährdet, da selbst bei vollautomatischen Lagern Fehlfunktionen auftreten können, welche zu einem Schaden am Regal führen können. Aus diesem Grund müssen Hochregale einer wiederkehrenden Prüfung unterzogen werden. Spezifische Angaben zu Fristen und Prüfumfang für Hochregale sind dabei in Normen zu finden. Diese sind zwar nicht direkt rechtlich bindend, spiegeln aber den aktuellen Stand der Technik wieder und sollen daher laut Betriebssicherheitsverordnung (§3 Abs. 7) zur Klärung offener Punkte herangezogen werden. Zur Inspektion von Regalanlagen aus Stahl werden speziell ausgebildete Regalprüfer eingesetzt. [Oeh-2016; Rum-2016]

Des Weiteren gilt es die Arbeitsstättenverordnung ArbStättV zu berücksichtigen, da Lager nach §2 Abs. 4 ArbStättV in deren Anwendungsbereich fallen. Wie bei der Betriebssicher-

heitsverordnung hat dabei nach §3 ArbStättV eine Gefährdungsbeurteilung zu erfolgen, welche bei Einhaltung des Standes der Technik sowie der veröffentlichten Regelwerke der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin als erfüllt gilt. [Bun-2010]

Konkretere Anforderungen zur Arbeitsstättenverordnung sind in den Arbeitsstättenregeln ASR zu finden. Hier sind vor allem ASR A1.2, A1.3, A1.8, A2.2, A2.3, A3.4 zu beachten. [Bun-2016b]

### **3.4 Normen und Richtlinien für Hochregallager**

*Christopher Ludwig, Peter Glaser*

#### **3.4.1 Allgemeines**

Durch die unterschiedliche baurechtliche Einstufung der beiden Bauweisen von Hochregalen (siehe Kapitel 3.3.1) sind auch die zu verwendenden Normen und Richtlinien unterschiedlich. Hochregale in Silobauweise müssen nach den Vorgaben der Landesbauordnungen bzw. des öffentlichen Baurechts behandelt werden, d. h. es sind die Normen und Richtlinien aus der Liste der technischen Baubestimmungen zu verwenden. Ansonsten ist ein bauaufsichtlicher Verwendbarkeitsnachweis notwendig. Freistehende Regale sind keine baulichen Anlagen, sondern Einrichtungsgegenstände, und unterliegen deshalb nicht dem Baurecht.

An beide Bauweisen werden Anforderungen aus dem Produktsicherheitsgesetz und dem Arbeitsschutzgesetz gestellt. Diese beiden Gesetze bzw. ihre zugehörigen Verordnungen verlangen zur Gewährleistung der Sicherheit die Anwendung des Standes der Technik. Für Hochregale mit Regalbediengerät, welche der Maschinenverordnung unterliegen, existiert die Norm DIN EN 528, welche die Vermutungswirkung auslöst, d. h. es wird bei Berücksichtigung der Norm angenommen, dass das Produkt automatisch die Anforderungen des Produktsicherheitsgesetzes bzw. der Maschinenverordnung erfüllt [DIN-528]. Für alle anderen Hochregale gibt es keine speziell bekannt gemachten Regelwerke mit Vermutungswirkung. Bei diesen können beliebige anwendungsbezogene Normen und Richtlinien herangezogen werden. Der Hersteller hat dann aber eine Risikobeurteilung und -vermeidung durchzuführen.

Paletten-Hochregale sind ein sehr spezifisches Produkt. Die für bauliche Anlagen (Silo-Hochregale) vorgegebenen Regelwerke sind größtenteils sehr allgemein ausgelegt, da sie möglichst alle Bauwerke abdecken sollen. Detaillierte anwendungsbezogene Angaben fehlen. Für freistehende Regale sind ebenfalls spezifische Regelwerke wichtig, da durch sie der Stand der Technik berücksichtigt werden soll.

Das Fehlen spezifischer europäischer Normen und Regelungen war der Auslöser für den Zusammenschluss von zehn nationalen Organisationen in der ERF (European Racking Federation) unter dem Dach der FEM (Fédération Européenne de la Manutention). Die in der ERF gebildeten Working Groups erarbeiteten mit den sogenannten FEM-Richtlinien u.a. Berechnungs- und Bemessungskriterien, Spezifikationen bezüglich Konstruktion und Montageverfahren, Regelungen hinsichtlich Toleranzen, Fachfreimaßen und Verformungen wie auch Angaben bezüglich Betrieb und Inspektion. Das Technical Committee TC des European Committee for Standardization CEN leitete hieraus europäisch harmonisierte Normen (EN-Normen) für alle Mitgliedsländer ab (siehe Tabelle 1). [DIN-15512; Ver-2012]

Die Regelungen gelten dabei für Regale aus Stahl. Etwaige Versuchsaufbauten sowie Prüfbeschreibungen sind daher ausschließlich auf diesen Werkstoff bezogen.

**Tabelle 1: Wichtige FEM-Richtlinien und abgeleitete EN-Normen für Palettenregale aus Stahl**

	DIN EN 15878	Begriffe, Definitionen
FEM 10.2.03	DIN EN 15629	Spezifikation von Lagereinrichtung
FEM 10.3.01 FEM 9.831	DIN EN 15620	Grenzabweichungen, Verformungen, Freiräume
FEM 10.2.02	DIN EN 15512	Auslegung, Bemessung
FEM 10.2.04 FEM 10.2.05 FEM 10.2.06	DIN EN 15635	Anwendung und Wartung von Lagereinrichtung

Die in Tabelle 1 genannten Richtlinien und Normen gelten für Palettenregale. Die Erstellung von Richtlinien und die Ableitung von Normen für andere Stahlregaltypen wie z. B. die FEM 10.2.06 für Fachbodenregale, die FEM 10.2.07 für Einfahr- und Durchfahrregale oder die FEM 10.2.09 für Kragarmregale ist derzeit entweder noch im Gange oder wurde zwischenzeitlich schon abgeschlossen [Ver-2012; Kat-2010].

Bei Regalbedienung mittels Regalbediengeräten ist zusätzlich zu den Normen und Richtlinien der Tabelle 1 die DIN EN 528 (siehe Kapitel 3.4.1) für die Berücksichtigung spezieller Sicherheitsanforderungen heranzuziehen [DIN-528].

Eine allgemeine Richtlinie für Lagereinrichtungen stellt die DGUV 108-007 (vormals BGR 234) der Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution dar [DGU-108-007]. Diese enthält jedoch im Vergleich zu den vorhin genannten spezifischen Normen und Richtlinien für Palettenregale keine neuen Informationen für Hochregale.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die in Tabelle 1 genannten Regelwerke für Palettenregale bei beiden Bauweisen von Hochregalen verwendet werden können. Bei Regalen in Silobauweise, welche der Bauordnung unterliegen, gilt dies nur solange die Vorgaben nicht im Widerspruch mit den baurechtlichen Regelwerken stehen oder ein Verwendbarkeitsnachweis zur Abweichung vorliegt. Ohne einen solchen Nachweis sind die harmonisierten Normen und Richtlinien somit nur als Ergänzung zu den baurechtlichen Vorgaben zu sehen. Freistehende Regale unterliegen nicht dem Baurecht, weshalb die harmonisierten Normen und Richtlinien ohne Einschränkung Anwendung finden.

Nachfolgend werden die bei der Planung und dem Betrieb von Hochregalen relevanten Normen und Richtlinien näher beschrieben.

### 3.4.2 Bemessung

Für die Bemessung von baulichen Anlagen müssen in Deutschland die in der Liste der technischen Baubestimmungen des DIBt aufgelisteten und europaweit gültigen Eurocodes verwendet werden. Im Stahl- bzw. Holzbau sind dies beispielsweise der Eurocode 3 bzw. 5, die sich ihrerseits wieder in zahlreiche Teilnormen aufgliedern [DIN-1993-1-1; DIN-1995-1-1]. Diese befassen sich unter anderem mit der Bemessung und Konstruktion im Hochbau, der Auslegung von Anschlüssen und geben ergänzende Regeln an. Die DIN EN 15512 enthält eine vollständige Bemessungsmethodik für Palettenregale aus Stahl, welche sich bereichsweise von den Angaben des Eurocode 3 unterscheidet. Die Fachkommission Bautechnik beschloss, diese Norm nicht in die Liste der Technischen Baubestimmungen aufzunehmen, wodurch sie grundsätzlich nicht für die Bemessung von baulichen Anlagen verwendet werden darf. Grund hierfür war das Nachweiskonzept, welches durchgehend auf einer versuchsgestützten Bemessung basiert. Möchte man trotzdem die Bemessung nach DIN EN 15512 durchführen, so ist ein Verwendbarkeitsnachweis, also eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall, erforderlich. Die in Anhang A der DIN EN 15512 geschilderten Versuche sollen hierbei als Grundlage für die Erteilung von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen dienen. Im Hinblick auf eine wirtschaftliche Konstruktion ist eine solche Zulassung interessant, da die Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen  $\gamma_f$  der Ladeeinheiten nach DIN EN 15512 im Vergleich zu den Eurocodes geringer sind. Begründet wird der reduzierte Sicherheitsbeiwert durch die verminderte Streuung der Lasten der Ladeeinheiten im Vergleich zu üblichen veränderlichen Einwirkungen wie z. B. Wind, Schnee oder Nutzlasten im Baubereich. Erfolgt zusätzlich die Beschickung des Lagers durch ein automatisches Regalbediengerät mit Ladegewichtskontrolle vor der Einlagerung ist eine weitere Reduzierung des Sicherheitsbeiwertes möglich. Die Teilsicherheitsbeiwerte für ortsfeste Regalsysteme sind in Tabelle 2 der DIN EN 15512 aufgeführt. [Kat-2010; Kat-2011; Ver-2012; DIN-15512]

Freistehende Regale benötigen keinen bauaufsichtlichen Nachweis, für sie kann standardmäßig die Bemessung nach DIN EN 15512 erfolgen.

### 3.4.3 Freiräume, Verformungen, Toleranzen

Die DIN EN 15620 sowie die FEM 9.831-1 / FEM 10.3.01-1 definieren Grenzabweichungen, Verformungen und Freiräumen die bei der Planung, Herstellung und Montage von Hochregalen beider Bauweisen beachtet werden müssen. Die DIN EN 15620 gibt dabei Grenzwerte verschiedener Beschickungsarten an. Die FEM 9.831-1 / FEM 10.3.01-1 bezieht sich hingegen rein auf Hochregallager – freistehend oder in Silobauweise – mit Beschickung durch Regalbediengeräte. Da die harmonisierten Normen aus den FEM-Richtlinien abgeleitet wurden, gibt es bei Hochregalen bezüglich der Freiräume, Grenzabweichungen und Verformungen kaum Unterschiede zwischen den beiden Regelwerken. Die gegebenen, sehr strengen Grenzwerte werden dadurch begründet die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems aus Bodenplatte, Regalstruktur und Bediengerät sicherzustellen.

### 3.4.4 Inspektion

Eine wiederkehrende Überprüfung von Hochregalen ist erforderlich, um etwaige Schäden frühzeitig zu erkennen und Gefahren zu vermeiden. Rechtlich gesehen wird die Regalinspektion für Hochregale beider Bauweisen durch die Betriebssicherheitsverordnung gefordert (siehe Kapitel 3.3). Die dabei nötigen Überprüfungsfristen werden vom Arbeitgeber festgelegt.

Dieser hat sich dabei am Stand der Technik, welcher in einschlägigen Normen festgehalten wurde, zu orientieren. Für Palettenregale aus Stahl gibt es dafür die DIN EN 15635, welche grundsätzlich nur für Stahlregale gültig ist.

Die DIN EN 15635 schreibt vor, dass Regale systematisch und regelmäßig zu überprüfen sind. Dazu ist meist eine Sichtkontrolle vom Boden aus ausreichend, da in diesem Bereich am häufigsten Schäden auftreten. Nur bei speziellen Vorfällen in oberen Ebenen ist eine Nachforschung in der entsprechenden Höhe notwendig. Neben wöchentlichen Sichtkontrollen durch einen Verantwortlichen des Betreibers sind auch jährliche Expertenkontrollen vorgeschrieben. Für Hochregallager wird dabei explizit eine rollierende jährliche Inspektion von mindestens 20% des Lagers verlangt. Zudem ist vom Betreiber ein schriftlicher Bericht zu führen, welcher auftretende Störungen sowie deren Auswirkungen auf das Regal dokumentiert. [DIN-15635]

#### **3.4.5 Brandschutz**

Für bauliche Anlagen ist grundsätzlich nach §14 MBO ein Brandschutz gefordert. Die in den weiteren Paragraphen der Musterbauordnung angeführten Vorgaben zum Thema Brandschutz sind für Hochregale (Sonderbau) nicht ausreichend. Für konkretere Angaben kann die in der Liste der technischen Baubestimmungen enthaltene Muster-Industriebauanleitung MInd-BauRL verwendet werden [Fac-2014a]. Diese schließt in der aktuellen Fassung von 2014 Regallager mit einer Oberkante Lagergut von mehr als 9 Metern nicht mehr wie bisher aus. Begründet wird diese Neuerung damit, dass die zuvor angewandte VDI Richtlinie 3564 „nicht ausschließlich auf bauordnungsrechtliche Schutzziele ausgerichtet ist“ [Fac-2014b; VDI-3564].

In der Muster-Industriebauanleitung können für die brandschutztechnische Beurteilung von Hochregalen die Abschnitte 5 und 6 MIndBauRL verwendet werden. Abschnitt 7 ist nicht anwendbar, da die Abbrandfaktoren nach DIN 18230-1 für Regale über 9 Meter nicht ermittelt werden können [DIN-18230-1]. Die in Kapitel 3.3.1 erläuterte unterschiedliche baurechtliche Einstufung von Silo- und freistehenden Hochregalen wird in der MIndBauRL bereits umgesetzt. Freistehende Regale zählen laut dem Erläuterungszusatz der Richtlinie als Einrichtungsgegenstände und Regale in Silobauweise als Einbauten. [Fac-2014b; Fac-2014a]

Da freistehende Regale in Hallen oder anderen Gebäuden errichtet werden und zur Lagerung von Gütern dienen, sind die umhüllenden Gebäude automatisch nach der MIndBauRL zu beurteilen. An die Regale selbst werden dabei keine Anforderungen gestellt, denn sie unterliegen nicht der Muster-Industriebauanleitung bzw. dem Baurecht. Freistehende Regale werden aber flächenmäßig Lagerbereichen zugerechnet, die dann bei der Beurteilung des umhüllenden Gebäudes zu berücksichtigen sind [Fac-2014b].

In Tabelle 2 in Abschnitt 6 MIndBauRL werden spezielle Anforderungen an die Baustoffe von tragenden und aussteifenden Bauteilen gestellt. Diese sind somit auch für Hochregale in Silobauweise gültig. Darin wird für tragende Bauteile erdgeschossiger Gebäude entweder ein nicht brennbarer Baustoff oder feuerhemmende Bauteile (F30) gefordert. Sollte die feuerhemmende Bauweise gewählt werden, so dürfen auch brennbare Baustoffe verwendet werden. [Fac-2014a]

In Abschnitt 6.4.2 der MIndBauRL wird für Lagergebäude bzw. Lagerbereiche mit Regalhöhen Oberkante Lagergut von mehr als 7,5 Metern ein selbsttätige Feuerlöschanlage vorgeschrieben [Fac-2014a]. Dadurch müssen Hochregale beider Bauformen immer über eine solche Brandschutzanlage verfügen.

Alle hier bisher angeführten Anforderungen der Muster-Industriebaurichtlinie sind grundsätzlich gültig. Jedoch heißt es gleich zu Beginn der Richtlinie in Abschnitt 2: "Weitergehende Anforderungen können gestellt werden z. B. für Regallager mit brennbarem Lagergut und einer Oberkante Lagerguthöhe von mehr als 9,0m.". Die Geschäftsstelle der Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz wies auf Rückfrage darauf hin, dass die MIndBauRL Regale über 9,0 m Höhe nicht abschließend regelt. Dadurch ist immer eine Einzelfallbetrachtung mit der zuständigen Bauaufsichtsbehörde und dem Prüfsachverständigen für Brandschutz notwendig. Im Einzelfall können dann auf Grundlage des §67 MBO Abweichungen einzelner Anforderungen der MIndBauRL verhandelt werden. Dafür ist eine Begründung bzw. Kompensation notwendig, bei der dann auch die früher verwendete VDI 3564 herangezogen werden darf [VDI-3564]. [Pat-2016a; Eng-2016]

Neben den genannten Regelwerken sind auch zwei weitere Richtlinien zu nennen, die von der VdS Schadenverhütung GmbH, einem Unternehmen des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., herausgegeben werden. Die darin enthaltenen Vorgaben und Empfehlungen müssen eingehalten werden, um eine Versicherbarkeit des Hochregals zu gewährleisten. Die VdS 2199 stellt dazu grundlegende Anforderungen zum Brandschutz im Lager [VdS-2199]. Die VdS CEA 4001 befasst sich mit der Sprinklerung von Regalen und Halblendecken [CEA-4001].

## **3.5 Eigenschaften der Regalwerkstoffe**

*Peter Glaser*

### **3.5.1 Allgemeines**

Die für den Bau von Regalstrukturen interessanten Baustoffe Stahl und Holz sollen im Nachfolgenden in kurzer Form vorgestellt und bezüglich ihrer Eigenschaften, die beim Bau von Hochregallagern relevant sind, verglichen werden. Für weiterführende Informationen wird auf einschlägige Literatur der jeweiligen Fachbereiche sowie auf produktspezifische Angaben von Herstellern verwiesen.

### **3.5.2 Stahl**

Stahl wird unter Verwendung der Rohstoffe Kohle, Koks, Erze bzw. Schrott hergestellt. Der Prozess ist energieaufwendig. Die Produktion erfolgt heutzutage mit zwei parallelen Linien. In der ersten Linie wird Erz im Hochofen durch die Befeuerung mit dem Brennstoff Koks geschmolzen. Mit der Beigabe von Zuschlagstoffen wird schließlich der gewünschte Stahl erzeugt. Nach dem Erstarren liegt der Stahl in kristalliner Form vor. Da Stahl vollständig recycelbar ist, existiert in der „modernen“ Stahlherstellung eine zweite Prozesskette. In dieser wird der gewünschte Stahl aus Schrott und der Zugabe von Zuschlagstoffen gewonnen. Bereits heute werden ca. 50% des weltweiten Stahlbedarfs aus Schrott gedeckt [Pet-2012, S. 1ff.].

Durch die Zugabe von verschiedenen Legierungselementen sowie durch mechanische Behandlung des Rohstahls können die Materialeigenschaften gezielt beeinflusst werden. Im

Stahlbau wird überwiegend Baustahl, zunehmend auch Feinkornbaustahl mit höheren Festigkeiten eingesetzt [Pet-2012, S. 1]. Durch die Prozesse der Stahlherstellung sind verschiedene, in ihrer Form optimierte Querschnittsgeometrien in Abhängigkeit des jeweiligen Einsatzgebietes realisierbar. Für den Bau von Hochregallagern werden in der Regel kaltgeformte Profile in unterschiedlichen Formen verwendet. Bei dem seit 40 Jahren bewährten Verfahren wird Stahlband kaltgewalzt. Durch die Kaltumformung werden höhere Festigkeitswerte erreicht. Sollen die erzeugten Stähle für standsicherheitsrelevante Bauteile eingesetzt werden, so müssen in Deutschland die Produkteigenschaften über bauaufsichtlich eingeführte Normen, allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) oder Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) geregelt sein. Für kaltgeformte Bauteile und Bleche ist dies im Stahlbau die [DIN-1993-1-3]. Bei der Herstellung der speziellen Stähle für Regalstrukturen entsprechen die Eigenschaften nicht immer gänzlich den Randbedingungen und Grenzwerten der [DIN-1993-1-3]. Diese nicht normenkonforme Stähle müssen daher über oben erwähnte abZ oder ZiE geregelt werden [DIN-15512].

Im Rahmen der bautechnischen Betrachtung wird Stahl als homogen und isotrop angesehen. Hinsichtlich der Materialeigenschaften zeichnet sich Stahl durch eine sehr hohe Festigkeit und Steifigkeit aus. Im Vergleich zu anderen Baustoffen besitzt Stahl außerdem eine sehr hohe Rohdichte. Die mechanischen Eigenschaften von Stahl hängen von der Temperatur des Materials ab. Dies bedeutet, dass Stahl bei Erhitzung an Festigkeit verliert bis er schließlich seinen Aggregatzustand von fest zu flüssig ändert und keine Tragfähigkeit mehr vorhanden ist. Anhand einer quantitativen Bezifferung bedeutet dies, dass bei circa fünfhundert Grad Celsius nur noch etwa die Hälfte der ursprünglichen Festigkeit zur Verfügung steht. Für die Stahlherstellung und das Recycling ist diese Materialeigenschaft notwendig, muss jedoch auch bei der Brandbeanspruchung von Tragwerken aus Stahl berücksichtigt werden.

Im Vergleich zu anderen Baustoffen ist die Wärmeleitfähigkeit wie auch der Temperaturendeckungskoeffizient von Stahl hoch. In den Planungsprozess von Bauwerken mit Stahl ist diese Eigenschaft daher miteinzubeziehen. Bezüglich der Dauerhaftigkeit besitzt Stahl nur eine begrenzte Korrosionsbeständigkeit. Dem können Veredelungsprozesse wie beispielsweise Verzinken Abhilfe schaffen [Pet-2012, S. 1ff.; DIN-1993-1-1].

#### **3.5.3 Holz**

Bei Holz handelt es sich um einen natürlich gewachsenen Rohstoff. Holz kommt als Nadel- und Laubholz vor. Wichtige Nadelhölzer in Deutschland sind Fichte, Kiefer, Douglasie, Lärche und Tanne. Die am weitesten verbreiteten Laubbäume sind Buche und Eiche [Bun-2014]. Im Bauwesen, also auch für den Bau der bestehenden Hochregallager, wird bisher fast ausschließlich Nadelholz eingesetzt.

Holz ist ein anisotroper Werkstoff. Hierunter versteht man die Eigenschaft der das Holz bildenden Zellen unter selben Bedingungen unterschiedliche Wachstumsrichtungen anzunehmen. Dieser Aufbau beeinflusst nicht nur das optische Erscheinungsbild von Holz sondern ebenso dessen Eigenschaften bezüglich mechanischer Beanspruchbarkeit, Feuchteverhalten und Wärmeleitfähigkeit. Im Vergleich zu Stahl ist nicht nur die Wärmeleitfähigkeit deutlich geringer, sondern ebenso die Volumenänderung (Temperaturendeckungskoeffizient) und können daher in der Praxis meist vernachlässigt werden.

Holz ist ein brennbarer Baustoff. Das Brandverhalten hängt hierbei von verschiedenen Faktoren ab. Allgemein verlieren im Brandfall die beanspruchten Querschnitte durch den Abbrand an Volumen. Die hierbei entstehende Kohleschicht übt eine passivierende Wirkung aus, so dass der Abbrand des inneren Querschnitts verzögert wird. Durch das Wissen über die Abbrandgeschwindigkeit von Holzbauteilen besitzen diese im Brandfall eine gute Kalkulierbarkeit. Zur Berücksichtigung der Brandeigenschaften für das Bauwesen wird Holz in Abhängigkeit der Entflammbarkeit in Baustoffklassen eingeteilt.

Die Rohdichte von Holz wird bestimmt durch die Größe der Porenräume zwischen den Zellwänden. In Abhängigkeit der Holzart unterscheidet sich diese erheblich. Die Rohdichte variiert in einem Bereich von nur  $100 \frac{kg}{m^3}$  für Balsaholz über in Deutschland weit verbreitetes Fichtenholz mit  $450 \frac{kg}{m^3}$  und Buchenholz mit  $700 \frac{kg}{m^3}$  bis hin zu Tropenhölzern wie Pockholz mit  $1300 \frac{kg}{m^3}$  [Her-2003, S. 32ff.]. Die Rohdichte beeinflusst hierbei die Festigkeit der Hölzer. Die Festigkeit hängt jedoch zusätzlich von wuchsbedingten Inhomogenitäten ab. Äste, Jahring- und Faserausbildung, Risse etc. stellen lokale Schwächungen im Material dar. Durch die Definition von Festigkeitsklassen in Kombination mit der Holzsortierung kann bei der Holzverarbeitung spezifisch auf die großen Materialstreuungen eingegangen werden.

Bezüglich der mechanischen Eigenschaften unterscheidet sich Holz ebenfalls deutlich von Stahl. Stahl hat eine höhere Festigkeit und Steifigkeit, aber auch eine vielfach größere Rohdichte. Durch die bereits erwähnte Anisotropie sind die Eigenschaften von Holz außerdem richtungsabhängig. In Bezug auf die Bemessung nach dem semiprobabilistischen Sicherheitskonzept resultieren aus der Inhomogenität höhere Teilsicherheitsbeiwerte auf Materialseite als bei Stahl.

Bei der Verwendung von Holz für die Konstruktion von Bauwerken ist der Materialfeuchtigkeit sowie Feuchtigkeitsänderungen besondere Aufmerksamkeit zu schenken. Wichtige Materialeigenschaften wie die Tragfähigkeit, Dimensionsstabilität, Schädigungen durch Pilze, Insekten oder feuchteinduzierte Rissbildung werden direkt von der Holzfeuchte beeinflusst. Die Ursache hierfür liegt in der Hygroskopizität des Materials, also der Fähigkeit Feuchtigkeit aufzunehmen und wieder abzugeben. Holz steht dabei in einem dynamischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung, d. h. die Feuchtigkeit des Holzes stellt sich nach einer gewissen Zeit auf einen Wert ein, welcher der Ausgleichsfeuchte entspricht. Bis zum Erreichen der Fasersättigung (bei Fichtenholz ca. 30% Holzfeuchte) wird die Feuchtigkeit dabei in den Zellwänden des Holzes eingelagert. Bei Änderungen der Holzfeuchte kommt es dann zu Volumenänderungen, welche als Quellen und Schwinden bekannt sind. Oberhalb der Fasersättigung lagert sich Feuchtigkeit in den Zellzwischenräumen ein. Das Volumen bleibt bei Feuchteänderungen konstant. Im Ingenieurholzbau wird nahezu ausschließlich mit Holzfeuchten unterhalb der Fasersättigung gearbeitet.

Aus Gründen der Bearbeitung sowie für die spätere Anwendung muss das Rohmaterial zunächst getrocknet werden. Bestenfalls wird dem Holz so viel Feuchtigkeit entzogen, dass die verbleibende Holzfeuchte der späteren Ausgleichsfeuchte der Nutzung entspricht. Die Auswirkungen von Quellen und Schwinden der Bauteile können somit verringert werden. Außerdem sinkt die Gefahr der Schädigung durch Pilze und Insekten [Her-2003, S. 33].

Bezüglich eines Angriffs aggressiver Medien weist Holz eine sehr hohe Beständigkeit auf, die die von Stahl deutlich übersteigt. Nadelholz ist in der Regel widerstandsfähiger als Laubholz. Im Hinblick auf verschiedenste, auch chemisch aggressive Lagergüter sollte dieser Vorteil des Holzes frühzeitig bei der Lagerplanung beachtet werden. Besondere Aufmerksamkeit bei den Konstruktionen ist den häufig ausgeführten Verbindungen mit metallischen Verbindungsmitteln (Stahl) zu schenken [Nie-1993, S. 128ff.].

Die oben beschriebenen Materialeigenschaften sind durch den Rohstoff gegeben und weisen deutliche Materialstreuungen auf. Hölzer oder Holzprodukt, die im Bereich tragender oder aussteifender Bauteile eingesetzt werden, müssen zur Gewährleistung der Sicherheit gewisse Eigenschaften erfüllen. Zur Definition der Eigenschaften ist analog zum Stahlbau eine bauaufsichtlich eingeführte Norm, eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich. Dies bedeutet, dass nur Hölzer oder Holzprodukte für statisch relevante Bauteile eingesetzt werden dürfen, die über eine der drei oben genannten Möglichkeiten geregelt sind [Her-2003, S. 38].

Im Laufe der Zeit wurde das Spektrum an gängigen Holzprodukten stetig durch neue Erfindungen und Zulassungen erweitert. Heute sind daher unterschiedliche Holzprodukte auf dem Markt verfügbar. Die Herstellung der Produkte erfolgte meist durch Zerkleinerung des Rohmaterials und anschließender Fügung. Die Zerkleinerung erfolgt durch sägen (Bretter), Schälen oder Messern (Furniere), zerspanen oder fasern. Im Anschluss werden die zerkleinerten Komponenten in weitestgehend beliebigen Abmessungen und Aufbauten durch Kleben gefügt. Vorteile dieser Herstellungsmethoden ist die „Homogenisierung“ der Endprodukte und die Entkopplung von natürlichen Abmessungen, also die Herstellung von Bauteilen mit größeren Dimensionen [Her-2003, S. 31ff.].

Verschiedene Holzprodukte sind entsprechend den oben genannten Regelungen auf dem Markt verfügbar. Nachfolgend werden auszugsweise gängige Holzprodukte vorgestellt, die für die Herstellung der Tragstruktur von Hochregallagern interessant sein könnten. Weitere Holzprodukte und Holzwerkstoffe sind in der Fachliteratur zu finden wie z. B. [Dun-2002; Amb-2005; Her-2003].

Weit verbreitete Anwendung findet Brettschichtholz BSH (Abbildung 9), das aus mindestens drei in Faserrichtung aufeinander geklebten Brettern besteht. Bei Brettschichtholz handelt es sich um linienförmige Bauteile. Eingesetzt wird BSH für hoch belastete und weit gespannte Tragwerke wie für Bauteile mit besonderen Anforderungen an die Formstabilität [Her-2003, S. 40f.]. Der Hauptanteil der Bauteile der Regalstrukturen der bisher realisierten Hochregallager wurde aus Brettschichtholz gefertigt.



**Abbildung 9: Brettschichtholz BSH**

Losgelöst von der linienförmigen Struktur des Holzes können flächige Bauteile hergestellt werden. Brettsperrholz BSP (Abbildung 10) entsteht durch die kreuzweise Verklebung von mindestens drei Brettlagen aus Nadelholz (meist Fichte) mit symmetrischem Aufbau zur Mittelachse. Durch die gekreuzte Anordnung wird die Tragfähigkeit in Querrichtung erhöht wodurch ein zweiachsiger Lastabtrag möglich wird. Gleichzeitig reduziert sich das Quell- und Schwindverhalten in dieser Richtung. Eingesetzt wird BSP vorwiegend als Wandscheiben, Decken- oder Dachplatten. Durch den flächenförmigen Aufbau wird Brettsperrholz häufig zur Aussteifung herangezogen. Geregelt ist Brettsperrholz derzeit noch über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen [Wal-2013, S. 8ff.]. Mehrschichtplatten (Drei- und Fünfschichtplatten) ähneln Brettsperrholz. Der Aufbau erfolgt ebenfalls durch eine kreuzweise, zur Mittelachse symmetrische Verklebung von Brettlagen (Abbildung 11). Der Unterschied zu BSP liegt in der Dicke der verwendeten Bretter und dem verwendeten Klebstoff [Bla-2003] [Her-2003, S. 42]. Spezifische Materialeigenschaften finden sich analog zum Brettsperrholz in den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen der verschiedenen Hersteller.



**Abbildung 10: Brettsperrholz BSP fünflagig**



**Abbildung 11: Mehrschichtplatte dreilagig**

Furnierschichtholz (FSH) (Abbildung 12) wird durch das Verkleben von Furnieren im Gegensatz zu Brettern hergestellt. Furniere haben im Vergleich zu Brettern mit nur rund  $3\text{ mm}$  eine deutlich geringere Materialstärke. Nach [DIN-14374] muss Furnierschichtholz mindestens aus fünf Furnieren mit einer jeweiligen maximalen Dicke von  $6\text{ mm}$  bestehen. FSH ist als stabförmiges wie auch flächiges Bauteil zu erhalten. Dementsprechend wird FSH nur mit Längslagen

(FSH-S) oder auch mit Querlagen (FSH-Q) produziert. Eingesetzt wird Furnierschichtholz hauptsächlich im Bereich von Trägern, Stützen und Gurten sowie als Stäbe von Fachwerkträgern, zur Querschnittsverstärkung oder als ebenes Flächentragwerk und zur Aussteifung [Her-2003, S. 42f.].

Eine Alternative zu gängigem FSH stellt Furnierschichtholz aus Buche dar (Abbildung 13). Diese sogenannte BauBuche besteht aus vom Stamm geschälten Furnieren, die im Anschluss zu Platten und Trägern unterschiedlicher Dimension verklebt werden. Hierdurch werden verschiedene, auch dimensionsgrößere Querschnittsabmessungen aus Buche realisierbar. Geregelt ist das Furnierschichtholz aus Buche über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen. Der Baustoff zeichnet sich durch äußerst hohe Festigkeitswerte aus. Anwendung findet er für linienförmige und flächige Tragwerke [DIB-Z-9b; DIB-Z-9a].

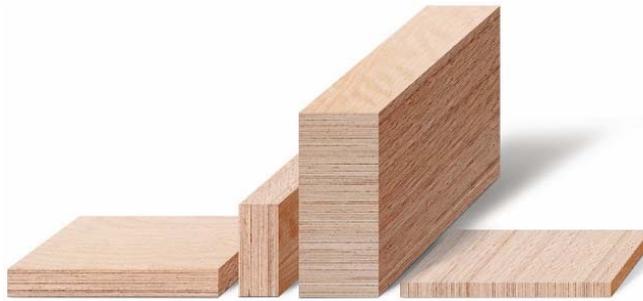
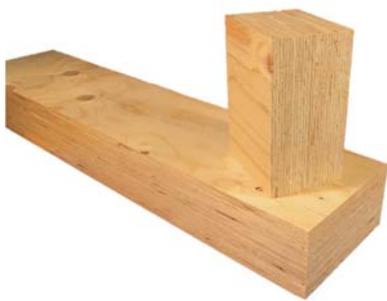


Abbildung 12: Furnierschichtholz

Abbildung 13: BauBuche als Platte, Träger und Paneel [Bla-2015, S. 6]

### 3.5.4 Gegenüberstellung Stahl und Holz

In den Erläuterungen der Kapitel 3.5.2 und 3.5.3 wurden die Eigenschaften von Stahl und Holz in kurzer Form dargestellt. Die Baustoffe sollen abschließend mit den für die Planung von Regalstrukturen interessanten spezifischen Eigenschaften gegenübergestellt werden. Tabelle 2 zeigt eine Zusammenstellung mit Richtwerten der Eigenschaften sowie der aufgrund der Vielfalt der beiden Werkstoffgruppen zu erwartenden Variabilität.

Tabelle 2: Allgemeine Gegenüberstellung der Materialeigenschaften von Baustahl und Holz

	Baustahl	Variabilität	Holz	Variabilität
<b>Materialvielfalt</b>	→		↑	
<b>Querschnittsvielfalt/ -optimierungen</b>	↑		→	
<b>Produktvielfalt</b>	↑		↑	
<b>Struktureller Material- aufbau</b>	Homogen und Isotrop		Inhomogen und Anisotrop	
<b>Rohdichte</b>	↑	sehr gering	↓	hoch
<b>Elastizitätsmodul</b>	↑	gering	↓	mittel bis hoch
<b>Festigkeit</b>	↑	hoch	→	hoch
<b>Spezifische Festigkeit</b>	→	mittel	↗	mittel

	<b>Baustahl</b>	<b>Variabilität</b>	<b>Holz</b>	<b>Variabilität</b>
<b>Feuchteverhalten</b>	Nicht hygroskopisch, mögliche Korrosion		Hygroskopisch, mögliche Holzerstörung	
<b>Korrosionsbeständigkeit</b>	↓	Erhöhung durch Veredelungen	↑	
<b>Wärmeleitfähigkeit</b>	↑	gering	↓	gering, abhängig von Feuchtigkeit
<b>Temperaturverhalten</b>	Nicht brennbar, Festigkeitsverlust bei Erhitzung, Standsicherheit dünner Profile nicht kalkulierbar		Brennbar, Eigenschutz des Querschnitts durch Kohleschicht, kalkulierbar	
<b>Bearbeitbarkeit</b>	→		↑	
<b>Energieaufwand Herstellung und Bearbeitung</b>	↑		↓	
<b>End-of-Life</b>	100% recycelbar		Energetische Verwertung oder Wiederverwendung/ Weiterverwertung	

Anhand Tabelle 2 werden die unterschiedlichen Eigenschaften von Holz und Stahl nochmals ersichtlich. Jeder Baustoff hat spezifische Vor- und Nachteile. In Abhängigkeit der speziellen Anwendung für Regalstrukturen und der Nutzungen (Lagergut) ergeben sich verschiedene Relevanzen der Materialeigenschaften. Bei der Planung von Regalstrukturen sollten daher die Nutzungsbedingungen frühzeitig geklärt und betrachtet werden um eine direkte Bewertung der Vorteile und Problemstellungen der beiden Werkstoffe durchführen zu können.

### 3.6 Regalkonstruktion bestehender Hochregallagerbauten

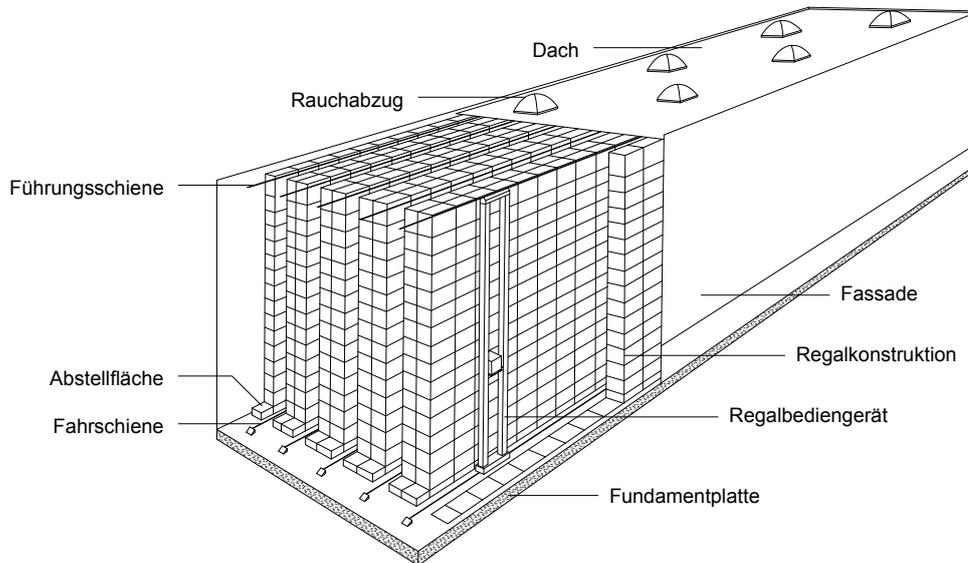
*Peter Glaser*

#### 3.6.1 Allgemeines

Die Darstellungen dieses Kapitels dienen der Analyse des statisch-konstruktiven Aufbaus bestehender Regalstrukturen. Der Fokus wird hierbei auf die konstruktiv anspruchsvolleren dach- und fassadentragenden Hochregallager (Silos) gelegt, da alle bisher gebauten Holz-Hochregale dieser Bauform entsprechen. Abbildung 14 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Hochregalsilos.

Im Rahmen der Analyse werden die gängigen Aufbauten für Hochregallager in Stahlbauweise ebenso wie die Besonderheiten der bisher realisierten Hochregallager aus Holz betrachtet.

Stahlbeton wurde ebenfalls für den Bau von Hochregallagern eingesetzt. Die größte Verbreitung fand die Bauweise in den 70er und 80er Jahren des letzten Jahrhunderts [Dor-1974].

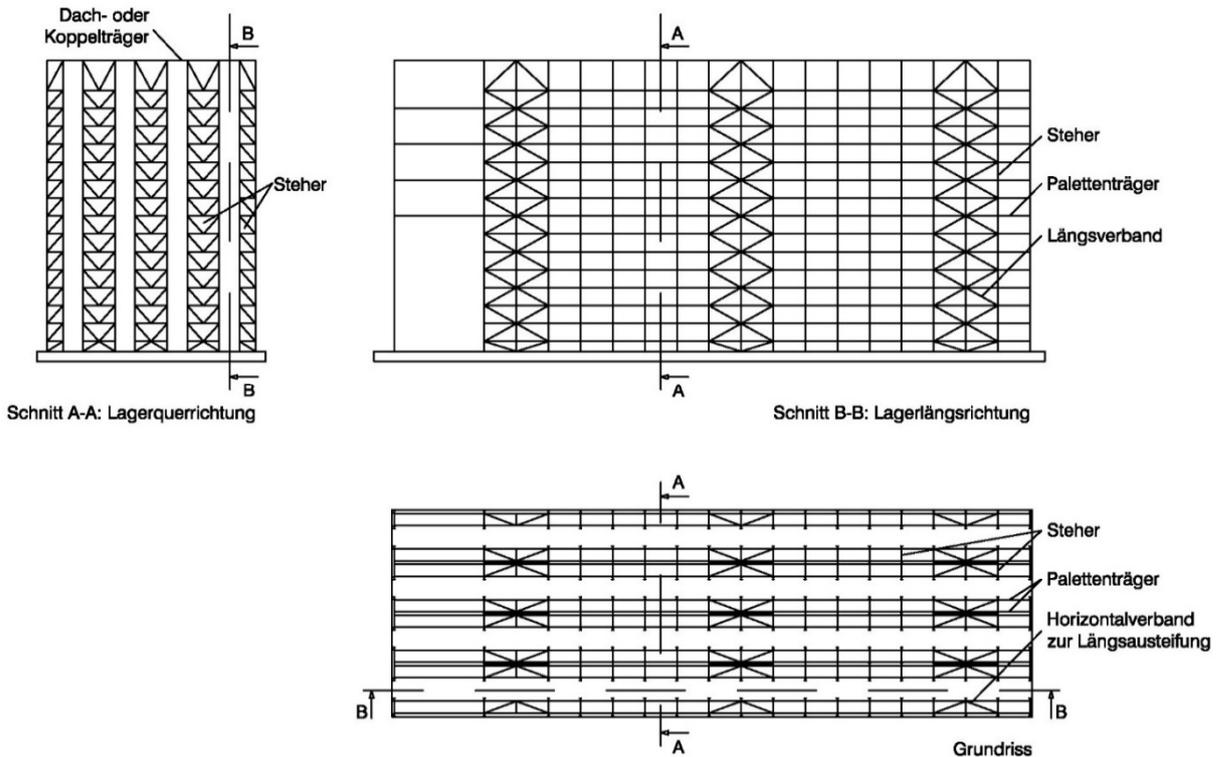


**Abbildung 14: Schematischer Aufbau eines Hochregallagers in Silobauweise in Anlehnung an [Dor-1975]**

Die Stahlbetonbauweise bzw. eine Mischbauweise mit Stahl stellte, mit einem Marktanteil von unter 10%, für die Konstruktion von Hochregallagern fortwährend eine Sonderanwendung dar [Gün-2007, S. 195]. Eingesetzt wurde Stahlbeton hauptsächlich für Lagerstrukturen mit außergewöhnlich hohen Lagerlasten oder beispielsweise bei Beanspruchungen durch chemisch aggressive Medien [Dor-1974]. Das letzte Hochregallager mit einer Lagerstruktur aus Stahlbeton wurde nach Angaben der Zeitschrift Materialfluss 2005 in Betrieb genommen. Aufgrund der geringen Verbreitung sowie der aktuellen Situation wird die Stahlbetonbauweise im Rahmen dieser Zusammenstellung nicht weiter betrachtet.

Baustoffunabhängig ist die Besonderheit bei der Planung der Regalstruktur die Häufigkeit gleicher, sich wiederholender Bauteile. Durch diese Wiederholungen sowie die hohen Stückzahlen ist eine optimierte Auslegung gleichartiger Bauteile und Querschnitte für eine wirtschaftliche Konstruktion erforderlich. Bezüglich der Anschlüsse gilt eben dies. Gewählt werden sollten einfache und idealerweise lösbare Anschlüsse mit geringem Montage bzw. Demontageaufwand [Kuh-2015, S. 761]. Wie bereits eingangs erwähnt, besteht die Regalstruktur für HRL in Silobauweise im Wesentlichen aus vier Hauptbestandteilen (siehe Abbildung 15):

- Palettenträger
- Steher
- Aussteifungsverbände
- Dach- oder Koppelträger



**Abbildung 15: Allgemeine Tragelemente von Hochregallagern in Anlehnung an [Möi-2001]**

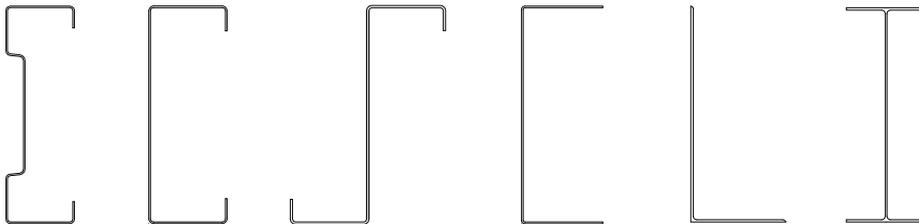
Alle Bauteile kommen, wenn auch in abgewandelten Formen und Geometrien, sowohl in Stahl- als auch Holzkonstruktionen vor. Die Lasten werden von den Palettenträgern in die Steher und weiter in die Gründung geleitet werden. Die Palettenträger übernehmen außerdem die Kopplung der Steher mit den Verbandstürmen in Lagerlängsrichtung, so dass alle Teile des Lagers in Längsrichtung ausgesteift sind. In Querrichtung erfolgt die Aussteifung über eine Rahmenwirkung. Hierzu werden die Dach- oder Koppelträger mit den Stehern verbunden, wodurch steife Rahmen entsteht, die die anfallenden horizontalen Lasten an die Gründung weitergeben. Äußere Einwirkungen aus beispielsweise Schnee und Wind werden durch den Anschluss von Dach und Fassade direkt über die Regalstruktur abgeleitet. Außergewöhnliche Einwirkungen wie z. B. Erdbebenlasten mit lateralen Beschleunigungen in allen drei Raumrichtungen werden ebenso durch die ausgesteifte Regalkonstruktion aufgenommen.

Die Gründung wird in der Regel als flächige Bodenplatte ausgeführt. In Abhängigkeit der Baugrundverhältnisse sind ggf. zusätzliche Pfähle unter der Bodenplatte zur sicheren Lastweiterleitung und zur Einhaltung der Grenzwerte der Gebrauchstauglichkeit erforderlich. Grenzwerte bezüglich Herstellungstoleranzen und Verformung für Gründungen von Palettenregalen sind in Abhängigkeit der Regalklasse [DIN-15620] und [FEM-9831] zu entnehmen.

Werkstoffspezifisch werden die Bauteile für Hochregallager unterschiedlich umgesetzt. Die Optimierung im Stahlbau ist im Vergleich zum Holzbau durch den größeren Erfahrungshorizont wesentlich weiter fortgeschritten. Eine weiterführende, werkstoffspezifische Erläuterung zu den konstruktiven Aufbauten sowie die Besonderheiten sind den nachfolgenden Kapiteln 3.6.2 und 3.6.3 zu entnehmen.

### 3.6.2 Hochregale aus Stahl

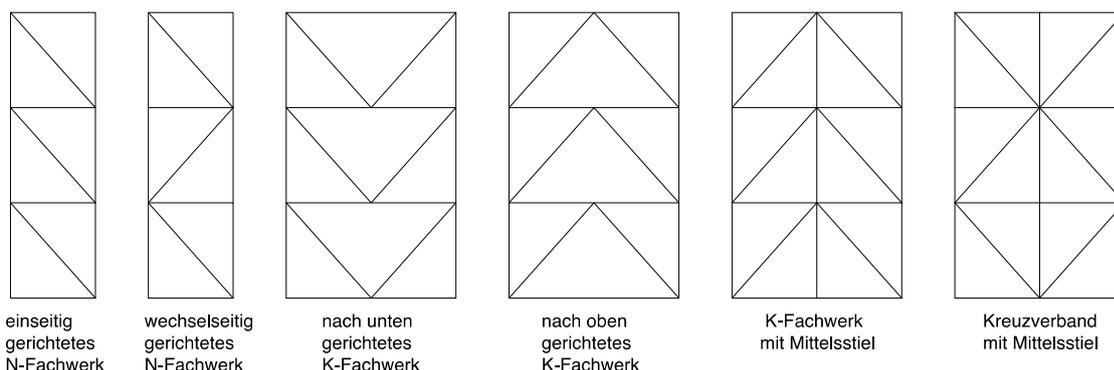
Die meisten Hochregallager wurden in Stahlbauweise errichtet. Die Dominanz ist sehr groß, so dass bisher fast von einer typischen Bauweise gesprochen werden kann. Regalkonstruktionen werden jedoch in der Regel nicht als „klassische“ Stahlbauten ausgeführt. Eingesetzt werden überwiegend kalt geformte, dünnwandige und offene Stahlquerschnitte für Stützen und Träger. Eine Auswahl möglicher Querschnittsgeometrien zeigt Abbildung 16. Um eine möglichst große Flexibilität in der Nutzung und ggf. einer Umnutzung gewährleisten zu können, werden die Stahlprofile mittels einfacher und leicht lösbarer Verbindungen wie z. B. Schrauben zur Regalstruktur gefügt [Kuh-2015, S. 761].



**Abbildung 16: Auswahl möglicher kaltgeformter, dünnwandiger Stahlquerschnitte in Anlehnung an [DIN-15512]**

Durch die Anordnung von lotrechten, horizontalen und schrägen Bauteilen wird ein räumlich ausgesteiftes Tragwerk erzeugt, das die Abtragung der vertikalen und horizontalen Einwirkungen sicherstellt.

Zunächst sollen die einzelnen Bauteile und deren Funktion im Tragwerk erläutert werden. Die vertikalen Bauteile (Steher) werden im Stahlbau als Fachwerke ausgeführt. Dies können, wie in Abbildung 17 dargestellt, N-Fachwerke, K-Fachwerke oder Kreuzverbände sein. Zur Erstellung der Fachwerksteher werden die Diagonalen mit den Stielen in der Regel durch Verschraubung verbunden.



**Abbildung 17: Möglichkeiten der Ausbildung der Steher als Fachwerke [Bin-2014]**

Die Steher leiten die vertikalen Lasten aus Eigengewicht, Schnee und Lagergut in den Baugrund ab. Die Anordnung der Steher in Lagerlängsrichtung ist bedingt durch die Abmessungen der Ladeeinheiten und der gewünschten Platzlagerung. In diesem Raster werden die Steher auf der Bodenplatte verankert. Häufig kommen hierzu Verschraubungen der Steher mit bereits in die Bodenplatte eingebrachten Gewindestangen und anschließendem Verguss der Steherfüße zum Einsatz (Abbildung 18). In Abhängigkeit der Lagerhöhe werden zusätzliche

Stöße der Steher vorgesehen. Im Zuge der Montage werden die einzelnen Hochregallagermodule an diesen Stellen miteinander verschraubt.



**Abbildung 18: Verschraubung der Steherfüße beim Stahlregal mit der Bodenplatte, Quelle: Merz Kley & Partner ZT GmbH**

Für die Auflagerung der Ladeeinheiten werden zwischen den Stehern horizontale Tragelemente angeordnet. Bei Palettenlagern sind dies Palettenträger. Hierfür werden im Stahlbau meist sogenannte Sigma-Profile ( $\Sigma$ -Profile) mit den vertikalen Stäben verschraubt (Abbildung 19). Die Aussteifung gegenüber horizontalen Lasten aus Wind, Regalbedienung, Schiefstellung oder Erdbeben erfolgt in Lagerquerrichtung durch die Drehsteifigkeit der Stehverankerung gekoppelt mit einer durch den Dachträger erzeugten Rahmenwirkung (Abbildung 20). Zur Aussteifung in Lagerlängsrichtung werden zusätzliche Verbände angeordnet. Im Gegensatz zu der Aussteifung in Querrichtung (jeder Steher wird zur Aussteifung herangezogen) erfolgt die Aussteifung in Längsrichtung nur an diskreten Stellen des Tragwerks. Über die horizontal verlaufenden Palettenträger werden die nicht direkt durch Längsverbände ausgesteiften Querrahmen mit den Längsverbänden gekoppelt. Aus Gründen der Regalbedienung können in Längsrichtung nicht überall Verbände vorgesehen werden. Die Anordnung erfolgt lediglich auf der der Regalbedienung abgewandten Seite (Abbildung 21). Zur Vermeidung von Stabilitätsproblemen an der Stehervorderseite werden deshalb horizontale Verbände in Längsrichtung angebracht, die wiederum mit den vertikal verlaufenden Verbänden in Längsrichtung gekoppelt sind (zum Tragwerk vergleiche auch Schemadarstellung der Abbildung 15).



**Abbildung 19: Regalgasse mit Anordnung der Steher und Palettenträger beim Stahlregal, Quelle: Voestalpine Krems Finaltechnik GmbH**



**Abbildung 20: Blick auf den Rahmen aus Stehern und Dachträgern in Querrichtung beim Stahlregal, Quelle: Voestalpine Krems Finaltechnik GmbH**

Die Montage erfolgt, indem die Steher mit den Palettenträgern auf dem Boden (häufig in Schablonen) zu gleichen und ähnlichen Modulen verschraubt werden (Abbildung 21). Nach der Fügung werden die Module mittels Kränen an die vorgesehenen Stellen im Regal gehoben und mit der Bodenplatte bzw. der bereits errichteten Konstruktion verbunden. Durch die sich wiederholenden Module ist eine gleichbleibende und somit relativ zeitarme Montage möglich.



**Abbildung 21: Montagezustand eines Regalmoduls aus Stahl mit Blick auf die Auskreuzungsverbindungen der Längsaussteifung, Quelle: Merz Kley & Partner ZT GmbH**

### 3.6.3 Hochregale aus Holz

Seit 2005 werden auch Hochregallager aus Holz gebaut. Bisher wurden acht Hochregalsilos zur Einlagerung von Paletten realisiert. Aufgrund der noch sehr jungen Bauweise und dem geringen Erfahrungsschatz variieren die Konstruktionsformen der Hochregallager teilweise erheblich. Die oben genannten Hochregallager wurden von drei Firmen errichtet. Zwei Firmen errichteten jeweils ein Lager. Die restlichen sechs wurden von nur einem Betrieb realisiert. Das Know-how ist demzufolge derzeit auf wenige Fachbetriebe begrenzt.

Bezüglich der Lagerung wurden ausschließlich Systeme mit Dreiplatzlagerung gewählt. Es wurden einfach- und doppeltiefe Lager gebaut. Das Hochregallager der Offsetdruckerei in Schwarzach ist das einzige aus Holz mit mehrfachtiefer Lagerung (Kanallager). Das Lager der Firma Josera hat die Besonderheit, dass die Kommissionierung in sogenannten Kommissioniertunneln direkt im Lager stattfindet. Bezüglich der Größe liegen vier kleinere Lager mit 700 bis knapp 4.000 Palettenstellplätzen vor. Die restlichen vier Hochregallager weisen 9.200 bis über 31.000 Palettenstellplätze auf. Die Gesamtabmessungen der Regalblöcke der Holzkonstruktionen liegen derzeit in folgenden Bereichen:

Länge:  $28m \leq l \leq 122m$

Breite:  $12m \leq b \leq 67m$

Höhe:  $11m \leq h \leq 32m$

Die konstruktiven Bestandteile der Regalstrukturen der Hochregallager aus Holz sind im Wesentlichen dieselben wie bei Stahlhochregallagern. Die Aussteifung in Querrichtung erfolgt ebenso über alle teileingespannten Steher und die durch die Kopplung der Dachträger aktivierte Rahmentragwirkung. In Lagerlängsrichtung werden Verbandstürme zur Aussteifung angeordnet. Die Ausführung erfolgte meist durch Stahlauskreuzungen (Abbildung 22). Bei dem Lager der Salinen Austria AG laufen die Zugstäbe über zwei Regalebenen durch. Die Anschlüsse der Stahlzugdiagonalen sind in Abbildung 24 dargestellt. Die Verbandstürme wurden bereits im Werk vorgefertigt.



**Abbildung 22: Stahl-Auskreuzungen mit anschließender Regalkonstruktion am Hochregallager der (Quelle:) Salinen Austria AG**



**Abbildung 23: Aussteifungstürme mit anschließender Regalkonstruktion am Hochregallager der (Quelle:) Alnatura GmbH**

Im zuletzt errichteten Lager von Alnatura, dem derzeit größten Hochregallager aus Holz, werden die Verbandstürme als massive Holz-Hohlquerschnitte ausgeführt (Abbildung 23). Die Hohlquerschnitte zur Aussteifung des Lagers bestehen aus zwei Brettschichtholzträger, die über angeklebte Mehrschichtplatten (siehe Kapitel 3.5.3) verbunden werden. Hierdurch wird ein äußerst steifer Turm zur Aufnahme der Längskräfte erzeugt. Die Herstellung erfolgte im Werk. Im Anschluss wurden die fertigen Aussteifungstürme als Ganzes auf die Baustelle geliefert.

Durch die Anordnung von Verbände am Lagerende wird jede Steherreihe separat für sich ausgeseift. Die horizontalen Verbände zur Stabilisierung der dem Regalbediengerät zugewandten Seite entfällt (vergleiche Kapitel 3.6.2). Die Aussteifung der in Längsrichtung nicht ausgesteiften Standard-Stehermodule erfolgt über die Kopplung durch die Palettenträger und Längsverbindungen in der Dachebene (Lastensammler) mit den Verbandstürmen.



**Abbildung 24: Längsaussteifungsverbände mittels Stahldiagonalen am Beispiel des Hochregallagers der (Quelle:) Salinen Austria AG**

Aufgrund der werkstoffspezifischen Eigenschaften unterscheidet sich die Ausbildung der Bauteile im Vergleich zum Stahlbau. Vier der Lager sind hybride Konstruktionen, vier „reine“ Holzbauten. Bei der Hybridbauweise werden Palettenträger aus Stahl analog den Stahlhochregallagern verwendet (Abbildung 25). Die kaltgewalzten Sigma-Profile werden mit den Stehern zu einzelnen Modulen verschraubt und im Anschluss zur Gesamtstruktur gefügt. Bei reinen Holzkonstruktionen wurden Palettenträger aus Brettschichtholz verbaut (Abbildung 26).

Die Steher wurden bei allen Lagern, unabhängig von der Bauweise, aus Brettschichtholz gefertigt. Beim HRL von Josera wurden die Mittelsteher in Anlehnung an den Stahlbau als K-Fachwerke ausgebildet (Abbildung 27). Die restlichen HRL wurden mit Stehern als volle BSH-Querschnitte hergestellt. Bei diesem Konzept sind die Querschnittshöhen abhängig von den erforderlichen Abständen der Palettenträger zur Einlagerung der Europoolpaletten. Dies bedeutet, dass auch bei doppeltiefer Lagerung, jede Palettenreihe auf einer eigenen Steherfolge in Lagerlängsrichtung abgestellt wird (Abbildung 26). Die statisch erforderlichen Querschnittsabmessungen können folglich nur durch die Variation der Querschnittsbreiten beeinflusst

werden. Die Verbindung zwischen den Stehern an deren Kopfpunkt erfolgt in jeder Steherebene durch Dachträger aus BSH. Wie beim Stahlbau wird jede Steherebene zur Aussteifung in Querrichtung herangezogen.



**Abbildung 25: Hochregallager in Hybridbauweise mit Palettenträgern aus Stahl und Stehern aus BSH, Quelle: Kaufmann Bausysteme GmbH**



**Abbildung 26: Hochregallager als reine Holzkonstruktion, Quelle: Alnatura GmbH**

Die Besonderheit aller bisher aus Holz errichteten Palettenhochregallager in Silobauweise ist, dass die Steher ungestoßen vom Steherfuß bis zum Dachträger durchlaufen. Dies wurde aus Gründen der Montage aber vor allem wegen den Nachweisen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit durchgeführt. Probleme, die sich hieraus ergeben, liegen gerade bei sehr hohen Konstruktionen, im Transport sowie der Restriktion im Hinblick auf Bauteiloptimierungen im oberen Steherbereich aufgrund der geringeren Beanspruchungen.

Die Steher in Form eines K-Fachwerks im Hochregallager Joseras sind bereits im Werk des Herstellers fertig gestellt worden. Die Vorfertigung ermöglichte eine zügige Montage auf der Baustelle. Logistische Herausforderungen aufgrund der Bauteilgrößen waren in diesem Fall aufgrund der geographischen Nähe von Hersteller und Baugrundstück von untergeordneter Bedeutung.

Die Verbindungen bei den realisierten Hochregallagern aus Holz sind Standardverbindungen aus dem Holzbau. Eingesetzt wurden Vollgewindeschrauben (z. B. Anschluss der Palettenträger an die Steher), Nägel und Stabdübel als Stahlblech-Holz-Verbindungen (z. B. Anschluss Steher-Bodenplatte oder die Knotenpunkte im K-Fachwerk der Steher des Lagers von Josera), Holzdübel (z. B. Verbindung der Palettenträger im Hochregallager der Salinen

Austria AG), eingeklebte Gewindestangen (z. B. Verbindung von Steher-Bodenplatte ebenfalls im Hochregallager der Salinen Austria AG). Der Anschluss der Dachträger an die Steher variierte bei den acht Konstruktionen ebenfalls. Es sind sowohl innenliegende Verbindungsmittel wie Holzdübel aber auch Stahlblech-Holz-Verbindungen mit außenliegenden Stahlbelchen ausgeführt worden. Im Gegensatz zum Stahlbau ist eine Einheitlichkeit der Verbindungen nicht zu erkennen. Bei der Wahl der Verbindungsmittel spielten jeweils unterschiedliche, maßgebende Faktoren eine entscheidende Rolle, wie z. B. die Wirtschaftlichkeit (Stahlblech-Holz-Verbindung mit Nägeln), die Montagefreundlichkeit und Möglichkeit einer potenziellen Demontierbarkeit im Schadensfall (Verbindung Steher-Palettenträger), Beständigkeit gegen korrosive Einwirkungen (Verbindung der Palettenträger mit Holzdübel) oder die Generierung großer Steifigkeiten (Verbindung Steher-Bodenplatte mit eingeklebte Gewindestangen).

Die Vielfalt der eingesetzten Verbindungen zeigt, dass der Erfahrungsschatz beim Bau von Hochregallagern aus Holz noch gering ist. Mit dem Zugewinn an Erfahrung sind Optimierungen und Vereinheitlichungen möglich. Ein Beispiel dieses Prozesses der Weiterentwicklung stellt das zuletzt gebaute Lager von Alnatura dar. Aufgrund des erweiterten Erfahrungsschatzes und in Abhängigkeit der statischen Erfordernisse wurde die Verbindung Steher-Bodenplatte aus Wirtschaftlichkeitsgründen als zweischnittige, genagelte Stahlblech-Holz-Verbindung mit außenliegenden Stahlblechen ausgeführt (Abbildung 26). Die Stahlblech-Formteile werden bereits im Werk mit dem Steher vernagelt und als Ganzes auf der Baustelle mit der Bodenplatte verbunden.



**Abbildung 27: Lagerquerrichtung des Paletten-Hochregalsilos von (Quelle:) Josera GmbH & Co. KG**



**Abbildung 28: Lagerquerrichtung und liegende Montage eines Moduls in einer Schablone des Paletten-Hochregalsilos von (Quelle:) Alnatura GmbH**

Alle acht Hochregallager wurden in Silobauweise gebaut. Das Dach wird direkt auf Dach- und Koppelträger in Längsrichtung montiert. Zusätzliche, mit den Stehern verbundene Stützen dienen der Anbringung der Fassade (Abbildung 29). Diese Vorsatzkonstruktion ist erforderlich, falls aufgrund der Regalkonstruktion nicht genügend Platz für die Einlagerung der äußersten Paletten in Lagerquerrichtung vorhanden sein sollte.



**Abbildung 29: Vorsatzkonstruktion zur Anbringung der Fassade beim Hochregallager von (Quelle:) Alnatura GmbH**

### **3.7 Brand im Hochregal**

*Christopher Ludwig, Peter Glaser*

#### **3.7.1 Allgemeines**

„Mehr als ein Drittel der großen Brandschäden in Industrie und Gewerbe entsteht in Lagern.“ [VdS-2199]. Ursachen dafür sind meist elektrische Fehlfunktionen, feuergefährliche Arbeiten sowie Brandstiftung. Ein Lagerbrand bedingt dabei nicht nur eine Personengefährdung, sondern auch einen enormen ökonomischen Schaden. Zum einen werden in Hochregalen große Warenwerte konzentriert gelagert, zum anderen können durch den Brand auch die logistischen bzw. technischen Einrichtungen zerstört werden. Dies wirkt sich auf die Lieferfähigkeit des Unternehmens aus und kann im schlimmsten Fall zu einem Verlust von Kunden und Geschäftspartnern führen. [VdS-2199; Nee-2010]

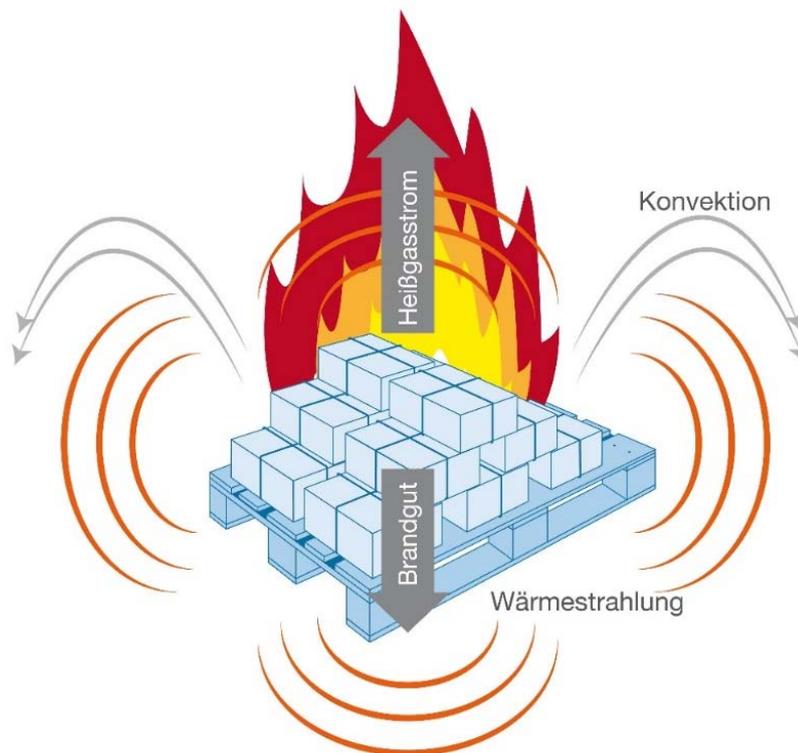
#### **3.7.2 Brandausbreitung im ungeschützten Lager**

Lagergüter in Hochregallagern sind meist zu Verpackungszwecken oder zur Ladungssicherung von Kartonagen oder Kunststoffen umhüllt. Da diese Stoffe leicht entflammbar sind und zudem auch viele Lagergüter sowie die Ladehilfsmittel selbst brennbar sind, liegt im Brandfall eine außergewöhnlich hohe Brandlast vor. Als Brandlast wird die Wärmeenergie bezeichnet, welche bei vollständiger Verbrennung aller brennbaren Stoffe in einem Bereich freigesetzt wird [DIN-13943].

Die Brandgefahr wird bei Hochregalen durch die kompakte Lagerung der Ladeeinheiten in einem möglichst kleinen Volumen noch weiter verschärft. Die offene und schlanke Regalkonstruktion erlaubt einerseits eine allseitige Luftzufuhr zu den Ladeeinheiten und bedingt andererseits aufgrund ihrer großen vertikalen Hohlräume eine gerichtete Brandausbreitung nach oben. Letzteres wird auch als „Kamineffekt“ bezeichnet. Die Flammen und heißen Brandgase werden dabei wie in einem Kamin nach oben gezogen und entzünden die darüberliegenden Ladeeinheiten. Es kommt jedoch auch zu einer seitlichen und nach unten gerichteten Brandausbreitung, da zum einen die Wärmestrahlung sowie die konvektive Wärmeübertragung rund um den Brandherd wirkt und zum anderen Brandgut während des Abbrands nach unten fällt

(siehe Abbildung 30). Zusätzlich kann Flugfeuer zu einer Entzündung führen, sofern die Kontaktbereiche bereits durch die Wärmestrahlung bzw. Konvektion ausreichend vorgewärmt wurden. Insgesamt findet die Hauptausbreitung nach oben zur Decke hin statt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist dabei vertikal vielfach höher als in horizontaler Richtung. [Kun-1995, S. 26, 29, 46] [Sic-2001] [Sch-1997, S. 17ff.]

Ohne ausreichende Brandschutzeinrichtungen steht ein Hochregal somit innerhalb kürzester Zeit nahezu vollständig in Brand. In weiterer Folge besteht die Gefahr einer Ausbreitung des Brandes auf benachbarte Gebäude sowie eines Umsturzes des Hochregals bei Versagen des Tragwerks [VDI-3564]. Dies kann durch die große Bauhöhe von Hochregalen weitreichenden Schaden verursachen.



**Abbildung 30: Brandausbreitung im Hochregallager**

#### **3.7.3 Brandschutz von Hochregalen**

Anhand der beschriebenen Risiken für Personen, Sachgüter sowie die allgemeine Geschäftstätigkeit ist ersichtlich, dass ein wirksamer Brandschutz für Hochregallager unabdingbar ist.

Das Thema Brandschutz gliedert sich in zwei Unterkategorien: den vorbeugenden und den abwehrenden Brandschutz. Letzterer ist Aufgabe der Feuerwehr, die im Brandfall alle möglichen Maßnahmen zur Gefahrenabwehr treffen muss. Der vorbeugende Brandschutz wird bereits vor einem Brand ausgeführt und soll die Entstehung und Ausbreitung eines solchen verhindern bzw. eingrenzen. Dazu gibt es bauliche, technische sowie organisatorische Maßnahmen. In den Bereich des baulichen Brandschutzes fallen dabei alle Belange, welche die bauliche Ausführung des Gebäudes betreffen (z. B. der Standort, die Zugänglichkeit, die Baukonstruktion inklusive Wände und Dächer sowie die Brandabschnitte). Der technische Brand-

schutz behandelt Brandschutzeinrichtungen wie Lösch- oder Brandmeldeanlagen. Diese sollen den baulichen Brandschutz unterstützen bzw. Mängel kompensieren. Zu guter Letzt stellt der organisatorische Brandschutz die Wirksamkeit des vorbeugenden und abwehrenden Brandschutzes sicher. Dazu müssen eine Brandschutzordnung und ein Feuerwehrplan erstellt werden und das Personal sowie die Feuerwehr entsprechend unterwiesen werden. [VDI-3564]

Da sowohl freistehende als auch Silo-Hochregale in der Regel brandschutztechnisch nicht bemessen werden, entfällt der bauliche Brandschutz bei der Regalkonstruktion. Stattdessen wird, wie in der Muster-Industriebaurichtlinie gefordert, ein technischer Brandschutz in der Form einer selbsttätigen Feuerlöschanlage ausgeführt. Diese soll eine etwaige Brandausbreitung verhindern bzw. den Brand bereits in der Entstehungsphase löschen. In der Praxis wird dazu am häufigsten eine vollständige Sprinklerung des Regals eingesetzt. Aber auch andere Systeme wie Sauerstoffreduzierungsanlagen oder Schaumlöschanlagen sind je nach Lagergut möglich. Die Auslegung der Sprinkleranlage erfolgt nach VdS CEA 4001 [CEA-4001]. [VDI-3564]

In der aktuellen Fassung (April 2014) der CEA 4001 werden Regallager über 7,5m (HHS1 bis HHS 3) bzw. 4,4m (HHS4) Höhe mit hoher Brandgefahr HHS (High Hazard Storage) eingestuft. Die Brandgefahr ist nach den Informationen der Richtlinie von der Brennbarkeit der Lagergüter, deren Verpackung, der Lagerart sowie der Lagerhöhe abhängig. Die Brandgefahrklasse HHS kann dabei in vier Kategorien HHS1 bis HHS4 eingeteilt werden. Die Beurteilung der Gefahr hat bei Ladeeinheiten, die Kunststoffe oder Gummi beinhalten, nach Anhang B und ansonsten nach Anhang C zu erfolgen. Eine reine Deckensprinklerung ohne Sprinkler in den Zwischenebenen des Regals ist bei Hochregalen (>9m) nicht möglich. Die Anzahl an Zwischenebenen wird durch die HHS-Kategorie bestimmt.

Die Richtlinie enthält einige Vorgaben, welche bei der Konstruktion von Hochregalen berücksichtigt werden sollten:

- Zwischen den Sprühtellern der Deckensprinkler und der Oberkante der höchstgelegenen Lagergüter muss ein Freiraum von mindestens einem Meter eingehalten werden.
- Stehen mehrere Regalzeilen hintereinander (Z-Richtung) so muss zwischen den Ladeeinheiten ein Abstand von mindestens 100mm bestehen.
- Die Sprinklerköpfe sollten vorzugsweise so montiert werden, dass diese an den Schnittpunkten zwischen den Längs- und Querschächten, welche durch die Lagergüter gebildet werden, hängen.
- Bei Sprinklerung in den Zwischenebenen des Regals muss ein Mindestabstand von 150mm zwischen dem Sprühteller und der Oberkante des Lagerguts vorherrschen. Der Sprühteller muss so platziert werden, dass dessen Unterkante gleich hoch oder unter benachbarten Hindernissen befestigt ist.
- Die Halterung der Sprinklerleitung muss aus einem nicht brennbaren Material bestehen.

### **3.7.4 Brandschutztechnische Besonderheiten von Hochregallagern aus Holz**

Wie bereits in Kapitel 3.4.5 beschrieben, gab es bezüglich des Brandschutzes bei Hochregalen im Jahr 2014 eine Änderung. Die Muster-Industriebaurichtlinie schließt in ihrer neuen Fassung (Juli 2014) Hochregale nicht mehr aus [Fac-2014a]. Die darin geforderte Feuerwiderstandsdauer F30 für brennbare tragende Bauteile ist jedoch nicht zwingend für Hochregale gültig, vor allem da ohnehin immer ein anlagentechnischer Brandschutz ausgeführt wird. Eine endgültige Entscheidung muss mit der zuständigen Bauaufsichtsbehörde und dem Prüfsachverständigen getroffen werden. Bei automatischen Hochregalen kann je nach Einschätzung ebenfalls die VDI 3564 herangezogen werden, welche keine Anforderungen an den Regalwerkstoff stellt [VDI-3564]. Abschließend kann somit mit hoher Wahrscheinlichkeit erwartet werden, dass Holz-Hochregale auch in Zukunft brandschutztechnisch nicht bemessen werden müssen.

Obwohl Holz ein brennbarer Baustoff ist, zeichnet es sich im Brandfall durch eine gute Kalkulierbarkeit aus. Im Hinblick auf die brandschutztechnische Auslegung von Hochregallagern aus Holz werden somit unter Verwendung der aus der Kaltbemessung erforderlichen Querschnitte gewisse Feuerwiderstandsdauern des Tragwerks erreicht. Bei den gebauten Beispielen mit den massiven Konstruktionen liegen diese in der Größenordnung von 30 Minuten (R30) für Steher und Palettenträger. Für zukünftige optimierte Konstruktionen wird dies unter Umständen nicht mehr erreicht. Bei der gleichzeitigen Verwendung eines anlagentechnischen Brandschutzes (z. B. Sprinklerung) sollte jedoch keine Widerstandsdauer ähnlich der Stahlbauern erforderlich sein. Die gebauten Beispiele zeigen jedoch, dass diese Vorgabe gegebenenfalls unter Verwendung von Holz erreicht werden kann.

## 4 Marktanalyse

### 4.1 Vorgehen und Ziel der Marktanalyse

Eine umfassende Analyse von bisher gebauten Hochregalen aus Stahl und Holz ist die Voraussetzung für die Erstellung neuer praxisrelevanter Konstruktionskonzepte. Durch die Recherche können Entwicklungen analysiert und Tendenzen sowie Veränderungen des Marktes erörtert werden. Mit Hilfe dieser Erkenntnis wird auf den bestehenden Entwicklungsstand aufgebaut und auf bereits bekannte Schwachstellen reagiert. Dazu werden zunächst Statistiken von gebauten Hochregallagern der letzten Jahre erstellt und ausgewertet. Hierüber soll zunächst ersichtlich werden, welche Typen von Lager wann wo in Betrieb gegangen sind. Im Weiteren ist das Ziel festzustellen, welche Lagergrößen, Ladeeinheitsgrößen und -gewichte realisiert wurden und welche Produkte darin untergebracht werden. Anschließend wird der aktuelle Stand der Technik bei der Konstruktion von Stahl- und Holz-Hochregalen ermittelt und diskutiert. Die Marktanalyse wird durch Betreiber- sowie Herstellerbefragungen von Hochregalen aus Holz abgeschlossen. Dadurch sollen Probleme, aber auch Vorteile, während der Planung sowie des Betriebs aufgezeigt werden.

### 4.2 Auswertung von Lagerstatistiken

*Peter Glaser, Christopher Ludwig*

#### 4.2.1 Allgemeines

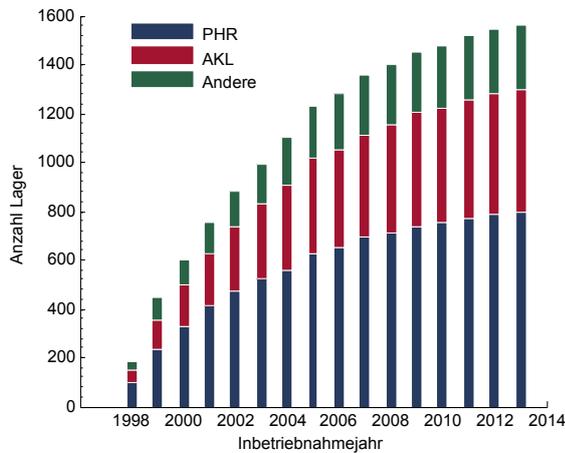
Die Zeitschrift „Materialfluss Markt“ veröffentlicht im Zweijahresrhythmus Anwenderstatistiken zu weltweit gebauten Hochregalen [Sch-2014a]. Die Lager müssen dazu im entsprechenden Baujahr vom Bauherrn oder einem am Bau beteiligten Unternehmen an die Zeitschrift gemeldet werden. Die daraus erstellte Liste hat damit keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Für den deutschsprachigen Raum ist diese jedoch, aufgrund der großen Anzahl an gemeldeten Regalen bzw. beteiligten Herstellern, als repräsentativ anzusehen.

Für die statistische Auswertung werden die Daten der Bundesrepublik Deutschland über einen Zeitraum von 16 Jahren von 1998 bis 2013 statistisch ausgewertet. Da diese teils unvollständig sind, werden sie anhand der zur Verfügung stehenden Informationen soweit wie möglich vervollständigt. Eine Nachprüfung der Daten wird nicht durchgeführt. Inbetriebnahmen mit fehlenden Angaben werden als Restliche angegeben, wodurch eine klare Darstellung möglich wird. Resultierend wurde ein Satz mit fast 1600 Lagerdaten ausgewertet. Aus dieser Gesamtheit konnten im Folgenden circa 800 Datensätze von Palettenhochregalen zur Auswertung extrahiert werden. Die durchgeführten statistischen Auswertungen sind in den nachfolgenden Unterkapiteln zu finden.

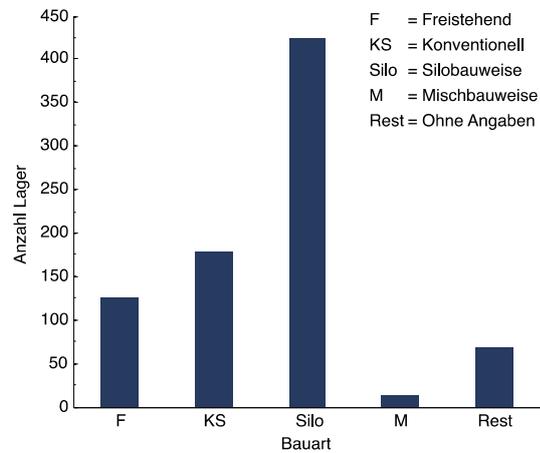
#### 4.2.2 Inbetriebnahmen

Ausgangspunkt der Auswertung bildet die Analyse hinsichtlich der Inbetriebnahmen von Hochregallagern im betrachteten Zeitraum. In Abbildung 31 ist der kumulierte Verlauf der Hochregallagerdaten bezogen auf das Jahr der Inbetriebnahme dargestellt. Die blauen Säulen repräsentieren den Anteil an Hochregallager für Paletten (PHR), die roten den der automatischen Kleinteilelager (AKL) und die grünen den der weiteren, nicht in diese beiden Kategorien zuordenbaren, Hochregallagern (Andere). Hierunter fallen Fachbodenregallager, Fließ- und

Kanallager, Langgut- und Coillager, Regallager ohne Regalbediengeräte, alle Lager mit Sonder-Lagereinheiten sowie Lager ohne Angabe des Lagertyps.



**Abbildung 31: Kumulierte Inbetriebnahmen von Hochregallagern [Bin-2014]**



**Abbildung 32: Aufschlüsselung der Anzahl der gebauten unterschiedlichen Hochregallager für Paletten [Bin-2014]**

Anhand der ausgewerteten Lagerdaten ist im betrachteten Zeitraum ein deutlicher Abwärtstrend der Inbetriebnahmen zu erkennen (Abbildung 31). Hierfür mag es verschiedene Erklärungen geben. Ein Grund könnte in der bereits eingangs erwähnten Datenbasis aus der Zeitschrift „Materialfluss Markt“ liegen. Eine Vollständigkeit der gebauten Hochregallager wird durch die Art der Datengewinnung der Zeitschrift nicht gegeben sein. Aufgrund der kontinuierlichen, in dieser Größenordnung ersichtlichen Abnahme der Inbetriebnahmen im Betrachtungszeitraum ist der Hintergrund jedoch nicht in einem Mangel an Daten, sondern in einem tatsächlichen Rückgang an Neubauten zu suchen. Des Weiteren blieb die Grundlage der Datenerhebung der Zeitschrift unverändert, weshalb davon auszugehen ist, dass die Daten den Trend der tatsächlichen Entwicklung als Näherung widerspiegeln.

Die Gesamtanzahl der betrachteten Hochregallager dieses Zeitraums umfasst 807 Hochregallager, 507 automatische Kleinteilelager und 249 weitere Hochregallager (Abbildung 31). Erstere bilden hierbei mit über 50% das Hauptanwendungsgebiet. Im Folgenden werden für Hochregallager zur Einlagerung von Paletten die Lagerstandorte in der Bundesrepublik Deutschland (BRD) ausgewertet (Abbildung 33).

Der Standort eines Lagers ist entscheidend für die Effizienz und die begleitenden Logistikkosten der Lageroperationen. Lagerstandorte werden also entsprechend der Lagerfunktion gewählt. Viele Aspekte fließen in die Wahl des Standortes mit ein, wie z. B. Nähe zu Lieferanten, Transportkosten, vorhandene Transportinfrastruktur, Grundstückskosten, Baubestimmungen, Steuer- und Umweltbestimmungen und weitere. Für die unterschiedlichen Lagerfunktionen des Vorratslagers bzw. des Auslieferungslagers kann allgemein gesagt werden, dass erstere vorzugsweise an einem produktorientierten, letztere an einem absatzorientierten Standort angesiedelt werden [Kla-2012, S. 307f.]

Ziel ist die Darstellung der geographischen Lagersituation der in den letzten Jahren gebauten Hochregallager für Paletten. Für die Konzeption sowie die spätere Planung der Hochregallager ist diese Kenntnis interessant um gegebenenfalls frühzeitig besondere geographische und lokale Umstände berücksichtigen zu können.

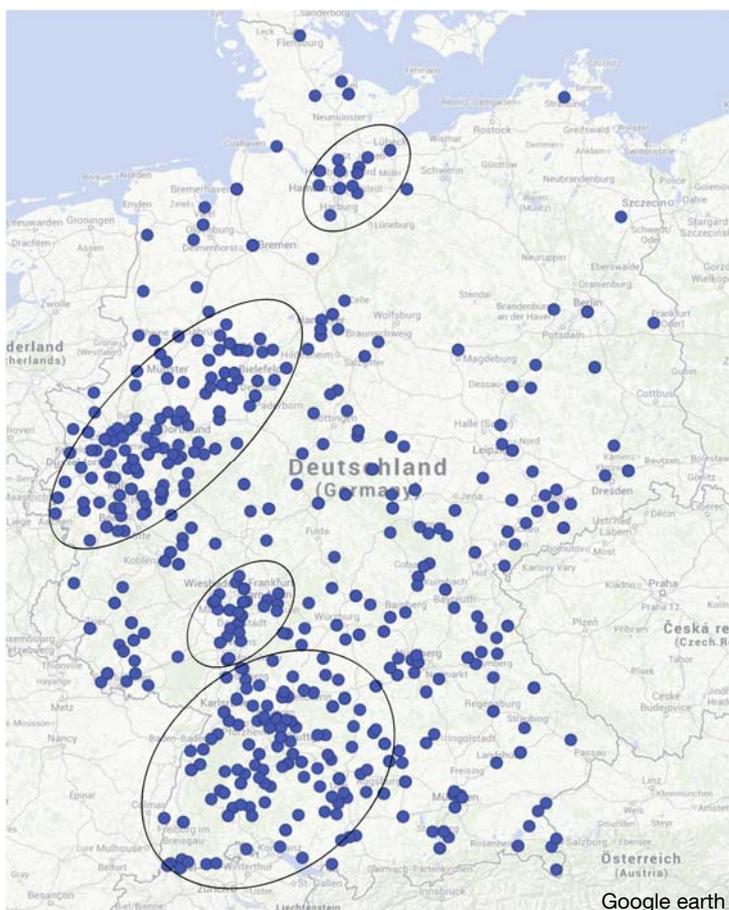


Abbildung 33: Standorte der Hochregallagern für Paletten des Betrachtungszeitraums in Deutschland [Bin-2014]

Tabelle 3: Aufteilung der Hochregallager für Paletten in Abhängigkeit des Standortes

Region	Anzahl Lager [Stk.]	Anteil [%]
<b>Gesamtzahl</b>	807	100,0
<b>Großraum Hamburg</b>	13	1,6
<b>NRW</b>	164	20,3
<b>Großraum Frankfurt</b>	15	1,9
<b>Baden-Württemberg</b>	147	18,2
<b>Bayern</b>	108	13,4
<b>Rest</b>	467	58,1

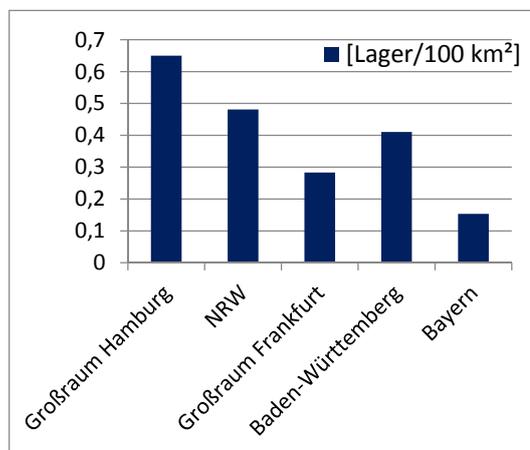


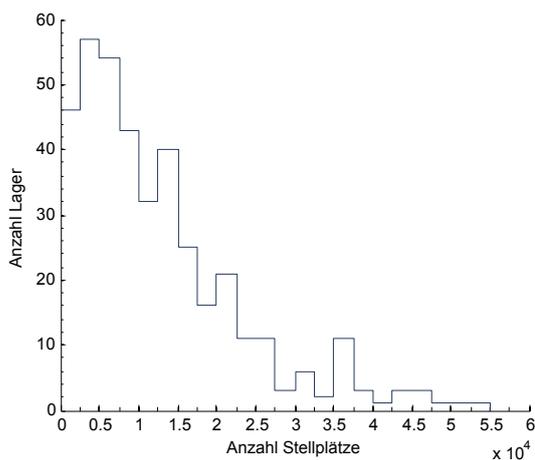
Abbildung 34: Lagerdichte der dominierenden Lagerstandorte

Die Analyse zeigt, dass Hochregallager für Paletten vorzugsweise in vier Regionen gebaut werden: in Baden-Württemberg, Nordrhein-Westfalen, Hamburg und in der Region um Frankfurt. Tabelle 3 stellt die Anzahl der Hochregallager für die Hauptstandorte und deren Anteil in Bezug auf die Gesamtzahl der Inbetriebnahmen von HRL für Paletten im Betrachtungszeitraum in der Bundesrepublik dar. Abbildung 34 zeigt die Ballungsdichte der Standorte. Es wird eine Verbindung zu der Entwicklung der Inbetriebnahmen im Bereich der Waren- und Güterproduktion ersichtlich. Die Betrachtung des Güterumschlages sowie des BIP der einzelnen Bundesländer zeigt, dass Nordrhein-Westfalen den größten Güterumschlag und das höchste BIP aufweist. Baden Württemberg ist ebenfalls auf den vorderen Plätzen beim BIP sowie beim Güterumschlag zu finden [Sta-2014][Sta-2015]. Bezogen auf die Fläche sind seit 1998 in Hamburg am meisten Neubauten entstanden. Hier gingen in den vergangenen 16 Jahren 17 Lager in Betrieb. Maßgeblich für die Attraktivität des Standortes dürfte die mit Deutschlands größtem Schifffahrtshafen hervorragende logistische Anbindung für Waren mit Zielen auch jenseits des Binnenmarktes sein. Die sehr gute logistische Situation wird ebenfalls ein entscheidender Faktor für Frankfurt als viertes Ballungszentrum sein. Dieser Standort vereint eine zentrale Lage für Warentransporte innerhalb Europas mit der Nähe zu Deutschlands größtem Flughafen. Der Standort ist dementsprechend für schnelle internationale Gütertransporte privilegiert.

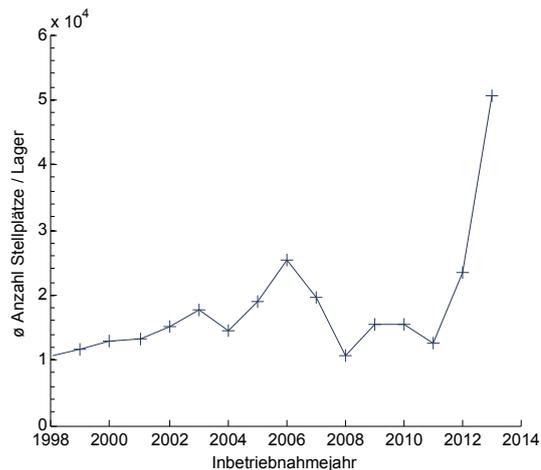
In Abbildung 32 sind die vorwiegend gebauten Hochregallager für Paletten nach Bauweisen aufgeschlüsselt. Mit über 424 PHR stellt die Silobauweise die verbreitetste Form dar. Unter Vernachlässigung von Sonderkonstruktionen und Bauten mit fehlenden Angaben („Rest“) entspricht dies einem Anteil von 57 Prozent. Der Grund für die Dominanz der Silobauweise sind die häufig vorkommenden großen Abmessungen von Hochregallagern meist großen Abmessungen. Freistehende Lager werden in der Regel nur bis zu einer Höhe von 20m gebaut. Höhere freistehende Lager sind technisch schwer zu realisieren und bedingen dadurch höhere Kosten. Hochregallager ab 20m Höhe werden fast ausschließlich in Silobauweise realisiert. Neben der Silobauweise kommen freistehende und konventionelle Systeme öfter zur Ausführung. Unter konventionellen Lagern versteht die Zeitschrift Palettenhochregallager in Stahlbauweise. Hierunter fallen sowohl freistehende Bauten wie auch Silokonstruktionen. Die Daten (mit der Angabe einer konventionellen Bauweise) stammen direkt von den Herstellerfirmen, weshalb eine genauere Spezifikation in Silo und freistehendes Lager nicht erfolgt. Eine Sonderform, mit durchschnittlich einem Lager pro Jahr, stellt die Mischbauweise dar. Die Mischbauweise ist eine Kombination verschiedener Lagertypen, wie z. B. von HRL und AKL.

### **4.2.3 Gesamtabmessungen für Palettenhochregallager**

Die weiteren Auswertungen beschränken sich auf die dominierende Gruppe der Hochregallager für Paletten in Silobauweise. Bezüglich einer möglichst allgemeinen Herangehensweise ist zu klären, wie zukünftige Hochregallager den Anforderungen des Marktes folgend auszu-sehen haben. Hierzu werden die Lagerdaten bezüglich Stellplätzen und Lagerabmessungen analysiert.



**Abbildung 35: Zusammenhang der Anzahl der Stellplätze und der gebauten Anzahl an Hochregallagern in Silobauweise [Bin-2014]**



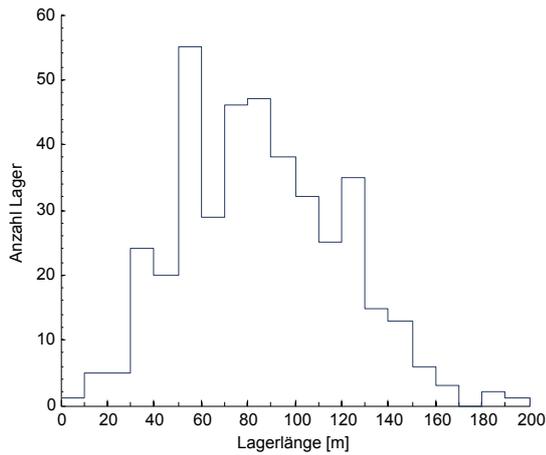
**Abbildung 36: Entwicklung der durchschnittlichen Stellplatzanzahl der Hochregallager in Silobauweise [Bin-2014]**

Abbildung 35 zeigt den Bezug zwischen der Anzahl an Stellplätzen und der Anzahl der gebauten Lager unabhängig vom Zeitpunkt der Errichtung. Es ist zu erkennen, dass im Betrachtungszeitraum vorzugsweise kleinere Lager mit einer Stellplatzanzahl bis ca. 15.000 Stück gebaut worden sind. Im Bereich bis knapp 30.000 findet sich ebenfalls eine erhebliche Anzahl realisierter Lager. Ab einer Größe von 30.000 Stellplätzen ist die Summe gebauter Lager gering und fällt lediglich durch einige Hochpunkte, wie bei etwa 35.000, auf.

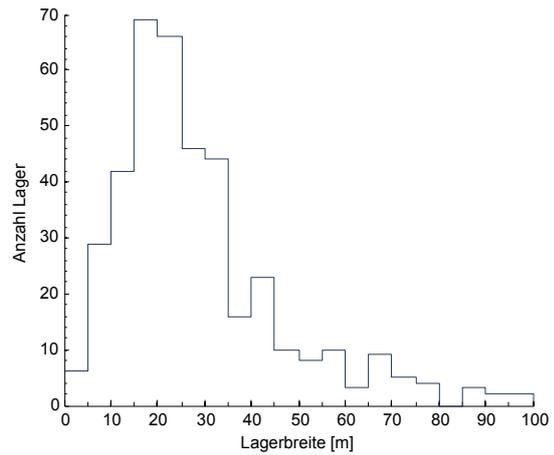
Um die Entwicklung seit 1998 beurteilen zu können werden die durchschnittlichen Lagergrößen je Jahr in Abbildung 36 zusammengetragen. Es ist ein deutlicher Anstieg der durchschnittlichen Lagergrößen ab 2011 zu erkennen. Dieser Anstieg darf nicht als repräsentativ angesehen werden, da in den Jahren 2012 und 2013 nur sehr wenige Lagerdaten vorhanden sind und die geringe Anzahl an großen Hochregallager das Ergebnis hin zu sehr großen Lagerdimensionen verschieben. Der Graph zeigt jedoch über den gesamten Zeitraum einen leichten Trend hin zu größeren Silobauwerken auf. Im Betrachtungszeitraum hat sich die durchschnittliche Stellplatzanzahl je Lager von 10.000 auf 20.000 Stellplätze verdoppelt. Die Realisierung größerer Lager dürfte eine Reaktion auf die Forderung der Wirtschaft nach einem größeren und schnelleren Warenumsatz sein.

Abbildung 37 und Abbildung 38 zeigen eine Zusammenstellung der Längen und Breiten von Hochregallagern, die im Betrachtungszeitraum gebaut worden sind. Die Hauptanzahl der Lager weist eine Länge von 30m bis 150m auf. Die Lagerbreiten liegen zum Großteil im Bereich zwischen 5m und 45m. Lager mit Breiten bis 100m werden zwar auch gebaut, stellen jedoch einen untergeordneten Anteil dar.

Eine Auswertung der realisierten Höhen von Hochregallagern in Silobauweise findet sich in Abbildung 39. Die meisten Lager fallen in das Höhenintervall zwischen 20m und 38m. Die Erhebung dieser Daten war besonders interessant, da die Planung und Ausführung von Lagern mit großen Höhen eine besondere Herausforderung darstellt. Aus diesem Grunde werden im Weiteren die Daten in Abhängigkeit des Jahres der Inbetriebnahme untersucht.

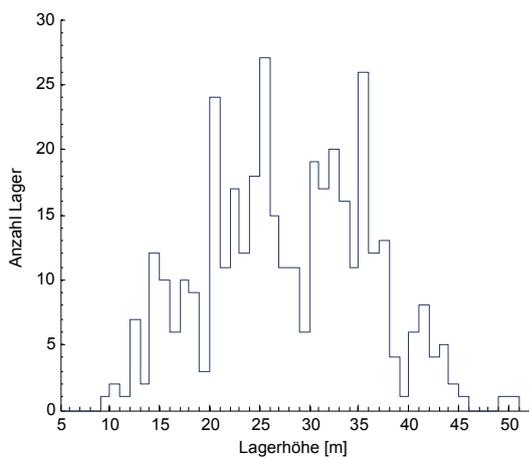


**Abbildung 37: Zusammenstellung der Anzahl der gebauten HRL in Bezug zur Lagerlängen [Bin-2014]**

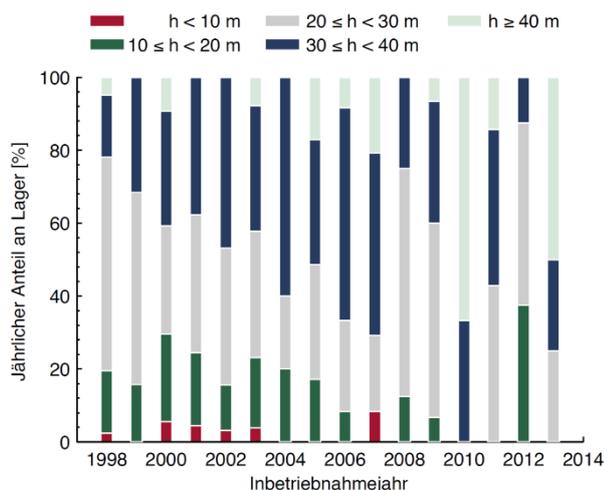


**Abbildung 38: Zusammenstellung der Anzahl der gebauten HRL in Bezug zur Lagerbreiten [Bin-2014]**

Abbildung 40 zeigt die Entwicklung der Höhen über den Zeitraum der statistischen Analyse. Die HRL werden hierzu in fünf Bereiche von je 10m Schritten eingeteilt. Palettenhochregallager in Silobauweise bis zu einer Höhe von 10m werden kaum gebaut. Ebenso fällt auf, dass in dem Höhenintervall von  $10\text{m} \leq h < 20\text{m}$  gleichermaßen eine relativ geringe Anzahl an HRL in Betrieb gegangen sind. Bei genauerer Betrachtung dieses Höhenbereiches fällt außerdem auf, dass der Anteil dieser Lager abnimmt. Von 1998 bis 2013 hat sich deren Menge im Verhältnis zur Gesamtzahl der jeweiligen jährlichen Inbetriebnahmen einem Abwärtstrend folgend im Durchschnitt in etwa halbiert. Den Hauptbereich bilden die grauen und blauen Säulen der Lager im Höhenbereich  $20\text{m} \leq h < 40\text{m}$ , die über den Betrachtungszeitraum mit im Durchschnitt über 75% einen konstant hohen Anteil der neu in Betrieb genommenen HRL in Silobauweise darstellen. Im Betrachtungszeitraum nimmt außerdem der Anteil von Hochregallagern mit einer Höhe von  $h \geq 40\text{m}$  zu. Anhand dieser Studie kann gezeigt werden, dass der Trend bei Silo-Neubauten hin zu höheren Strukturen geht.



**Abbildung 39: Zusammenstellung der Anzahl der gebauten HRL in Bezug der Lagerhöhe [Bin-2014]**



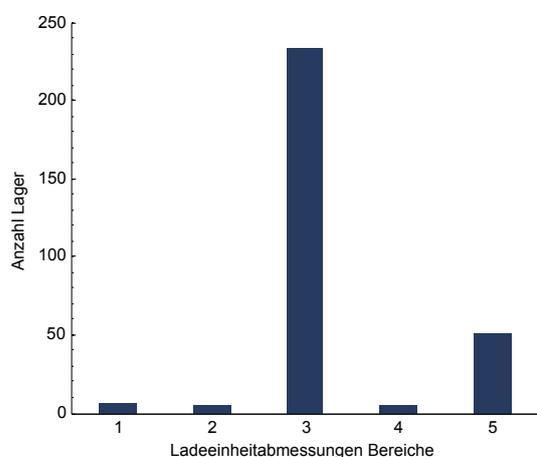
**Abbildung 40: Entwicklung der Lagerhöhen im Betrachtungszeitraum**

Die Erhebung dieser Daten hat Einfluss auf die in Kapitel 6 nachfolgende Konzeption der Lagerstrukturen. Längen, Breiten und Höhen beeinflussen die Systemsteifigkeiten und die Einwirkungen erheblich. Aufgrund der strengen Vorgaben bezüglich Verformungen von Hochregallagern ist diese Information für eine zukunftsfähige Systementwicklung entscheidend.

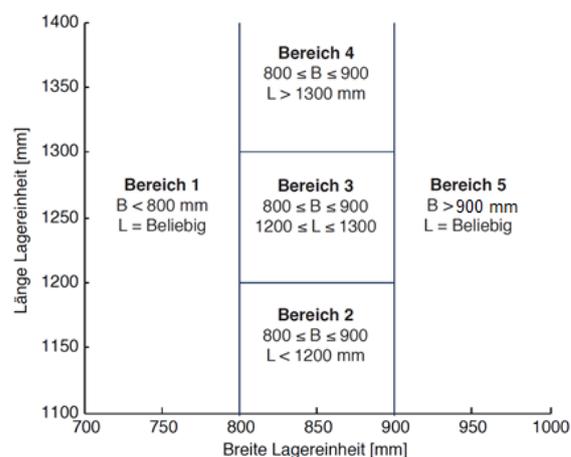
#### 4.2.4 Charakteristika der Ladeeinheiten für die konstruktive Planung

Im Weiteren werden in Ergänzung zur Betrachtung der globalen Lagerabmessungen statistische Untersuchungen zu den Ladeeinheiten angestellt. Betrachtet werden ebenfalls Hochregallager in Silobauweise. Ziel der Auswertung ist die Generierung einer Datenbasis für die Entwicklung geeigneter Module zu nachfolgend anstehender Konstruktionsentwicklung.

In Abbildung 41 sind die Anzahl der Lager in Abhängigkeit der Abmessungen der Ladeeinheiten dargestellt. Hierzu wurden die Ladeeinheiten im Vorfeld in fünf Bereiche eingeteilt (Abbildung 42). Mit einem Anteil von über  $\frac{3}{4}$  sind die meisten Lager bezüglich der einzulagernden Ladeeinheiten dem Bereich 3 zugehörig. Der Grund hierfür liegt in der sehr weit verbreiteten Verwendung der nach [DIN-13698-1] genormten Europoolpalette (Flachpalette aus Holz) mit den Abmessungen  $b/h = 800\text{mm}/1200\text{mm}$  in der Logistik. Einen Anteil von etwa 20% nimmt Bereich 5 ein. Die maßgebende Anzahl dieses Bereichs wird durch eine ebenfalls häufig verwendete Flachpalette aus Holz (Industriepalette) mit den Abmessungen von  $b/h = 1000\text{mm}/1200\text{mm}$  nach [DIN-13698-2] bestimmt. Die Bereiche 1, 2 und 3 stellen Sondermaße dar und werden daher nicht weiter betrachtet.



**Abbildung 41: Zusammenstellung der Maße der Ladeeinheiten der HRL in Silobauweise in fünf Bereichen nach Abbildung 42 [Bin-2014]**

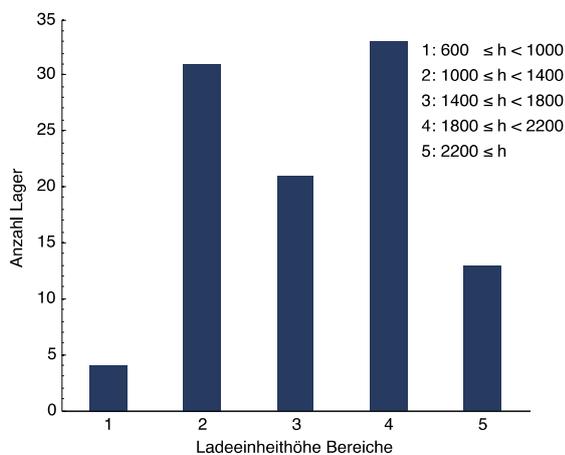


**Abbildung 42: Einteilung der Ladeeinheiten in fünf Bereiche [Bin-2014]**

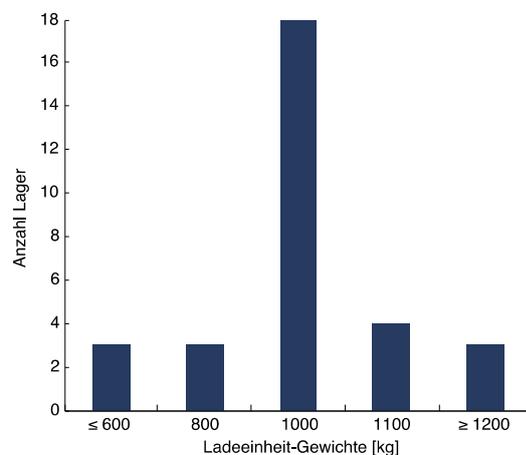
Eine größere Varianz ist bezüglich der Höhe der Ladeeinheiten festzustellen, wie Abbildung 43 zeigt. Die Auswertung erfolgte anhand einer gewählten bereichsweisen Unterteilung der Höhen in einem Intervall  $\Delta h = 400\text{mm}$ . Ladeeinheiten mit Höhen  $h < 1000\text{mm}$  kommen selten zum Einsatz. Die meisten Ladeeinheiten weisen eine Höhe  $1000\text{mm} \leq h < 2200\text{mm}$  auf. Aber auch Ladeeinheiten mit Höhen  $h \geq 2200\text{mm}$  sind keine Seltenheit. Je nach Lagerbetreiber sind unterschiedliche Höhen in der Regalstruktur für die Ladeeinheiten erforderlich (siehe hierzu auch Kapitel 6.4.2). Diese können bereits innerhalb eines Lagers variieren, wodurch Stellplätze für Paletten mit verschiedenen Höhen vorgesehen werden. Maßgeblich für die

Wahl der Ladeeinheitshöhen sind die Produkte, die eingelagert werden sollen. Gewählt werden daher Ladeeinheitshöhen, die zum einen funktional und im Hinblick auf logistische Prozesse sinnvoll sind, aber zum anderen auch die Anforderungen der Ladehilfsmittel selbst erfüllen.

Eine Kernanforderung der Paletten ist die zulässige maximale Beladungslast. Abbildung 44 stellt die Daten zusammen, zu welchen Angaben zu den Lasten der Ladeeinheiten in der Datenbasis der Zeitschrift Materialfluss vorhanden waren. Trotz der geringen Datenmenge fällt auf, dass die meisten Lager (über 60%) auf maximale Ladeeinheitslasten von  $1000\text{kg}$  ausgelegt worden sind. Die Dominanz resultiert aus der für den Anwendungsfall zulässigen Nennlast von  $1000\text{kg}$ , die beliebig auf der Palettenfläche verteilt werden darf. Dies bedeutet, dass eine globale Gewichtskontrolle der Palette ausreichend ist und keine gleichmäßige Verteilung bei der Beladung beachtet werden muss. Daher werden die meisten Lager auf diese Masse bemessen um, auch bei gegebenenfalls geringeren Massen der Ladeeinheiten, für den zukünftigen Lagerbetrieb eine gewisse Flexibilität gewährleisten zu können. In der Auswertung sind auch Hochregallager zu finden, die für größere oder kleinere Massen ausgelegt worden sind. Der jeweilige Anteil ist im Vergleich zu den Ladeeinheiten mit einer Masse von  $1000\text{kg}$  jedoch gering. Ladeeinheiten mit einer Masse von  $1000\text{kg}$  stellen auch aufgrund der Intralogistik sowie des Transports die hauptsächlich anzutreffenden Lasten dar, da die anschließende Logistik in der Praxis meist für Massen von  $1000\text{kg}$  ausgelegt ist.



**Abbildung 43: Zusammenstellung von Höhenbereichen der Ladeeinheiten [Bin-2014]**



**Abbildung 44: Zusammenstellung der maximal für die Regalstruktur zulässigen Massen der Ladeeinheiten [Bin-2014]**

#### 4.2.5 Zusammenfassung der geometrisch und konstruktionsrelevanten Lagerdaten

Die Auswertungen in diesem Kapitel bezüglich Inbetriebnahmen, zu Gesamtabmessungen von Hochregallagerbauten in Silobauweise, die detaillierte Betrachtung der Ladeeinheiten bezüglich Abmessungen und Lasten wie auch die Darstellung der Entwicklungen im Betrachtungszeitraum liefern wichtige Informationen bezüglich der Konzeption von Hochregallagern in Holzbauweise.

Im Rahmen der Marktanalyse wird festgestellt, dass die Gruppe der Hochregallager in Silobauweise die am häufigsten ausgeführten Bauwerke zur Lagerung von Waren darstellt. Die Anzahl der Neubauten hat im Betrachtungszeitraum (1998 bis 2013) allerdings kontinuierlich

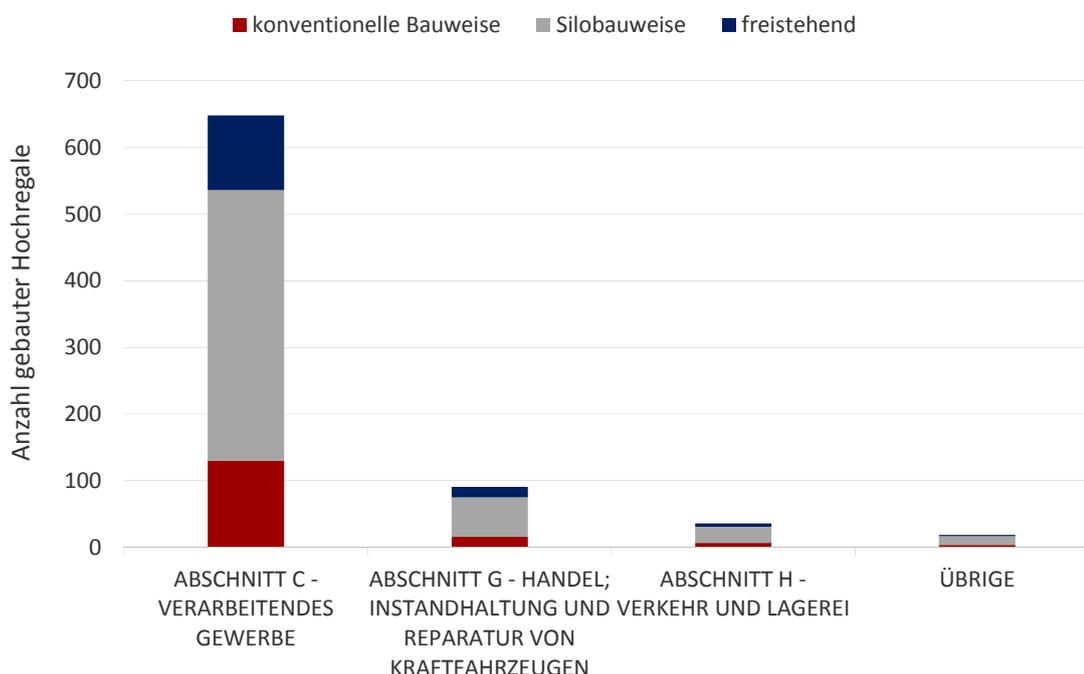
abgenommen. Dem entgegen ist eine Vergrößerung der Lagerkapazität der Neubauten zu beobachten. Die durchschnittliche Stellplatzanzahl hat sich in den 16 Jahren der Betrachtung auf 20.000 Stück verdoppelt. Folglich geht der Trend der Gesamtabmessungen von Hochregallager hin zu größeren und höheren Bauwerken. Die meisten Hochregallager weisen Höhe von  $20\text{m} \leq h < 40\text{m}$  auf. Ladehilfsmittel Nummer eins stellt die Europoolpalette dar. Die meisten Hochregallager werden für Ladeeinheitsmassen von 1000kg bemessen.

Dieses Kapitel stellt mit seinen Ergebnissen eine wichtige Grundlage für die spätere konstruktive Entwicklung von Hochregallagern dar. Die Analyse und Bewertung der Inbetriebnahmen lässt zukünftige Entwicklung des Marktes erahnen.

#### 4.2.6 Branchen und Lagergüter

Im letzten Schritt wird nun ermittelt in welchen Branchen Hochregallager eingesetzt werden und welche Güter dort gelagert sind. Dazu werden zunächst die einzelnen Hochregallager (gesamter Zeitraum 1998-2013) bzw. deren Betreiber nach der „Klassifikation der Wirtschaftszweige“ des Statistischen Bundesamts in Abschnitte A bis U eingeteilt [Sta-2008].

Abbildung 45 zeigt die Ergebnisse der Auswertung. Es ist ersichtlich, dass Hochregale vor allem im verarbeitenden Gewerbe, im Handel und im Transportwesen Anwendung finden. Die bereits in Kapitel 4.2.2 gezeigte Verteilung der Bauweisen zeigt sich unverändert auch hier in den einzelnen Branchen.

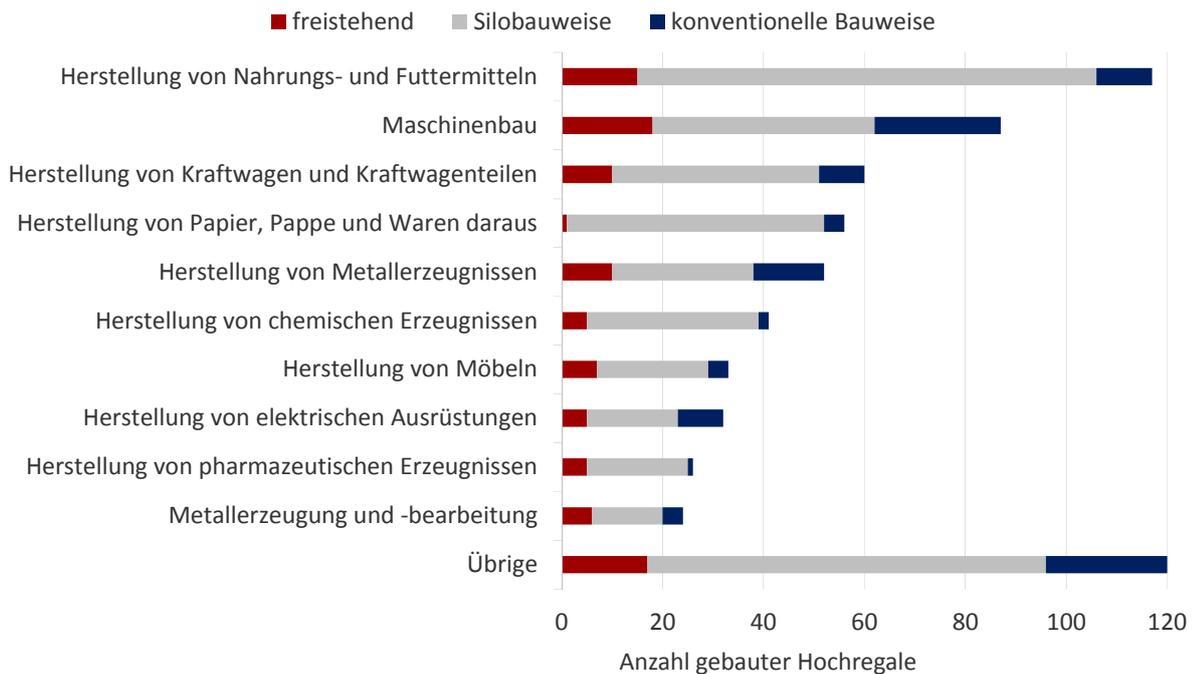


**Abbildung 45: Anzahl gebauter Hochregale in Deutschland sortiert nach Branchen**

Zur Untersuchung welche Güter am häufigsten gelagert werden, werden die Hochregale des verarbeitenden Gewerbes genauer betrachtet. Diese werden abermals nach der Einteilung des Statistischen Bundesamts klassifiziert [Sta-2008]. Wie in Abbildung 46 ersichtlich, haben die Herstellung und Verarbeitung von Nahrungs- und Futtermitteln sowie der Maschinenbau den größten Anteil an der Gesamtsumme. Die weiteren Hochregale verteilen sich relativ

gleichmäßig auf den Fahrzeugbau, die Papierindustrie, die Herstellung von Metallerzeugnissen sowie die chemische Industrie. Auffällig dabei ist die unterschiedliche Verteilung der Regalbauweisen in den verschiedenen Branchen. So wird in der Lebensmittel-, Pharma-, Chemie- und Papierindustrie fast ausschließlich die Silobauweise verwendet. Ein schwächerer Trend ist im Maschinenbau zu beobachten. Die Silobauweise ist jedoch in allen Branchen die vorherrschende Bauweise.

Die identifizierten, häufigsten Branchen, in denen Hochregallager eingesetzt werden, sollen als Grundlage für die spätere Betrachtung von möglichen Einsatzszenarien dienen.



**Abbildung 46: Anzahl gebauter Hochregale im verarbeitenden Gewerbe in Deutschland**

### 4.3 Gründe für die Holzbauweise

*Christopher Ludwig*

Hochregallager wurden bisher aus verschiedenen Gründen aus Holz gebaut. Tabelle 4 zeigt einen Überblick der bestehenden Holz-Hochregale, die darin gelagerten Lagergüter sowie die Motivation der Bauherrn für den Einsatz des natürlichen Regalwerkstoffs. Die Angaben stammen von Betreibern, Herstellern und Logistikplanern der jeweiligen Anlagen. Die Regale sind dabei aufsteigend nach Baujahr geordnet.

Während beim ersten Lager vor allem der volatile Stahlpreis und die damit verbundene Planungsunsicherheit ausschlaggebend war, wurde der Regalwerkstoffe Holz zuletzt wegen seinen ökologischen Vorzüge gewählt. Eine Ausnahme hiervon stellt ein Hochregal zur Lagerung von Salzprodukten dar. In dieser Lagerumgebung wäre ein konventionelles Stahlregal nur mit einer aufwendigen Beschichtung möglich gewesen. Die beschränkte Haltbarkeit dieser Schutzschicht war zusammen mit der aufwendigeren Herstellung der Grund für die Holzbauweise. Ein weiteres Argument für das Holz-Hochregal ist seine lange Tragfähigkeit im Brandfall. Diese ergibt sich aus den Brandeigenschaften des Baustoffs selbst (siehe Kapitel 3.5.3).

**Tabelle 4: bestehende Hochregallager aus Holz, Lagergüter und Motivation für die Holzbauweise**

<b>Baujahr</b>	<b>Unternehmen</b>	<b>Lagergüter</b>	<b>Gründe für die Holzbauweise</b>
2005	Giko Verpackungen GmbH	Verpackungsmaterialien	Stahlpreis, Brandschutz
2006	Tiefenthaler Transporte GmbH	diverse Güter	Nachhaltigkeit
2007	Salinen Austria AG	Salzprodukte	Korrosion
2007	Wilsanco Plastics Ltd.	Verpackungsmaterialien	Nachhaltigkeit, Brandschutz
2008	Offsetdruckerei Schwarzach GmbH	Papier und Kartonagen	Nachhaltigkeit
2009	Greiner Real Estate GmbH	Verpackungsmaterialien	Nachhaltigkeit, Brandschutz
2010	Josera GmbH & Co. KG	Tiernahrung	Nachhaltigkeit
2013	Alnatura GmbH	abgepackte Lebensmittel	Nachhaltigkeit

#### **4.4 Durchgeführte Befragungen**

*Christopher Ludwig, Peter Glaser*

##### **4.4.1 Vorgehen und Ziele**

Um etwaige Probleme, Schwachstellen oder Vorteile während der Planung, der Herstellung, der Montage und dem Betrieb von bestehenden Hochregalen aus Holz zu erfassen, werden zu Beginn des Forschungsprojekts Befragungen von vier Betreibern und zwei Herstellern durchgeführt. Dabei werden die Betreiber der vier stellplatzmäßig größten Läger gewählt. Die Befragung wird mittels eines zuvor erstellten Interviewleitfadens und einer anschließenden Diskussion durchgeführt. Zusätzlich findet eine Besichtigung des Lagers bzw. der Produktionsstätte statt. Dadurch soll ein näherer Eindruck von der Herstellung der Bauteile, der fertigen Konstruktion sowie des Betriebsablaufs gewonnen werden. Eine kritische Betrachtung der aufgenommenen Aussagen erfolgt in den nächsten Kapiteln.

##### **4.4.2 Herstellerbefragung**

Beide Hersteller geben an, dass die größte Herausforderung die Neuheit des Themas beziehungsweise die fehlende Erfahrung darstelle. Hochregale aus Stahl werden schon seit vielen Jahrzehnten gebaut. Sie wurden im Laufe der Jahre weitestgehend optimiert. Holz-Hochregale stünden dahin gehend noch ganz am Anfang. Bestehende Normen und Richtlinien sind historisch bedingt nur auf Stahl-Hochregale ausgelegt. Informationen können daher nur zum Teil entnommen werden. Hauptsächlich werde die FEM 9.831 als Richtlinie für die Planung der Konstruktion verwendet [FEM-9831]. Der Bau von Hochregalen sei stark unterschiedlich zum allgemeinen Hochbau, da sehr strenge Verformungsgrenzen für einen reibungslosen Be-

trieb einzuhalten sind. Da in diesem Bereich auch Erfahrungswerte zum Verhalten der Konstruktion unter Last fehlen, sind konservative Annahmen notwendig, welche sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit auswirken. Aufgrund der genannten Punkte schätzen die Hersteller ihren Planungsaufwand in Summe um einiges höher als bei Stahl-Hochregalen ein. Dieses Problem sei ihrer Meinung nach nur durch Forschungsarbeit sowie weitere Projekte bzw. Erfahrungen zu verbessern.

Durch die Brettschichtholzbauweise mit am Stück gefertigten Stehern werde auf der Baustelle wertvolle Montagezeit gespart. Jedoch müssen dafür die Bauteile aufwendig per Sondertransport angeliefert werden. Dabei wird die maximale Steherlänge und somit die maximale Regalhöhe durch den steigenden Transportaufwand sowie Herstellungsgrenzen auf ca. 30 Meter limitiert. Bedingt durch dieses Problem war der Einsatz der Holzbauweise bei einigen Projekten in der Vergangenheit unmöglich. Die Kunden benötigten aufgrund der Platzverhältnisse und der geforderten logistischen Anforderungen ein höheres Lager. Die Einführung eines Steherstoßes werde bisher wegen der Verformungsproblematik nicht weiter verfolgt.

Die Regalbauteile werden mit einer Holzfeuchte von ca. 10-12% verbaut. Diese werden nur für den Transport und die Montage mit einem Schutzanstrich, welcher vor einer Änderung der Holzfeuchte schützt, versehen. Es werde kein chemischer Holzschutz eingesetzt. Die sich einstellende Holzfeuchte während des Betriebes wird im Jahresrhythmus von den Herstellern gemessen. Sie befindet sich bei allen Regalen im Bereich von 8 bis 12 %.

Bezüglich des Brandschutzes weisen beide Hersteller darauf hin, dass bedingt durch die hohen Anforderungen an die Regalgesamtverformung im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit die Regalsteher automatisch eine gewisse Feuerwiderstandsdauer aufweisen. Dieser Vorteil wird wegen der vollständigen Sprinklerung brandschutztechnisch derzeit nicht weiter berücksichtigt.

Generell gab es laut den Herstellern bis auf eine Ausnahme bisher keine nennenswerten Probleme während des Herstellungs- und Bauablaufs. Die Ausnahme trat beim ersten vollständigen Hochregal aus Holz auf. Dort kam es im Bereich der Palettenträger-Stöße zu einem Lockern der Verbindung. Die Schwachstelle konnte jedoch kostengünstig durch zusätzliche Holzschrauben beseitigt werden. Sie tritt bei den nachfolgenden Regalen nicht mehr auf, da die Verbindung konstruktiv anders gelöst wird.

### **4.4.3 Betreiberbefragungen**

Durch die verschiedenen Bauzeiten der Regale verfügen die vier befragten Betreiber über jeweils unterschiedliche Betriebszeiten ihrer Anlagen und weisen daher auch einen mehr oder weniger stark ausgeprägten Erfahrungsschatz auf. Das älteste Regal ist zum Zeitpunkt der Befragung seit 7 Jahren in Betrieb, das jüngste seit circa einem Jahr.

In Bezug auf die Planung geben die Betreiber die Empfehlung, die zuständigen Behörden, Gemeinden und Sachverständigen von Beginn an in das Projekt mit einzubeziehen, um so unnötige Missverständnisse und Probleme zu vermeiden. Bei Berücksichtigung dieser Empfehlung sei mit hoher Wahrscheinlichkeit mit keiner Verzögerung der Planung seitens der genannten Stellen zu rechnen.

Bezüglich der Montage des Regals weisen zwei Betreiber darauf hin, dass diese schneller als bei einem ebenfalls angebotenen Stahl-Hochregal durchgeführt werden konnte.

Bedingt durch massivere Palettenträger haben vollständige Holz-Hochregale eine größere Gesamthöhe als funktionsgleiche Stahl-Hochregale. Die Mehrhöhe beträgt dabei je nach Ebenenanzahl wenige Zentimeter bis zu einem halben Meter. Sie führt zu zusätzlicher Fassadenfläche.

Bei allen befragten Betreibern werden Sprinkler als anlagentechnischer Brandschutz eingesetzt. Laut Informationen der Betreiber sind bei Hochregalen aus Holz aufgrund der massiven Bauweise und der damit verbundenen Sprühschatten mehr Sprinklerköpfe notwendig. Alle übrigen Bauelemente der Brandschutzanlage sind jedoch identisch.

Betreffend der Wirtschaftlichkeit bzw. des nötigen Invests besteht nach Wissen der befragten Unternehmen ein Mehraufwand bei Hochregalen aus Holz von ca 5 bis 30%. Diese Aussage betrifft nur die Regalkonstruktion an sich und beinhaltet keine übrigen durch die Holzbauweise bedingten Änderungen.

Während des Betriebs sind bisher bei keinem Betreiber unzulässige Verformungen oder Probleme bei der Holz-Regalkonstruktion aufgetreten. Das Regal erweist sich durch seine massiven Bauteile mit Vollquerschnitt als besonders robust. Bei einem Unternehmen befinden sich unter dem Regal Kommissioniertunnel, die von Flurförderzeugen befahren werden. In diesem Bereich gibt es häufig Zusammenstöße zwischen den Fahrzeugen und den Regalstehern. Die Steher nahmen dabei auch ohne Anfahrschutz keinen tragsicherheitsrelevanten Schaden. Ein ähnlicher Fall wird von einem anderen Betreiber mit automatischen Regalbediengeräten geschildert. In seinem Lager traten, bedingt durch Fehlfunktionen bei der Sensorik des Bediengeräts, Kollisionen zwischen dem Lastaufnahmemittel und den Palettenträgern auf. Auch hier wurde die Regalkonstruktion nicht beschädigt.

Als einen weiteren Vorteil des Holz-Hochregals nennen zwei Betreiber dessen Fähigkeit Wärme zu speichern. Ihrer Meinung nach hält die Holzmasse des Regals die Raumtemperatur über den Tages- und Nachtzyklus nahezu konstant. Es wird somit die Fähigkeit zur zwischenzeitlichen Wärmespeicherung unterstellt.

## **4.5 Datenanalyse bestehender Holz-Hochregale**

*Christopher Ludwig*

### **4.5.1 Vorgehen und Ziel der Datenanalyse**

Um noch mehr über die Vor- und Nachteile der bestehenden Holz-Hochregale zu erfahren und die Eindrücke der Betreiberbefragungen zu überprüfen bzw. zu belegen, werden funktionsgleiche Hochregale aus Holz und Stahl miteinander verglichen. Der Fokus dieser Gegenüberstellung liegt dabei nicht nur auf den Regalkonstruktionen selbst, sondern auch auf den übrigen Komponenten des Hochregallagergebäudes. Es soll festgestellt werden, welche Anpassungen bzw. Änderungen an den Komponenten aufgrund der Holzbauweise notwendig sind und wie groß diese ausfallen. Auf diese Weise können etwaige Unterschiede zwischen den beiden Hochregalbauweisen sichtbar gemacht und in ihrer Relevanz bewertet werden.

Die Untersuchungen dienen als Informationsbasis für die weiteren Arbeiten und sollen klären welche Unterschiede weiter betrachtet werden.

Dazu werden zahlreiche Daten zu den bestehenden Holz-Hochregalen von allen Herstellern und Betreibern gesammelt. Für eine aussagekräftige Gegenüberstellung sind zudem Vergleichsdaten von vollständig funktionsgleichen Stahl-Hochregalen notwendig, welche von einem am Projekt beteiligten Stahl-Hochregalhersteller zur Verfügung gestellt werden. Dieser kann für einige bestehende Lager bereits auf Planungswerte aus der Angebotsphase zurückgreifen. Bei den übrigen Lagern erfolgte eine grobe Neuplanung.

Wie in Kapitel 4.4 aufgeführt, werden von den Herstellern und Betreibern Unterschiede bei folgenden Aspekten vermutet:

- Planungs-, Montage- und Projektlaufzeit
- Regalgesamtabmessungen
- Brandschutzeinrichtungen
- Robustheit
- Gebäudetechnik
- Nachhaltigkeit

Im Laufe der Arbeiten am Projekt wurden weitere potenzielle Unterschiede identifiziert, bei:

- Inspektion
- Sachversicherung

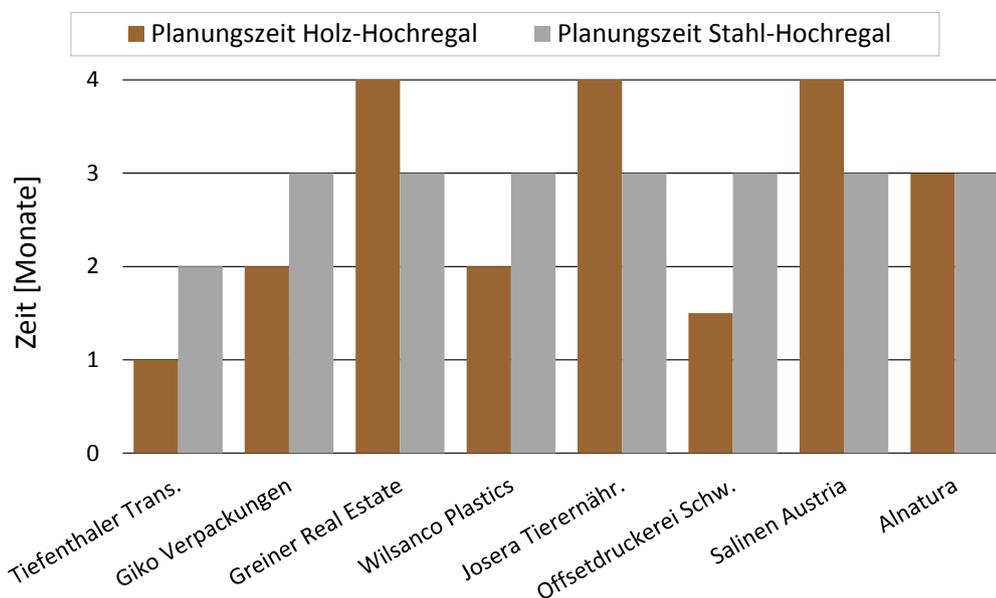
Die gezeigten möglichen Abweichungen werden nun näher untersucht. Ein Vergleich der Nachhaltigkeit wird jedoch erst in Kapitel 6 durchgeführt.

### **4.5.2 Planungs-, Montage- und Projektlaufzeit**

Für den Vergleich der Planungs-, Montage- und Projektlaufzeit werden, wie anhand der Datenherkunft ersichtlich, reale Daten der Holz-Hochregale mit Erfahrungs- bzw. Schätzwerten von funktionsgleichen Stahl-Hochregale verglichen. Die zu erwartende Unsicherheit kann aber aufgrund der langjährigen Erfahrung des befragten Stahl-Hochregalherstellers als gering eingeschätzt werden. Externe Einflüsse wie zum Beispiel die Witterung bei der Montage werden durch die Datenlage nur bei den Holz-Hochregalen berücksichtigt. Die Angaben beziehen sich rein auf die Regalkonstruktion.

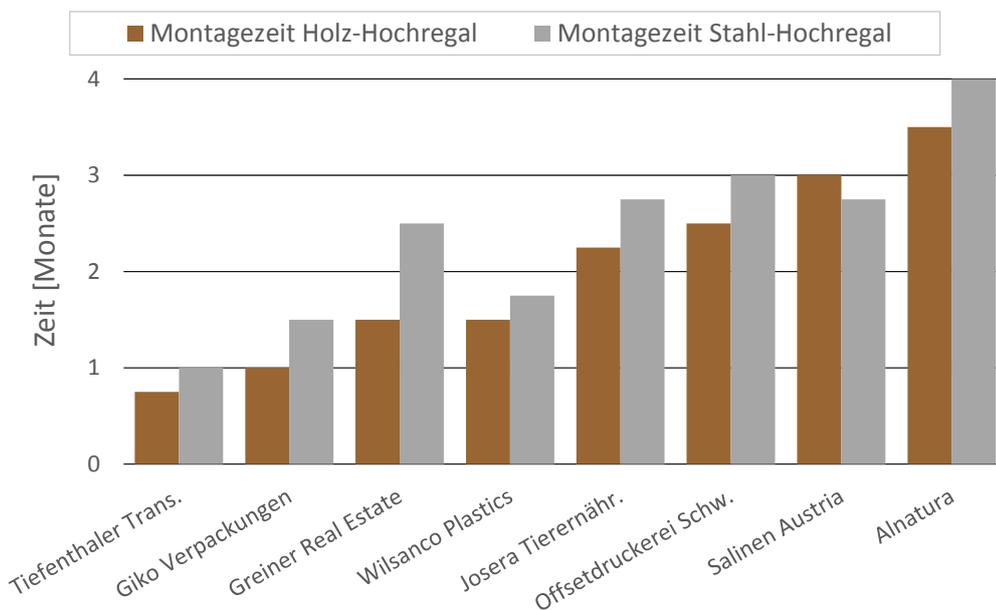
Bezüglich der Planungszeit gibt es laut Abbildung 47 starke Unterschiede bei Hochregalen aus Holz. Die drei dargestellten Maxima stellen die jeweils ersten vollständig aus Holz gebauten Hochregale der drei Hersteller dar, wodurch die vergleichsweise hohen Planungszeiten bei diesen Anlagen erklärt werden können. Bei den Stahl-Hochregalen beträgt die Planungszeit nahezu bei allen Projekten drei Monate. Auf Rückfrage wurde dies damit begründet, dass die Größe eines Lagers nur einen untergeordneten Einfluss hat. Es sind bei jedem Hochregal ähnliche bis gleiche Aufgaben zu erfüllen, wie zum Beispiel die Berechnung der Statik der Aussteifungsbereiche an den Regalenden. Wie viele Regalfächer dazwischen angebracht sind beeinflusst zwar die konstruktive Gestaltung nicht aber die Planungsdauer. Allgemeine Aussagen über einen Unterschied bei der Planungsdauer sind anhand des erstellten Diagramms

nur schwer möglich. Im Hinblick auf das zuletzt gebaute und derzeit größte Lager (Alnatura) kann der Zeitraum jedoch als zumindest gleichwertig eingeschätzt werden. Der von den Herstellern während der Befragung angesprochene Planungsaufwand ist bei dieser Gegenüberstellung nicht ersichtlich (vgl. Kapitel 4.4.2).



**Abbildung 47: Planungszeiten bestehender Holz-Hochregale sowie funktionsgleicher Stahl-Hochregale**

Eine weitere wichtige Zeitspanne beim Bau eines Hochregals ist die Montagezeit. Abbildung 48 zeigt das Ergebnis des Vergleichs der benötigten Zeiträume.

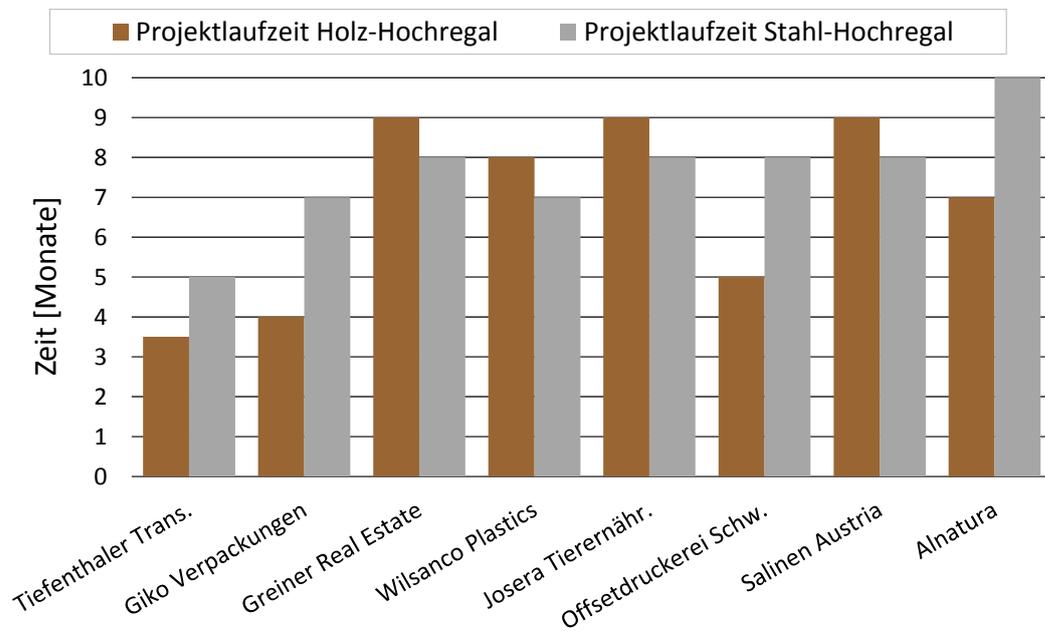


**Abbildung 48: Vergleich der Montagezeit von gebauten Holz-Hochregalen und funktionsgleichen Stahlregalen**

Es ist ersichtlich, dass die Montagezeit bei der Holzbauweise in fast allen Fällen niedriger ist. Durchschnittlich ergibt sich eine Reduktion der Montagezeit um ca. 20 Prozent. Da die realen

Daten der Holzregale mit den geschätzten Zeiten der Stahlregale verglichen werden und die Witterung daher bei den Stahlregalen nicht einfließt, darf in der Praxis eine noch höhere Zeitersparnis erwartet werden. Die kürzere Montagezeit kann durch die massiven, an einem Stück gefertigten und transportierten, Steher erklärt werden (siehe Kapitel 3.6.3). Wegen dieser Bauweise entfallen auf der Baustelle einige zeitintensive Zusammenbauarbeiten.

Im letzten Schritt wird die gesamte Projektlaufzeit von der Auftragsannahme bis zur Abnahme des Regals betrachtet (siehe Abbildung 49). Hier ist eine ähnliche Charakteristik wie bei der Planungszeit ersichtlich. Die ersten vollständig aus Holz gebauten Hochregale der drei Hersteller weisen große Zeitspannen von jeweils 9 Monaten auf und liegen dabei knapp über den Stahl-Hochregalen. Das Hochregal der Firma Wilsanco Plastics wurde in Irland gebaut. Die Bauteile des Regals mussten dabei von Österreich aufwendig (Steher in einem Stück) nach Irland transportiert werden, wodurch die gesamte Projektlaufzeit vergrößert wurde. Aus diesem Grund liegt die Projektlaufzeit bei diesem Regal auch über jener des funktionsgleichen Stahlregals. Bei allen übrigen Hochregalen, auch beim zuletzt gebauten von Alnatura, weist Holz klar eine kürzere Projektlaufzeit auf.



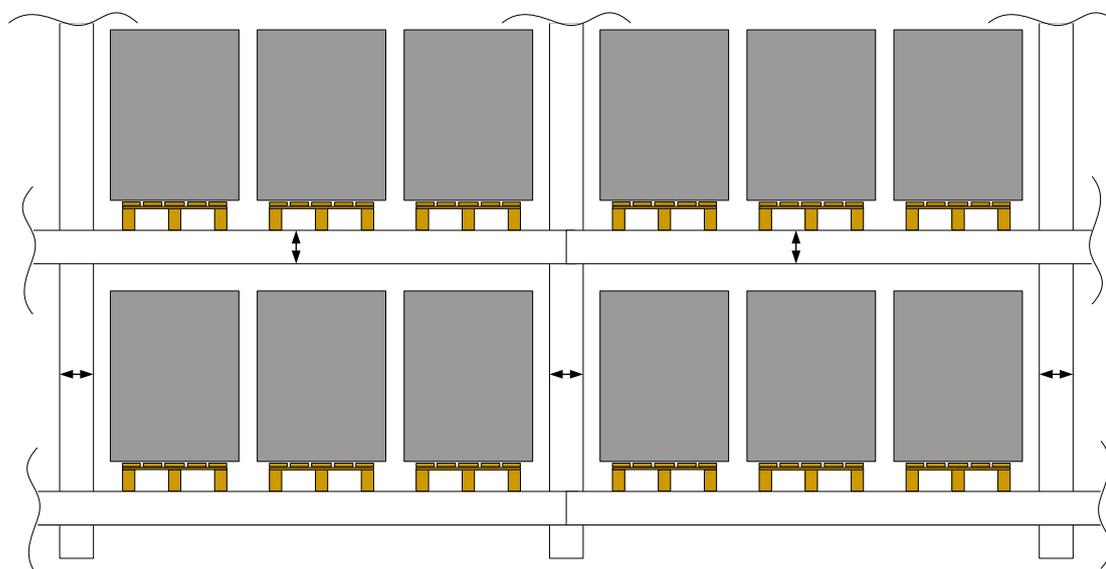
**Abbildung 49: Projektlaufzeit bei bestehenden Holz-Hochregalen und funktionsgleichen Stahl-Hochregalen**

### 4.5.3 Regalgesamtabmessungen

Damit Hochregale aus Holz und Stahl die selbe Funktionalität aufweisen, müssen ihre Regalfächer die selbe Größe und Anordnung besitzen. Die dazwischenliegenden Regalbauteile können jedoch unterschiedlich sein. So variieren die Steherbreiten (X-Richtung) und die Höhen der Palettenträger (Y-Richtung) bei den beiden Regalwerkstoffen (siehe Abbildung 50). Die Abmessungen in Z-Richtung sind identisch. Die genannten Größenunterschiede betragen je Bauteil zwar nur wenige Zentimeter, summieren sich aber über die Anzahl an Regalfächern auf.

Um nun festzustellen wie groß der Unterschied bei den Gesamtabmessungen ausfällt, wird das neueste Hochregal aus Holz (Baujahr 2014) betrachtet. Dieses stellt den aktuellen Stand der Konstruktionsentwicklung dar. Bei diesem Hochregal befinden sich in X-Richtung am Gassenende sogenannte Aussteifungstürme, welche die Gesamtlänge des Holz-Hochregals zusätzlich vergrößern (vgl. Kapitel 3.6.3). Da sich in dem Bereich aber auch die Auslaufstrecken der Regalbediengeräte befinden, welche ohnehin meist nicht genutzt werden können, ist die Längenzunahme um die Auslaufstrecke zu reduzieren.

Auch bei den Stahl-Hochregalen variieren die Bauteilabmessungen je nach Hersteller, daher werden die Konstruktionsdaten von zwei weiteren Hersteller in die Untersuchung miteinbezogen. Somit stehen der aktuellen Holzbauweise drei Stahlausführungen gegenüber. Die Ergebnisse des Vergleichs sind in Tabelle 5 ersichtlich. Die berechnete Differenz bei der Gesamtlänge bewegt sich bedingt durch die unterschiedlichen Steherbreiten bei den Stahl-Hochregalen sowie die reduzierte Mehrlänge der Aussteifungstürme bei der Holzbauweise in einem Bereich von -350 bis +1130mm. Bezogen auf die Gesamtlänge des kürzesten Stahlregals beträgt die größte Mehrlänge weniger als ein Prozent. In Y-Richtung, also bei den Höhen der Palettenträger, sind die Stahl-Hochregale einheitlich, weshalb sich eine Mehrhöhe bei Holz-Hochregalen für das gewählte Untersuchungsobjekt von 140mm berechnen lässt. Dabei wurde der Palettenträger der untersten Ebene nicht gezählt, da dessen Höhe durch das untere Anfahrmaß des Regalbediengeräts nicht relevant ist. Wird die Zunahme der Regalgesamthöhe durch das Holz-Hochregal wieder auf die des niedrigsten Stahl-Hochregals bezogen, so macht diese abermals weniger als ein Prozent aus.



**Abbildung 50: Einfluss der Steherbreiten und Palettenträgerhöhen auf die Regalgesamtabmessungen**

Anhand der Untersuchung des neuesten Holz-Hochregallagers kann somit gezeigt werden, dass die Regalgesamtabmessungen bei Hochregalen aus Holz und Stahl nur geringfügig unterschiedlich sind. Die Abweichungen bewegen sich bei unter einem Prozent und können daher vernachlässigt werden. Aus diesem Grund sind auch die mit den Regalabmessungen zusammenhängenden Dach- und Fassadenflächen als gleichwertig anzusehen. Die Betrachtung

hat ebenfalls gezeigt, dass in X-Richtung selbst zwischen den Stahl-Hochregalen starke Unterschiede je nach Hersteller vorherrschen.

**Tabelle 5: Berechnung der Unterschiede bei den Regalgesamtabmessungen von Hochregalen aus Holz und Stahl am Beispiel Alnatura**

Abmessungen	Holz-HRL [mm]	Stahl-HRL [mm]
Breite Steher	100	120...160
Höhe Palettenträger	180	160
Längendifferenz gesamtes Lager	-350...+1130	
Höhendifferenz gesamtes Lager	+140	

#### 4.5.4 Brandschutzeinrichtungen

Holz-Hochregale werden derzeit nur durch einen anlagentechnischen Brandschutz geschützt. Bei allen Lagern bis auf eines, welches in Irland gebaut wurde, wird hierzu eine Sprinklerung des Lagers eingesetzt. Eine solche Brandschutzanlage besteht aus einer Wasserquelle, einer Pumpe, Steuerungstechnik, Rohrleitungen, Ventilen und zahlreichen Sprinklerköpfen [CEA-4001]. Wie bereits in Kapitel 3.7.3 beschrieben, müssen die Sprinklerköpfe und Rohrleitungen bei Hochregalen (<9m) sowohl an der Gebäudedecke als auch in den Zwischenebenen des Regals platziert werden. Die Auslegung der Sprinklerung sowie die Bestimmung der Brandgefahr erfolgt nach VdS CEA 4001.

Während der Betreiberbefragungen wurde mehrmals die Vermutung ausgesprochen, dass bei Holz-Hochregalen aufgrund der massiven sowie vollflächigen Regalsteher Sprühschatten für die Regalsprinklerung entstehen und diese durch zusätzliche Sprinklerköpfe ausgeglichen werden müssen. Zur Überprüfung der genannten Behauptung wird abermals das neueste Holz-Hochregal (Baujahr 2014) herangezogen, da dieses den in Deutschland gültigen Brandschutzbestimmungen unterliegt. Für Informationen bezüglich der Brandschutzanlage wurde der damalige Planer der Regalsprinklerung, welcher über mehrjährige Erfahrung im Bereich des anlagentechnischen Brandschutzes von Stahl-Hochregalen verfügt, kontaktiert.

Seinen Angaben nach berücksichtigt die VdS CEA 4001 den Regalwerkstoff nicht, da dieser in der Vergangenheit immer nicht brennbar war. Da das betrachtete Holz-Hochregal jedoch brennbar ist und somit die Brandlast im Lager erhöht wird, wurde in der Planungsphase Rücksprache mit der VdS Schadenverhütung GmbH gehalten. Der VdS stellte nach gemeinsamen Recherchen fest, dass das Lager infolge der Holzregalkonstruktion keine wesentlich höhere Brandgefahr aufweist, weil die Regalgesamtmasse nur ca. 5% der Gesamtmasse aller Lagergüter beträgt. Gelagert werden diverse Lebensmittel, welche in Kartonagen verpackt und zur Ladungssicherung mit Kunststoffolie umspannt sind. Die VdS CEA 4001 verlangt für die beschriebenen Lagergüter Regalsprinkler an der Decke, in jeder Ebene sowie an allen Schnittpunkten der Längs- und Querschächte, welche durch die Lagergüter gebildet werden. Somit wird im betrachteten Lager, bedingt durch die Lagergüter, ohnehin jeder Stellplatz gesprinklert. Aufgrund der Holzbauweise mussten in Summe nur ca. 5% mehr Sprinklerköpfe verbaut werden. Die Sprinklerköpfe, welche in der Anschaffung vergleichsweise günstig sind, wurden

im Bereich der Aussteifungstürme (siehe Kapitel 3.6.3) platziert. Alle sonstigen kostenintensiven Baugruppen (z. B. Pumpen, Verrohrung usw.) blieben gleich. Der ökonomische und montageteknische Mehraufwand bei der Brandschutzanlage kann daher nach Aussage des befragten Planers bei Holz-Hochregalen vernachlässigt werden. [Lim-2015]

Weil sich die genannten Ausführungen nur auf ein spezifisches Lager bzw. Lagergut beziehen, wurde für eine allgemeine Aussage Kontakt mit der Risikoabteilung der VdS Schadenverhütung GmbH aufgenommen. Der zuständige Mitarbeiter weist darauf hin, dass es seitens des VdS bei einer Sprinklerung des Regals zu keiner höheren Einstufung der Brandgefahr infolge der Holzbauweise kommt [Rus-2015]. Dabei handelt es sich jedoch nur um eine Empfehlung. Die Planung des anlagentechnischen Brandschutzes muss in jedem Fall mit der zuständigen Bauaufsichtsbehörde, dem Prüfsachverständigen sowie der gewünschten Versicherung abgestimmt werden (siehe Kapitel 3.4.5).

Auch bei nicht brennbaren Lagergütern muss nach den Angaben der VdS CEA 4001 eine Sprinklerung vorgesehen werden [CEA-4001]. Diese muss dann aber nicht im Umfang des untersuchten Holz-Hochregals vorliegen, d. h. es werden je nach Risikoeinschätzung nicht alle Ebenen oder Stellplätze mit Sprinklerköpfen versehen.

Die Feststellungen des befragten Planers sowie des VdS sind kritisch zu sehen, denn der relative Beitrag der Holzregalkonstruktion zur Brandlast ist stark vom Lagergut abhängig. Die Höhe des Beitrags sowie die Auswirkungen auf die Sprinklerung sollten versuchstechnisch oder simulativ näher untersucht werden, um eine genauere Beurteilung durchführen zu können.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass es in der Praxis derzeit keinen nennenswerten Unterschied beim anlagentechnischen Brandschutz von Hochregalen aus Holz und Stahl gibt. Die vorherrschende Brandlastserhöhung durch die Holzregalkonstruktion sollte aber genauer untersucht werden, um die momentane Vorgehensweise zu überprüfen.

#### **4.5.5 Robustheit**

Bei Hochregalen sind in Folge von Fehlern bei der Regalbedienung Zusammenstöße zwischen dem Lastaufnahmemittel des Regalbediengeräts und der Regalkonstruktion möglich, welche sich schädigend auswirken können. Dies gilt auch für vollautomatische Lager, da die dort verwendeten Sensoren Fehlfunktionen aufweisen können.

Am häufigsten kommt es bei Hochregalen während des Betriebs zu einem Anprall an den Palettenträgern durch zu tief positionierte Teleskopgabeln der Bedieneinrichtung. Besteht dieser Träger wie gewöhnlich aus dünnem komplex geformtem Stahlblech, so weist er gegen die auftretende Querkraft kaum Widerstand auf, verformt sich und muss ausgewechselt werden. Je nach Größe eines Lagers muss durchschnittlich alle fünf bis sieben Jahre bedingt durch eine Fehlfunktion einmal ein Palettenträger ausgetauscht werden. [Sch-2015]

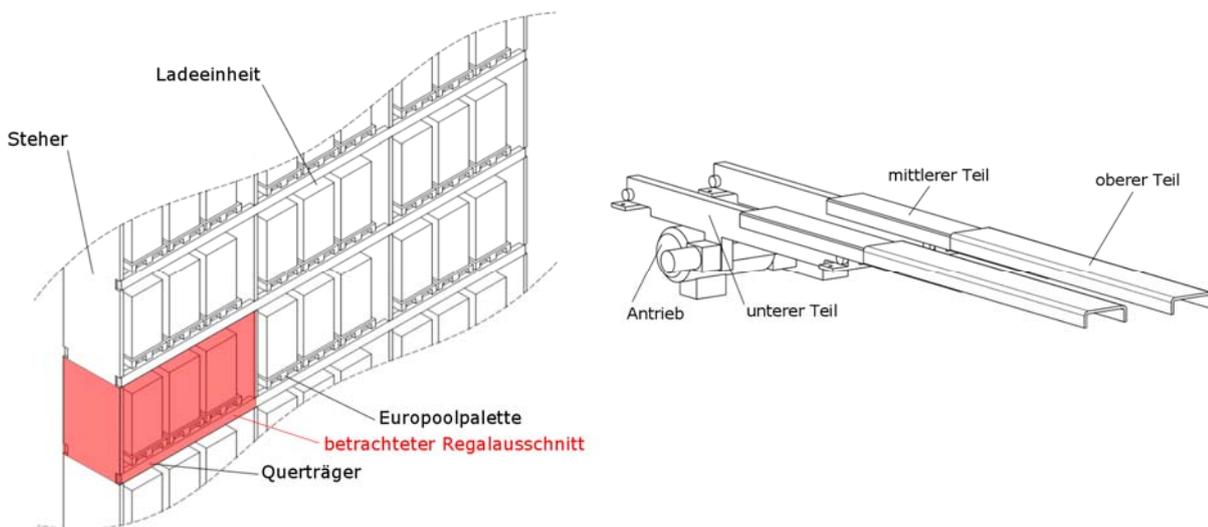
Regalbauteile bei Hochregalen aus Holz weisen Vollquerschnitte auf und sind daher robuster gegenüber Anpralllasten als vergleichbare Stahlbauteile. Dieser Vorteil wurde während der Betreiberbefragungen mehrfach von den befragten Unternehmen hervorgehoben. Ein wie oben beschriebener Zusammenstoß ist beim derzeit größten automatischen Hochregallager

aus Holz bereits einmal aufgetreten. Aufgrund einer Verdeckung der zur vertikalen Positionierung genutzten Lichtschranke durch eine Stück Kunststoffolie kam es zu einem Anprall der unbeladenen Teleskopgabeln des Lastaufnahmemittels an einem Palettenträger. Dieser wurde bis auf zwei Eineurostück große Druckstellen nicht merklich beschädigt (Sichtkontrolle). Das Lastaufnahmemittel wurde ebenfalls nicht beschädigt. Um mehr über mögliche Schädigungen beim Anprall des Lastaufnahmemittels herauszufinden, werden Anprallsimulationen mit Hilfe der Finite-Elemente-Software ABAQUS durchgeführt.

*Modellannahmen*

Als Untersuchungsgegenstand dient ein Hochregal mit Palettenträgern aus Brettschichtholz (3-Platzlagerung, siehe Abbildung 51 (a)). Simuliert wird als Extremfall der Anprall beladener Teleskopgabeln (Europoolpalette mit Masse 1000kg) an einem Palettenträger mit leerem Stellplatz. Als horizontale Anprallposition wird die Mitte des Palettenträgers (mittlerer Stellplatz) gewählt, da hier die größte Verformung bzw. Schädigung erwartet wird. In vertikaler Richtung schließt die Oberkante des Palettenträgers mit dem oberen Teil der Teleskopgabeln bündig ab. Die zwei seitlichen Stellplätze werden als belegt angenommen.

Näherungsweise wird nur ein Fach des Hochregals modelliert, d. h. die Nachgiebigkeit der Regalkonstruktion wird beim Anprall vernachlässigt. Als konservative Annahme wird zudem die Kopplung des vorderen und hinteren Palettenträgers durch die zwei seitlich eingelagerten Ladeeinheiten weggelassen, weshalb nur noch der vordere Palettenträger betrachtet wird. Die drei Hauptbauteile der Teleskopgabeln sind mechanisch mit einander verbunden (vgl. Abbildung 51 (b)). Der untere Teil ist dabei fest am Hubwerk des Regalbediengeräts montiert und steht während der Ein- und Auslagerung still. Der mittlere Teil bewegt sich zusammen mit dem oberen Teil der Teleskopgabeln, jedoch mit geringerer Geschwindigkeit. Bei einem Bedienvorgang beschleunigen die zwei Teile zusammen mit der Ladeeinheit bis zum Erreichen einer Maximalgeschwindigkeit, welche bereits vor dem Anprall erreicht wird und für den oberen Teil sowie die Ladeeinheit nach *Hübner* mit 0,87m/s angenommen wird [Hüb-2010, S. 6].



(a) Ausschnitt Hochregallager

(b) Lastaufnahmemittel

**Abbildung 51: Darstellung der beteiligten Subsysteme**

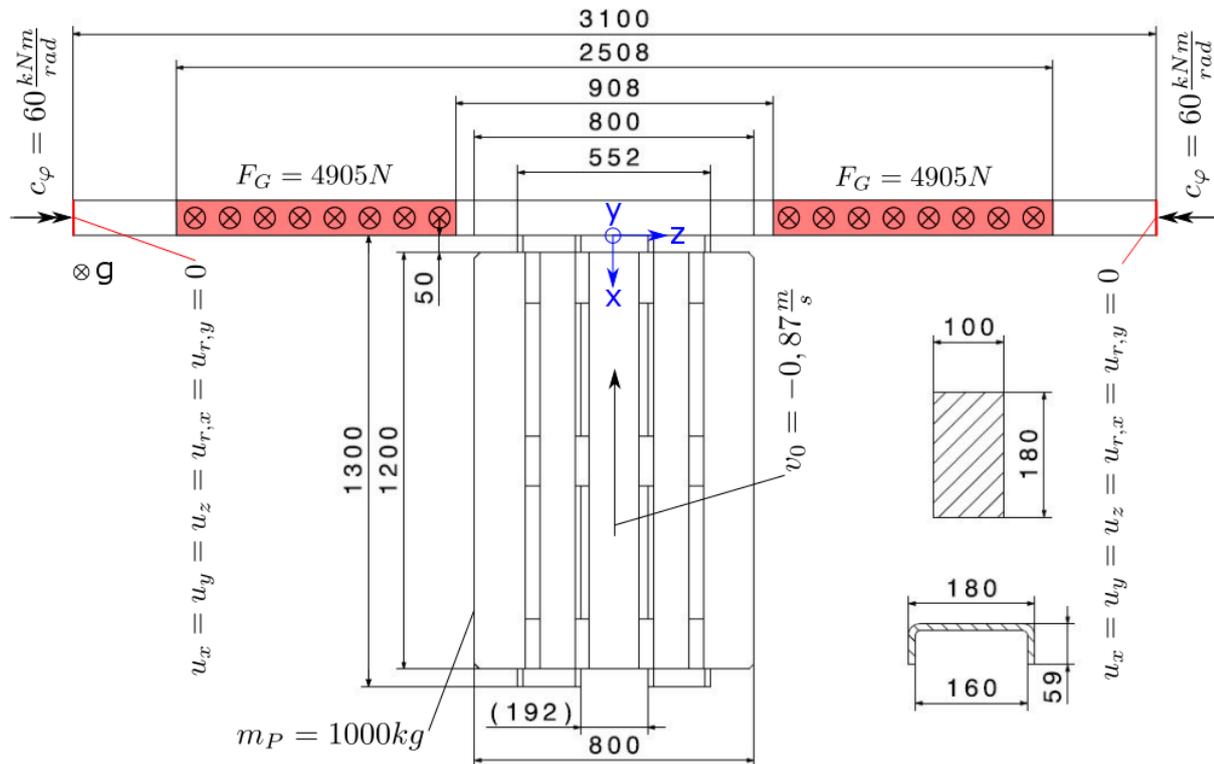
Zum Zeitpunkt des Anpralls liefert der Antrieb nur ein geringes Drehmoment, welches den Reibungsverlusten entspricht. Da das Antriebsmoment und die Massenträgheiten der beweglichen Bauteile im Vergleich zur Ladeeinheit als gering eingeschätzt werden, werden sie nicht berücksichtigt. Es findet daher im beschriebenen Modell keine Kraftübertragung zwischen den Hauptbauteilen der Teleskopgabeln statt, weshalb nur noch der obere Teil betrachtet werden muss. Da Stoßvorgänge innerhalb sehr kurzer Zeiträume (Millisekundenbereich) auftreten, wird eine Erhöhung des Antriebsdrehmoments erst lange nach dem Stoß erwartet. Das Antriebsdrehmoment wird dabei durch eine Rutschkupplung begrenzt. Die Kraft auf den Palettenträger in Folge des maximalen Antriebsmoments wurde analytisch berechnet. Sie ist vielfach kleiner als die Anprallkraft, welche durch die kinetische Energie der Ladeeinheit verursacht wird.

Der Baustoff Holz weißt orthotrope Materialeigenschaften auf. Der Verlauf der radialen und tangentialen Vorzugsrichtung innerhalb des orthotropen Materialmodells variiert je nach Entnahmeposition des Holzbretts im Bezug zur Stammmitte [Neu-1994, S. 37ff.]. Durch die Vereinigung mehrerer einzelner Holzbretter zu Brettschichtholz wird eine Homogenisierung über den Querschnitt des entstehenden Holzträgers erreicht. Zur Abbildung des Brettschichtholzträgers wird daher ein transversal-isotropes Materialmodell gewählt. Da die Modellierung von plastischen Verformungen bei Holzwerkstoffen aufgrund zahlreicher Einflussfaktoren äußerst schwierig ist [Fle-2005, S. 138ff.], wird für die Zwecke dieser Untersuchung ein rein linear-elastisches Materialmodell verwendet. Damit können zwar keine Aussagen zu plastischen Verformungen getroffen werden, jedoch sind Bereiche in denen plastische Verformungen stattfinden identifizier- und eingrenzbar. In konservativer Näherung können solche Bereiche als nicht mehr tragfähig angenommen und daraus Rückschlüsse auf die Schädigung des Palettenträgers gezogen werden.

#### *Ableitung und Implementierung des Simulationsmodells*

Abbildung 52 zeigt die wichtigsten Parameter der vorliegenden Problemstellung. Von der zuvor gezeigten Teleskopgabelbaugruppe werden die beiden oberen Teile extrahiert und für die Simulation herangezogen. Die berücksichtigte Geometrie besteht aus zwei U-Profilen der Breite  $b=180\text{mm}$ , der Höhe  $h=59\text{mm}$ , der Wandstärke  $t=10\text{mm}$  und der Länge  $l=1300\text{mm}$  (Masse  $27\text{kg}$  je Gabel).

Beim betrachteten Palettenträger werden die eingelagerten Europoolpaletten als statische Ersatzstreckenlasten mit halber Gewichtskraft einer Europoolpalette ( $F_G=4905\text{N}$ ) modelliert. Die axialen Positionen dieser Lasten bzw. Europaletten werden durch die Vorgaben der in Kapitel 3.4.3 genannten Regelwerke bestimmt. Der zu analysierende Einfeldträger ist in Form eines Rechteckquerschnitts der Breite  $b=100\text{mm}$ , der Höhe  $h=180\text{mm}$  und der Länge  $l=3100\text{mm}$  ausgeführt.



**Abbildung 52: Aufbau des Simulationsmodells (Draufsicht)**

Die Lagerung des Palettenträgers wird derartig ausgeführt, dass alle Freiheitsgrade bis auf die Rotation um die Trägerlängsachse ( $u_{r,z}$ ) gesperrt werden. Die Knotenpunkte der Trägerstirnflächen sind gegenüber einem auf ihr liegenden Referenzpunkt eingeschränkt (Coupling). Letzterer ist mit einem sich außerhalb des Trägers befindlichen fixen Referenzpunkt über eine Torsionsfeder mit der Drehfederkonstante  $c_\phi=60\text{kNm/rad}$  (Annahme) verbunden. Auf diese Weise kann die Nachgiebigkeit um die Trägerachse im Modell berücksichtigt werden, welche bedingt durch die in vertikaler Richtung außermittige Anprallposition von Bedeutung ist. Die Sperrung der sonstigen Freiheitsgrade spiegelt die in Kapitel 3.6.3 beschriebene feste Einspannung des Trägers in Aussparungen der Steher wieder.

Für die Teleskopgabeln werden die translatorischen Freiheitsgrade in y- und in z-Richtung und für die darauf mittig liegende Europoolpalette lediglich in z-Richtung eingeschränkt. Aufgrund der Symmetrie des vorliegenden Problemfalls wird lediglich eine Hälfte des in Abbildung 52 dargestellten Aufbaus modelliert. In der Symmetrieebene des Querträgers wird eine Symmetrierandbedingung mit Normalenvektor in z-Richtung definiert. Zur Vernetzung des Simulationsmodells werden dreidimensionale Hexaederelemente mit 20 Knotenpunkten je Element und reduzierter Integration (C3D20R) verwendet. Weiterführend wird zwischen den Aufstandsflächen der Europoolpalette und den Teleskopgabeln eine Kontaktbedingung zur Modellierung des senkrechten und tangentialen Kontakts definiert. Die als Flächenkontakt (Surface-to-Surface) definierte Kontaktbedingung wird dabei in senkrechter Richtung als Hard Contact und in tangentialer Richtung durch Auswahl der Penalty-Methode mit einem Reibungskoeffizienten  $\mu=0,3$  nach Hübner festgelegt [Hüb-2010, S. 37].

In der Simulation werden zunächst die statischen Grundlasten simuliert, die den Ausgangszustand für die dynamische Simulation darstellen. Hierbei erfährt zum einen der Palettenträger die statischen Lasteinwirkungen durch die zwei eingelagerten Europoolpaletten und zum anderen wirkt auf die Teleskopgabeln die Gewichtskraft der darauf platzierten Europoolpalette (Masse 1000kg). Die Kraft kommt dabei aufgrund der im gesamten Modell wirkenden Gravitationsbeschleunigung zu Stande.

Das statische Simulationsergebnis wird im Anschluss über die Vorgabe eines Anfangszustands (Initial State) der dynamischen Simulation zum Zeitpunkt  $t=0$  zugewiesen. Neben den weiterhin wirkenden statischen Lasten werden den Teleskopgabeln und der Europoolpalette die Anfangsgeschwindigkeiten in Form eines Predefined Field zugewiesen. Infolge der Anordnung der beteiligten Komponenten treten im Laufe der dynamischen Simulation zusätzliche Kontaktbedingungen zwischen Teleskopgabeln bzw. Europoolpalette und Einfeldträger auf. Die beiden senkrechten Kontakte zwischen den genannten Komponenten werden dabei analog der in der statischen Simulation beschriebenen Kontaktbedingung zwischen Teleskopgabel und Europoolpalette festgelegt. Die dynamische Simulation des Anprallvorgangs wird für 150 Millisekunden durch ein implizites Integrationsverfahren im Step-Modul der Software ABAQUS realisiert.

#### Materialkennwerte

Basierend auf der DIN EN 1995-1-1 bestimmen sich die Materialkennwerte für den Palettenträger bestehend aus Fichtenbrettschichtholz mithilfe des charakteristischen Werts  $X_k$ , dem Modifizierungsbeiwert  $k_{mod}$  und dem Sicherheitsbeiwert  $\gamma_M$  [DIN-1995-1-1]:

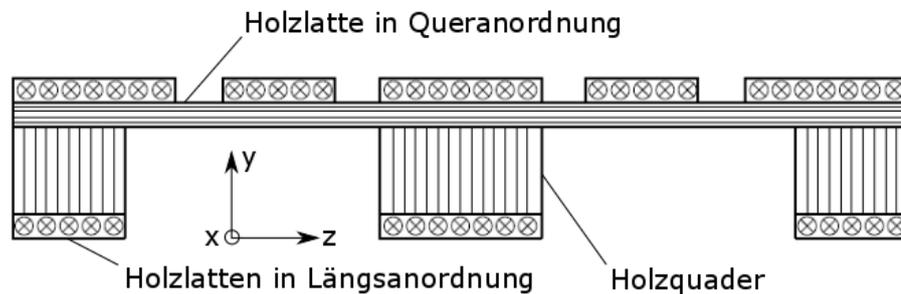
$$X_d = k_{mod} \frac{X_k}{\gamma_M}$$

Für das verwendete transversal-isotrope Materialmodell sind für beide Vorzugsrichtungen (parallel bzw. senkrecht zur Faser) der E-Modul  $E$  sowie der Schubmodul  $G$  nach vorhin dargestellter Gleichung zu bestimmen. Der Sicherheitsfaktor ermittelt sich aufgrund des vorliegenden Zusammenstoßes als außergewöhnliche Bemessungssituation zu  $\gamma_M=1,0$ . Für die Nutzung des Hochregals wird Nutzungsklasse 1 festgelegt, wodurch sich ein Modifizierungsbeiwert von  $k_{mod}=1,1$  ergibt. Die abschließend benötigten Werte für die charakteristischen Kennwerte  $X_k$  des verwendeten (homogenen) Brettschichtholzes der Klasse GL24h lassen sich ebenfalls aus der DIN EN 1995-1-1 entnehmen. Die Querkontraktionszahlen  $v$  werden aus der Literatur [Bod-1993, S. 712] durch Mittelwertbildung von einem orthotropen auf ein transversal-isotropes Materialmodell transferiert. Tabelle 6 gibt eine Übersicht der in der Simulation verwendeten Materialkennwerte für den Palettenträger.

**Tabelle 6: Übersicht Materialkennwerte Brettschichtholz**

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$E_R$ [MPa]	$E_T$ [MPa]	$E_L$ [MPa]	$\nu_{RT}$ [-]	$\nu_{RL}$ [-]	$\nu_{TL}$ [-]	$G_{RT}$ [MPa]	$G_{RL}$ [MPa]	$G_{TL}$ [MPa]
420	330	330	12650	0,5	0,0355	0,0355	71,5	715	715

Die gezeigten Werte werden näherungsweise auch für die Europoolpalette verwendet, welche ebenfalls aus Fichtenholz gefertigt wird. Allerdings werden hier verschiedene Faserrichtungen in unterschiedlichen Bereichen der Europoolpalette vorgegeben (vgl. Abbildung 53).



**Abbildung 53: Faserorientierung verschiedener Zonen der Europoolpalette**

Die Beschreibung des elastischen Materialmodells des für die Teleskopgabeln verwendeten Stahls S355 erfolgt aufgrund der isotropen Eigenschaftsverteilung über lediglich einen Elastizitätsmodul und eine Querkontraktionszahl, die in Tabelle 7 angegeben ist:

**Tabelle 7: Zusammenfassung der Materialkennwerte für Stahl**

$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	E [MPa]	$\nu$ [-]
7850	210 000	0,33

Zur lokalen Eingrenzung der Zonen mit plastischer Verformung bedarf es der Ermittlung der Grenzen elastischer Verformung von Brettschichtholz in Abhängigkeit verschiedener Lastfälle. Dies geschieht analog zur Berechnung der in Tabelle 6 festgelegten Parameter. Daraus resultieren folgende Grenzen:

- Druck parallel zur Faser:  $\sigma_{c,par} = -26,4 \text{ MPa}$
- Druck senkrecht zur Faser:  $\sigma_{c,sr} = -2,75 \text{ MPa}$
- Zug parallel zur Faser:  $\sigma_{t,par} = 21,12 \text{ MPa}$
- Zug senkrecht zur Faser:  $\sigma_{t,sr} = 0,55 \text{ MPa}$

### Simulationsergebnisse

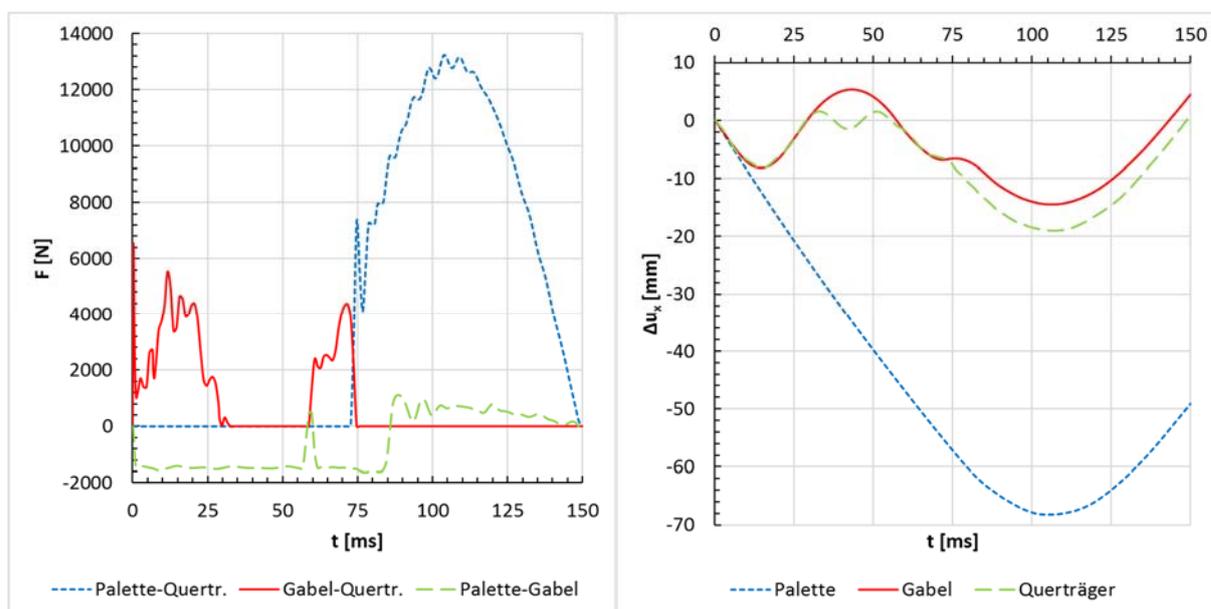
Die vorliegende geometrische Anordnung der mittig auf den Teleskopgabeln liegenden Europoolpalette mündet in das Auftreten zweier diskreter Stöße. Zur generellen Verdeutlichung der stattfindenden Phänomene zeigt Abbildung 54 den zeitlichen Verlauf zum einen der in der Kontaktfläche übertragenen Kraft der drei modellierten Kontaktbedingungen (vgl. Abbildung 54 (a)) und zum anderen die Verschiebung in x-Richtung  $u_x$  der beteiligten Komponenten (vgl. Abbildung 54 (b)). Aufgrund der Symmetrie des behandelten Lastfalls und der dargelegten Modellierung in Form der halben Geometrie sind die angegebenen Kontaktkräfte ebenso mit dem halben Gesamtwert angegeben. Für die Verschiebungen der Teleskopgabeln und der Europoolpalette in x-Richtung wird das arithmetische Mittel in der Stirnfläche und für den

Palettenträger das der Schnittkante zwischen Symmetrieebene und Trägervorderseite verwendet.

Zum Zeitpunkt  $t=0$  kollidieren die Teleskopgabeln mit dem Palettenträger. Aufgrund der freien Lauflänge  $\Delta x=50\text{mm}$  zwischen der Stirnseite der Europoolpalette und dem Palettenträger, kommt es aufgrund der Massenträgheit ersterer nach Überwindung der Haftreibung zu einer Relativbewegung gegenüber den Teleskopgabeln und einem schlussendlichen Anprall am Palettenträger ( $t=73\text{ms}$ ).

Der Anprall der Teleskopgabeln bzw. der der Europoolpalette führt zu Spannungskonzentrationen im Palettenträger aufgrund folgender Phänomene:

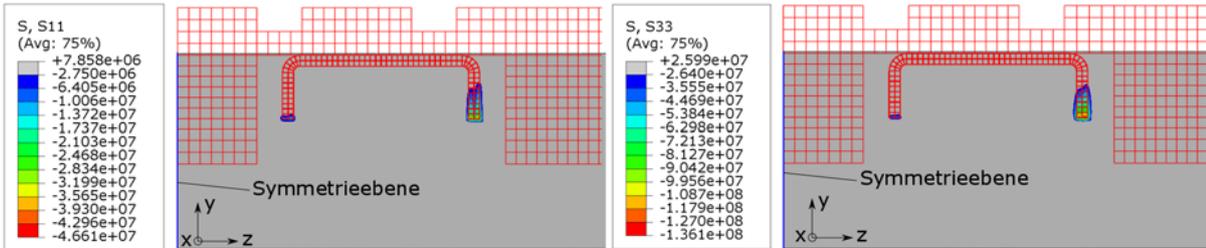
- erhöhte lokale Druck(normal-)spannungen  $\sigma_x$  in normaler Richtung der Kontaktfläche aufgrund der Kraftübertragung infolge des Anpralls der Teleskopgabeln bzw. der Europoolpalette
- erhöhte Druck- und Zug(normal-)spannungen  $\sigma_z$  infolge der Ausbauchung des Palettenträgers und des Biegemomentes in x-Richtung und einer daraus resultierenden Streckung und Stauchung der Fasern in z-Richtung
- erhöhte Schubspannungen  $\tau_{zx}$  aufgrund der Verdrehung des Trägers um seine Längsachse als Resultat des exzentrischen Kraftangriffs bei Anprall der Teleskopgabeln bzw. der Europoolpalette

(a) Kontaktkraft  $F$ (b) Verschiebung  $u_x$ 

**Abbildung 54: zeitlicher Verlauf von Kraft und Verschiebung während des Anprallvorgangs**

Abgeleitet vom zeitlichen Verlauf der Stoßkraft und der kraftübertragenden Kontaktfläche werden für den Anprall der Teleskopgabeln  $t=12\text{ms}$  und für den der Europoolpalette  $t=109\text{ms}$  als Zeitpunkt maximaler auftretender Spannungen identifiziert. Zu diesen beiden Zeiten werden im Folgenden die Normalspannungen in x- ( $\sigma_x$ ) und z-Richtung ( $\sigma_z$ ) näher betrachtet. Infolge der Kollision der Teleskopgabeln mit dem Palettenträger entstehen gemäß Abbildung

55 lokale Plastifizierungszonen, in denen die Druckfließgrenzen quer (vgl. Abbildung 55 (a)) bzw. parallel zur Faser (vgl. Abbildung 55 (b)) überschritten werden. Aufgrund der in Richtung Trägermitte steigenden Ausbauchung des Palettenträgers resultiert am von der Symmetrieebene aus gesehen äußeren Steg der Teleskopgabeln eine größere plastische Deformation als am inneren Steg, welche infolge der Verdrehung des Trägers in dessen untere Bereiche verschoben ist. Das gleiche Verhalten ist auch beim Anprall der Europoolpalette zu beobachten.

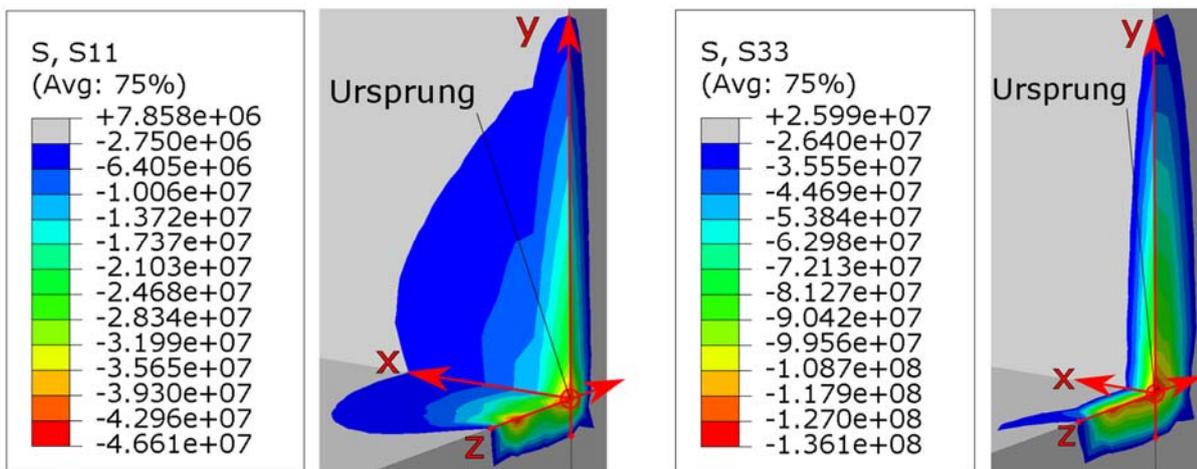


(a) Normalspannung  $\sigma_x$

(b) Normalspannung  $\sigma_z$

**Abbildung 55: Lokale plastische Deformationszonen zum Zeitpunkt  $t = 12\text{ms}$**

Der Einfluss dieser Plastifizierungsbereiche bestimmt sich maßgeblich durch deren Ausdehnung in der Querschnittsfläche (x-y-Ebene) des Trägers (vgl. Abbildung 56).



(a) Normalspannung  $\sigma_x$

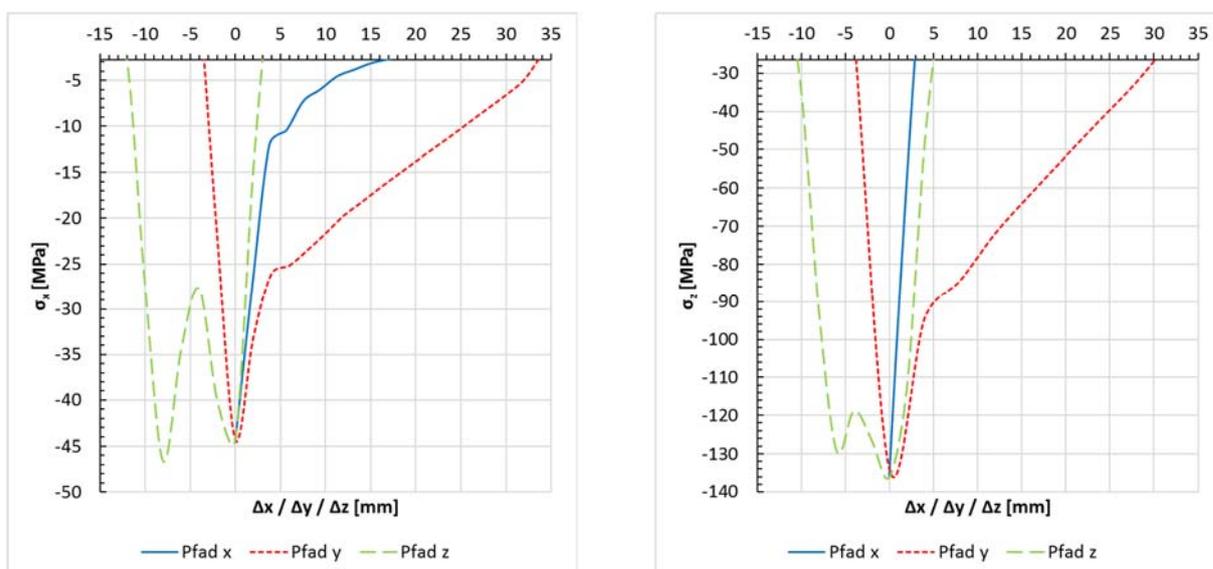
(b) Normalspannung  $\sigma_z$

**Abbildung 56: Schnittansicht und gewählte Spannungspfade in der lokalen Plastifizierungszone ( $t = 12\text{ms}$ )**

Neben der gezeigten qualitativen Auswertung erfolgt eine quantitative Auswertung der Spannungen innerhalb der Plastifizierungszone im Anprallbereich gemäß illustrierter Spannungspfade, wobei der gewählte Ursprung sich im Schnittpunkt der drei Achsen befindet. Abbildung 57 veranschaulicht den Verlauf der Normalspannungen in x- (vgl. Abbildung 57 (a)) und z-Richtung (vgl. Abbildung 57 (b)) innerhalb der Plastifizierungszone für den Anprall der Teleskopgabeln ( $t = 12\text{ms}$ ). Das Auftreten der Spannungskonzentrationen in x-Richtung ist hierbei ein direktes Resultat der durch den Stoß übertragenden Druckkraft auf den Träger. Als Konsequenz der dadurch verursachten Elementstauchung erfolgt über die Kopplung zur Querdehnung und Volumenkonstanz eine Ausdehnung in z-Richtung, die jedoch von Seiten der

Nachbarzellen unterbunden wird und somit in z-Richtung lokal überhöhte Druckspannungen induziert.

Es ist zu erkennen, dass die auftretenden Normalspannungen in z-Richtung mit maximalen Werten  $\sigma_z = -136,1 \text{ MPa}$  deutlich größer ausfallen als in x-Richtung ( $\sigma_x = -46,6 \text{ MPa}$ ). Darüber hinaus lässt sich ableiten, dass die Ausdehnung der plastischen Deformationszone durch Überschreiten der Elastizitätsgrenze  $\sigma_{c,sr}$  aufgrund der geringeren Festigkeit quer zur Faser größer ausfällt als parallel zur Faser. Daraus resultiert, dass die Dimension der Deformationszone in den Raumrichtungen y und z größer ist als in x-Richtung. Unter der Annahme, dass plastifizierte Querschnittsbereiche nicht mehr zur globalen Tragfähigkeit des Trägers beitragen, ergibt sich eine effektive Querschnittminderung von 2,5 Prozent.



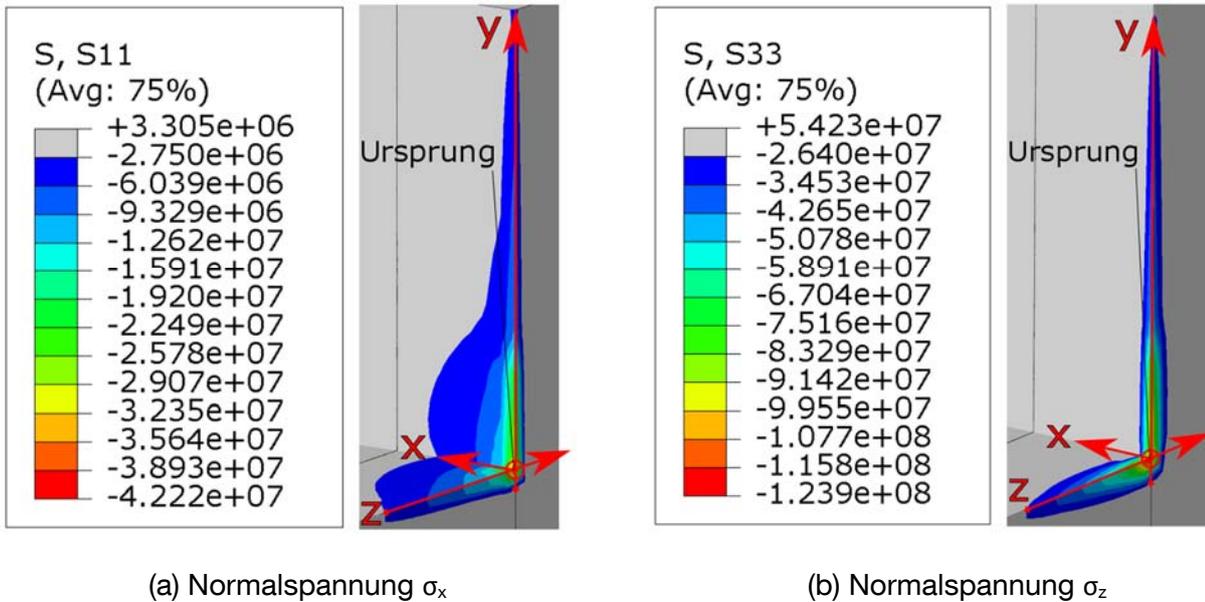
(a) Normalspannung  $\sigma_x$

(b) Normalspannung  $\sigma_z$

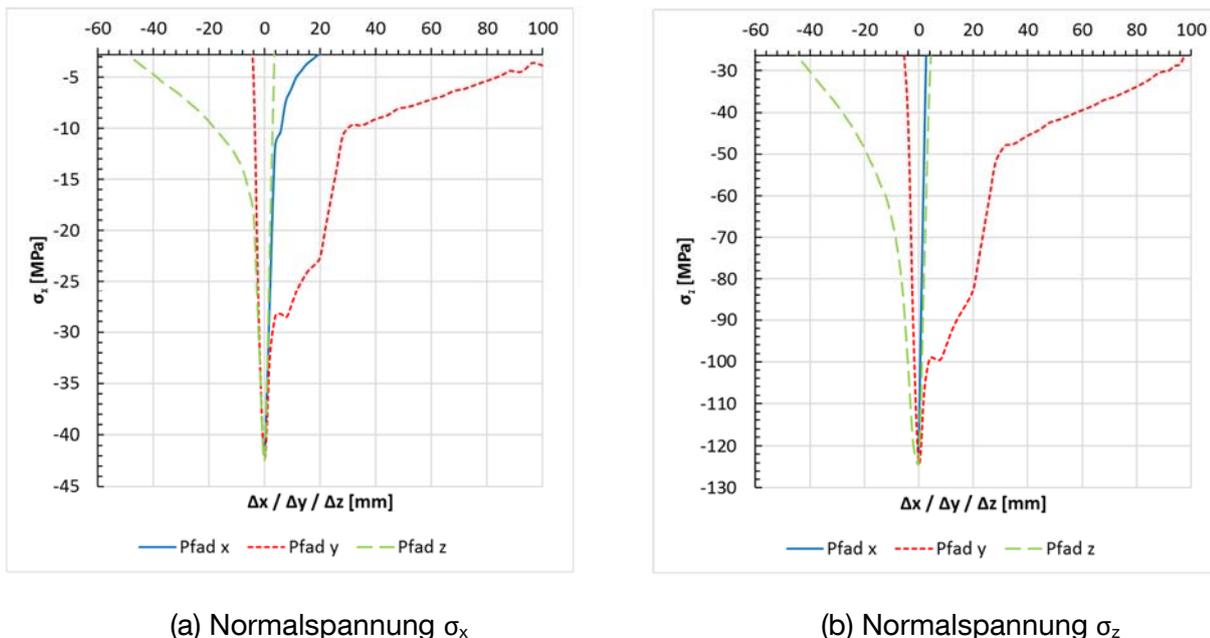
**Abbildung 57: Spannungsverlauf entlang ausgewählter Pfade in der lokalen Plastifizierungszone ( $t=12 \text{ ms}$ )**

Im Anschluss wird nun der Anprall der Europoolpalette zum Zeitpunkt maximaler Kontaktkraft ( $t=109 \text{ ms}$ ) betrachtet. Trotz der größeren kraftübertragenden Kontaktfläche entsteht aufgrund der höheren kinetischen Energie der Europoolpalette eine größere Plastifizierungszone als im zuvor betrachteten Anprall der Teleskopgabeln.

Um auch hier Aussagen bezüglich einer eingeschränkten Tragfähigkeit treffen zu können, werden wieder die Spannungspfade entlang der Plastifizierungszone gemäß Abbildung 58 ausgewertet. Die visualisierten Verläufe der Normalspannungen in x- und z-Richtung sind dabei in Abbildung 59 (a) und (b) gegeben. Es zeigt sich abermals, dass die Plastifizierungsausdehnung in x-Richtung wesentlich kleiner ist als in y- und z-Richtung. Die hohen Spannungsgradienten sorgen nun dafür, dass die maximalen Spannungen von  $\sigma_x = -42,2 \text{ MPa}$  und  $\sigma_z = -123,9 \text{ MPa}$  auf sehr kleine Bereiche beschränkt sind. Der im Gegensatz zum Anprall der Teleskopgabeln stark ausgedehnte plastifizierte Bereich ist damit zum Großteil von einem Bereich nahezu linearen Spannungsabfalls mit  $|\sigma_x| \leq 10 \text{ MPa}$  und  $|\sigma_z| \leq 50 \text{ MPa}$  beherrscht. Anhand der geometrischen Abmessungen ergibt sich in Analogie zum Anprall der Teleskopgabeln eine effektive Querschnittminderung von 3,5 Prozent.



**Abbildung 58: Schnittansicht und gewählte Spannungspfade in der lokalen Plastifizierungszone (t = 109ms)**



**Abbildung 59: Spannungsverlauf entlang ausgewählter Pfade in der lokalen Plastifizierungszone (t = 109ms)**

Neben den lokalen plastischen Deformationen ruft der Anprall der Europoolpalette ebenso eine globale Plastifizierung in der Nähe der Einspannung an der Trägerstirnfläche aus. Die dort ermittelten Spannungen sind eine Folge der strikten numerischen Formulierung der Randbedingungen und daher in der Realität nicht zu erwarten. Ansonsten treten während der zwei Anprallvorgänge keine weiteren globalen Plastifizierungen auf.

*Zusammenfassung und Fazit*

Mit Hilfe der Finite-Elemente-Software ABAQUS wurde der Anprall beladener (Europoolpalette 1000kg) Teleskopgabeln an einem Palettenträger aus Brettschichtholz simuliert. Dabei

zeigte sich, dass bedingt durch das Verrutschen der Palette auf den Teleskopgabeln zwei diskrete Zusammenstöße mit dem Träger entstehen. Die beim Anprall auftretenden Spannungen wurden ausgewertet und die Zonen plastischer Verformungen bestimmt. Unter der Annahme, dass solche Bereiche nicht mehr zu Tragfähigkeit beitragen, konnten Querschnittsminderungen des Palettenträgerquerschnitts abgeschätzt werden. Diese betragen maximal 3,5 Prozent und können daher in Anbetracht der für die Bemessung des Palettenträgers verwendeten Sicherheitsbeiwerte vernachlässigt werden. Es ist somit während des Betriebs auch bei Fehlfunktionen der Regalbedienung von keiner nennenswerten Schädigung der Palettenträger auszugehen.

#### **4.5.6 Gebäudetechnik**

Hochregallager stellen meist ein sehr großes Gebäude mit einer beträchtlichen Grund- und Fassadenfläche dar. In ihrem Inneren befinden sich auf engstem Raum zahlreiche Lagergüter. Zur Gewährleistung eines definierten Raumklimas, welches für die Lagerung von gewissen Gütern benötigt wird (siehe Kapitel 5), werden Heizungs- und Kühlungsanlagen sowie in manchen Fällen auch Be- und Entfeuchtungsanlagen verwendet. Diese Gebäudetechnik hat die Aufgabe die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit im Vergleich zur Außenluft so konstant wie möglich zu halten. Die Außenatmosphäre ändert sich nicht nur im Laufe der Jahreszeiten, sondern auch über den Tages- und Nachtzyklus. Dabei können starke Temperatur- sowie Feuchteunterschiede auftreten, welche sich durch die Gebäudehülle hindurch auch auf das Klima im Lager auswirken. Diesen Änderungen wirkt nicht nur die Gebäudetechnik entgegen, sondern auch alle im Lager befindlichen Stoffe, denn auch diese müssen den Temperatur- bzw. Luftfeuchteänderung folgen. Die größte Masse in einem Hochregallager besitzen die Lagergüter. Diese verfügen je nach Material über gewisse Eigenschaften (z. B. Wärmekapazität, Wasseraufnahme), welche das Raumklima positiv oder negativ beeinflussen können. Auch die Regalkonstruktion besitzt eine Masse sowie Eigenschaften, welche stark vom verwendeten Werkstoff abhängen.

In Kapitel 3.5.4 wurden bereits die Werkstoffeigenschaften von Stahl und Holz gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass die Fähigkeiten bezüglich Wärme- und Feuchteaufnahme bzw. Speicherung bei den beiden Baustoffen unterschiedlich sind. Holz besitzt eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit, eine vergleichsweise hohe Wärmekapazität und ist hygroskopisch. Stahl besitzt gegensätzliche Eigenschaften.

Von zwei Holz-Hochregal-Betreibern wird vermutet, dass sich die Holzregalkonstruktion als eine Art Wärme- und Feuchtespeicher positiv auf das Lagerklima auswirkt, wodurch die Gebäudetechnik entlastet wird. Trifft dies zu, so wäre ein Downsizing der Anlagen oder zumindest eine Reduktion der Betriebsdauer möglich. Zur Überprüfung der Vermutung müssen Wärme- sowie Feuchtesimulationen durchgeführt werden, welche jedoch nicht Bestandteil dieses Projekts sind. Ein möglicher Einfluss des Holzregals auf das Raumklima kann daher zum momentanen Zeitpunkt weder völlig ausgeschlossen noch bestätigt werden.

#### **4.5.7 Inspektion**

Auch für Hochregale aus Holz gelten die in Kapitel 3.3.3 beschriebenen Vorschriften. Sie sind Arbeitsmittel und unterliegen Schäden verursachenden Einflüssen, d. h. sie müssen nach den

Vorgaben der Betriebssicherheitsverordnung regelmäßig innerhalb bestimmter Fristen von einer befähigten Person überprüft werden. Die Fristen sowie der Umfang der Prüfung müssen vom Arbeitgeber festgelegt werden, wobei dieser sich am Stand der Technik zu orientieren hat. Leider gibt es für Hochregale aus Holz dazu keine passenden Normen, Richtlinien oder Empfehlungen der Hersteller. Die für Stahlregale verwendete DIN EN 15635 ist grundsätzlich nur für Regale aus dem Werkstoff Stahl gültig.

Bei den bestehenden Holz-Hochregalen führen die Hersteller bisher aus eigenem Interesse jährliche Inspektionen der von ihnen gebauten Regale durch. Im Zuge dessen wird das gesamte Regal vom Boden aus auf etwaige Schäden oder unzulässige Verformungen untersucht. Für die Betreiber entstehen dabei derzeit keine Kosten.

Eine solche Vorgehensweise mag zum momentanen Zeitpunkt funktionieren, da die Anzahl der bestehenden Holz-Hochregale mit 8 Stück noch überschaubar ist und die Hersteller sehr an Erfahrungswerten aus dem Betrieb interessiert sind. Mit Erhöhung der Anlagenzahl wird sich dies wahrscheinlich ändern. Es ist zu erwarten, dass der Aufwand für die Hersteller bald zu groß wird. Die Anforderungen einer befähigten Person nach TRBS 1203 (einschlägige Berufsausbildung, Erfahrung mit Arbeitsmittel usw.) zur Inspektion von Holz-Hochregalen besitzen derzeit nur Mitarbeiter der Hersteller. Stahlregalinspektoren können nicht eingesetzt werden, da sie keine entsprechende Erfahrung mit Hochregalen aus Holz aufweisen. Im Sinne der Betreiber, welche rechtlich in der Pflicht stehen ihre Hochregale überprüfen zu lassen, ist es daher ratsam eine entgeltliche Inspektion mit den Herstellern durchzuführen. Um in Falle eines Vorfalls mit Personenschaden nicht angreifbar zu sein, sollte die derzeitige Vorgehensweise bei der Inspektion zudem überarbeitet bzw. an die von Stahl-Hochregalen angelehnt werden.

Die Beschränkung der DIN EN 15635 auf den Werkstoff Stahl liegt in den Angaben zur Schadensbeurteilung begründet, welche nur für Stahlregale zu verwenden sind. Die für die Inspektion von Hochregalen definierten Arbeitsumfänge und Fristen können jedoch unabhängig vom Werkstoff gesehen werden (vgl. Kapitel 3.4.4). Aus diesem Grund können diese Angaben auch für Hochregale aus Holz empfohlen werden. Wichtig ist dabei vor allem die schriftliche Dokumentation etwaiger Störungen sowie deren Auswirkung auf die Regalkonstruktion durch den Betreiber. So können diese Bereiche später gezielt überprüft werden. Auch wenn nach DIN EN 15635 jährlich nur 20% des Lagers begutachtet werden müssen, sollte vom Zeitintervall der jährlichen Inspektion nicht abgewichen werden (z. B. 100% alle 5 Jahre), da dies sonst die Zeit bis ein Schaden entdeckt wird erhöht.

### **4.5.8 Sachversicherung**

In Hochregalen werden große Mengen an Gütern gelagert. Sollten die Güter sowie das Lager selbst beschädigt oder zerstört werden, so kann dies große ökonomische Auswirkungen auf das betreibende Unternehmen haben. Aus diesem Grund werden Hochregale und vor allem deren Inhalt in der Regel versichert.

Die Höhe der Versicherungsprämie hängt dabei von der Risikoeinschätzung der jeweiligen Versicherung ab. Dabei werden unter anderem Aspekte wie die Lagerhöhe, die Lagergüter, die Umgebung des Lagers sowie die Brandschutzmaßnahmen berücksichtigt. Seitens der

VdS Schadenverhütungs GmbH wird bei gesprinklerten Holz-Hochregalen von keiner erhöhten Brandgefahr und somit von keiner höheren Prämie ausgegangen. Dabei handelt es sich wie im Bereich der Brandschutzeinrichtungen jedoch nur um eine Empfehlung, die Risikobewertung obliegt der jeweiligen Versicherung. [Rus-2015]

Von den zwei kontaktierten Versicherungen ist keine zu einer allgemeinen Aussage bereit. Es wird darauf verwiesen, dass die Versicherungsprämie je nach Objekt festgelegt wird. Für Gebäude mit brennbarem Tragwerk werden aber im Normalfall Zuschläge fällig. Ein Rabatt wäre allgemein für Tragwerke mit Feuerwiderstandsdauer F30 möglich.

Somit kann dieser mögliche Unterschied zwischen Hochregalen aus Holz und Stahl im Rahmen dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden.

### 4.6 Systemgrenze des Forschungsprojekts

*Christopher Ludwig, Peter Glaser*

#### 4.6.1 Faktoren und Ziele der Systemgrenzendefinition

In diesem Kapitel wird der Rahmen für die weiteren Arbeiten gesetzt. Es wird festgelegt welche Bauweisen weiter untersucht werden und für welche Ladeeinheiten und Bedienarten diese ausgelegt sein sollen.

In der zur Verfügung stehenden Projektlaufzeit können nicht alle Arten von Regalbauweisen, Ladeeinheiten und Regalbedienungen näher analysiert werden. Ziel ist es Hochregale aus Holz für einen möglichst großen Anwenderkreis nutzbar zu machen. Aus diesem Grund muss eine sinnvolle Auswahl an näher zu untersuchenden Typen getroffen werden. Die Ergebnisse der Marktanalyse stellen dafür eine gute Entscheidungsgrundlage dar. Diese beinhalten Informationen zu gebauten Hochregalen der letzten Jahre und sollen so eine objektive und praxisrelevante Wahl gewährleisten.

#### 4.6.2 Definition der Systemgrenze

Anhand der zur Verfügung stehenden Informationen wird die Systemgrenze wie folgt festgelegt. Es werden für die weiteren Analysen Hochregale in Silobauweise mit automatischer Bedienung durch Regalbediengeräte betrachtet, da diese dem Trend zu immer größeren und vor allem höheren Lagern gerecht werden. In den Hochregalen sollen Ladeeinheiten mit einer Gesamtmasse von einer Tonne gelagert werden. Als Ladehilfsmittel wird die Europoolpalette eingesetzt. Diese Merkmale der Ladeeinheiten sind in Industrie und Handel derzeit am weitesten verbreitet.

Für die Regalkonstruktion wird eine bei Gebäuden übliche Nutzungsdauer von 50 Jahren angenommen.

Betrachtungsgegenstand ist grundsätzlich nur die Hochregalkonstruktion an sich. Mögliche Einflüsse auf die übrigen Komponenten des Hochregallagergebäudes infolge der Holzbauweise wurden bereits in Kapitel 4.5 beleuchtet und als nicht signifikant identifiziert. Die umgebenden Komponenten wie zum Beispiel die Bodenplatte, Gebäudehülle, Förder-, Brandschutz- und Gebäudetechnik werden daher nicht näher untersucht, weil von diesen angenommen wird unabhängig vom verwendeten Regalwerkstoff zu sein. Einwirkungen des Hochregallagergebäudes auf die Regalkonstruktion müssen jedoch bei der gewählten Silobauweise berücksichtigt werden. Hierzu zählen Lasten aus Wind, Schnee, Fassade, Dach, Regalbedienung und der Brandschutzanlage.

Mögliche Unterschiede während des Betriebs von Hochregalen aus Holz und Stahl wurden ebenfalls in Kapitel 4.5 untersucht. Da bezüglich der Sachversicherung derzeit keine endgültigen Ergebnisse vorliegen, wird diese als gleich angenommen und daher zusammen mit der Regalinspektion bei den folgenden Arbeiten vernachlässigt. Die festgestellten Unterschiede bei den betrachteten Zeiträumen (Planung, Montage usw.) sowie der Robustheit werden berücksichtigt.

Eine Planung alternativer, von dieser Festlegung abweichender Konstruktionen ist durchaus möglich. Die erwähnten Normen und Richtlinien für die Auslegung von Hochregallagern aus

Stahl können z. B. mit den erforderlichen Maßangaben ebenfalls für die Planung von Hochregallagern aus Holz herangezogen werden. In Abweichung zu den weiteren Betrachtungen sind dann die Besonderheiten der entsprechenden Läger (z. B. mit manueller Regalbedienung) zu berücksichtigen.



## 5 Mögliche Einsatzszenarien für Holz-Hochregallager

*Christopher Ludwig*

### 5.1 Motivation und Vorgehensweise

Der nachwachsende Rohstoff Holz besitzt besondere Vorteile, welche in entsprechenden Umgebungen genutzt werden können. Neben den Stärken bringt Holz aber auch Schwachstellen mit, die ebenfalls zu berücksichtigen sind. Ziel ist es mögliche Einsatzszenarien aufzuzeigen und daraus jene, die speziell für Holzwerkstoffe vorteilhaft sind, heraus zu filtern. Durch die neuen Einsatzszenarien soll die kommerzielle Nutzbarkeit von Holz-Hochregalen weiter gesteigert werden.

Zu diesem Zweck werden zunächst allgemeine Einsatzgrenzen der beiden Regalwerkstoffe Holz und Stahl untersucht. Dabei spielen Faktoren wie zum Beispiel die relative Luftfeuchte sowie korrosive Einflüsse eine wichtige Rolle. Für einen Einsatz von Holz in hygienisch sensiblen Bereichen muss der Werkstoff gewissen Hygieneanforderungen genügen. Diese werden anhand aktueller Forschungsergebnisse und geltender Vorschriften überprüft. Holz hat eine hohe chemische Beständigkeit, daher soll auch ein Einsatz zur Lagerung von Gefahrstoffen geprüft werden. Nach der Ermittlung der allgemeinen Werkstoffgrenzen werden einige übliche Lagergüter und Atmosphären nach ihrer klimatischen und chemischen Beschaffenheit charakterisiert. Die Auswahl der Einsatzszenarien erfolgt dabei nach den Ergebnissen aus Kapitel 4.2.6. Im letzten Schritt werden die gewählten Szenarien mit den zuvor ermittelten Werkstoffgrenzen abgeglichen, um so eine Aussage über mögliche und vor allem vorteilhafte Szenarien treffen zu können. Lagergüter und Atmosphären, welche hier nicht berücksichtigt werden, können von Anwendern mit den Informationen der Werkstoffgrenzen selbst verglichen und bewertet werden.

Alle Betrachtungen beschränken sich dabei auf den Innenbereich von Gebäuden, da Hochregalkonstruktionen vollständig von einer Gebäudehülle umgeben sind und daher nicht direkt der Außenatmosphäre ausgesetzt sind.

### 5.2 Einsatzgrenzen der Regalwerkstoffe

Bevor nun auf die einzelnen Grenzen der Werkstoffe eingegangen wird, müssen mögliche Schädigungs- bzw. Schutzarten diskutiert werden. Aufgrund der zu erwartenden negativen ökologischen Auswirkungen ist ein chemischer Holzschutz nicht Teil der Betrachtungen. Es wird somit nur unbehandeltes Holz eingesetzt. Bei Stahlregalen wird Baustahl (hauptsächlich S350GD nach [DIN-10346]) sowohl unbehandelt als auch feuerverzinkt eingesetzt. Zur Aufbringung der Feuerverzinkung werden zwei verschiedene Verfahren verwendet: Band- und Stückverzinken. Beim Bandverzinken wird das Stahlblech bereits im Stahlwerk durch ein Zinkschmelzebad gezogen, wodurch Schichtdicken von 20-40 Mikrometer erzeugt werden [Sch-2014b]. Das Stahlband wird anschließend während der Kaltumformung gestanzt bzw. gelocht, jedoch zieht das Stanzwerkzeug eine feine Zinkschicht bis über die Schnittfläche, weshalb dann auch diese von Zink bedeckt ist. Beim Stückverzinken werden einzelne fertig bearbeitete Bauteile in heiße Zinkschmelze getaucht, wodurch hohe Schichtdicken von 50 bis 150 Mikrometer erreicht werden [Bru-2011]. Da Bandverzinken ein kontinuierlicher sowie aufwandsärmerer Vorgang ist und die erzeugten Schichtdicken meist ausreichen, wird dieses

Verfahren bevorzugt bei der Herstellung von Stahlregalen verwendet [Sch-2014b]. Ob verzinkt wird und welches Verfahren dafür angewandt wird, hängt von der zu erwartenden Belastung im Betrieb ab. Ein korrosiver Abtrag der Werkstoffoberfläche ist bei den dünnen und sehr stark optimierten Stahlprofilen auf jeden Fall auszuschließen. Bei Holzbauteilen kann eine Schädigung erlaubt werden, wenn diese durch eine entsprechende Überdimensionierung berücksichtigt wird. Eine solche Überdimensionierung ist nur bei den Holzwerkstoffen sinnvoll, da hier vergleichsweise geringe Querschnittszunahmen nötig sind. Auf die unterschiedlichen Schädigungsarten wird nun im Folgenden eingegangen.

### 5.2.1 Mechanische Zerstörung

Eine mechanische Zerstörung durch statische oder dynamische Lasten ist sowohl bei Holz als auch bei Stahl möglich. Diese Art der Schädigung kann jedoch im Normalbetrieb ausgeschlossen werden, da die Konstruktion und Berechnung der Regale nach aktuell gültigen Normen und Richtlinien durchgeführt wird. Außergewöhnliche Lasten werden in diesem Kapitel nicht berücksichtigt. Ein Verschleiß bzw. Abrieb ist bedingt durch die hebende Lastaufnahme bei der Bedienung nicht zu erwarten.

### 5.2.2 Temperatur

#### *Holz*

Steigende Temperatur führt bei Holz bis ca. 100°C zu einer Trocknung und anschließend zu einer chemischen Zersetzung [Deu-2009, S. 94f.]. Im Bereich von tiefen Temperaturen (<0°C) wird ungesättigtes Holz nicht geschädigt, es kommt sogar zu einer Erhöhung der Zugfestigkeit und des E-Moduls [Gei-1976, S. 73 ff.].

#### *Stahl*

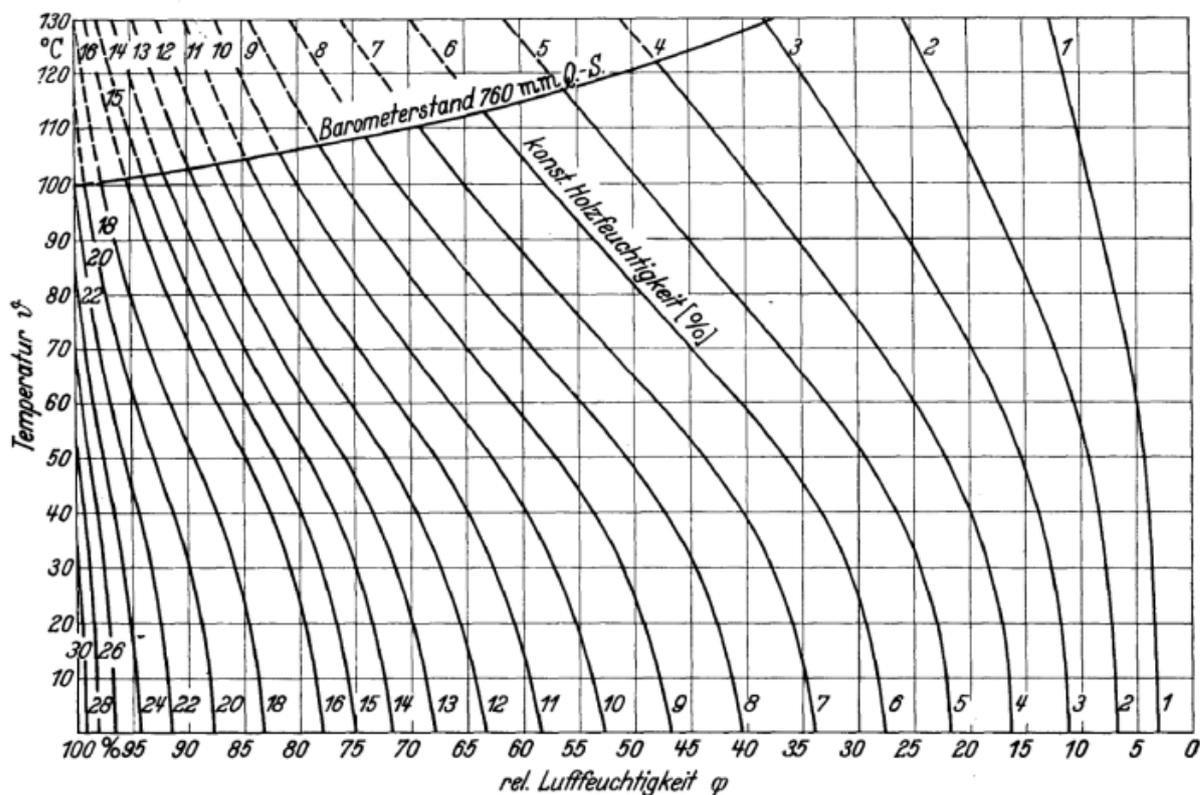
Bei Stahl tritt bei höheren Temperaturen keine Schädigung im eigentlichen Sinn auf, sondern es beginnen Vorgänge, welche die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen. Nach der DIN EN 1993-1-2 müssen Abminderungsfaktoren ab 100°C berücksichtigt werden [DIN-1993-1-2]. Stähle unterliegen bei tiefen Temperaturen einer zunehmenden Versprödung (Kaltversprödung). Handelsübliche Baustähle wie zum Beispiel S355J2 können daher nur bis -20°C eingesetzt werden [DIN-10025-2]. Mit vergüteten Feinkornbaustählen (z. B. S460QL1) sind Temperaturen bis -60°C möglich [DIN-10025-6].

### 5.2.3 Feuchtigkeit

#### *Holz*

Wie bereits in Kapitel 3.5 erwähnt, spielt Feuchtigkeit für den Werkstoff Holz eine außerordentlich wichtige Rolle, da die mechanischen Eigenschaften, das Volumen sowie biologische Einflüsse davon abhängen. Die Holzfeuchte wird im verbauten Zustand von der umgebenden relativen Luftfeuchte sowie Temperatur bestimmt. Die relevanten Schädigungen werden durch feuchteabhängige Effekte hervorgerufen und in den nächsten Kapiteln erläutert. In der DIN EN 1995-1-1 wird Holz bezüglich der Feuchtigkeit in drei Nutzungsklassen NKL eingeteilt [DIN-1995-1-1]. NKL 1 entspricht einer rel. Luftfeuchte <65% (Holzfeuchte 5-15%) und NKL

2 von <85% (Holzfeuchte 10 bis 20%). Hölzer bei höheren Luftfeuchten fallen in Nutzungs-kategorie 3. Die sich einstellende Holzfeuchte bei gegebener Temperatur und Luftfeuchte kann anhand Abbildung 60 bestimmt werden.



**Abbildung 60: Hygroskopische Isothermen für Fichtenholz im Bereich 0°C bis 130°C [Kol-1951, S. 378]**

### Stahl

Eine völlig andere Situation ist beim Werkstoff Stahl vorherrschend. Hier ist Feuchtigkeit in Verbindung mit Sauerstoff für die Oxidation des Metalls verantwortlich. Diese Schädigungsform wird auch elektrochemische Korrosion oder kurz „Rost“ genannt. Nach den Vorgaben der DIN EN 1993-1-1 sind Tragwerke erst ab einer relativen Luftfeuchte von 80% bei über 0°C vor Korrosion zu schützen [DIN-1993-1-1]. In der Praxis werden Hochregale jedoch bereits ab 60% relativer Luftfeuchte geschützt, da man oberflächliche Korrosionserscheinungen vermeiden möchte [Sch-2014b]. Bezüglich eines beschichtenden Korrosionsschutzes wird vom Eurocode 3 auf die DIN EN ISO 12944-1 verwiesen [DIN-12944-1]. Diese definiert 6 Korrosivitätskategorien für atmosphärische Umgebungsbedingungen im Innen- und Außenbereich [DIN-12944-2]. Tabelle 8 zeigt einen Überblick der Kategorien sowie entsprechende Umgebungen im Innenbereich.

**Tabelle 8: Korrosivitätskategorie für atmosphärische Umgebungsbedingungen und Beispiele für typische Umgebungen, in Anlehnung an [DIN-12944-2]**

Korrosivitätskategorie	Dickenverlust <b>unlegierter Stahl</b> [µm] im ersten Jahr	Dickenverlust <b>Zink</b> [µm] im ersten Jahr	Typische Umgebungen im Innenbereich
C1	≤ 1,3	≤ 0,1	Geheizte Gebäude mit neutralen Atmosphären, z. B. Büros, Läden, Schulen, Hotels.
C2	> 1,3 bis 25	>0,1 bis 0,7	Ungeheizte Gebäude, wo Kondensation auftreten kann, z. B. Lager, Sport-hallen.
C3	>25 bis 50	>0,7 bis 2,1	Produktionsräume mit hoher Feuchte und etwas Luftverunreinigung, z. B. Anlagen zur Lebensmittelherstellung, Wäschereien, Brauereien, Molke-reien.
C4	>50 bis 80	>2,1 bis 4,2	Chemieanlagen, Schwimmbäder, Bootschuppen über Meerwasser.
C5-I (Industrie)	>80 bis 200	>4,2 bis 8,4	Gebäude oder Bereiche mit nahezu ständiger Kondensation und mit starker Verunreinigung.
C5-M (Meer)	>80 bis 200	>4,2 bis 8,4	Gebäude oder Bereiche mit nahezu ständiger Kondensation und mit starker Verunreinigung.

Bei der atmosphärischen Korrosion im Innenbereich sind vor allem die relative Luftfeuchte, lokale Befeuchtung bzw. Kondensation sowie Verunreinigungen (z. B. Chlor-/Schwefel-/Stickstoffverbindungen) ausschlaggebend. Zur Ermittlung der vorherrschenden Korrosivitätskategorie wird die Auslagerung von Standardproben über den Zeitraum von einem Jahr empfohlen. Die Auslagerung innerhalb einer kürzeren Zeitspanne mit anschließender Hochrechnung ist nicht erlaubt. Sollte die Verwendung von Standardproben nicht möglich sein, so ist auch eine Schätzung auf Basis der Angaben in Tabelle 8 zulässig. [DIN-12944-2]

Die Anwendung der Dosis-Wirkung-Funktion zur Abschätzung der Korrosivitätskategorie nach DIN EN ISO 9223 ist nur für Korrosion im Außenbereich bzw. Freien möglich. [DIN-9223]

Die in Tabelle 8 angegebenen Dickenverluste dürfen für Langzeitbetrachtungen nicht einfach extrapoliert werden, da kein linearer Fortschritt zu erwarten ist. Eine Hochrechnung mittels der in DIN EN ISO 9224 angegebenen Exponentialfunktion ist nur für Korrosion im Außenbereich möglich [DIN-9224]. Für den Innenbereich ist normativ keine solche Abschätzungsformel definiert. Nach den Forschungen von Corvo et al. sind im Innenbereich von Gebäuden Staubablagerungen für signifikant höhere Korrosionsgeschwindigkeiten als bei vergleichbaren Bedingungen im Außenbereich verantwortlich [Cor-2007]. Verantwortlich dafür ist die Erhöhung der Leitfähigkeit der Feuchtigkeit durch Staubpartikel nach längerer Auslagerung [DIN-11844-1]. Die in der Veröffentlichung von Corvo et al. entwickelte Gleichung baut auf der genannten Exponentialfunktion auf und soll damit eine genauere Abschätzung liefern. Jedoch kann diese Methode wegen der Vielzahl an zu ermittelnden Exponenten als nicht praktikabel eingestuft werden. Somit ist eine Aussage zu den zu erwartenden Langzeitfolgen einer atmosphärischen Korrosion von unbehandeltem bzw. verzinktem Baustahl im Innenbereich auf Basis der Literatur nur sehr aufwendig möglich.

Nach Angaben der DIN EN ISO 12944-5 ist für unbehandelten Stahl maximal die Korrosivitätskategorie C1 zulässig [DIN-12944-5]. Bei höheren Kategorien muss ein entsprechender Korrosionsschutz vorgesehen werden. Für verzinkten Stahl kann nach Rücksprache mit einem Sachverständigen für Korrosionsschutz folgende Empfehlung gegeben werden. Im Hinblick auf die Abtragsraten in Tabelle 8 und einer Nutzungsdauer von 50 Jahren wird davon ausgegangen, dass bandverzinkter Stahl (Schichtdicke 20-40µm) maximal bis Korrosivitätskategorie C2 und stückverzinkter Stahl (Schichtdicke 120-150 µm) maximal bis Kategorie C4 eingesetzt werden sollte.

### 5.2.4 Biologische Einflüsse

#### *Holz*

Unter biologischen Einflüssen versteht man den Befall durch Pilze oder Insekten. Diese Schädigungsformen hängen von der Feuchtigkeit ab und treten erst ab einer gewissen Holzfeuchte sowie einer Temperatur von über 0°C auf. So ist bei technisch getrockneten Holzwerkstoffen wie Brettschicht- oder Brettsperrholz unter 20% Holzfeuchte (ca. 85% rel. Luftfeuchte bei 20°C) mit keinem Insektenbefall zu rechnen [DIN-68800-1]. Pilze können verfärbend oder zerstörend sein. Erstere verändern nur die farbliche Erscheinung des Holzes und beeinflussen die Festigkeit nicht. Zerstörende Pilze wirken sich negativ auf die Tragfähigkeit aus, da sie die äußeren Querschnittsbereiche zerstören. Nach *DIN 68800-2* kann unter einer Holzfeuchte von 20% mit ausreichender Sicherheit und unabhängig von der Holz- oder Pilzart davon ausgegangen werden, dass kein Befall bzw. Wachstum stattfindet [DIN-68800-2]. Schimmelpilze können sich auch auf trockenem Holz bilden, falls durch äußere Einflüsse an der Oberfläche längerfristig eine erhöhte Feuchte vorherrscht [DIN-68800-1]. Notwendig für Schimmelbildung sind mittlere bis kalte Temperaturen (0-60°C), eine relative Luftfeuchte von 70 bis 100% (ideal >95%), ausreichend Sauerstoff sowie ein leicht saurer Nährboden [Dan-1995].

#### *Stahl*

Bei Stahl können biologische Befälle generell nicht auftreten, da dieser keinen Nährboden bietet.

### 5.2.5 Chemische Einflüsse

Chemisch aggressive Medien können in fester, flüssiger und gasförmiger Form existieren. Da Lagergüter in Hochregalen in der Regel verpackt in Behältern und auf Ladehilfsmitteln gelagert werden, kann unter Normalbedingungen ein direkter Kontakt von festen oder flüssigen schädigenden Stoffen mit der Regalkonstruktion ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund werden nachfolgend nur Schädigungen durch gasförmige Medien betrachtet.

#### Holz

Holz weist im Vergleich zu anderen Materialien eine hohe natürliche Beständigkeit gegenüber Chemikalien auf. Das Ausmaß und die Art der Schädigung hängt von zahlreichen Faktoren (Art, Konzentration, pH-Wert, Hygroskopizität des Mediums; Umgebungsbedingungen usw.) ab. Aufgrund der verschiedenen Einflussfaktoren ist die zu erwartende Schädigung immer vom Einzelfall abhängig. Es gibt in der Literatur aber einige allgemeine Erkenntnisse. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich auf die Veröffentlichungen von Erlen und Rug [Erl-1998; Erl-2000] [Rug-2011].

Holz wird durch chemische Einflüsse an der Oberfläche verfärbt und seine Festigkeit reduziert. Die Effekte beschränken sich auf die Randbereiche des Querschnitts, weshalb auch von einer „festigkeitsgeminderten Randschicht“ gesprochen wird. Die Korrosionsgeschwindigkeit nimmt bei allen Medien mit der Zeit ab. Die Schichten sind selbst bei aggressiven Medien und langer Auslagerungsdauer nur weniger Millimeter dick.

Ausgewählte Medien können durch Versuche anhand ihrer Schädigungsstärke auf Holz klassifiziert werden. Sie werden in drei Beanspruchungsgrade BG I (nicht oder schwach aggressiv), BG II (mittel aggressiv) und BG III (stark aggressiv) eingeteilt. Da die relative Luftfeuchte ebenfalls einen Einfluss hat, wird auch zwischen den Nutzungsklassen NKL 1 bis 3 nach DIN EN 1995-1-1 unterschieden.

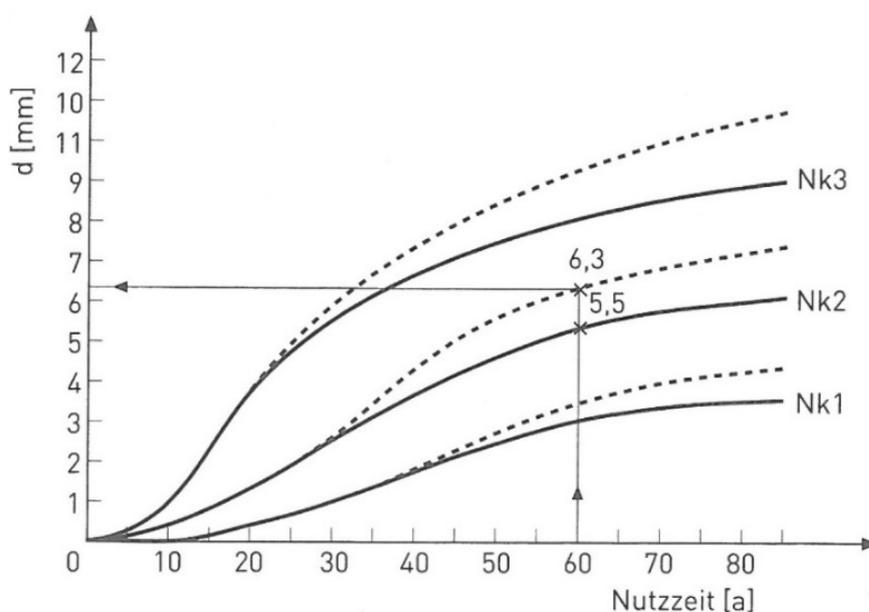
**Tabelle 9: Gasförmige Medien und Beanspruchungsgrade, in Anlehnung an [Erl-1998]**

Medium	Konzentration	Beanspruchungsgrade BG		
		NKL 1	NKL 2	NKL 3
Formaldehyd		I	I	I
Ammoniak		I	I	I
Schwefeldioxid	0,2-10 mg/m <sup>3</sup>	I	I	I
	10-200 mg/m <sup>3</sup>	I	II	II
Stickstoffdioxid	0,1-5 mg/m <sup>3</sup>	I	I	I
	5-25 mg/m <sup>3</sup>	I	II	II
	>25 mg/m <sup>3</sup>	II	II	II
Chlorwasserstoff	0,05-1 mg/m <sup>3</sup>	I	I	I
	1-10 mg/m <sup>3</sup>	I	II	II
	>10 mg/m <sup>3</sup>	II	II	II
Chlor	0, 2-1 mg/m <sup>3</sup>	I	I	I
	1-5 mg/m <sup>3</sup>	I	II	II
	>5 mg/m <sup>3</sup>	II	II	II

Es ist ersichtlich, dass bei keinem der untersuchten Medien eine Beanspruchung der Kategorie BG III festgestellt wurde. Gegenüber den meisten gasförmigen Medien ist Holz in Nutzungsklasse NKL 1 zudem sehr beständig.

Erl er führte nach eigenen Angaben über 100 Versuche an Bauteilen durch und ermittelte Verläufe der festigkeitsgeminderten Randschichtdicke über die Nutzdauer für verschiedene Nutzungsklassen. Die Ergebnisse für Salzeinwirkung, welche in ähnlicher Weise auch bei gasförmigen Medien zu beobachten sind, werden in Abbildung 61 dargestellt. Man erkennt, dass die Schädigungstiefe mit der Zeit zunimmt, jedoch die Geschwindigkeit der Schädigung nach längere Beanspruchung abnimmt. Höhere Nutzungsklassen bzw. relative Luftfeuchten führen zu einer stärkeren Schädigung des Holzes.

Erl er weist darauf hin, dass für die Praxis hauptsächlich Beanspruchungen nach BG II relevant sind, da nur diese zu merklichen Schädigungen führen. Er schlägt daher Tabelle 10 zur näherungsweisen Bestimmung der festigkeitsgeminderten Randschichtdicke bei unterschiedlichen Randbedingungen vor. Für eine Nutzungsdauer von 75 Jahren in Nutzungsklasse NKL 3 empfiehlt Erl er zum Beispiel eine Randschichtdicke von ca. 9 mm.



**Abbildung 61:** Zunahme der Randschichtdicke mit verminderter Festigkeit im Laufe der Nutzungsdauer bei Salzeinwirkung und unterschiedlichen Nutzungsklassen (Nk=NKL) [Mön-2004]

**Tabelle 10:** Umlaufende Reduzierung der Holzquerschnitte aus Nadelholz um die Breite  $d$  in [mm] in Abhängigkeit der Nutzungsklasse und Nutzungsdauer [Erl-2000]

Nutzungs- klasse	Nutzungsdauer [Jahre]				
	15	30	45	60	75
NKL 1	-	-	2	3	3,5
NKL 2	1	2	4	6	7
NKL 3	2	5	7	8	9

Die Angaben in Tabelle 10 beziehen sich auf Nadelvollholz. Das beim Bau von Holz-Hochregalen verwendete Brettschichtholz weist nach den Angaben von Erler und Rug „mindestens in den ersten 20 bis 30 Jahren“ eine noch höhere Resistenz gegenüber chemischen Einwirkungen als Vollholz auf. Bezüglich des im letzten Absatz genannten Beispiels (BG II, NKL 3, Nutzdauer 75 Jahre) geht Erler daher von einer Randschichtdicke bei Brettschichtholz von nur 6 mm aus. Es kann somit für Holz-Hochregale bei BG II, NKL 1 und einer Betriebsdauer von 50 Jahren eine Schädigungstiefe für Brettschichtholz von etwas mehr als einem Millimeter angenommen werden (vgl. Tabelle 10). Die so ermittelte Schädigungstiefe kann bei der Bemessung von Holz-Hochregalen in ähnlicher Weise wie bei der Berechnung einer Feuerwiderstandsdauer berücksichtigt werden.

Ein wichtiger Bestandteil von Brettschichtholz ist dabei der verwendete Kleber. Als besonders beständige Klebstoffe werden dabei Resorzin-Formaldehyd und Akyresorzin-Formaldehyd genannt. Der Grund für die höhere Beständigkeit von Brettschichtholz wird laut Erler bedingt durch die „großen kompakten Querschnitte, den gleichmäßigen Trocknungsgrad, seltene Risse sowie gute Widerstandsfähigkeit der Kleber.“ Ein chemischer Schutz des Holzes bei aggressiven Medien ist nach Erler unter 65% rel. Luftfeuchte nur für die Stirnseiten der Stützen im Fußbereich notwendig. Für höhere Luftfeuchten wird eine generelle Schutztränkung der Bauteile empfohlen.

In aggressiven Umgebungen müssen neben den Holzbauteilen auch die Verbindungsmittel ausreichend beständig sein. Anforderungen an Werkstoffe und Korrosionsschutz von Verbindungsmitteln werden in der DIN EN 1995-1-1 gestellt [DIN-1995-1-1]. Während bei einer geringen Beanspruchung noch eine Feuerverzinkung ausreichend ist, müssen bei höheren Ansprüchen nicht rostende Stähle bzw. spezielle Beschichtungen eingesetzt werden.

### *Stahl*

Eine chemische Schädigung von unlegiertem Stahl ist wie bei Holz von der Feuchtigkeit und der Art bzw. Konzentration des angreifenden Mediums abhängig. Besonders korrosiv für Stahl sind dabei Schwefel-, Chlorid- und Stickstoffverbindungen (z. B.  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$  usw.).

Einen speziellen Einfluss auf die Korrosion im Inneren von Gebäuden hat Staub. Dieser erhöht die Leitfähigkeit der Oberflächenfeuchte und kann so die Korrosionsgeschwindigkeit nach längerer Auslagerungsdauer erhöhen. [DIN-11844-1]

Die Auswirkungen der relativen Luftfeuchte wurden bereits in 5.2.3 beschrieben. Die dort definierten Korrosivitätskategorien C1-C5 sind auch für chemische Verunreinigungen der Atmosphäre gültig. Unter Zuhilfenahme der Angaben in Tabelle 8 kann für einen Anwendungsfall eine entsprechende Korrosivitätskategorie abgeschätzt werden. Bei den meisten Verunreinigungen wird dies je nach Stärke eine Kategorie C3 bis C5 ergeben. Alternativ ist auch eine einjährige Auslagerung von Standardproben zur Ermittlung der Kategorie möglich. Bezüglich der Einsatzgrenzen von unlegiertem und verzinktem Stahl gelten die selben Angaben wie in Kapitel 5.2.3.

Neben den beschriebenen Luftverunreinigungen können nach DIN EN ISO 12944-2 auch „spezielle Fälle“ auftreten, welche nicht durch Tabelle 8 berücksichtigt werden. Solche Sonderbelastungen liegen bei betrieblichen Immissionen vor. Diese treten bei „Kokereien, Beizeereien, Galvanisierungsanstalten, Färbereien, Zellstofffabriken, Gerbereien und Erdölraffinerien auf“. In diesen Fällen ist die Auslagerung von Standardproben oder der Kontakt mit Experten zur Bestimmung des nötigen Korrosionsschutzes sinnvoll. [DIN-12944-2]

### **5.2.6 Hygieneanforderungen**

#### *Rechtliche Vorgaben*

Hygienevorschriften müssen in Hochregalen hauptsächlich bei der Lagerung von Lebensmitteln beachtet werden (siehe Kapitel 4.2.6). Den rechtlichen Rahmen für Betriebsstätten, in denen mit Lebensmitteln umgegangen wird, stellen in erster Linie die EU-Verordnungen EG (VO) Nr. 178/2002, Nr. 852/2004 dar. [Eur-2002; Eur-2004a]

Unter diesen Amtsblättern der Europäischen Union ist für Hochregallager vor allem der Anhang II zur EG (VO) 852/2004 von Bedeutung. Demnach müssen Betriebsstätten, in denen mit Lebensmitteln umgegangen wird, so konzipiert sein, dass eine angemessene Instandhaltung, Reinigung und Desinfektion möglich ist. In Kapitel II heißt es weiter: „Flächen (einschließlich Flächen von Ausrüstungen) in Bereichen, in denen mit Lebensmitteln umgegangen wird, und insbesondere Flächen, die mit Lebensmitteln in Berührung kommen, sind in einwandfreiem Zustand zu halten und müssen leicht zu reinigen und erforderlichenfalls zu desinfizieren sein. Sie müssen entsprechend aus glattem, abriebfestem, korrosionsfestem und nichttoxischem Material bestehen, es sei denn, die Lebensmittelunternehmer können gegenüber der zuständigen Behörde nachweisen, dass andere verwendete Materialien geeignet sind.“ [Eur-2004a, S. 42ff.]

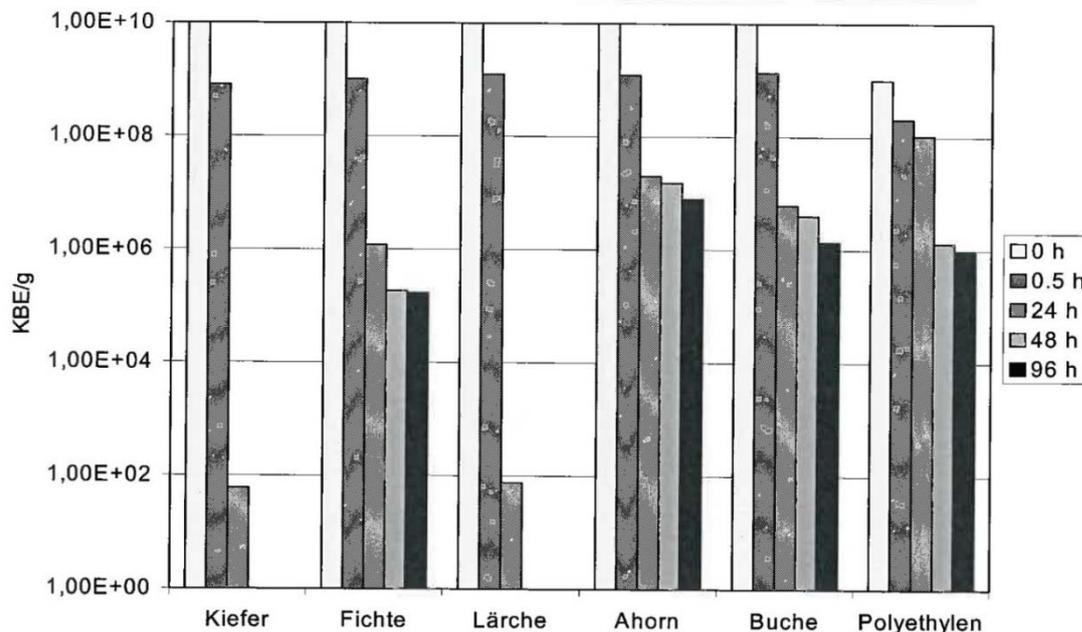
Da es bei Hochregalen im Normalfall zu keinem direkten Kontakt zwischen dem Lagergut und dem Regalwerkstoff kommt, müssen in dieser Hinsicht keine weiteren Regelwerke (z. B. EG (VO) Nr. 1935/2004, DIN 10528) berücksichtigt werden [Eur-2004b; DIN-10528].

#### *Holz*

Bevor festgestellt werden kann, ob Holzwerkstoffe die gestellten Anforderungen erfüllen können, müssen die hygienischen Eigenschaften von Holz näher untersucht werden. Über diese existieren seit längerem widersprüchliche Ansichten und Forschungsarbeiten. In zahlreichen wissenschaftlichen Arbeiten wurden negative hygienische Eigenschaften von Hölzern nachgewiesen. Dagegen existieren seit einigen Jahren Studien und Arbeiten, welche das Gegenteil behaupten und sogar hygienische Vorteile bestimmter Holzarten gegenüber Kunststoffen und Metallen bestätigen.

Nach neueren Untersuchungen von Milling können die hygienischen Eigenschaften von Holz nicht verallgemeinert werden, sondern müssen differenzierter betrachtet werden. Den größten Einfluss auf die hygienischen Eigenschaften hat die Art des Holzes. Wichtige weitere Faktoren stellen die Holzfeuchte, die Umgebungsbedingungen (Temperatur und relative Luftfeuchte) und die Art und Konzentration der Bakterien dar. Während Kiefern- und Eichenholz eindeutig antibakterielle Eigenschaften und Vorteile gegenüber Kunststoff aufweisen, ist das Überleben der Bakterien auf Fichten- und Buchenholzoberflächen mit dem auf Kunststoff vergleichbar

(siehe Abbildung 62). Holz ist hygroskopisch und nimmt daher Flüssigkeiten von der Oberfläche auf und speichert sie im Inneren. So werden zwar etwaige Bakterien von der Oberfläche entfernt, diese leben im Inneren aber teilweise weiter und können dann nur schwer wieder entfernt werden. Antibakterielle Holzarten töten auch im Holzinneren Bakterien effektiv. So sind bereits spezielle Hygienepaletten aus Kiefernholz erfolgreich im Einsatz. [Mil-2005, S. 11ff.] [Sch-2002, S. 249]



**Abbildung 62: Überleben von E. coli pIE639 auf Holz und Kunststoff nach verschiedenen Auslagerungsdauern [Sch-2000, S. 2037]**

Der Einsatz von Holzwerkstoffen in hygienisch sensiblen Bereichen (offene Lagerung) ist somit allgemein durch die Vorgabe der EG (VO) 852/2004 bezüglich angemessener Reinigung und Desinfektion kritisch zu sehen. Wie beschrieben, gelangen Bakterien bei Holzwerkstoffen auch in innere Querschnittsbereiche und leben dort teilweise weiter. Hieraus ergibt sich, dass zum Beispiel Fichten-Holzpaletten in Bereichen, in denen Lebensmittel zubereitet, behandelt oder verarbeitet werden, nicht immer das zu bevorzugende Ladehilfsmittel darstellen. Sie können im Vergleich zu Kunststoff oder Stahl nicht angemessen gereinigt und desinfiziert werden. Aus diesem Grund wird auch eine mögliche Verwendung von Fichtenholz als Regalwerkstoff bei unverpackten Lebensmitteln kritisch gesehen [Ber-2016].

Die Länderarbeitsgemeinschaft Verbraucherschutz AFFL (Arbeitsgruppe Fleisch- und Geflügelhygiene und fachspezifische Fragen von Lebensmitteln tierischer Herkunft) verbietet seit 2011 sogar generell die Verwendung von Holzpaletten in Kühlräumen, in denen offene Fleischwaren gelagert werden. [Län-2011]

Ob Holz-Hochregale für die Lagerung von unverpackten Lebensmitteln eingesetzt werden kann, muss für jeden Anwendungsfall mit der zuständigen Lebensmittelüberwachungsbehörde geklärt werden. Die Behörde sollte in allen Fällen bereits bei der Planung eines Holzregallagers hinzugezogen, um mit ihr ein individuelles (Hygiene-)Konzept zu erarbeiten. Grundsätzlich ausgeschlossen ist der Einsatz von Holz rein rechtlich derzeit nur bei Fleischwaren.

Sollte die Verwendung von Fichtenholz auch bei anderen Produkten aufgrund der schwierigen Reinigung nicht möglich sein, so können Holzsorten wie z. B. Kiefer benutzt werden. Diese töten durch ihre antibakterielle Wirkung auch Bakterien im Holzinneren ab. Die Verwendung von Holzregalen für verpackte Lebensmittel ist hygienetechnisch unkritisch.

### *Stahl*

Verzinkte Stahlprofilen erfüllen die genannten Hygieneanforderungen, da sie ausreichend gereinigt werden können.

### **5.2.7 Lagerung von Gefahrstoffen**

#### *Rechtliche Vorgaben*

Stoffe, die besonders brandgefährlich und/oder schädlich für Mensch und Umwelt sind, fallen unter den Anwendungsbereich der Gefahrstoffverordnung [Bun-2015c]. Deren Anforderungen werden von den Technischen Regeln für Gefahrenstoffe TRGS konkretisiert. Die für den vorliegenden Anwendungsfall (Hochregale) relevanten Richtlinien sind die TRGS 509 und TRGS 510 [TRG-509; TRG-510]. In der TRGS 509 werden das Lagern von flüssigen und festen Gefahrstoffen in ortsfesten Behältern sowie der Betrieb von Füll- und Entleerstellen für ortsbewegliche Behälter geregelt. Die TRGS 510 hingegen beschreibt grundsätzlich die Lagerung aller Gefahrstoffe in ortsbeweglichen Behältern.

Von den beiden Richtlinien kann abgewichen werden, wenn durch andere Maßnahmen gleicher Schutz erreicht wird. Zusätzlich müssen Tätigkeiten oder Gegebenheiten, die nicht in einer TRGS berücksichtigt werden, ebenfalls durch eine Gefährdungsbeurteilung berücksichtigt werden. [Hen-2016]

### *Holz*

Weder nach TRGS 510 noch nach TRGS 509 wird derzeit eine Regalkonstruktion aus nicht brennbaren Materialien gefordert. Stoffliche Anforderungen werden an die bauliche Trennung zu Nachbarbereichen, den Auffangraum für auslaufende Stoffe und die Lagergüter selbst gestellt, nicht aber an die Regalkonstruktion. Bezüglich der Lagergüter legt TRGS 510 Zusammenlagerungsverbote fest, welche die Brandausbreitung im Lager möglichst gering halten sollen. In diesem Zuge wird auch eine Lagerung von entzündlichen Stoffen wie Holz, Papier usw., welche nicht Teil der Ladeinheit sind, verboten.

Im Allgemeinen muss im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung vom Arbeitgeber der Nachweis zur Einhaltung des Schutzniveaus erbracht werden. Das bedeutet, dass bei der Verwendung von Holz als Regalwerkstoff, gegebenenfalls durch gesonderte Maßnahmen sichergestellt werden muss, dass es gegenüber Stahlregalen zu keiner Gefahrenerhöhung kommt. [Hen-2016]

Bei der Lagerung von Gefahrstoffen wird der Regalwerkstoff Holz rechtlich nicht verboten. Die Verwendung muss jedoch für jeden Anwendungsfall mit der entsprechenden Behörde abgeklärt werden. Das Verbot zur Lagerung von entzündlichen Stoffen (z. B. Holz), welche nicht Teil der Ladeinheit sind, hat die Beseitigung aller nicht systemrelevanten brennbaren Stoffe zum Ziel und betrifft daher den Regalwerkstoff nicht.

*Stahl*

Der Regalwerkstoff Stahl wird in beschichteter Form seit jeher für die Lagerung von Gefahrenstoffen eingesetzt. Die Art der Beschichtung richtet sich dabei nach der vorliegenden Korrosivitätskategorie.

**5.2.8 Zusammenfassung**

Die Einsatzgrenzen der beiden Regalwerkstoffe Holz und Stahl wurden anhand von Literatur- und Experteninformationen charakterisiert und festgelegt. Tabelle 11 zeigt einen Überblick der wichtigsten Grenzen. Diese sind als Richtwerte zu sehen. Für eine verlässliche Vorhersage der schädigenden Wirkung während des Betriebs ist die Auslagerung von Proben zu empfehlen.

Beim Werkstoff Holz sollte aufgrund möglicher biologischer Schädigungen eine Holzfeuchte 20% (relative Luftfeuchte 85%) nicht überschritten werden. Auch eine längerfristig erhöhte Oberflächenfeuchte sollte vermieden werden, da sich ansonsten Schimmel bilden und zu Holzzerstörungen führen kann. Unlegierter Stahl kann bis 60% und verzinkter Stahl bis knapp 100% rel. Luftfeuchte eingesetzt werden. Bei chemischer Beanspruchung ist Holz hoch und Stahl je nach Korrosionsschutz wenig bis mittel beständig.

**Tabelle 11: Einsatzgrenzen der Regalwerkstoffe für eine Nutzdauer von 50 Jahren**

	<b>Holz</b> (unbehandelt)	<b>Stahl unlegiert</b> (unbehandelt)	<b>Stahl unlegiert</b> (feuerverzinkt)
Temperatur	bis 100°C	-20 bis 100°C	-20 bis 100°C
relative Luftfeuchte	bis 85% bei 20°C entspr. 20% HF	bis 60%	bis 80% bei bandv. bis 100% bei stückv.
biologische Beständigkeit	bis 85% bei 20°C entspr. 20% HF	-	-
chem./korrosiv. Beständigkeit	festigkeitsgeminderte Randschicht	bis C1	bis C2 bei bandv. bis C4 bei stückv.

Der Einsatz von Holzwerkstoffen in hygienisch sensiblen Bereichen ist aufgrund der Hygrokopizität bzw. Reinigung des Holzes kritisch zu sehen. Für die Lagerung von Fleischwaren darf Holz derzeit nicht verwendet werden. Stahl hingegen erfüllt die gestellten Hygieneanforderungen. Zur Lagerung von Gefahrenstoffen können grundsätzlich beide Regalwerkstoffe eingesetzt werden. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass es bei Holzhochregalen zu keiner Gefahrenerhöhung im Vergleich zur Stahlbauweise kommt.

**5.3 Betrachtung spezieller Lagergüter und -atmosphären**

**5.3.1 Vorgehensweise**

Nachdem die Einsatzgrenzen der beiden Regalwerkstoffe bestimmt wurden, werden nun einige Lagergüter betrachtet, welche sich entweder selbst schädigend auf Stahl oder Holz auswirken oder eine Werkstoff schädigende Atmosphäre zur Aufbewahrung benötigen. Im Rahmen dieses Kapitels werden dabei nur einige ausgewählte Beispiele genannt, weshalb die

Angaben keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Für ein vorliegendes Lagergut kann von Anwendern anhand der Informationen in Kapitel 5.2 selbst eine mögliche Schädigung abgeschätzt werden. Neben den Lagergütern werden auch Einflüsse der Außenatmosphäre untersucht.

Wie in Kapitel 4.2.6 gezeigt wurde, werden Hochregale derzeit hauptsächlich im verarbeitenden Gewerbe eingesetzt. Innerhalb dieser Branche haben die Herstellung von Nahrungs- und Futtermitteln sowie der Maschinenbau den größten Anteil. Danach folgen mit einem gewissen Abstand der Fahrzeugbau, die Papierindustrie, die Herstellung von Metallerzeugnissen und die chemische Industrie. Aus den genannten Zweigen werden im Folgenden die Lebensmittel-, Papier- und Chemieindustrie näher untersucht, da bei diesen eine mögliche Schädigung der Regalwerkstoffe in Folge der Lagergüter oder -atmosphäre vermutet werden kann. In Branchen wie dem Maschinenbau, dem Fahrzeugbau, der Herstellung von Metallerzeugnissen sowie vielen weiteren können nicht schädigende Lagergüter und Atmosphären (12-25°C, rel. Luftfeuchte 45-65%, keine aggressiven Medien [Sch-1996]) erwartet werden, welche sich nach Tabelle 11 weder bei Holz noch bei Stahl schädigend auswirken. Hochregale aus Holz und Stahl sind in diesen Fällen daher gleich gut geeignet.

### **5.3.2 Nahrungs- und Futtermittelindustrie**

Die Lagerung von verpackten langsam verderblichen Lebens- und Futtermitteln bedingt in der Regel keine besondere Lageratmosphäre und hat auch selbst keine schädigenden Immissionen. Interessant sind daher verpackte oder offene schnell verderbliche Güter. Die folgenden Absätze beinhalten Informationen nach Dantzer [Dan-1995, S. 40].

Schnell verderbliche organische Produkte haben in der Regel einen sehr hohen Wassergehalt von 70 bis 90% und müssen gekühlt bzw. temperaturngeführt gelagert werden. Nach Dantzer wird zwischen Kühl- ( $0^{\circ}\text{C} < T < 15^{\circ}\text{C}$ ) und Tiefkühlagerung ( $< 18^{\circ}\text{C}$ ) unterschieden.

Verderbliche Lebensmittel wie Fleisch- und Milchprodukte, Obst und Gemüse werden zur Verlängerung der Haltbarkeit zwischen 0 und 15°C aufbewahrt. Die Lageratmosphäre wird dabei genau auf das Lagergut abgestimmt. Die relative Luftfeuchte ist in solchen Lagern mit 60-95% sehr hoch. Bei CA-Lagern (Controlled Atmosphere) wird zur langfristigen Lagerung oder auch zur Reifung zusätzlich der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Raumluft erhöht und der Sauerstoffgehalt gesenkt.

Sollen Lebens- und Futtermittel über einen längeren Zeitraum vor dem Verderben geschützt werden, so ist eine Tiefkühlagerung mit Temperaturen unter -18°C notwendig. Da das Wasseraufnahmevermögen der Luft mit sinkender Temperatur abnimmt, steigt bei einer Abkühlung die relative Luftfeuchtigkeit. In Tiefkühlagern ist dieser Effekt unerwünscht, weil es bei hoher rel. Luftfeuchte zu einer Vereisung des Lagers kommt. Aus diesem Grund sind Tiefkühl-läger meist mit Entfeuchtungsmaschinen ausgestattet. Die erreichte niedrige Luftfeuchtigkeit von 30-40% bedingt jedoch ein sehr großes Brandrisiko, denn die absolute Luftfeuchte ist bei tiefen Temperaturen sehr gering. Als Brandschutzmaßnahme bietet sich in solchen Fällen eine generelle Sauerstoffabsenkung der Raumluft an.

### *Fazit*

In der Nahrungs- und Futtermittelbranche müssen bei der Lagerung offener Produkte besondere Hygienevorschriften beachtet werden. Die Erfüllung der Vorgaben ist mit Hochregalen aus unbehandeltem Fichtenholz schwer zu erreichen. Ein Einsatz muss mit der zuständigen Behörde für jeden Anwendungsfall abgeklärt werden. Sollte Fichtenholz ausgeschlossen sein, so kann das Problem aber durch den Einsatz einer antibakteriellen Holzart wie zum Beispiel der Kiefer gelöst werden. Bei offenen Fleischwaren ist Holz generell untersagt. Die Verwendung von Holzregalen für verpackte Produkte ist hygienisch unkritisch. Ebenso unkritisch ist der Einsatz von Stahl, da dessen Oberfläche gut gereinigt werden kann.

Bei schnell verderblichen Lebensmitteln herrschen im Kühlbereich meist hohe Luftfeuchtigkeiten. Unbehandeltes Holz kann für die Lagerung offener Produkte wie zum Beispiel frischem Obst oder Gemüse aufgrund der Hygieneanforderungen, dem möglichen Eintrag von Schädlingen sowie der hohen zu erwartenden Holzfeuchte höchstwahrscheinlich nicht eingesetzt werden. Hier kann feuerverzinkter Stahl Anwendung finden.

Die Lagerung von verpackten Lebensmitteln ist aber selbst im Fall höherer Luftfeuchtigkeiten möglich, solange die Holzfeuchte unter 20% bleibt. So werden in Südtirol bereits seit mehreren Jahren erfolgreich zwei Kühlläger mit tragenden unbehandelten Brettschichtholzbauteilen (Fichte) betrieben. Die gelagerten Molkereiprodukte bedingen eine Lageratmosphäre von 2-4°C bei 60-70% rel. Luftfeuchte, welche kurzzeitig auch auf 80-85% steigen kann. Die Holzfeuchte wird regelmäßig gemessen und beträgt zwischen 18-20%, wodurch die Holzbauteile der Nutzungsklasse 2 zuzuordnen sind. Bisher sind keine Schädigungen an den Holzbauteilen festgestellt worden. [Grö-2015]

Für die Kühllagerung von verpackten Lebensmitteln kann auch feuerverzinkter Stahl problemlos eingesetzt werden.

Eine Verwendung von Holz im Tiefkühlbereich ist grundsätzlich denkbar, da die Werkstoffeigenschaften durch die tiefen Temperaturen sogar positiv beeinflusst werden. Die sich einstellende Holzfeuchte hängt von der relativen Luftfeuchte im Lager ab. Holzfeuchten über 20% stellen im Tiefkühlbereich kein Problem dar, da es bei Temperaturen unter 0°C zu keiner biologischen Schädigung kommen kann. Bei tiefen Temperaturen müssen jedoch noch andere Aspekte wie die unterschiedliche Temperaturdehnungen zwischen Holz, Stahl und Stahlbeton sowie Quellen und Schwinden infolge der Holzfeuchteänderung beim Abkühlvorgang beachtet werden. Ein Einsatz von Stahl ist bei tiefen Temperaturen ebenso möglich. Hier müssen gegebenenfalls spezielle Stahlsorten verwendet werden, um der Kaltversprödung entgegen zu wirken.

### **5.3.3 Papierindustrie**

Bei der Aufbewahrung von Papier- und Kartonageprodukten hat die Kontrolle der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur hohe Priorität. Falls die Luftfeuchte zu niedrig ist, werden die Produkte brüchig. Bei einer rel. Luftfeuchte oberhalb von ca. 60% besteht die Gefahr eines mikrobiologischen Befalls. In der Praxis hat sich daher die Aufbewahrung bei ca. 50% Luftfeuchte und ca. 16°C durchgesetzt. Die Temperatur sowie die Luftfeuchtigkeit sollten dabei

möglichst konstant sein, da starke Schwankungen zu einer Schädigung von Papier und Kartonage führen können. [Kna-2014]

### *Fazit*

Die Lagerung von Papier und Kartonagen, das bei den bestehenden Holz-Hochregalen derzeit häufigste Einsatzszenario (siehe Kapitel 4.3), stellt bedingt durch die niedrige Temperatur und rel. Luftfeuchte kein Problem für die zwei Regalwerkstoffe dar. Holz besitzt jedoch einen für dieses Lagergut besonders wichtigen Vorteil. Es ist hygroskopisch und kann daher Feuchte aufnehmen sowie abgeben. Dadurch kann die Holzkonstruktion als Feuchtespeicher dienen und so Schwankungen der rel. Luftfeuchte entgegenwirken. Um festzustellen wie sehr sich dieser Effekt auf das Raumklima auswirkt sind aber weitere Untersuchungen nötig. Falls sich ein nennenswerter Beitrag ermitteln ließe, wäre Holz ein idealer Werkstoff für auf Schwankungen der Feuchte empfindliche Lagergüter.

### **5.3.4 Chemieindustrie**

Im Bereich der chemischen Industrie werden unterschiedliche Chemikalien hergestellt und gelagert. Die Meisten davon sind entweder besonders brandgefährlich und/oder für Menschen und Umwelt schädlich. Chemikalien fallen dann unter Gefahrstoffe (siehe Kapitel 5.2.7). Diese müssen in entsprechenden Behältnissen gelagert werden, um einen Kontakt mit der Umgebung zu vermeiden. Dabei ist es möglich, dass es zu Dichtheitsfehlern kommt. Nach den Vorgaben der beiden TRGS Richtlinien für Gefahrstoffe wird daher eine regelmäßige Dichtheitskontrolle vorgeschrieben [TRG-509; TRG-510]. Sollte es aber dennoch zu einer Undichtigkeit kommen, besteht die Gefahr eines schädigenden Angriffs auf den Regalwerkstoff. Die relative Luftfeuchtigkeit sollte über 35% liegen, um die Brandgefahr nicht unnötig zu erhöhen [Ric-1989].

### *Fazit*

Das Lagern von Chemikalien und insbesondere von Gefahrstoffen ist grundsätzlich auch in Regalen aus Holz möglich. Dieser Werkstoff ist für eine solche Anwendung aufgrund seiner hohen chemischen Beständigkeit besonders zu empfehlen. Stahl kann bei aggressiven Medien selbst mit Feuerverzinkung nur bedingt eingesetzt werden. Für eine längerfristige Korrosionsbeständigkeit wäre eine aufwendige Beschichtung notwendig.

### **5.3.5 Einflüsse durch Außenatmosphäre**

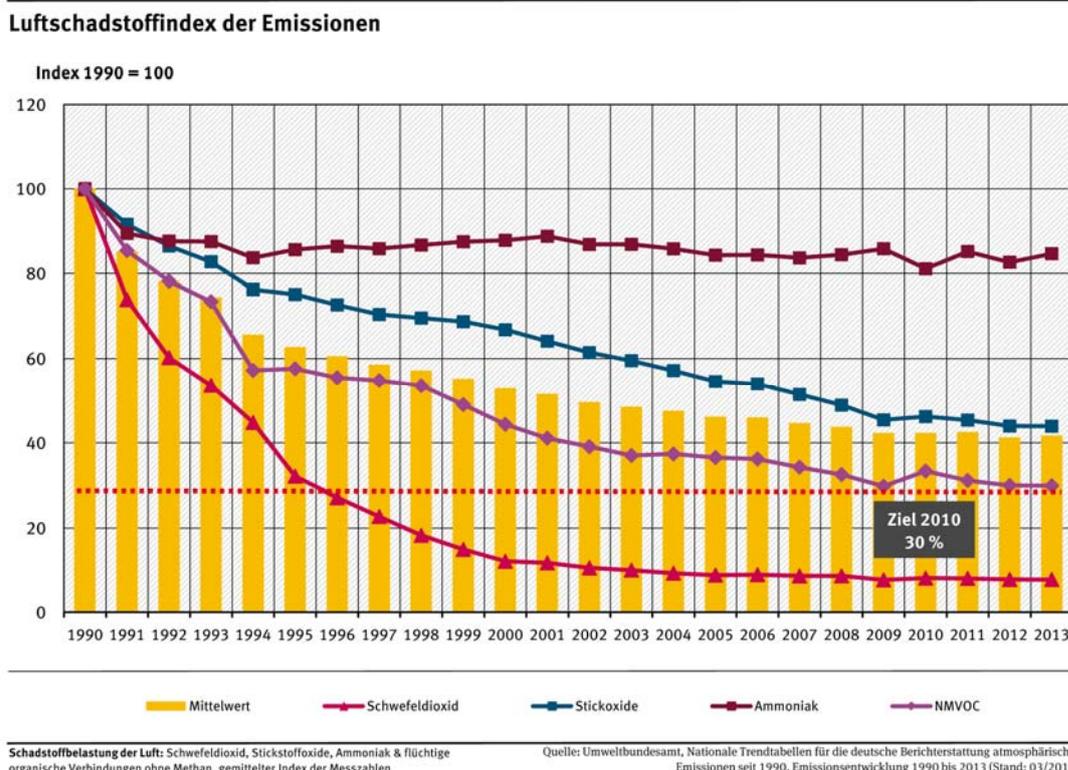
Neben schädigenden Quellen im Inneren eines Lagers gibt es auch äußere Einflüsse. Diese sind stark vom geografischen Standort abhängig. Einflüsse wie Temperatur und rel. Luftfeuchte werden zudem von der Tages- sowie Jahreszeit bestimmt. Nachfolgend wird auf chemische Verunreinigungen der Umgebungsluft eingegangen, da diese besonders schädigend und teils nur schwer zu vermeiden sind.

So ist zum Beispiel in der Umgebungsluft in der Nähe der Küste eine erhöhte Chlorid-Konzentration festzustellen, da es zu einem natürlichen Eintrag von Meersalz kommt [Sta-2012]. In Gegenden mit hoher industrieller Nutzung bzw. Stadtgebieten ist ein erhöhter Schwefeldioxid-Gehalt der Luft üblich, welcher aus stationärer und mobiler Verbrennung (Verkehr)

stammt. Im ländlichen Bereich kann eine erhöhte Ammoniak-Konzentration gemessen werden. [Umw-2016a; Umw-2016b]

Vor allem bei dem für Baustahl sehr korrosiv wirkenden Schwefeldioxid konnte in den letzten Jahren aber eine starke Reduktion der Luftverunreinigung erwirkt werden. Wie in Abbildung 63 ersichtlich, wurde die durchschnittliche Konzentration im Zeitraum von 1990 bis 2000 um ca. 90% reduziert. Beim Ammoniak-Gehalt ist nur eine geringe Abnahme ersichtlich, welche nach den Informationen des Umweltbundesamts auf den Rückgang der Tierhaltung zurückzuführen ist. [Umw-2016a]

Zusätzlich zu den genannten regionalen Verunreinigungen können auch lokale Quellen schädigende Emissionen verursachen. Diese treten beispielsweise bei „Kokereien, Beizereien, Galvanisierungsanstalten, Färbereien, Zellstofffabriken, Gerbereien und Erdölraffinerien auf“ [DIN-12944-2]. Die Konzentration von Verunreinigungen der Außenluft kann entweder selbst gemessen oder bei regionalen Messstellen für Luftgüte erfragt werden. Sie sind im Innenbereich allgemein niedriger als im Außenbereich. Dies gilt unter der Voraussetzung, dass keine internen Quellen vorliegen. Im Anhang B zur DIN EN ISO 11844-1 ist eine Tabelle der wichtigsten Luftverunreinigungen und deren typischer Konzentration im Innen- und Außenbereich zu finden. Die Abnahme von Außen nach Innen ist dabei von der Gebäudehülle bzw. Lüftung abhängig. [DIN-11844-1]



**Abbildung 63: Luftschadstoffindex der Emissionen in Deutschland von 1990 bis 2013 [Umw-2016a]**

### *Fazit*

Im Außenbereich sind verschiedene Luftverunreinigungen zu finden, welche sich schädigend auf Holz und Stahl auswirken können. Diese müssen generell bei Hochbauten berücksichtigt werden. Ernst zu nehmende Schädigungen sind dabei nur in speziellen Gebieten (Küstennähe, spezielle Industrieausstöße) zu erwarten. Die Konzentration der Verunreinigungen ist im Innenbereich im Allgemeinen erheblich niedriger, weshalb allein aufgrund der Außenatmosphäre keine kritischen Schädigungen zu erwarten sind. Es kann somit Holz und feuerverzinkter Baustahl verwendet werden.

### **5.3.6 Zusammenfassung**

Abschließend zeigt Tabelle 12 eine Zusammenfassung der betrachteten Einsatzszenarien für die beiden Regalwerkstoffe Holz und Stahl. Bei nicht schädigenden Lagergütern und –atmosphären (12-25°C, rel. Luftfeuchte 45-65%, keine aggressiven Medien) sind beide Regalwerkstoffe gleich gut geeignet. Hochregale aus Holz können bis auf die Kühllagerung offener Lebensmittel problemlos für alle weiteren Szenarien eingesetzt werden. Unlegierter Stahl ist im verzinkten Zustand ebenfalls für nahezu alle untersuchten Einsatzszenarien anwendbar. Nur bei der Lagerung im Tiefkühlbereich sowie von aggressive Chemikalien müssen je nach Anwendungsfall andere Stahlsorten oder Beschichtungen gewählt werden.

Tabelle 12: mögliche Einsatzszenarien für die Regalwerkstoffe Holz und Stahl (✓ möglich, ~ möglich aber kritisch, ✗ nicht möglich)

Einsatzszenarien	Temp. [°C]	rel. Luftf. [%]	Konzentration aggr. Medien	Holz (unbehandelt)	Stahl unlegiert (unbehandelt)	Stahl unlegiert (feuerverzinkt)
normale Atmosphäre	12-25	45-65	niedrig	✓	~	✓
Kühlagerung, offene Lebensm.	0-15	60-85	niedrig	Fleischwaren ✗ übrige Lebensm. ~	✗	✓
Kühlagerung, verpackte Lebensm.	0-15	60-85	niedrig	✓	✗	✓
Tiefkühlagerung	<-18	30-40	niedrig	✓	~	~
Papier, Kartonagen	16	50	niedrig	✓	✓	✓
Chemikalien, Gefahrstoffe	18-35	>30	mittel/hoch	✓	✗	~

## 6 Konzeption potenzieller Regalkonstruktionen für Holzhochregallager

*Peter Glaser*

### 6.1 Allgemeines

Dieses Kapitel stellt potenziell geeignete Konstruktionen von Hochregallagern aus Holz vor. Ziel ist die Selektion geeigneter Aufbauten für die relevanten Bauteile der Lagerstruktur. Für die Entwicklung sinnvoller konstruktiver Durchbildungen der Lagerbestandteile sind eingangs generelle wie auch spezifisch festgelegte Anforderungen an die Konzeption dargestellt. Anschließend werden entwurfsrelevante Parameter beschrieben und auf Grundlage der Marktanalyse, existierender Restriktionen und funktionellen Anforderungen eingegrenzt. Wichtige planerische Grundlagen des konstruktiven Entwurfs werden aufgezeigt. Das hierin vorgestellte Lastenheft dient dem konkreten Fall eines objektspezifischen Entwurfs und wird vertiefend beschrieben, da es zu Beginn eine unverzichtbare planerische Grundlage darstellt. Anhand der abschließend beschriebenen Entwicklung von Modulgrößen unter Berücksichtigung der besonderen geometrischen Anforderungen der automatischen Regalbedienung wird die praxisrelevante Ermittlung der Bauteilabmessungen und Anordnung zum sicheren Lagerbetrieb aufgezeigt.

### 6.2 Anforderungen an die Regalkonstruktion

Die nachfolgende Zusammenstellung von Vorgaben und Restriktionen dient als Grundlage der Konzeption möglicher Konstruktionen und Bauteilbildungen der Lagerstruktur von Hochregallagern aus Holz. Die Rahmenbedingungen sind zum einen Restriktionen von Richtlinien geschuldet, zum anderen stehen Aspekte der allgemeinen Anwendbarkeit, einer weitest gehenden Flexibilität, der Möglichkeit einer sofortigen Umsetzung und der Wirtschaftlichkeit im Vordergrund.

Im Rahmen des Entwurfs sollen reine Holzbauten betrachtet werden. Besonders unter Beachtung der in Kapitel 4.2 abgeleiteten, für Holz prädestinierten Anwendungsgebiete sollen die Materialeigenschaften von Holz bestmöglich genutzt werden. Aus diesem Grund wird anhand von Entwurfsvorschlägen unter anderem auf Lösungen mit minimalem Einsatz von Stahlteilen geachtet.

Hybride Konstruktionen können anhand der Beschreibungen analog ausgeführt werden. Aufbauten mit Palettenträgern aus Stahl scheinen, in Abhängigkeit des aktuellen Stahlpreises, mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit eine attraktive Alternative zur reinen Holzbauweise darzustellen. Ausführungsmöglichkeiten der hybriden Bauweise sind in Kapitel 3.6.3 gezeigt worden.

Bei der statischen Auslegung von Regalstrukturen sind, im Vergleich zum regulären Holzbau, vom Tragwerksplaner zusätzliche besondere Anforderungen und Gegebenheiten für Hochregallager zu beachten. Besonders zu erwähnen sind an dieser Stelle die Nachweise im Grenz-zustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG). Die Vorgaben bezüglich der zulässigen Verformung der Hochregallager im Gebrauchsfall sind streng. Diese rühren aus der Sicherstellung der Funktionsfähigkeit der Regalbedienung her. Die Konzeption einer möglichst steifen Konstruktion in Lagerlängs- und -querrichtung muss daher beim Entwurf ständig beachtet werden. Aufgrund der wesentlich geringen materiellen Steifigkeit von Holz im Vergleich zu Stahl

muss bei der Konstruktion von Hochregallagern aus Holz besonders auf die Aktivierung geometrischer Steifigkeiten geachtet werden. Eine detaillierte Betrachtung der Vorgaben im GZG findet sich in Kapitel 6. Gerade bei der Konzeption von Hochregallagern aus Holz stellt dies eine besondere Herausforderung dar, da Holz im Vergleich zu Stahl eine deutlich geringere materielle Steifigkeit aufweist. Im Rahmen der Standsicherheitsbetrachtung stellt der Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit ebenfalls große Anforderungen an das Tragwerk. Die Kumulation der Lagerlasten führt zu sehr hohen statischen Beanspruchungen. Die Größe von Hochregallagern bedingt außerdem sehr große äußere Einwirkungen, v.a. aus Wind.

Für den Aufbau der Lagerstrukturen sollen gängige Holzprodukte eingesetzt werden, die entweder über Normen oder allgemein bauaufsichtliche Zulassungen geregelt sind. Ziel dieses Vorgehens ist die Möglichkeit einer sofortigen Umsetzung von Hochregallagern aus Holz. Im Rahmen weiterer Entwicklungen und Optimierungen ist es jedoch analog dem Stahlbau denkbar, Bauteile oder ganze Hochregalsysteme über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen zu regeln. Hierzu sind weitere Erfahrungen beim Bau von Hochregallagern aus Holz erforderlich.

Die bereits erwähnten strengen Vorgaben bezüglich den zulässigen Verformungen müssen bei der Wahl der Verbindungen ebenfalls berücksichtigt werden, da diese einen sehr großen Einfluss auf die Gesamtsteifigkeit des Systems haben. Die Wahl der Verbindungsmittel wird daher unter Berücksichtigung der Steifigkeit, der Wirtschaftlichkeit, des Herstellungsaufwandes und der technischen Umsetzbarkeit, eines hohen Vorfertigungsgrades, des Montageaufwandes sowie einer gegebenenfalls erforderlichen Demontage gewählt.

Eine wichtige Eigenschaft, die dem Entwurf zugrunde liegen soll, betrifft den Aufbau. Es wird auf die Konstruktion in modularer und skalierbarer Form geachtet. Hieraus ergeben sich aufgrund der hohen Stückzahlen Vorteile für die Produktion und Montage. Die Skalierbarkeit ermöglicht gerade bei hohen Konstruktionen einen materialeffizienteren Einsatz. Weniger beanspruchte Bereiche des Lagers, wie beispielsweise weiter oben liegende Module, können hierdurch wirtschaftlicher und materialsparender gestaltet werden. Diese Vorgabe bedingt allerdings z. B. die Einführung eines Stoßes innerhalb der Steher.

Zur Reduzierung des Montageaufwandes auf der Baustelle wird ein möglichst hoher Vorfertigungsgrad angestrebt. Restriktionen bezüglich Verfügbarkeit der Bauteilgrößen, der Fertigung und Herstellung wie auch des Transportes müssen hierbei beachtet werden. Bezüglich des Aufbaus wird angestrebt, das Längsaussteifungssystem möglichst in die „Standard-Lagerstruktur“ zu integrieren. Bei den bisherigen Bauten erfolgte die Aussteifung in Lagerlängsrichtung durch an den Enden angeordnete Verbandstürme (vergleiche hierzu auch Kapitel 3.6.3).

### **6.3 Festlegung von Randbedingungen**

#### **6.3.1 Allgemeines**

Die Parameter bei der Konzeption von Hochregallagern werden nachfolgend eingegrenzt. Die Eingrenzung erfolgt anhand der zuvor definierten Anforderungen an die Lagerstruktur sowie auf Grundlage der eingangs durchgeführten Marktanalyse. Ziel ist die Festlegung sinnvoller

Parameterschranken zur Abdeckung eines möglichst großen Anwendungsspektrums der Entwürfe.

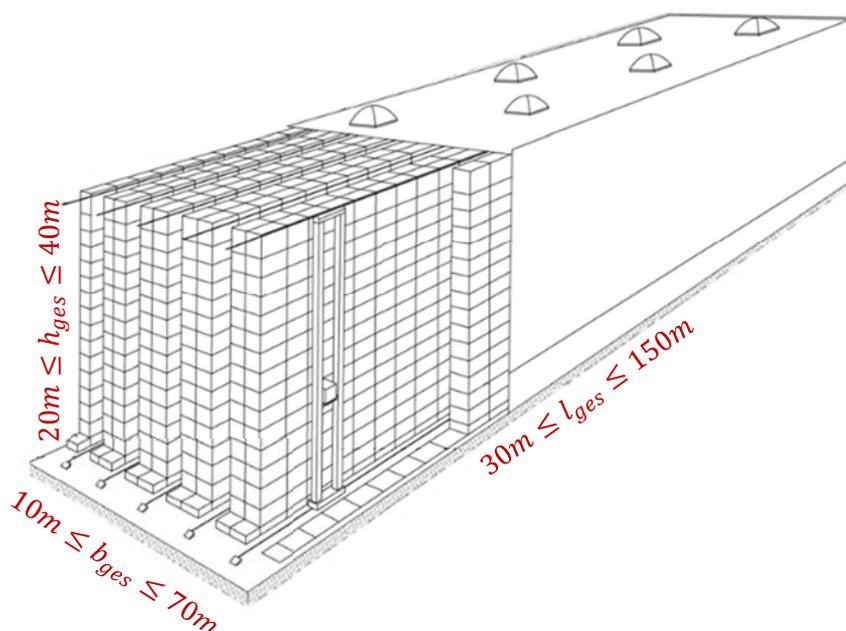
### 6.3.2 Gesamtabmessung der Hochregallager in Silobauweise

Für die Konzeption von Hochregallagern aus Holz werden zunächst die globalen Abmessungen festgelegt. Datengrundlage zur Begrenzung der Parameter bilden die statistischen Auswertungen des Kapitels 4.2.3. Die erfassten Daten von 1998 bis 2013 stellen eine repräsentative Grundgesamtheit der gebauten Hochregallager dar und spiegeln somit die marktrelevanten Hochregalabmessungen wider. Folgende Begrenzungen der Parameter werden festgelegt:

Länge:  $30m \leq l_{ges} \leq 150m$

Breite:  $10m \leq b_{ges} \leq 70m$

Höhe:  $20m \leq h_{ges} \leq 40m$



**Abbildung 64: Festlegung der betrachteten Grenzwerte der Lagergesamtabmessungen**

Besonders interessant ist die Betrachtung der Lagerhöhen. Die Planung höherer Lager im Bereich über 30m birgt erhöhte Herausforderungen in sich. Die Herausforderungen bei der Konzeption und Planung liegen darin, dass mit zunehmender Höhe die Verformungen überproportional zunehmen. Folglich wird es schwieriger die zulässigen Verformungen im GZG einzuhalten. In Querrichtung wird als Obergrenze die Breite des zuletzt errichteten Hochregallagers aus Holz gewählt.

### 6.3.3 Logistische und geometrische Anforderungen des Lagerguts

Bei der Marktanalyse des Kapitels 4 wurden neben den globalen Lagerabmessungen auch die Anforderungen der Ladeeinheiten untersucht. Bezüglich der Ladehilfsmittel wird fast ausschließlich die Europoolpalette eingesetzt. Betrachtet werden in Anlehnung an Kapitel 4.2.4. Ladeeinheiten auf Europoolpaletten mit folgenden Eigenschaften:

Länge:	$1200\text{mm} \leq l \leq 1300\text{mm}$
Breite:	$800\text{mm} \leq b \leq 900\text{mm}$
Höhe:	$600\text{mm} \leq h \leq 2500\text{mm}$
Masse:	$m = 1000\text{kg}$

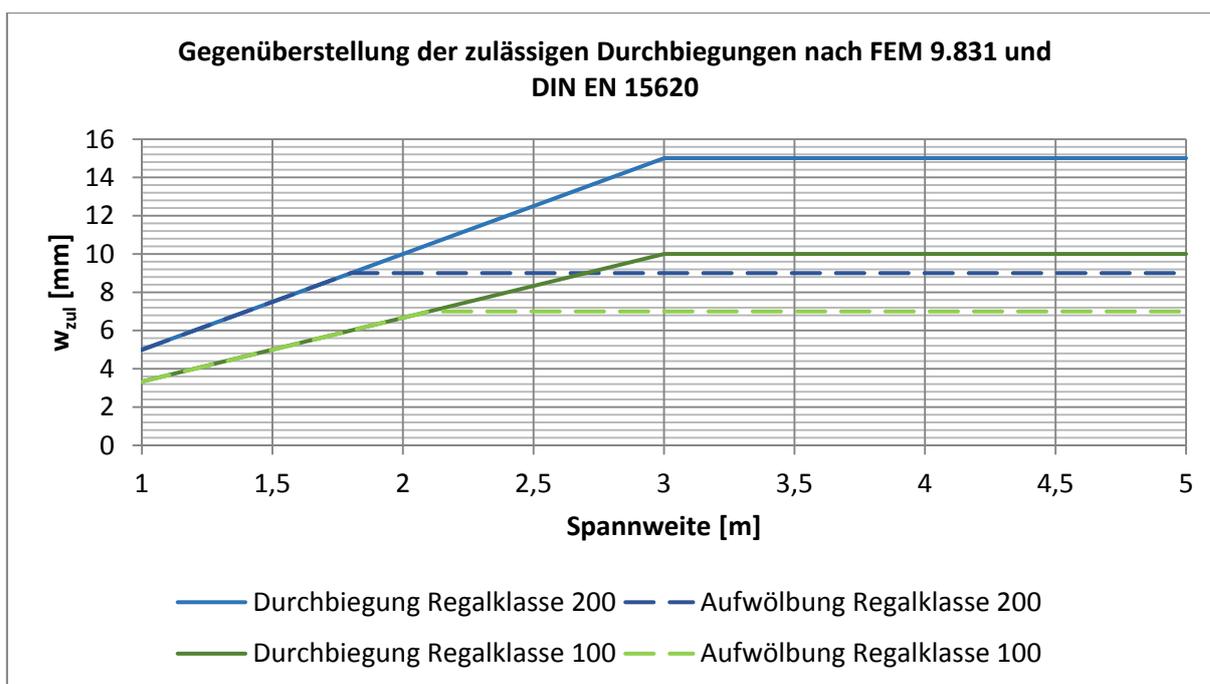
Eine Adaption der Steherabstände zur Einlagerung von größeren Ladeeinheiten, wie beispielsweise der ebenfalls häufig eingesetzten Industriepalette, ist möglich. Die Bemessung der Palettenträger muss folglich, bei gleichbleibender Platzlagerung, für größere Fachbreiten durchgeführt werden.

Ein weiterer wichtiger Parameter, der vor dem Entwurf eines Hochregallagers bekannt sein sollte, ist die gewünschte Platzlagerung. In Abhängigkeit der gewünschten Platzlagerung resultiert die Spannweite der Palettenträger.

Die Tauglichkeit der Dreiplatzlagerung wurde Anhand einer Bemessung im GZT und GZG für Hochregallager mit Palettenträgern aus Holz untersucht. Die Lastfallkombinationen und Bemessungen erfolgten nach Eurocode. Lediglich beim Nachweis im GZG werden die strengeren Vorgaben der [DIN-15620] berücksichtigt. Diese begrenzt zulässige Verformung (Durchbiegung und Aufwölbung) der Palettenträger auf einen maximalen Wert. Der Maximalwert ist hierbei unabhängig von der Spannweite der Palettenträger. Die zulässige Verformung nach Tabelle 13 der [DIN-15620] ist in Abbildung 65 dargestellt. Auch an dieser Stelle gilt, dass spezifische Werte objekt- und funktionsbezogen für die jeweilige Anlage von den Planern festgelegt werden können.

Betrachtet werden Systeme mit Zweiplatz-, Dreiplatz- und Vierplatzlagerung. Die Modellierung erfolgte für die relevanten Lastfälle bei Zweifeld-, Dreifeld- und Vierfeldträgern. In die Analyse sind verschiedene, maßgebliche Lastfälle eingegangen.

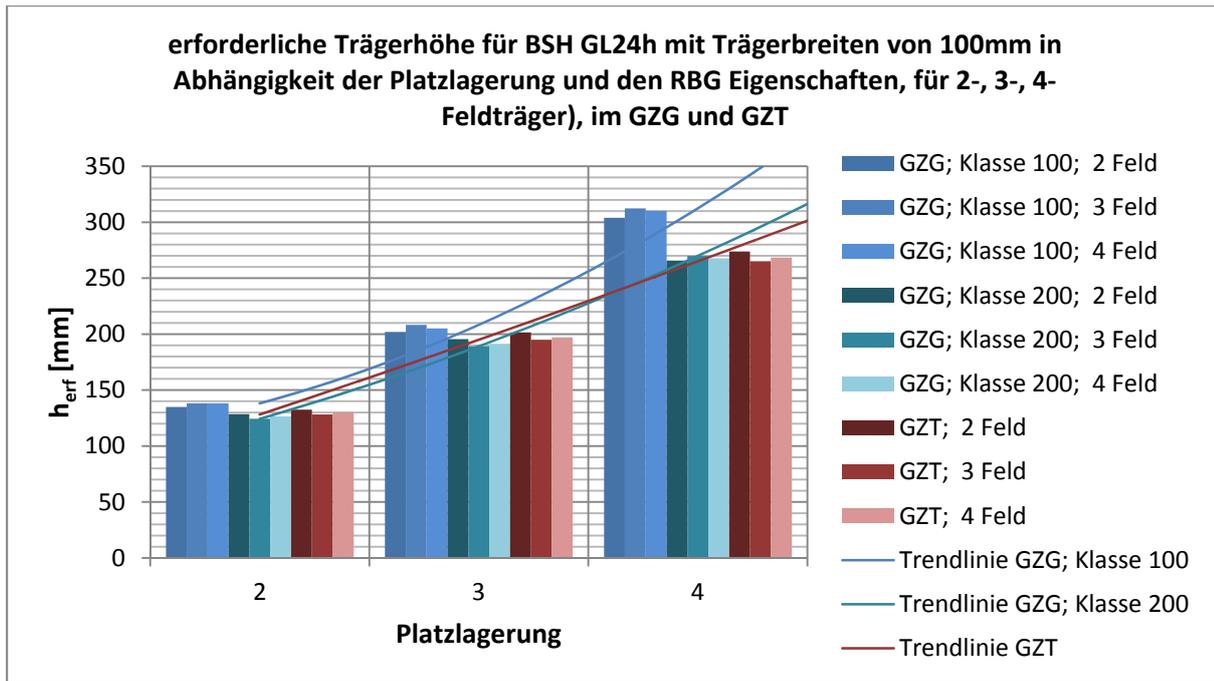
Die Abbildung 66 und Abbildung 67 stellen die erforderlichen Trägerhöhen in Abhängigkeit der Platzlagerung bei Ladeeinheitsgewichten von  $m = 1000\text{kg}$  dar. Die blauen Säulen zeigen hierbei die erforderlichen Höhen in Abhängigkeit der Platzlagerung für die Nachweise im GZG der Regalklasse 100 (ohne Feinpositionierung). Analog zeigen die türkisen Säulen dies für die Regalklasse 200 (bei manueller Einlagerung oder mit Feinpositionierung). Die roten Säulen stellen die erforderlichen Trägerhöhen für den Nachweis im GZT dar. Die verschiedenen Blau-, Türkis- und Rottöne geben die zur Einhaltung der Nachweise benötigten Trägerhöhen für Zweifeld-, Dreifeld- und Vierfeldträger an. Die Unterschiede in Abhängigkeit der Ausbildung der Trägerdurchlaufwirkung (Zweifeld-, Dreifeld- und Vierfeldträger) sind äußerst gering.



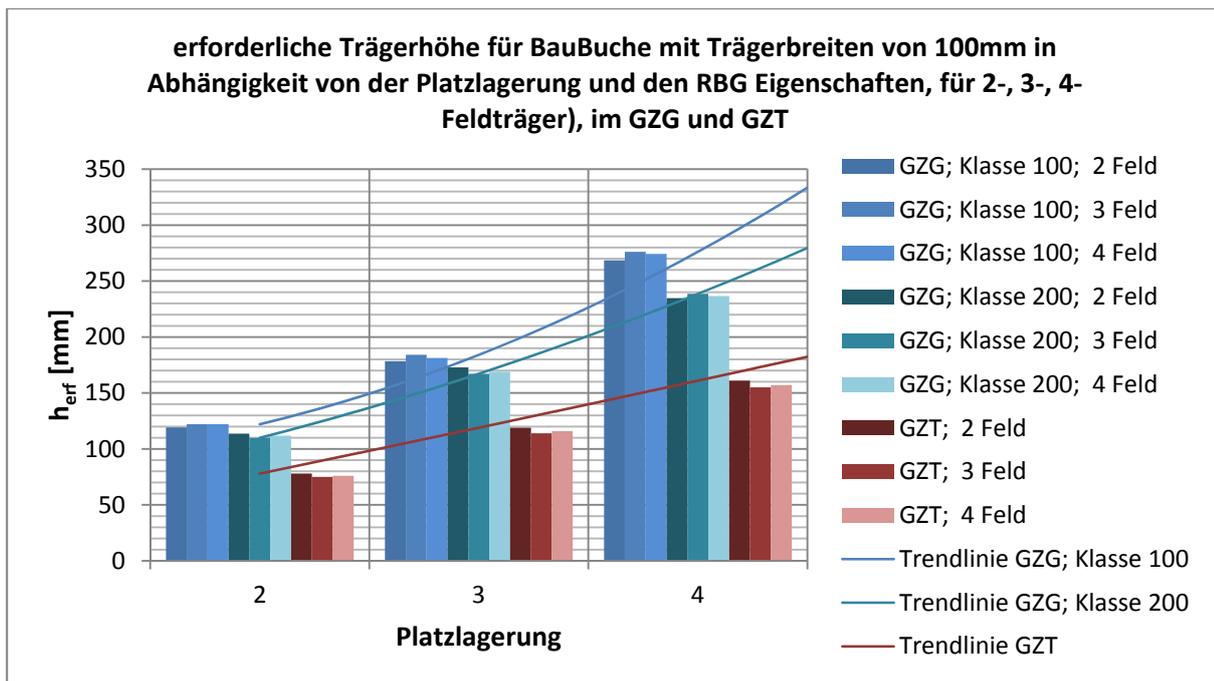
**Abbildung 65: Zulässige Durchbiegung der Palettenträger nach [DIN-15620]**

Die farblich angepassten Kurven spiegeln den Trend der Entwicklung der erforderlichen Höhen in Abhängigkeit der Platzlagerung wider. Gerade die Kurven der Nachweise im GZG zeigen einen überproportionalen Anstieg der erforderlichen Trägerhöhen bei zunehmender Platzlagerung. Die Ursache liegt in der Begrenzung der maximal zulässigen Verformung. Maßgebend bei der Bemessung war für jede Lastkonstellation die Durchbiegung und nicht die Aufwölbung der Träger. Dies bedeutet, dass ab einer Trägerlänge von  $l = 3,0\text{m}$  die maximal zulässige Verformung im GZG (fixer Wert und keine Längenabhängigkeit) maßgebend wird (vergleiche Abbildung 65). Unter den vorausgesetzten Randbedingungen entspricht dies in etwa einer Dreiplatzlagerung.

Bei der Bemessung der Träger wird das Maximum der Nachweise im GZT und GZG maßgebend. Im Hinblick auf einen wirtschaftlichen Einsatz der Palettenträger sollten die Ausnutzungsgrade in beiden Fällen hoch sein. Anhand der Abbildung 66 und Abbildung 67 ist eine zunehmende Divergenz zwischen den Nachweisen im GZT und GZG festzustellen. Um eine bestmögliche Ausnutzung zu erzielen, wird eine Dreiplatzlagerung für die Konstruktion von Hochregallagern empfohlen. Die Vorteile, die sich hieraus ergeben, sind ähnlich hohe Ausnutzungsgrade im GZT und GZG. Außerdem ist keine überproportionale Zunahme der erforderlichen Abmessungen der Palettenträger, was einen Materialmehraufwand bei gleichzeitig weniger nutzbarem Lagervolumen bzw. steigender Fläche der Hüllkonstruktion bedeutet, zu beobachten. Der Fall der Zweiplatzlagerung birgt den Nachteil einer deutlich steigenden Steherzahl und wird daher unter den gesetzten Bedingungen nicht gewählt. Für alternative Konstruktionen mit hohen Einwirkungen oder ungünstigen Lagergeometrien, wie z. B. sehr schmale und hohe Lager, kann dieser Fall allerdings durchaus interessant werden.



**Abbildung 66:** Darstellung der erforderlichen Trägerhöhen für Palettenträger aus BSH GL 24h in Abhängigkeit der Platzlagerung und der Art der Regalklasse



**Abbildung 67:** Darstellung der erforderlichen Trägerhöhen für Palettenträger aus BauBuche in Abhängigkeit der Platzlagerung und der Art der Regalklasse

Die Analyse der beiden betrachteten Materialien zeigt, dass die erforderlichen Querschnitte bei Anwendung der leistungsfähigeren BauBuche kleiner werden. Aus den hohen Tragfähigkeiten der BauBuche folgen sehr geringe erforderliche Querschnittshöhen im GZT. Die maßgebenden Querschnittshöhen liegen allerdings aufgrund der Nachweise im GZG merklich darüber. Ausnutzungsgrade beider Nachweise auf gleichem Niveau wie beispielsweise bei BSH

sind nicht möglich. Die Entwicklung querschnittsoptimierter Träger mit höheren geometrischen Steifigkeiten, wie beispielsweise Querschnitte des Stahlbaus, würde das Ungleichgewicht der Ausnutzungsgrade verringern.

Die Anordnung der Palettenträger ergibt sich zum einen aus den erforderlichen Fachfreimaßen (siehe Kapitel 6.4.3) und zum anderen aus dem Aufstandsbereich der Palette. Bezüglich der Abstände zweier Palettenträger eines Faches ist nur letzterer Punkt maßgebend. Durch die Anordnung der Träger muss ein sicheres Aufstellen und eine sichere Lastweiterleitung der Ladeeinheiten sichergestellt werden. Die Auflagerung der Paletten erfolgt im Bereich ihrer Klötze. Eine Anordnung der Palettenträger über die gesamte Tiefe der Klötze der Palette ist nicht erforderlich. Ein beidseitiges Überstehen des Ladehilfsmittels ist zulässig (Siehe hierzu auch Anhang E der DIN EN 15620:2010-05).

Neben der Festlegung der internen Geometrien in Lagerlängsrichtung wird ebenfalls der für die Intralogistik relevante Aufbau festgelegt. Betrachtet werden einfach- und doppeltiefe Lager. In der Praxis sind dies die beiden am häufigsten vorkommenden Lagerungsarten für Hochregallager. Einfachtiefe Lager zeichnen sich durch die direkte Erreichbarkeit jeder Ladeeinheit im System zu jedem Zeitpunkt aus. Der Vorteil der doppeltiefen Lagerung liegt in einer höheren Lagergutdichte.

#### 6.3.4 Restriktionen und Ziele bezüglich Transportierbarkeit und Herstellbarkeit

Die Auswahl der Holzprodukte mit Zuweisung zu Bauteilen für die Regalstruktur muss unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit, Fertigung und Transportierbarkeit erfolgen. In Anlehnung an Festlegungen des Kapitels 6.2 werden nur bereits am Markt erhältliche Holzprodukte verwendet. Gerade beim Einsatz von plattenförmigen Bauteilen ergeben sich dimensionsbedingte Beschränkungen. Das bedeutet, dass in Abhängigkeit der Konstruktion nicht alle Platten für alle Bauteile verwendet werden können. Eine grobe Zusammenstellung der verfügbaren Abmessungen ausgewählter flächiger Holzwerkstoffe zeigt Tabelle 13. Produkte anderer Hersteller können abweichende Maße aufweisen. Für Brettsperrholz sind beispielsweise auch durchaus größere Platten erhältlich. Aus Gründen der Transportierbarkeit sowie erforderlicher Plattenmaße für die Lagerkonstruktion wird hierauf jedoch nicht weiter eingegangen. Für weitere Informationen wird auf die entsprechenden allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen verwiesen.

**Tabelle 13: Auswahl der maximalen Abmessungen verschiedener flächenförmiger Holzwerkstoffe**

	$l_{max}$ [m]	$b_{max}$ [mm]	$\Delta d$ [mm]
<b>BSP</b> nach Z-9.1-559	16,5	3.000	60 bis 500
<b>Dreischichtplatte</b> nach Z-9.1-242	18,0	2.000	20 bis 75
<b>Kerto Q</b> nach Z-9.1-100	20,0	2.500	21 bis 69
<b>BauBuche</b> nach Z-9.1-838	35,0	1.850	20 bis 120
<b>OSB</b> nach Z-9.1-503	15,0	2.800	8 bis 40

Linienförmige Holzbauteile sind ebenfalls Bestandteil der Konstruktion von Hochregallagern. In Abhängigkeit des Entwurfs in einer mehr oder weniger großen Anzahl. Nachfolgend sind die Abmessungen einer Auswahl linienförmiger Holzprodukte zusammengestellt, die für den Bau von Hochregallagern aus Holz interessant sein können.

**Tabelle 14: Auswahl der üblichen und möglichen Abmessungen verschiedener linienförmiger Holzprodukte**

	$l_{max}$ [m]	$\Delta b$ [mm]	$\Delta h$ [mm]
<b>KVH</b>	bis 14	bis 120	bis 240
<b>BSH</b>	bis 60	60 bis 300	100 bis 3.000
<b>Formoptimierte Stegträger</b> nach ETA-02/0026	bis 14	45 bis 96	160 bis 600
<b>BauBuche</b> nach Z-9.1-837	bis 35	bis 300	120 bis 600

Weitere Abmessungen gängiger Holzprodukte können Normen oder Zulassungen wie auch Angaben von Herstellern entnommen werden. Beim Aufbau der Hochregalstruktur mit linienförmigen Bauteilen, wie beispielsweise mit Fachwerkstehern, sollten bezüglich den verfügbaren Bauteilabmessungen keine Einschränkungen auftreten.

Aufgrund der großen Anzahl an Regalbauteilen wird bei der Konstruktion auf eine Begrenzung der Bauteilmaße aus Gründen der Transportierbarkeit und der Erleichterungen in der Fertigung geachtet. Gleichzeitig soll die Möglichkeit eines hohen Vorfertigungsgrades gewahrt werden. Zum einen soll durch einen hohen Vorfertigungsgrad die Montagezeit auf der Baustelle verkürzt werden. Zum anderen soll der Transport durch die Minimierung der Anzahl der Ladungen möglichst einfach und umweltschonend erfolgen. Maßgeblich hierfür sind einfache Bauteilgeometrien (hoher Raumnutzungsgrad der Ladung). Zur Vermeidung von Großraum- oder Schwertransporten werden die Bauteile so konzipiert, dass die Bauteile zu einer Ladung gepackt werden können, die Straßenverkehrsordnungskonform (§ 22 StVO) ist. Hieraus ergeben sich folgende Grundabmessungen die, unter Beachtung der oben genannten Vorgaben, von der Einheit aus Ladung und Fahrzeug nicht überschritten werden dürfen:

Länge:  $l \leq 20,75m$

Breite:  $b \leq 2,55m$

Höhe:  $h \leq 4,0mm$

Überschreitet entweder das Fahrzeug oder die Ladung die Grenzabmessungen, so ist eine Ausnahmegenehmigung für den Transport erforderlich. Eine Längenüberschreitung ist in der Praxis meist problemlos möglich. Schwieriger wird es bei notwendigen Überschreitungen der Breitenvorgabe. Durch die vorhandenen Fahrbahnbreiten und möglichen Hindernissen (z. B. Fahrbahnbegrenzungen oder Brücken) sind die Umstände im konkreten Fall zu prüfen. Brücken sind auch der entscheidende Faktor, weshalb eine Überschreitung der Höhe meist ausgeschlossen ist.

## 6.4 Entwurfsgrundlagen

### 6.4.1 Allgemeines

Ziel des Kapitels ist die Darstellung der für den Entwurf relevanten Grundlagen. Entscheiden für den Entwurf von Hochregallagern unabhängig vom eingesetzten Material ist die genaue Kenntnis der Anforderungen an das Lager. Der Betreiber legt diese vorab in einem sogenannten Lastenheft fest. Die Anforderungen des Lastenheftes zusammen mit der festgelegten Konstruktionsart bilden die Grundlage der Ermittlung der Fachgrößen. Anhand der Anforderungen des Lastenheftes und den bestimmten Fachgrößen kann der Grobentwurf der Lagerstruktur erfolgen.

### 6.4.2 Lastenheft

Im Lastenheft macht der Betreiber notwendige Angaben und legt die Anforderungen für sein geplantes Hochregallager fest. Es stellt damit eine äußerst wichtige Grundlage für die Planer von Regalstruktur und Fördereinrichtung dar.

[DIN-15629] gibt wichtige Vorgabedaten an, die der Betreiber den Planern und Herstellern von Hochregallagern zur Verfügung stellen soll. Weitere, als sinnvoll erachtete Angaben, können ebenfalls im Lastenheft mit aufgenommen werden. Die Informationen sollten daher mindestens folgende Punkte umfassen:

1. Angaben zum Aufstellungsort des geplanten Hochregallagers  
Gegebenenfalls zusätzliche Beschreibungen des Standortes (Umgebung, Baugrundverhältnisse, Baufeld, baurechtliche Restriktionen) vereinfachen die Planung weiter. Falls diese Informationen nicht vorliegen, müssen diese im Rahmen der Planung und Bemessung ermittelt werden.
2. Zusammenstellung der Eigenschaften der Gründung (Informationen zu Fundament und Bodenplatte)  
Die Angabe ist wichtig, da die resultierenden Lasten eines Hochregallagers sehr hoch sind und in Abhängigkeit der Lagerhöhe deutlich variieren können. Folglich hängt die maximale Lagerhöhe unter anderem von der zulässigen Belastung der Gründung ab. Angaben zu den vorhandenen Toleranzen der Bodenplatte beeinflussen die Ausführung der Fußpunkte der Regalstruktur. Bei zu großen Ungenauigkeiten sind die Stützenfüße in jedem Fall so auszuführen, dass eine bauseits von der Gründung unabhängige Konstruktion der Regalstruktur ermöglicht wird.
3. Spezifizierung der Ladeeinheiten in Bezug auf die verwendeten Ladehilfsmittel und die einzulagernden Waren  
Hierbei sollen auch spezielle Anforderungen und Eigenschaften des Lagerguts beschrieben werden.
4. Angabe zu den erforderlichen Stellplätzen mit Informationen zu den maximalen Ladeabmessungen bzw. Quantifizierung verschiedener Ladeeinheitsabmessungen.  
Außerdem müssen die für die Bemessung relevanten Lasten der Ladeeinheiten sowie der maximale Auslastungsgrad beziffert werden.

5. Vorgaben zur geplanten Durchsatzleistung sowie zur gewünschten Verfügbarkeit der Waren  
Diese Daten bilden die Grundlage zur Festlegung der Lagerungsart (einfach-, doppel- oder mehrfachtief) und der Regalbedienung (Art der Bedienung, Anzahl der Gassen etc.). Darauf aufbauend bedingt dies indirekt (Wahl der Lagerungsart) die Fachgrößen.
6. Spezifizierung der einzusetzenden Regalbedienung  
Die Art der Regalbedienung beeinflusst die geometrischen Abmessungen der Lagerkonstruktion wie auch deren Bemessung.
7. Durchschubsicherungen im Lager  
Es wird in Abhängigkeit des Lagers festgelegt, ob Durchschubsicherungen erwünscht sind und wenn ja, aus welchen Gründen. Die Angabe sollte auch die Bezifferung der Einwirkungen oder zusätzlich geforderte Eigenschaften, wie beispielsweise Steifigkeitsanforderungen, beinhalten.
8. Quantifizierung der aus der Regalbedienung resultierenden Einwirkungen
9. Informationen zum Personenaufenthalt im Normalbetrieb mit ggf. Angaben zu Bühnen und Laufwegen
10. Angabe von besonderen Vorgaben oder Wünschen hinsichtlich der brandschutztechnischen Gestaltung  
Die Beschreibungen helfen dabei, die Art des anlagentechnischen Brandschutzes auszuwählen. In der Regel kommen hier Sprinkleranlagen zum Einsatz. Besondere Lagergüter oder Lagerumgebungen können jedoch einen alternativen anlagentechnischen Brandschutz bedingen. Für die geometrische Gestaltung eines funktionsfähigen Hochregallagers ist dies insofern relevant, da ggf. für die Installationen Freiräume vorgehalten werden müssen.
11. Informationen zu den Übergabepätzen und, falls bereits vorhanden, zu der anschließenden Kommissionierung (falls eine Kommissionierung erfolgt)
12. Alle zum Zeitpunkt der Erstellung bekannten zukünftig geplanten Änderungen der Lageranforderungen.

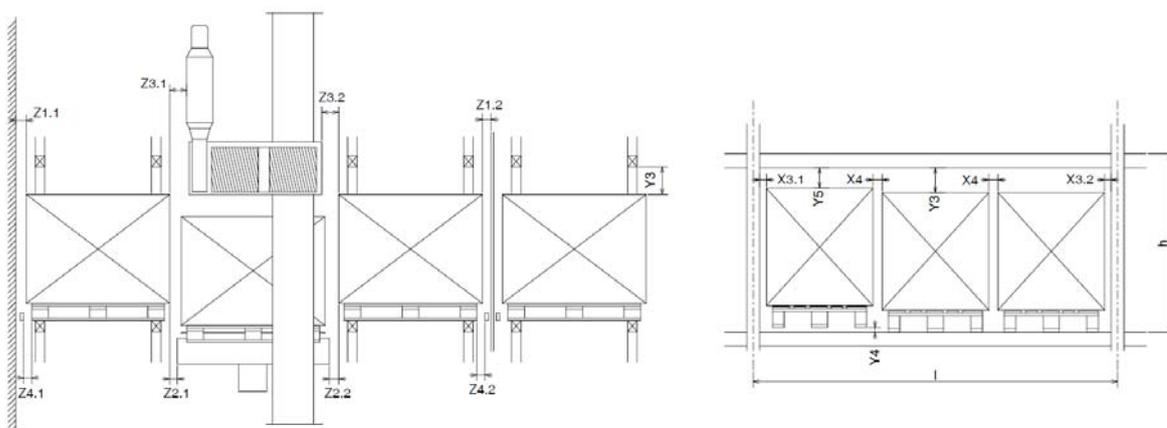
Erfolgt die Bereitstellung der Planungsgrundlagen (Lastenheft) nicht, sollte die Auslegung der Regalstruktur in der Regel nicht erfolgen. Für den Betreiber ist wichtig, dass er sich bei der zukünftigen Nutzung an die im Lastenheft für die Planung definierten Grundlagen zu halten hat [DIN-15629].

[DIN-15629] gibt weiterführende Erläuterungen zu den oben aufgezählten Komponenten des Lastenheftes. Im Anhang der Norm werden außerdem für ortsfeste Regalsysteme aus Stahl die Verantwortlichkeiten der Planer, Benutzer und Lieferanten beschrieben. Für Konstruktionen aus Holz können diese bereichsweise übernommen werden. Spezielle Forderungen aufgrund der Verwendung dünner Stahlbauprofile oder für freistehende Lager entfallen für Silostrukturen aus Holz.

### 6.4.3 Ermittlung von Fachfreimaßen und Fachgrößen

In Abhängigkeit von der gewählten Platzlagerung erfolgt die Ermittlung der Fachbreiten. Neben den maximalen Abmessungen des Lagerguts müssen, zur Gewährleistung eines sicheren Lagerbetriebs, Freiräume zwischen den Ladeeinheiten, zwischen Ladeeinheit und Regalkonstruktion und zwischen Ladeeinheit und Installationsgegenständen wie beispielsweise Sprinklerung (siehe auch Kapitel 3.7.2), Rauchmeldeanlage oder allgemeine Haustechnik vorgehalten werden. Bei der Ermittlung der Freiräume werden Ungenauigkeiten aus der Herstellung und Montage wie auch aus den Verformungen des Hochregallagers im Betrieb berücksichtigt.

[FEM-9831] befasst sich unter anderem mit der Ermittlung der Fachfreimaße. Abbildung 68 zeigt die Fachfreimaße eines einfachtiefer Hochregallagers. Die in Bezug zum globalen Koordinatensystem werden die erforderlichen Freimaße in den jeweiligen Richtungen angegeben und durch Nummerierung eindeutig bezeichnet. Die Maße ergeben sich unter Berücksichtigung von Toleranzen und Verformungen der Regalkonstruktion, der Ladehilfsmittel und Ladung, der Fahr- und Führungsschiene sowie der Regalbediengeräte. Die für die resultierenden Fachfreimaße in x-, y- und z-Richtung jeweils zu berücksichtigenden Anteile der einzelnen Toleranz- und Verformungsmaße für einfach- und doppeltiefe Hochregallager aus Stahl sind in [FEM-9831] in tabellarischer Form zusammengestellt. Abweichend können spezifischen Angaben der Regalbedienung von den Herstellern der Regalbediengeräte angegeben werden.



**Abbildung 68: Beispiel der Fachfreimaße eines einfachtiefer Lagers in Lagerlängs- und Lagerquerrichtung**

Anhand von Berechnungsbeispielen werden in [FEM-9831] für Stahlager die Anteile der Toleranzen und Verformungen aufgezeigt, die für die verschiedenen Fachfreimaße in Abhängigkeit der Regalklasse und der Steuerungsart zu berücksichtigen sind. Für die Ermittlung der Fachfreimaße bei Hochregallagern aus Holz werden die Berechnungsregeln dieser Richtlinie ebenfalls empfohlen. Begründet werden kann dies damit, dass zum einen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit die Regalbemessung von Hochregallagern aus Holz wie bei Stahlhochregallagern erfolgt und dieselben Vorgaben bezüglich der Verformung eingehalten werden. Zum anderen ähnelt der Aufbau von Hochregallagern aus Holz denen der Stahlbauten, da im Wesentlichen dieselben Bauteile in nur anderer Materialisierung eingesetzt werden. Durch die Ähnlichkeit des Aufbaus ist der Anteil der für die jeweiligen Fachfreimaße zu be-

rücksichtigenden Toleranzen und Verformungen vergleichbar. Toleranz- und Verformungsvorgaben aus der Regalbedienung, der Fahr- und Führungsschiene, der Ladung und Ladehilfsmittel sind für beide Lager ohnehin identisch. Unterschiede ergeben sich im Falle nur aus Herstellungs- und Montagetoleranzen der Holzstruktur. Die in der [FEM-9831] hierzu angegebenen Werte müssen also gegebenenfalls durch konkrete, holzbauspezifische Daten ersetzt werden.

Die Einhaltung der Fachfreimaße ist für einen sicheren und möglichst störungsfreien Betrieb von Hochregallagern wichtig. Im Rahmen von objektspezifischen Entwürfen müssen daher frühzeitig die erforderlichen Fachfreimaße ermittelt werden. Aus diesem Grunde wurde für eine einfache und schnelle Handhabung ein auf Excel basierendes Berechnungstool erstellt, das die schnelle Ermittlung von Fachfreimaßen und Fachgrößen für einfach- und doppeltiefe Konstruktionen ermöglichen soll. Das Bemessungstool ist bei den Lehrstühlen erhältlich.

### 6.5 Zusammenstellung und Bewertung möglicher Bauteilaufbauten

#### 6.5.1 Auswahl und Vorgehen bei der Bewertung

Anhand dieses Kapitels sollen Konstruktions- und Bauteilaufbauten zusammengestellt und bewertet werden. Untergliedert werden die Konstruktionsvorschläge in die Hauptbestandteile der Regalstruktur (siehe auch Kapitel 3.6.1). Die standsicherheitsrelevanten Aufgaben der Regalbauteile sollen an dieser Stelle noch einmal kurz erwähnt werden:

<b>Bauteil</b>	<b>Aufgabe</b>
<b>Steher</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ableitung der lotrechten Lasten aus Eigengewicht, Wind, Schnee, Nutzlast etc.</li><li>• Aussteifung des Systems in Lagerquerrichtung</li></ul>
<b>Dachträger</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Weiterleitung der lotrechten Lasten in die Steher</li><li>• Kopplung der Steher zur Aussteifung in Lagerquerrichtung</li><li>• Auflagerung der Dachhaut</li></ul>
<b>Palettenträger</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Weiterleitung der lotrechten Lasten der Ladeeinheiten</li><li>• Kopplung der Steher mit der Lagerlängsaussteifung</li><li>• Knickhalterungen</li></ul>
<b>Längsaussteifung</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Aussteifung des Hochregallagers in Längsrichtung</li><li>• Aufnahme von Stabilisierungslasten</li></ul>
<b>Koppelfetten/ Lastensammler</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Kopplung der Steher mit den Längsverbänden (Längsaussteifung)</li><li>• Auflagerung der Dachhaut</li></ul>

### **Durchschubsicherung**

- Klare Zuweisung, ob Palettenanschlage (bei manuell bedienten Lagern; werden planmäßig bei der Einlagerung angefahren) oder Durchschubsicherung (zur Sicherung der Palette um gegebenenfalls eine zu tiefe Einlagerung oder Fehleinlagerung zu verhindern)
- Unerwünschtheit der Palettenanschlage (fördern Missbrauch)

Wenn Durchschubsicherungen erforderlich sind, werden diese auf Höhe des Ladehilfsmittels an der Rückseite der hintersten Fachebene jedes Regalblocks angeordnet. Nach [DIN-15512] können Durchschubsicherungen gegebenenfalls für automatische Systeme vorgeschrieben werden, um Anforderungen der [DIN-528] zu erfüllen. Dies bedeutet, dass Durchschubsicherungen für Systeme mit automatischer Regalbedienung in der Regel nicht erforderlich sind. Im Rahmen der konstruktiven Entwicklung werden Durchschubsicherungen daher, wie auch aus Gründen der ausschließlich lokalen Wirkung (keinen Einfluss auf die Gesamtsystemeigenschaften) nicht weiter betrachtet. Sollten dennoch Aufgrund der Vorgaben der [DIN-528] Durchschubsicherungen erwünscht sein, so wird die Ausführung mit einfachen Holz- oder Stahlquerschnitten unter Beachtung erforderlicher geometrischer Freiräume vorgeschlagen. Angaben bezüglich zu berücksichtigender Einwirkungen werden aus Gründen der Vollständigkeit in Kapitel 7.2 gezeigt.

Die jeweils als sinnvoll erachteten Bauteile und Aufbauten werden in der Zusammenstellung kurz durch Erläuterung und mittels Skizzen in ihrem prinzipiellen Aufbau beschreiben. Anschließend erfolgt die Bewertung der Vorschläge auf Grundlage verschiedenster festgelegter Parameter, die für die Konstruktion von Hochregallagern aus Holz als sinnvoll erachtet werden. Die Parameter ergeben sich aus den Zielen für die Konstruktion, die Materialisierung, die Trageigenschaften, die Herstellung und Montage, den Transport und die Wirtschaftlichkeit. Eine Aufgliederung der einzelnen Rubriken ist in nachfolgender Auflistung zusammengetragen. Die Bewertung erfolgt im Hinblick auf:

1. die Einfachheit und Reproduzierbarkeit (Gleichheit der Bauteile im Hinblick auf hoher Stückzahlen),
2. einen modularen Aufbau,
3. die Skalierbarkeit der Konstruktion,
4. die Integrierbarkeit der Längsaussteifung,
5. die Verfügbarkeit,
6. einen geringen Materialaufwand,
7. die Herstellbarkeit der Bauteile mit einem geringen Anteil an Stahlteilen,
8. eine hohe Formgenauigkeit,
9. die Brandschutzeigenschaften,
10. eine sehr hohen Steifigkeit,
11. eine hohe Tragfähigkeit,
12. einen hohen Vorfertigungsgrad,
13. eine kurze Montagedauer,

14. die Einfachheit der Ausbildung der Anschlüsse (einfach Montage und ggf. Demontage),
15. eine einfache, umweltschonende und wirtschaftliche Transportierbarkeit,
16. die Wirtschaftlichkeit.

Bei der Wahl der Verbindungen stehen die Einfachheit und Wirtschaftlichkeit im Vordergrund. Aus diesem Grund sollen überwiegend Nägel und Schrauben eingesetzt werden. Im Hinblick eines geringen Einsatzes an Stahlteilen werden weitestgehend Holz-Holz-Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln aus Stahl vorgesehen. Aus Gründen der Leistungsfähigkeit der Verbindung sowie aus geometrischen Randbedingungen sind jedoch teilweise auch Stahlblech-Holz-Verbindungen erforderlich. Für die bereits im Werk im Rahmen der Vorfertigung hergestellten Verbindungen werden aus Gründen der Wirtschaftlichkeit Nagelverbindungen ausgebildet. Alternative Verbindungen des Holzbaus sind möglich. Die Fügung der Bauteile auf der Baustelle soll aus Gründen der Einfachheit der Montage mit Schrauben erfolgen. Die ausreichende Steifigkeit der Verbindungen wird über die Anzahl der Verbindungsmittel sichergestellt. Klebeverbindungen, die sehr hohe Steifigkeiten der Einzelbauteile ermöglichen, können ebenfalls eingesetzt werden. Hierbei sollte allerdings auf die Vermeidung von Verklebungen auf der Baustelle geachtet werden, da dies einen erheblichen Aufwand bedeutet und die Montagezeit auf der Baustelle verlängert. Bei Verklebungen im Werk muss auf die Bauteilgrößen für den Transport geachtet werden.

Tabelle 15 und Tabelle 16 beinhalten die Darstellungen der Bauteilaufbauten. Dargestellt sind Systemskizzen mit einer kurzen Beschreibung. In den Systemskizzen der Bauteilaufbauten sind mögliche anschließende Bauteile im Verbund der Regalkonstruktion zeichnerisch angedeutet, um die Verständlichkeit des Gesamtsystems zu vereinfachen. Dargestellt sind meist eine Queransicht (mit Blick auf die Anordnung der Steher im System) und ein Blick auf die Lagerlängsrichtung mit dem Auszug eines Regalfachs zur Einlagerung der Paletten. Im Anhang befindet sich der Konstruktionskatalog, in welchem die Bauteilaufbauten nochmals in größerer Form dargestellt sind. Die letzte Spalte unter dem Begriff „Anmerkungen“ dient der Nennung spezifischer Besonderheiten der einzelnen Bauteile, die im Rahmen der Bewertung nicht mit abgebildet werden, allerdings relevante weiterführende Informationen geben.

Zur verständlicheren Darstellung der Systemausschnitte der Tabelle 16 sind in Abbildung 69 der Grundriss sowie ein Schnitt in Lagerlängs- und Lagerquerrichtung eines beispielhaften, doppeltiefen Hochregallagers aus Holz abgebildet. Im Bild links oben ist die Draufsicht mit Blick auf die Palettenträger, die Steher und die neun Gassen für die Regalbediengeräte zu sehen. Der Längsschnitt der Lagerstruktur ist rechts oben gezeigt. Am Ende des Lagers werden beispielhaft die Aussteifungsverbände des Lagers in Längsrichtung angeordnet (rot). Ebenfalls rot dargestellt sind die Lastensammler am oberen Lagerende. Der untere Schnitt zeigt die Lagerquerrichtung, geschnitten durch einen Bereich ohne Längsaussteifungsverbände. Zu erkennen sind die doppeltiefen Steher und die Freiräume für die Regalbediengeräte. Gekoppelt werden die Steher über die oben liegenden Dachträger. Die Anordnung der Steher erfolgt für eine Dreiplatzlagerung.

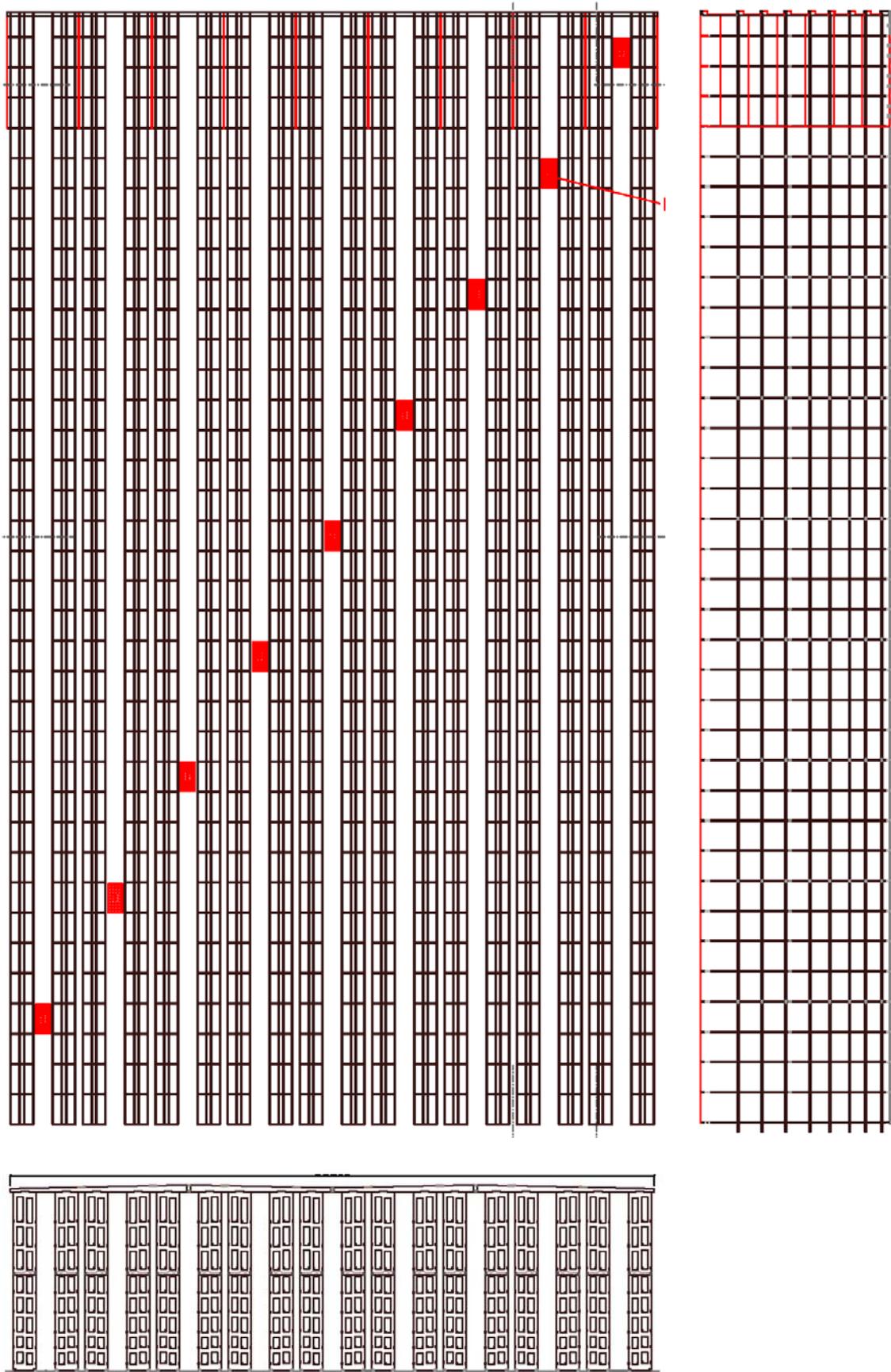


Abbildung 69: Darstellung des Grundrisses, der Längs- und Lagerquerrichtung eines beispielhaften Hochregallagers

6.5.2 Darstellung der verschiedenen Bauteilaufbauten und Bewertung

Tabelle 15: Einteilung in Bewertungskategorien der Bauteile

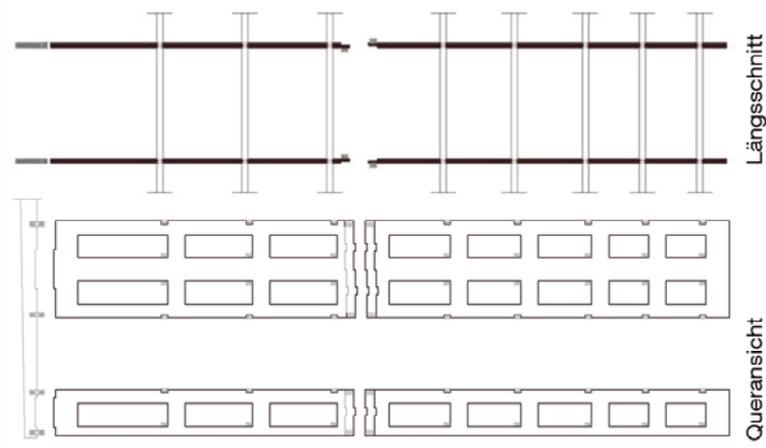
Aufbau	
Beschreibung	
Materialien	
1. Einfachheit und Reproduzierbarkeit	
2. modularer Aufbau	
3. Skalierbarkeit	
4. Integrierbarkeit der Längsaussteifung	
5. Verfügbarkeit	
6. geringer Materialaufwand	
7. geringer Anteil an Stahlteilen	
8. hohe Formgenauigkeit	
9. Brandschutzeigenschaften	
10. hohe Steifigkeit	
11. hohe Tragfähigkeit	
12. hoher Vorfertigungsgrad	
13. kurze Montagedauer	
14. Einfachheit Ausbildung der Anschlüsse	
15. Transportierbarkeit	
16. Wirtschaftlichkeitspotenzial	
Anmerkungen	

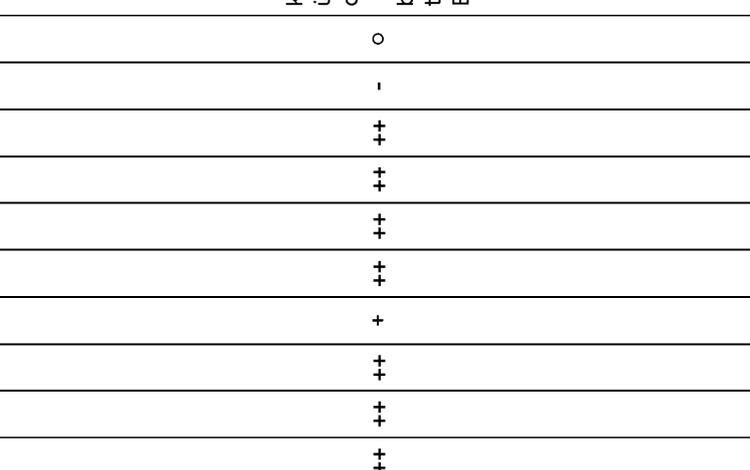
Die Bewertung der 16 Kategorien erfolgt nach folgender Skala:

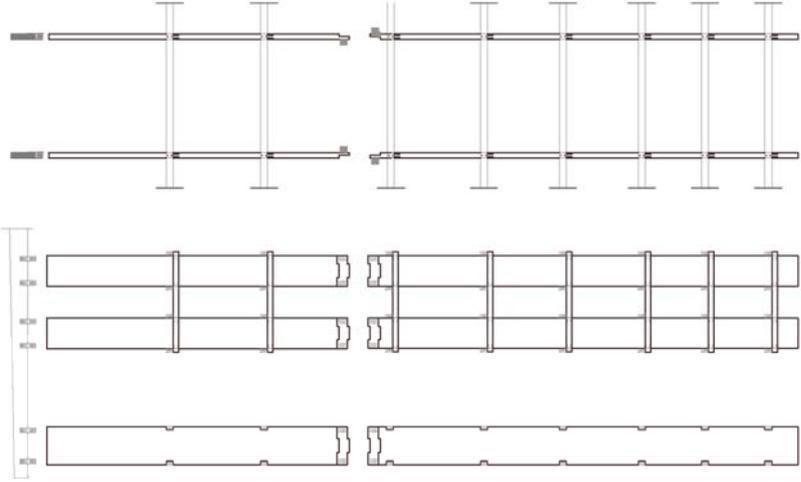
- ++ Die festgelegten Anforderungen der Bewertungskategorie können sehr gut erfüllt werden
- + Die Anforderungen der Bewertungskategorie werden weitestgehend erfüllt mit gewissen Einschränkungen im Vergleich zu „++“
- o Die Anforderungen der Bewertungskategorie werden nur bedingt erfüllt
- Die Anforderungen der Bewertungskategorie werden nur schlecht erfüllt. Gewisse Vorzüge zu „--“ sind jedoch vorhanden.
- Die vorgegebenen Anforderungen der Bewertungskategorie werden nur unzureichend oder nicht eingehalten.
- k.A.** Es erfolgt keine Bewertung, da diese nicht sinnvoll erfolgen kann oder irrelevant ist.

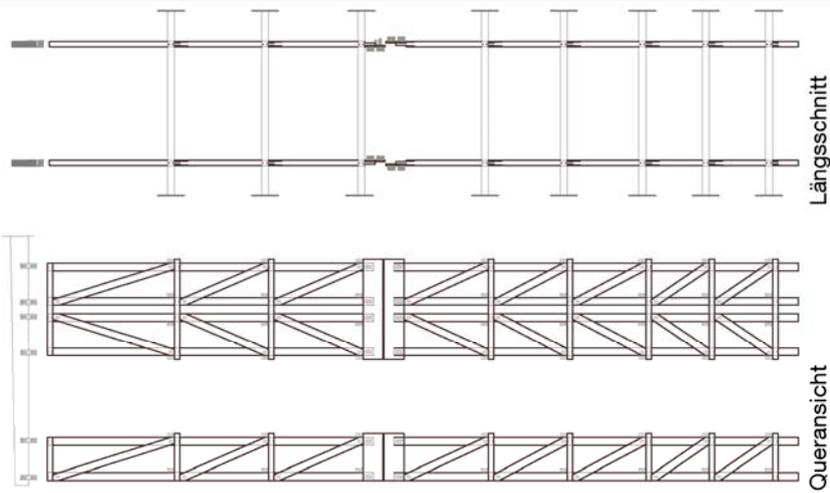
Tabelle 16: Beschreibung der Aufbauten der Bauteile und Bewertung

Tabelle 18: Beschreibung der Aufbauten der Bauteile und Bewertung

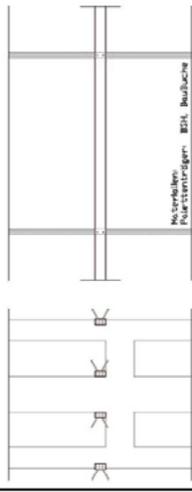
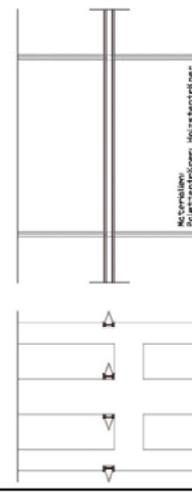
Aufbau	Beschreibung	Materialien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Anmerkungen					
1		<p>Aufbau mit massiven BSP-Elementen mit Steherstoß und Öffnungen</p>	BSP																Verwendung ausschließlich von BSP wegen der erforderlichen Plattenabmessungen					
																					günstige Anordnung der Verbindungsmittel möglich			
																						ggf. Weiterverwendung der Öffnungsverschnitte (Forschung) oder Herstellung von BSP bereits mit Öffnungen		
																						Verwendung einer Holz-Holz Verbindung (stehendes, gerades Blatt)		
																						Anordnung des Steherstoßes möglichst in der Nähe einer Palettenträgerebene		

Aufbau	Beschreibung	Materialien	Anmerkungen
	<p>Aufbau mit linienförmigen massiven Stehern, kein Steherstoß</p>	<p>BSH BauBuche</p>	<p>keine Skalierbarkeit über die Höhe wegen durchlaufender Steher bisher meist ausgeführter Steheraufbau aus BSH</p>
1			++
2			+
3			o
4			-
5			+
6			o
7			++
8			++
9			++
10			+
11			++
12			++
13			++
14			++
15			-
16			o

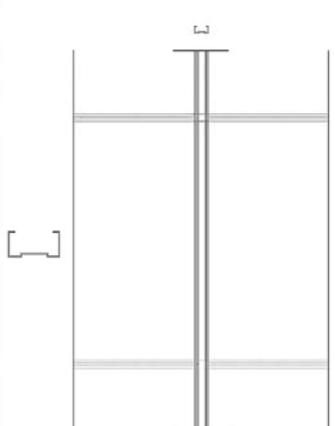
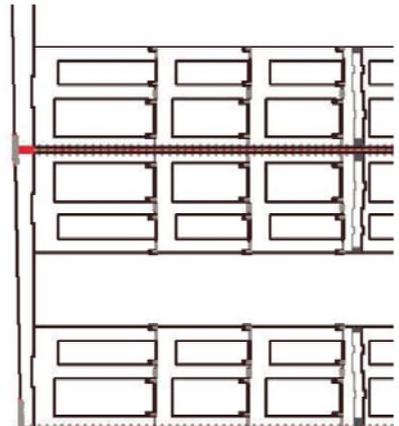
	Aufbau	Beschreibung	Materialien	Anmerkungen
3		<p>Aufbau wie 2 aber mit Steherstoß und Koppelträgern</p>	<p>Steher: BSH BauBuche</p> <p>Koppelträger: BauBuche Mehrschichtplatten Flachstahl</p>	<p>1. o</p> <p>2. ++</p> <p>3. ++</p> <p>4. -</p> <p>5. +</p> <p>6. o</p> <p>7. +</p> <p>8. o</p> <p>9. o</p> <p>10. o</p> <p>11. ++</p> <p>12. ++</p> <p>13. o</p> <p>14. o</p> <p>15. ++</p> <p>16. k. A.</p>
<p>Mehrbreite wegen seitlicher Anbringung der Laschen</p> <p>Aufgrund der "Weichheit" der Konstruktion nur für begrenzte Lasten erhöhen möglich</p> <p>ggf. Verstärkung der Randsteher im Stoßbereich, z.B. mit außenliegenden Stahlaschen</p> <p>Anordnung des Steherstoßes möglichst in der Nähe einer Palettenträgerebene</p>				

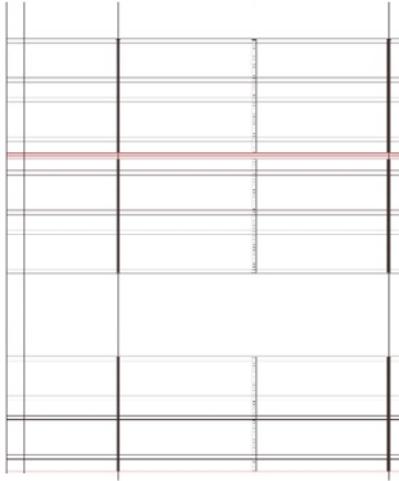
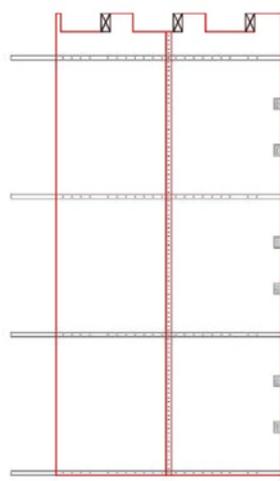
Aufbau	Beschreibung	Materialien	Anmerkungen
 <p style="text-align: right;">Längsschnitt</p> <p style="text-align: left;">Querschnitt</p>	<p>Aufbau als Fachwerk, Integration eines Steherstoßes, Diagonalen zur Aussteifung</p>	<p>Steher: BSH BauBuche</p> <p>Koppelträger/ Diagonalen: BauBuche Mehrschichtplatten Flachstahl</p>	<p>Mehrbreite wegen seitlicher Anbringung der Laschen,</p> <p>Aufgrund der "Weichheit" der Konstruktion nur für begrenzte Lasten erhöhen möglich,</p> <p>Flexibelster dargestellter Steheraufbau aufgrund der Auflösung des Systems</p> <p>ggf. Verzicht auf die beiden mittleren Stützen und direkte Verbindung der Diagonalen mit den Koppelträgern (K-Fachwerk)</p>
			1. o
			2. ++
			3. +
			4. ++
			5. ++
			6. ++
			7. -
			8. -
			9. -
			10. -
			11. -
			12. o
			13. -
			14. o
			15. ++
			16. k. A.

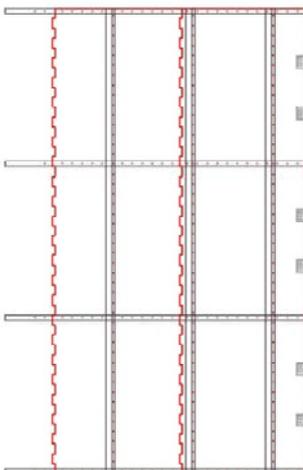
Aufbau	Beschreibung	Materialien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Anmerkungen	
<b>Dachträger</b>																				
<p><b>1</b></p> <p>Querschnitt Schnitt</p>	massive Dachträger, je nach Lagerbreite gestoßen	BSH BauBuche BSP	++	k. A.	k. A.	k. A.	++	+	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	o	einfache Kopplung der Dachträger mit den Stehern (Rahmenbildung)  einfache Ausbildung von Verbindungen  Bei brandschutztechnischen Anforderungen auch innenliegende Verbindungen möglich
	<p><b>2</b></p> <p>Querschnitt Schnitt</p>	Querschnittsoptimierte Holzträger, je nach Lagerbreite gestoßen	Holzstegträger	+	k. A.	k. A.	k. A.	++	+	+	--	k. A.	k. A.	++	+	o	++	o	Steherkopplung (Rahmenbildung)  erschwerte Unterbringung der Verbindungsmittel, Ausföhrung z.B. mit in zwei Ebenen schrägen Schrauben  keine Verwendung mit Stehervverzahnung  Mehraufwand für Dachneigung	

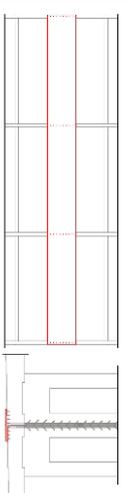
Aufbau	Beschreibung	Materialien	i	ii	iii	iv	v	vi	vii	viii	ix	x	xi	xii	xiii	xiv	xv	xvi	Anmerkungen
<b>Palettenträger</b>																			
 <p><b>1</b></p> <p>Oben: Querschnitt BSH und BauBuche (vierfach vergrößert)                  Unten links: Queransicht auf Steher mit Palettenträger,                  Unten rechts: Längsschnitt Regalfach</p>	massive Palettenträger	BSH BauBuche	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	geeignet für Steher 1, 2, 3, 4 Vertikales Auflager in Steher (Ausparung) oder auf den Koppelträger Verschraubung mit schräg eingedrehten Vollgewindeschrauben
	 <p><b>2</b></p> <p>Oben: Querschnitt Holzstegträger (vierfach vergrößert)                  Unten links: Queransicht auf Steher mit Palettenträger,                  Unten rechts: Längsschnitt Regalfach</p>	Querschnittsoptimierte Holzträger	Holzstegträger	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++



Aufbau	Beschreibung	Materialien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Anmerkungen
 <p>Oben: Querschnitt Sigma-Profil vergrößert Unten: Längsschnitt mit Fachansicht</p>	Kaltgeformte Stahlprofile	Sigma-Profil	++	++	++	k. A.	++		--	++		o	++	++	++	++	++	+	geeignet für Steher 1, 2, 3, 4
<b>Längsaussteifung</b>																			
 <p>Querrichtung mit Darstellung der Längsaussteifung (rot) auf den Rückseite der Steher</p>	Aussteifung über ins System integrierte Holzplatten...	BSP Mehrschichtplatten BauBuche FSH																	

Aufbau	Beschreibung	Materialien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Anmerkungen
 <p>Draufsicht Hochregallager mit Längsverbänden (rot)</p>																			
 <p><b>a</b></p> <p>Schnitt in Lagerlängsrichtung mit Ansicht der Längsaussteifung (Platten), der Verschraubung mit den Stehern, Schubbinde zur Bodenplatte (Schubfeigenerierung) und Querverteiler der Last (links)</p>	<p>...mit a) Querverlastenverteiler am Systemende</p>	<p>BSH BauBuche</p>	o	o	++	++	-	+	+	-	+	+	+	o	o	o	+	+	geeignet für Steher 1 und 4

Aufbau	Beschreibung	Materialien	Anmerkungen		
 <p>Schnitt in Lagerlängsrichtung mit Ansicht der Längsaussteifung (Platten), der Verschraubung mit den Stehern, Schubbinde zur Bodenplatte (Schubfeldgenerierung) und Ansicht auf horizontale Konstruktion aus Platten und Palettenträgern (siehe Palettenträgeraufbau 3)</p>	<p>...mit b) horizontalen Platten zur Verbindung von Stabilitätsverbänden</p>	<p>BSP Mehrschichtplatten BauBuche FSH</p>	geeignet für Steher 1 und 4 Verwendung bereichsweise mit Palettenträger 3 zur Aussteifung		
			1	+	
			2	++	
			3	++	
			4	++	
			5	++	
			6	-	
			7	+	
			8	++	
			9	o	
			10	++	
			11	++	
			12	o	
			13	-	
			14	o	
15	+				
16	-				
<p>2</p> <p>Siehe Abbildungen und Erläuterungen des Kapitels 3.3.3</p>	<p>Stahlaussteifungsverbänden ins System integriert</p>	<p>Stahzugdiagonalen</p>	geeignet für Steher 1 und 4 ggf. Lockerung der Stahlauskreuzungen im Laufe der Zeit, Nachspannen erforderlich Weiche Verbindung		
			1	+	
			2	++	
			3	++	
			4	++	
			5	++	
			6	k. A.	
			7	--	
			8	o	
			9	--	
			10	o	
			11	o	
			12	o	
			13	-	
			14	-	
15	+				
16	o				

Aufbau	Beschreibung	Materialien	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	Anmerkungen
<b>3</b> Siehe Abbildungen und Erläuterungen des Kapitels 3.3.3	Verbandstürme aus Holz	BSP Mehrschichtplatten BauBuche FSH	o	o	o	--	++	o	++	++	+	++	+	++	+	+	--	o	geeignet für Steher 2, 3
			<hr/>																
<b>1</b>  Querschnitt und Draufsicht der Koppelplatten Lagerlängsrichtung mit Anordnung über den Längsaussteifungsplatten	linienförmige Anordnung dünner, flächiger Holzprofile im Bereich der Längsaussteifungsverbände auf den Dachträgern	BSP Mehrschichtplatten BauBuche FSH	++	o	k. A.	k. A.	++	+	++	++	-	+	o	++	++	++	++	++	geeignet für Steher 1, 2, 3, 4
			<hr/>																

Die Konzeption der Gesamtstruktur von Hochregallagern aus Holz erfolgt anhand einer Kombination der in Tabelle 16 beschriebenen Konstruktionsvorschläge der Bauteile. Hierbei ist zu beachten, dass nicht alle Komponenten miteinander kombinierbar sind. Aus diesem Grund wurden in relevanten Fällen für die zu fügenden Bauteile in den Anmerkungen mögliche und sinnvolle Kombinationen angegeben.

### 6.6 Auswahl und Darstellung von Systemen für Hochregallager aus Holz

In Kapitel 6.5 werden verschiedene Aufbauten für die Bauteile der Regalstruktur von Hochregallagern aus Holz vorgestellt und bewertet. Im Rahmen von praktischen Projekten können unterschiedliche Bauteilaufbauten wirtschaftlich und konstruktiv interessant werden. Die Wahl der Aufbauten erfolgt projektspezifisch in Abhängigkeit der Anforderungen des Lastenheftes. Einfluss auf die Wahl der Bauteile haben z. B. die Eigenschaften des Lagerguts (Tragfähigkeit, Steifigkeit, Widerstandsfähigkeit gegen chemisch aggressive Lagergüter) die Lagergeometrien (erforderliche Systemsteifigkeit und Tragfähigkeit, Wirtschaftlichkeit im Hinblick auf die Vorfertigung und Montagedauer) oder den Möglichkeiten der Transportierbarkeit.

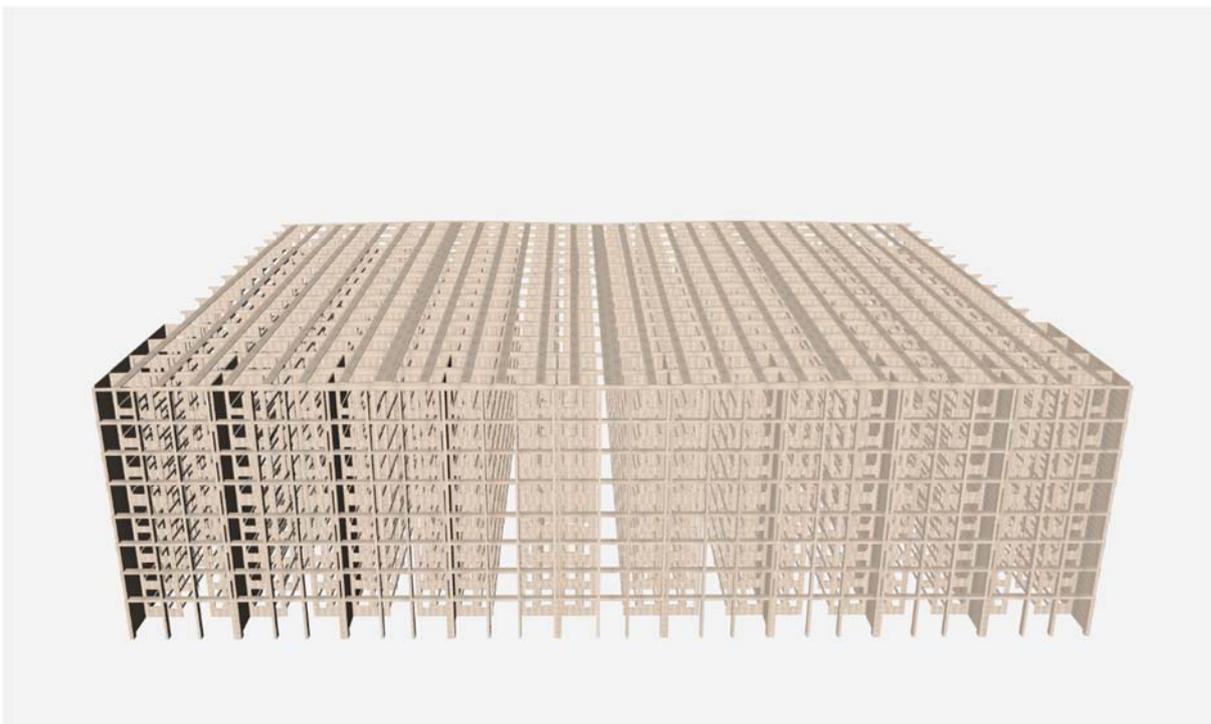
Um die Potenziale von Hochregallagern aus Holz aufzuzeigen, werden Bauteile anhand der Bewertungen der Tabelle 16 für die weiteren Betrachtungen ausgewählt. Basierend auf dem nachgewiesenen Trend hin zu höheren Lagerstrukturen werden möglichst steife Bauteile mit hoher Tragfähigkeit ausgewählt. Für eine uneingeschränkte Transportierbarkeit werden außerdem Bauteile gewählt, die unabhängig von der Hochregallagergröße die Grenzwerte der Transportierbarkeit nach Kapitel 6.3.4 erfüllen. Auf die Verwendung großer Mengen an Stahlteilen wird weitestgehend verzichtet, um die Vorteile von Holz für die in Kapitel 5 abgeleiteten bevorzugten Einsatzgebiete ausnutzen zu können. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen soll ein möglichst geringer Materialbedarf angestrebt werden. Dennoch sollen brandschutztechnische Vorteile bestmöglich genutzt werden.

Die Auswahl ist im Folgenden dargestellt samt einer kurzen Zusammenstellung der besonderen Vorteile die für die Selektion entscheidend waren.

Bauteil	Aufbau	Entscheidende Gründe der Auswahl der Bauteile zur Betrachtung der Potenziale
Steher	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• große Steifigkeit</li> <li>• Kompromiss zwischen einfacher Transportierbarkeit und schneller Montage</li> <li>• hoher Vorfertigungsgrad</li> <li>• Integrierbarkeit der Längsaussteifung</li> <li>• geringer Anteil an Stahlteilen</li> </ul>
Dachträger	1, BSH	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfachheit der Ausbildung der Verbindungen</li> <li>• geringer Anteil an Stahlteilen</li> <li>• massive Querschnitte im Brandfall (ggf. nicht gefordert)</li> </ul>

Palettenträger	1, BSH	<ul style="list-style-type: none"><li>• Einfachheit der Ausbildung der Verbindungen</li><li>• Massive Querschnitt im Falle eines Anpralls des RBG's</li><li>• geringer Anteil an Stahlteilen</li><li>• massive Querschnitte im Brandfall (ggf. nicht gefordert)</li></ul>
Längsaussteifung	1a, BSH	<ul style="list-style-type: none"><li>• Systemintegrierte Längsaussteifung</li><li>• Gleichzeitige Verwendung der Querlastensammler für den Anschluss der Fassade</li><li>• Nutzung der Überfahrstrecke des RBG's</li><li>• Kombinierbarkeit mit der Längsaussteifungsvariante 1b nach Erfordernis</li></ul>
Koppelpfetten / Lastensammler	1 Mehrsch.pl.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Holzbauteile</li><li>• Geringer Anteil einfacher Verbindungen</li><li>• wirtschaftlich, materialsparend, platzsparend</li></ul>

Beispielhafte Regalaufbauten sind in nachfolgenden Renderings dargestellt:



**Abbildung 70: Gesamtansicht der für die weitere Betrachtung selektieren Hochregallagerkonstruktion**



**Abbildung 71: Möglicher Aufbau der Module für die Addition**



**Abbildung 72: Darstellung eines beispielhaften Steherstoßes**

Anhand des im Anhang gegebenen Konstruktionskataloges werden, ausgehend vom Gesamtaufbau eines Hochregallagers die einzelnen Bauteile dargestellt. Der Schwerpunkt wird auch hier auf den gewählten Konstruktionsaufbau gelegt. Bezüglich der Modularisierung werden zwei verschiedenen Ausbildungen der Aufbauten gezeigt. Für die wichtigen Verbindungen werden anhand von Details Vorschläge zu deren Ausführung angegeben.

### 6.7 Fazit

Für den Bau der Regalstruktur von Hochregallagern aus Holz sind unterschiedliche Bauteilaufbauten möglich. Aufgrund der geringen Anzahl an Bauteilen ist zu Beginn die Klärung der relevanten Bauteile samt einer Zuweisung von Anforderungen und Aufgaben sinnvoll. Anhand des gezeigten Bewertungsschemas kann eine sinnvolle Selektion geeigneter Bauteile erfolgen. Im konkreten Fall wurden verschiedene Bauteilaufbauten und Anschlussmöglichkeiten gezeigt. Das größte Potenzial liegt aufgrund der hohen Stückzahlen in Verbindung mit dem großen Materialaufwand in der Ausbildung der Steher. Einen ebenfalls großen Materialaufwand bedingen die Palettenträger. Bezüglich der Ausbildung dieser sind die konzeptionellen Freiheiten aufgrund der geometrischen und anlagentechnischen Anforderungen beschränkt. Potenzial birgt lediglich die Querschnittsausbildung.

Die Auswahl an Bauteilen wurde aufgrund der Rahmenbedingungen der bisherigen Ergebnisse des Forschungsprojektes getroffen, um ein möglichst breites Anwendungsspektrum abdecken zu können. Im Rahmen von unterschiedlichen Projekten aus der Praxis können überdies in Abhängigkeit der Anforderungen abweichende Aufbauten sinnvoll und wirtschaftlich sein. Beispiele möglicher Bauteilaufbauten wurden in Tabelle 16 angegeben und beschrieben. Vorschläge möglicher Bauteil- und Konstruktionsaufbauten mit dem Schwerpunkt im gewählten Entwurf sind im Anhang des Forschungsberichtes zu finden.

Der gewählte Entwurf stellt eine relativ einfache Konstruktion dar, die die Vorzüge eines hohen Vorfertigungsgrades und somit einer kurzen Montagezeit und eines modularen und skalierbaren Aufbaus vereint. Durch die massive Ausbildung der Steher werden günstige geometrische Grundlagen für die Integration der Verbindungen geschaffen. Im Gesamtsystem können somit trotz der Ausbildung von Steherstößen sehr steife Konstruktionen erreicht werden. Durch die Öffnungen in den Stehern können die Palettenträger einfach eingebracht und eine „reine“ Holzlängsaussteifung im System integriert werden. Die Öffnungen können durch spezielle Anlagen direkt bei der Fertigung von Brettsperrholz vorgesehen werden. Die Anlagen zur direkten Herstellung von Brettsperrholz mit Öffnungen sind allerdings am Markt noch nicht weit verbreitet und stellen daher zu diesem Zeitpunkt noch eine Besonderheit dar. Alternativ, was derzeit den Regelfall darstellt, werden die Öffnungen nachträglich aus massiven BSP-Platten geschnitten. Zunächst bedeutet dies einen sehr großen Materialverschnitt. Die Verschnitte der Öffnungen weisen nicht zu vernachlässigende Größen auf. Beispielsweise könnten die Platten direkt für andere Einsatzgebiete (z. B. Stürze) weiterverwendet werden. Eine sinnvolle Anwendung wäre die erneute Fügung der Plattenreste über Universal-Keilzinkenverbindungen zu Platten größerer Abmessungen. Der Entwurf der Norm für Brettsperrholz berücksichtigt bereits Universal-Keilzinkenverbindungen [E D-16351]. Hierdurch wäre eine Weiterverwendung der Plattenreste möglich.

## 6 Konzeption potenzieller Regalkonstruktionen für Holzhochregallager

---

Der gewählte Konstruktionsaufbau dient als Grundlage der weiteren Betrachtungen und der Erläuterungen zur Berechnung von Hochregallagern im nachfolgenden Kapitel.

## 7 Berechnung von Hochregallagern aus Holz

*Peter Glaser*

### 7.1 Allgemeines

Hochregallager sind hoch beanspruchte Tragwerke. Im Rahmen der Bemessung dieser Anlagen sind neben den gängigen zusätzliche nutzungsbedingte Einwirkungen zu berücksichtigen. Anhand des Kapitels 7.3 werden die Besonderheiten bei der Zusammenstellung der Einwirkungen und Bildung der Lastfallkombinationen dargestellt. In Anlehnung an die Bemessung im Stahlbau werden außerdem Regeln für die Modellbildung von Hochregallagern aus Holz aufgezeigt. In Bezug auf die Anforderungen der Regalstruktur werden die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit genauer betrachtet, da diese im Rahmen der Bemessung einen entscheidenden Einfluss auf die Dimensionierung haben. Hierfür werden in einer Parameterstudie beispielhaft verschiedene geometrische Ausbildungen der Lager untersucht um die Grenzen und Leistungsfähigkeiten der Systeme abschätzen zu können. Das Vorgehen bei der Konstruktion und Bemessung wird abschließend in einer Planungs- und Berechnungsanleitung der Regalstruktur für eine übersichtliche praktische Anwendung zusammengefasst.

### 7.2 Einwirkungen

#### 7.2.1 Gängige Einwirkungen im Bauwesen

Aufgrund der Betrachtung von dach- und wandtragenden Hochregallagern müssen neben den typischen Lagerlasten auch äußere Einwirkungen im Rahmen der Nachweise der Standsicherheit berücksichtigt werden. Diese Lasten beeinflussen die Bemessung maßgeblich und sind bei Silos in jedem Fall zu berücksichtigen, stellen jedoch für Hochregallagern im Vergleich zu anderen Bauwerken keine Besonderheit dar. Aus dem Grund werden die Einwirkungen an dieser Stelle nicht vertieft erläutert. Für nähere Informationen sei auf die Eurocodes verwiesen. Mögliche, gängige Einwirkungen sind:

- Eigengewicht der Struktur und Einbauteile, sowie von Dach und Fassade
- Nutzlasten (Die Besonderheiten der Ladeeinheiten werden in Kapitel 7.2.2 erläutert)
- Windlasten
- Schneelasten
- ggf. seismische Einwirkungen
- ggf. Verkehrslasten (z. B. bei der Installation von Bühnen und Laufgängen, siehe auch DIN EN 15512:2010-09, 6.3.6)
- ggf. Temperaturlasten (z. B. Tiefkühlager)

#### 7.2.2 Spezielle Einwirkungen und Imperfektionen bei automatisch bedienten Hochregallagern in Silobauweise

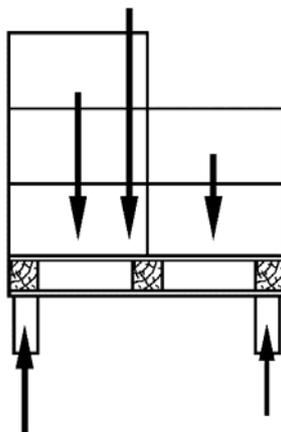
Bei der statischen Bemessung von Hochregallagern aus Holz sind neben den gängigen Einwirkungen des Hochbaus zusätzliche, lagerspezifische Lasten zu berücksichtigen. Nachfolgende Zusammenstellung soll einen Überblick über mögliche Belastungen sowie den Besonderheiten der Einwirkungen geben.

### 1. Lagerlasten der Ladeeinheiten

Die Lasten der Ladeeinheiten stellen eine Haupteinwirkung dar. Bedingt durch die Größe der Hochregallager und die Dichte der Lagerung können diese für den Hochbau erhebliche Werte erreichen. Maßgebend wird das vor allem für die Bemessung der Steher sowie der Aussteifungssysteme in Lagerquer- und -längsrichtung.

In Abhängigkeit den Angaben im Lastenheft (Kapitel 6.4.2) sind die Einwirkungen der Ladeeinheiten zu berücksichtigen. Informationen über eine gegebenenfalls vorhandene Vielfalt der Ladeeinheitsgrößen und -lasten ist hierin anzugeben, so dass dies bei der Regalplanung berücksichtigt werden kann. Im Falle von variierenden Ladeeinheiten sind im Anschluss an die Regalauslegung explizite Bereiche für die jeweiligen Ladeeinheiten auszuweisen, um im Folgenden das System der automatischen Regalbedienung hierauf auslegen zu können. Spezielle Wünsche (z. B. aus Anforderungen der Intralogistik) für die Anordnung der Paletten sind mit dem Betreiber und dem Hersteller der Fördertechnik abzustimmen oder idealerweise direkt aus dem Lastenheft ersichtlich.

Eine Besonderheit bei Hochregallagern können ungleichmäßig verteilte Lasten (Abbildung 73) darstellen. Im Regelfall sind diese bei Silos nicht anzusetzen, außer es wird im Rahmen der Vorgaben für die Regalauslegung darauf hingewiesen.



**Abbildung 73: ungleichmäßig beladene Palette mit Lastaufteilung, in Anlehnung an [DIN-15629]**

Von einer planmäßig exzentrischen Positionierung der Ladeeinheit auf den Palettenträgern ist bei automatisch bedienten Hochregallagern nicht auszugehen. Diese sind nur zu berücksichtigen, wenn die Auswirkung (z. B. Belastung, Verformung) der maximalen Imperfektionen aus der Belastung die Auswirkungen der Träger bei normaler Belastung um mehr als 12% übersteigt [DIN-15512].

Zusammengefasst bedeutet dies, dass der Planer der Regalstruktur von gleichmäßig beladenen und symmetrisch eingelagerten Ladeeinheiten ausgehen kann, wenn die Anforderungen nach DIN EN 15512:2010-09, 6.3.2 eingehalten sind. Wenn diese Kriterien erfüllt werden, ist eine Systemauslegung unter Annahme gleichmäßig verteilter Feldlasten möglich.

## 2. Beschickungslasten

Aufgrund der Regalbedienung sind Lasten infolge der Platzierung der Waren zu berücksichtigen. [DIN-15512] gibt in Abhängigkeit der Betriebsart Mindestbeschickungslasten an. Beschickungslasten können in vertikaler und horizontaler Richtung auftreten.

Vertikale Beschickungslasten  $Q_{pv}$  sind bei Systemen mit automatischer Regalbedienung nur bei Regalstrukturen mit Einplatzlagerung oder gleichzeitig platzierten Mehrfachlasten anzusetzen. Falls eines dieser Systeme vorliegt, sind vertikale Beschickungslasten bei der Bemessung der Palettenträger sowie deren Anschlüsse zu berücksichtigen. Anzusetzen ist die Beschickungslast in der ungünstigsten Position mit einem Anteil von 25% der maximalen Ladeeinheitslast.

Horizontale Beschickungslasten  $Q_{ph}$  sind in ungünstigster Position einzeln (keine Überlagerung) sowohl in Ganglängs- als auch -querrichtung anzusetzen. Die Lastwerte der horizontalen Beschickung sind vom Hersteller der Regalbedienanlage anzugeben. Mindestens gilt jedoch  $Q_{ph} = 0,25kN$ .

In Lagerlängsrichtung sind die horizontalen Beschickungslasten nur in den Trägerebenen anzusetzen. Zur Reduzierung der Lastfälle kann vereinfachend eine Gesamtlast von  $2Q_{ph}$  angenommen werden, die gleichmäßig über alle Trägerebenen zu verteilen ist.

In Lagerquerrichtung sind die horizontalen Beschickungslasten in zwei Formen anzusetzen. Zum einen muss die Wirkung auf das Gesamtsystem geprüft werden. Hierzu werden die Beschickungslasten auf die Steher aufgebracht. Maßgebende Stellen sind nach [DIN-15512] der oberste Punkt der Steher (Rahmenecke in Lagerquerrichtung) oder der Mittelpunkt zwischen zwei Verstrebungsknoten. Der oberste Punkt des Lastangriffs ist für die Bemessung von Hochregallagern aus Holz ebenfalls anzusetzen. Abweichend zur zweiten Nachweisstelle wird eine Lasteinleitung in Höhe der Steherstöße empfohlen. Begründet wird dies durch die aus Beschickung maximal hervorgerufene Beanspruchung des Anschlussbereiches. Neben der Gesamtsystemüberprüfung sind zum anderen die Palettenträger unter Beschickungslasten nachzuweisen (schwache Achse). Maßgebende Stellen für die Biege- und Schubspannungsnachweise sind zu betrachten. Eine Interaktion mit der  $Q_{ph}$  verursachenden vertikalen Beschickungslast braucht nicht zu erfolgen.

Für andere Regalbedienungsarten sind abweichende Vorgaben zu beachten (für Regalanlagen aus Stahl nach [DIN-15512]).

Nach [DIN-15512] sind Beschickungslasten für die Standsicherheitsnachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit anzusetzen, brauchen jedoch im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nicht berücksichtigt zu werden.

## 3. Auswirkungen von regalgeführten Geräten

Im Falle der betrachteten Hochregallager mit automatischen Regalbediengeräten werden durch die Schiefstellung der Bediengeräte horizontale Abtriebskräfte durch die obere Führungsschiene (vergleiche Abbildung 6) verursacht, die in der Regalstruktur Seitenstützungslasten hervorrufen.

In Abhängigkeit der Lagergröße variiert die Anzahl der Regalgassen und entsprechend auch die Anzahl der Bediengeräte. Die Wahrscheinlichkeit, dass alle Bediengeräte zum selben Zeitpunkt Abtriebskräfte in dieselbe Richtung verursachen, sinkt. Folglich darf für zusammenhängende Rahmen nach [DIN-15512] die Anzahl der anzusetzenden Seitenstützlasten  $Q_h$  nach Tabelle 17 reduziert werden. Anzusetzen ist die Last in Lagerlängsrichtung in der ungünstigsten Position für die Lagerquerrichtung.

**Tabelle 17: Anzusetzende horizontale Einwirkungen der oberen Führungsschiene bei regalgeführten Geräten in Abhängigkeit der Anzahl der Regalbediengeräte in Anlehnung an Tabelle 1 der [DIN-15512]**

Anzahl der Regalbediengeräte	$Q_{h,t}$
1 oder 2	$\sum Q_h$
3	$0,85 \cdot \sum Q_h$
4	$0,7 \cdot \sum Q_h$
$\geq 5$	$3 \cdot Q_h$
mit: $Q_h$	maximal anzusetzende Seitenstützlast aus dem RBG
$Q_{h,t}$	verminderte kumulierte Seitenstützlast des Gesamtsystems in Abhängigkeit der Anzahl der Regalbediengeräte

Gegebenenfalls planmäßig vorhandene Exzentrizitäten bei Regalbediengerät und Führungsschiene schließen eine Anwendung der Tabelle 17 aus. Weitere besondere Lasten, die durch das Regalbediengerät entstehen, wie z. B. bei kurvenfahrenden oder bei über das Lager hinausfahrenden Regalbediengeräten, sind von den Bediengeräteherstellern anzugeben und entsprechend zu berücksichtigen.

4. *Außergewöhnliche Einwirkungen aus Stoßbeanspruchungen*

Stoßbeanspruchungen der Regalstruktur sind nicht planmäßige Einwirkungen, die durch die Regalbedienung entstehen können. Da diese im Regelfall nicht auftreten, sind sie als außergewöhnliche Einwirkungen zu behandeln. [DIN-15512] nimmt an, dass die Einwirkungen aus Nutz- und Beschickungslasten eine ausreichende Sicherheit gewöhnlicher Stoßbedingungen beinhalten. Es sind jedoch gegebenenfalls im Rahmen der Standsicherheitsnachweise Lasten und Anwendungen zu berücksichtigen, die ungewöhnliche Schwingungen oder dynamische Lasten mit sich bringen.

[DIN-15512] macht für Stahlregale Vorgaben bezüglich der Ausbildung der Stützen. So soll die Standsicherheit der Stützen mittels eines angebrachten Stützenschutzes zur Prävention der direkten mechanischen Einwirkung gewahrt werden. Unabhängig von der Art der Regalbedienung werden Angaben zur Ausbildung der Schutzeinrichtung gegeben. Bei Hochregallagern mit RBGs ist es gegebenenfalls nicht erforderlich die Stützen durch separate Schutzeinrichtungen zu sichern.

Für Hochregallager aus Holz mit automatischer Regalbedienung werden keine Schutzsysteme für die Steher vorgesehen. Begründet wird dies zum einen durch die nicht zwingende

Installation eines Stützenschutzes für Hochregallager aus Stahl mit automatischer Regalbedienung und zum anderen durch die Massivität der Stützenquerschnitte und den Materialeigenschaften von Holz. Ein Stabilitätsversagen der Steher, ähnlich denen der dünnwandigen Profile des Stahlbaus, kann für den Holzbau ausgeschlossen werden.

Im Rahmen der Bemessung sind Regalbauteile direkt über Ladeeinheiten für außergewöhnliche vertikale Beanspruchungen auszulegen. Die außergewöhnlichen vertikalen Einwirkungen  $A_{pv}$  sind nach [DIN-15512] anzunehmen zu:

$$A_{pv} = 0,5 \cdot Q_u \begin{cases} \geq 0,25 \text{ kN} \\ \leq 5,0 \text{ kN} \end{cases}$$

Für außergewöhnliche horizontale Einwirkungen ist bei automatischer Regalbedienung separat in Ganglängs- oder -querrichtung nach [DIN-15512] eine Last  $A_{ph} = 0,5 \text{ kN}$  als außergewöhnliche Überbelastung anzusetzen. Bestimmte Gerätetypen können abweichende Beanspruchungen aufweisen. Eine Abstimmung mit dem Hersteller der Bediengeräte ist erforderlich.

### 5. Imperfektionen

Vorhandene geometrische und strukturelle Imperfektionen sind zu berücksichtigen. DIN EN 15512:2010-09 gibt in Kapitel 5.3.3 Werte für die Imperfektionen von ausgeseiften Hochregalsysteme aus Stahl an. Im Holzbau werden geometrische Imperfektionen der Bauteile, strukturelle Imperfektionen aus Herstellung und Montage sowie Inhomogenitäten der Baustoffe bereits durch die Bemessungsmethode berücksichtigt sind [DIN-1995-1-1]. Die Norm gibt für Rahmen anzusetzende Imperfektionen an. Für die Bemessung von Hochregallagern aus Holz (Rahmen in Lagerlängs- und Querrichtung) können die vorgegebenen Imperfektionen angewendet werden. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Toleranzen bei der Herstellung und Errichtung von Hochregallagern im Vergleich zum regulären Holzbau liegt dieser Ansatz auf der sicheren Seite. Anhand von weiterer Forschungsarbeit und dem Zugewinn von Erfahrungen könnte eine hochregalspezifische Anpassung der Werte erfolgen.

In Lagerlängsrichtung sind für die Berechnung nach DIN EN 15512:2010-09 alle an einen Aussteifungsverband angeschlossenen Querrahmen mit Imperfektionen in einer Richtung zu berücksichtigen. In Lagerquerrichtung sind analog alle Imperfektionen der über den Dachträger gekoppelten Steher anzusetzen.

### 6. Belastung der Durchschubsicherung

Nach [DIN-15629] sind die auf die Durchschubsicherungen wirkenden Kräfte durch die Fördermittel vom Planer festzulegen. Sind die Kräfte nicht festgelegt, so sind die Lasten nach [DIN-15512] anzusetzen. [DIN-15512] gibt nur einen Mindestwert der Belastung für manuell bediente Lager an. Die Angaben zu Einwirkungen auf die Durchschubsicherung sind daher bei automatisch bedienten Hochregallagern von den Herstellern der Regalbedienung anzugeben.

7. Montagelastfälle

Falls im Rahmen der Montagearbeiten eine Sicherung der Monteure auch über die bereits erstellte Regalstruktur erfolgen soll, sind die entsprechenden Bauteile für einen Sturz der Monteure auszulegen. Mit einer bleibenden Verformung ist aufgrund der Bauteileigenschaften beim Hochregallager aus Holz nicht zu rechnen.

Aufgrund der Schlankheit der Bauteile und der liegenden Montage in Schablonen sind die Module für Montagelastfälle im Hinblick auf Biegedrillknicken zu untersuchen.

7.2.3 Gegenüberstellung und Bewertung des Einflusses der Einwirkungen

Hochregallager werden in vertikaler Richtung primär durch die Einwirkungen der Ladeeinheiten beansprucht. Um die Dominanz der Lagerlasten durch die Ladeeinheiten ersichtlich zu machen, werden in Abbildung 74 die charakteristischen vertikalen Auflagerkräfte gegenübergestellt. Die Untersuchung erfolgte für Ladeeinheitslasten von 1000kg und einem maximalen Lagerauslastungsgrad von 80%. Beispielhaft wurden der Standort und die Lagerabmessungen in Lagerquer- und Lagerlängsrichtung von Alnatura gewählt. Die Hochregallager mit diesen Grundrissabmessungen werden für verschiedene Höhen von 20m, 30m und 40m untersucht. Die Modulhöhe wird zu 10m gewählt. Je Modul werden 4 übereinander liegende Ladeeinheitsebenen vorgesehen.

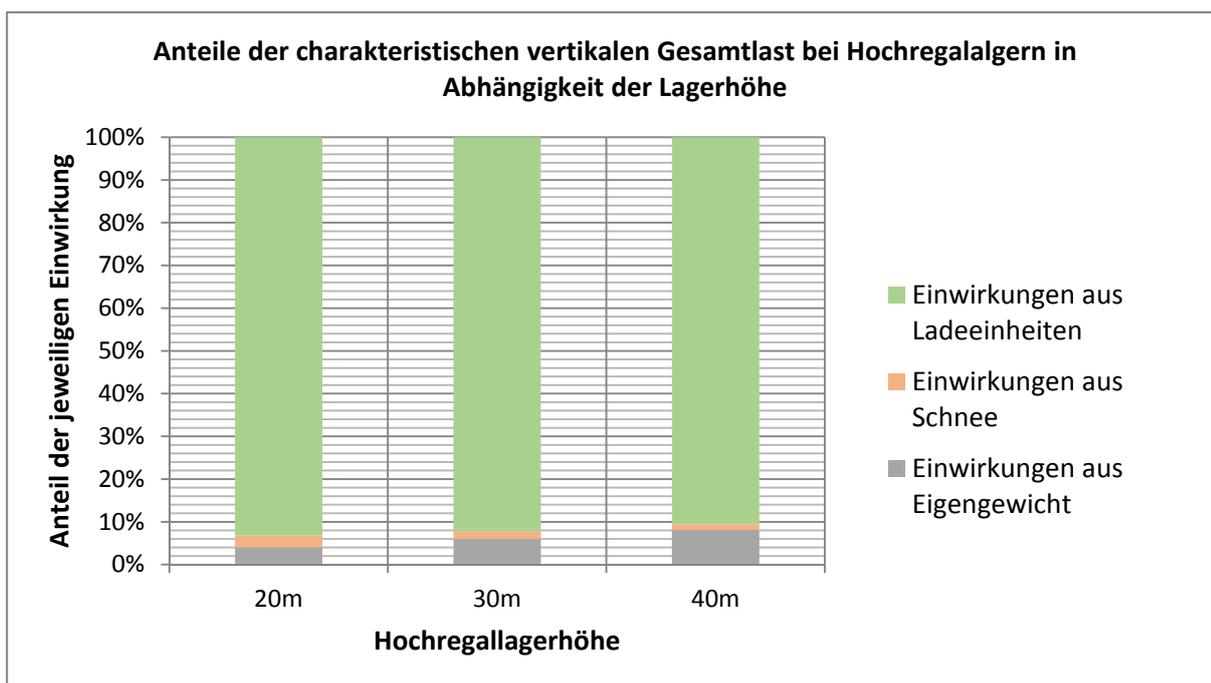
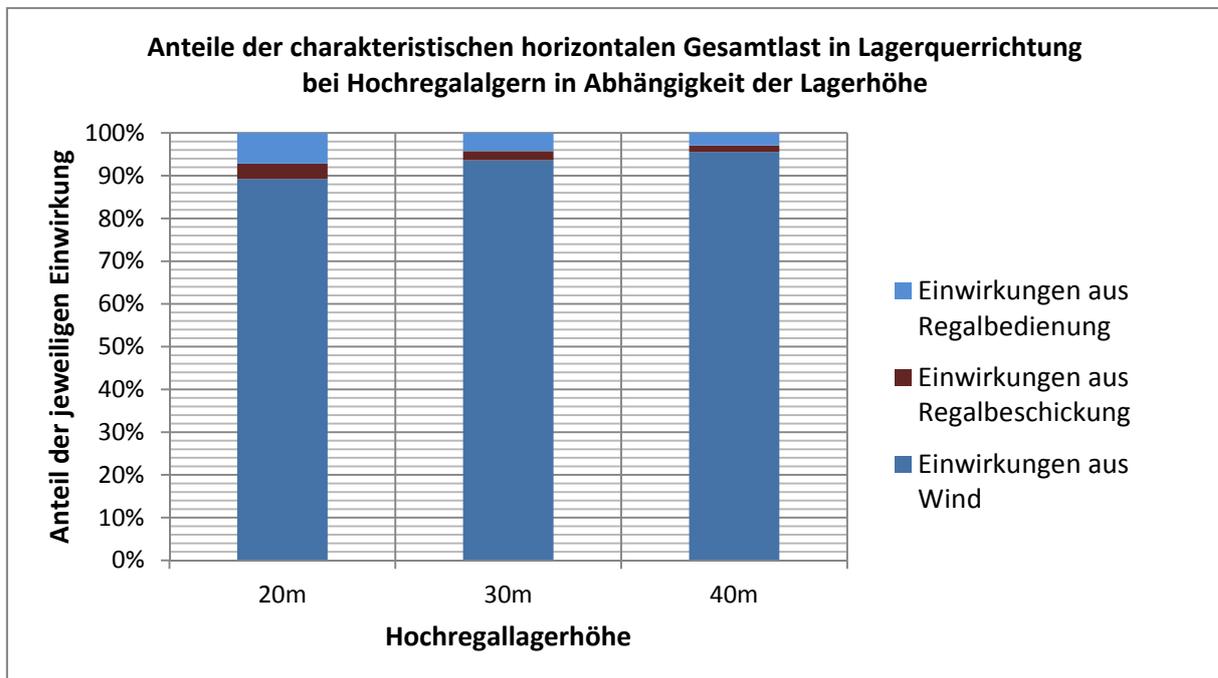


Abbildung 74: Gegenüberstellung der charakteristischen Anteile der vertikalen Einwirkungen

Wie Abbildung 74 zeigt, beträgt der charakteristische Anteil der Einwirkungen aus den Ladeeinheiten ca. 90%. Das Eigengewicht nimmt einen Anteil von weniger als 10%, die Schneelast von 1% bis 3% ein. Der Anteil der Schneelast stellt bei der Betrachtung von Hochregallagern eine untergeordnete Einwirkung dar. Mit zunehmender Lagerhöhe sinkt der Einfluss weiter. Die Lasten aus Eigengewicht sind ebenfalls gering. Ihr Einfluss steigt mit der Höhenzunahme von Hochregallager aufgrund der erforderlichen massiveren Ausbildung der Steher auch wegen den Anforderungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Abbildung 74 zeigt die

vertikalen Einwirkungen am Regalfußpunkt. Die unterschiedlichen Wichtigkeiten für die Vorbemessungen im Rahmen von Projekten in der Praxis werden ersichtlich. Im Bereich der Bauteile treten zusätzliche vertikale Komponenten der horizontalen Einwirkungen auf, die es im Rahmen der Bemessung zu berücksichtigen gilt.

Analog den Gegenüberstellungen von den Lasten in vertikaler Richtung erfolgt die Betrachtung der Lastanteile in beiden horizontalen Richtungen für den gewählten Lageraufbau in Abhängigkeit der Lagerhöhe. In Abbildung 75 sind die charakteristischen Lastanteile in Lagerquerrichtung dargestellt. Mit einem Anteil von 90% stellt die Windlast die dominierende Einwirkung dar. Der Anteil aus der Regalbeschickung und aus Schiefstellungen der Regalbediengeräte ist gering. Mit zunehmender Lagerhöhe nimmt deren Einfluss im Gesamtsystem weiter ab.



**Abbildung 75: Gegenüberstellung der charakteristischen Anteile der horizontalen Lasten in Lagerquerrichtung**

Abbildung 76 stellt die Anteile der horizontalen Einwirkungen in Lagerlängsrichtung dar. Die Windlast, mit einem Anteil von über 65% ist auch hier die dominierende Einwirkung, deren Einfluss mit steigender Hochregallagerhöhe zunimmt. Mit einem Anteil zwischen 25% und 35% sind die Einwirkungen aus Imperfektionen der an den Längsverband angehängten Steherrahmen ebenfalls groß. Diese werden direkt von der Anzahl der an einen Längsverband angeschlossenen Steherrahmen beeinflusst. Im betrachteten Beispiel mit den Grundabmessungen des Lagers von Alnatura werden 37 Steherrahmen durch einen Verband ausgesteift. Bei mehr angeschlossenen Steherrahmen nimmt der Anteil der Einwirkungen aus Imperfektionen zu, bei weniger ab. Die Einwirkungen aus Regalbeschickung stellen bei der Gesamtsystembetrachtung wieder eine untergeordnete Rolle dar, deren Einfluss mit zunehmender Lagerhöhe weiter abnimmt.

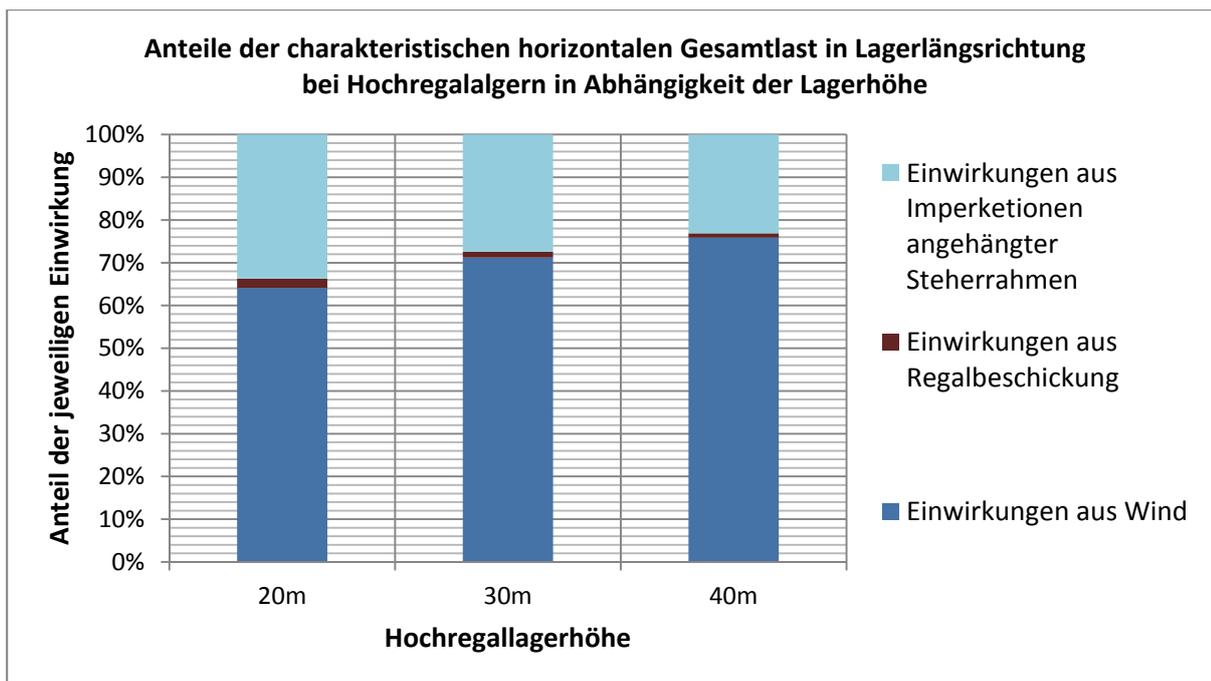


Abbildung 76: Gegenüberstellung der charakteristischen Anteile der horizontalen Lasten in Lagerlängsrichtung

### 7.3 Lastfallkombinationen, Nachweiskonzept und Besonderheiten

#### 7.3.1 Allgemeines / Grundlagen der Bildung der Lastfallkombinationen

Dieses Kapitel befasst sich mit den anzusetzenden Lastfallkombinationen für Hochregallager aus Holz in Silobauweise. Wie bereits in Kapitel 3.4.2 beschrieben, enthält die DIN EN 15512 eine vollständige Bemessungsmethodik für Palettenregale aus Stahl. Aufgrund von Abweichungen in der Bemessungsmethodik (die Bemessung basiert auf einem versuchsgestützten Verfahren) beschloss die Fachkommission Bautechnik, diese Norm nicht in die Liste der Technischen Baubestimmungen aufzunehmen. Dies bedeutet, dass DIN EN 15512 nur für die Bemessung von Hochregallagern aus Stahl herangezogen werden darf, wenn diese eine auf DIN EN 15512 basierende allgemeine bauaufsichtliche Zulassung besitzen. Liegt keine abZ vor, so hat die Bemessung von Hochregallagern aus Stahl auf Grundlage des Eurocodes zu erfolgen. Wesentliche Unterschiede zwischen einer Bemessung nach Eurocode und einer Bemessung nach DIN EN 15512 betreffen die Lastfallkombinationen und die Teilsicherheitsbeiwerte.

#### 7.3.2 Lastfallkombinationen im Grenzzustand der Tragfähigkeit

Nach DIN EN 15512:2010-09 sind im Grenzzustand der Tragfähigkeit folgende beiden Lastkombinationen für die Bemessung zu betrachten:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \quad \text{Berücksichtigung nur jeweils einer Einwirkung}$$

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus 0,9 \cdot \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \cdot Q_{k,i} \quad \text{Berücksichtigung aller Einwirkungen (abgemindert)}$$

Der außergewöhnliche Lastfall wird weiter festgelegt zu:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus \sum_{i \geq 1} Q_{k,i} \oplus A_d$$

mit:

$\oplus$	„zu kombinieren mit“
$\gamma_{G,j}$	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Lasten
$\gamma_{Q,1}$	Teilsicherheitsbeiwert einer veränderlichen Einwirkung
$\gamma_{Q,i}$	Teilsicherheitsbeiwert für veränderliche Lasten
$G_{k,j}$	charakteristischer Wert der ständigen Einwirkungen
$Q_{k,1}$	charakteristischer Wert einer veränderlichen Einwirkung
$Q_{k,i}$	charakteristischer Wert der veränderlichen Einwirkung
$A_d$	Bemessungswert der außergewöhnlichen Einwirkung, da $\gamma_A = 1,0$

In Tabelle 2 der DIN EN 15512:2010-09 sind Teilsicherheitsbeiwerte (Belastungsfaktoren) zur Ermittlung der Einwirkungen im GZT und GZG angegeben. Im Rahmen der Bemessung besonders interessant sind die Teilsicherheitsbeiwerte für Ladeeinheiten mit  $\gamma_Q = 1,4$  oder  $1,3$ . Begründungen zu diesem im Vergleich zum Eurocode abgeminderten Teilsicherheitsbeiwert finden sich in Tabelle 2 der DIN EN 15512 oder Kapitel 3.4.2.

Die Grundkombination der DIN EN 1990:2010-12 für die Nachweise im GZT lautet:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Im außergewöhnlichen Bemessungslastfall erfolgt die Kombination der Einwirkungen nach:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus A_d \oplus \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

mit:

$\oplus$	„zu kombinieren mit“
$\gamma_{G,j}$	Teilsicherheitsbeiwert für ständige Lasten
$\gamma_{Q,1}$	Teilsicherheitsbeiwert für die erste veränderliche Einwirkung
$\gamma_{Q,i}$	Teilsicherheitsbeiwert für weitere veränderliche Einwirkungen
$\psi_{0,i}$	seltener „charakteristischer“ Kombinationsbeiwert der weiteren Einwirkungen
$\psi_{1,1}$	häufiger Kombinationsbeiwert der Einwirkung
$\psi_{2,i}$	„Quasi-ständiger“ Kombinationsbeiwert der weiteren Einwirkungen
$G_{k,j}$	charakteristischer Wert der ständigen Einwirkungen
$Q_{k,1}$	charakteristischer Wert der ersten veränderlichen Einwirkung
$Q_{k,i}$	charakteristischer Wert einer weiteren anzusetzenden veränderlichen Einwirkung
$A_d$	Bemessungswert der außergewöhnlichen Einwirkung, da $\gamma_A = 1,0$

Die relevanten Teilsicherheitsbeiwerte für die Bemessung nach Eurocode für den GZT und GZG sind in Tabelle NA.A.1.2(B) der DIN EN 1990/NA:2010-12 dargestellt. Für ungünstig wirkende veränderliche Einwirkungen, worunter Ladeeinheitslasten zu zählen sind, ist ein Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_Q = 1,50$  anzusetzen.

### 7.3.3 Lastfallkombinationen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Die Lastfallkombinationen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN 15512:2010-09 lauten:

$$E_d = \sum \gamma_G \cdot G_k \oplus \gamma_Q \cdot Q_{k,1}$$

Berücksichtigung nur der ungünstigsten veränderlichen Einwirkung

$$E_d = \sum \gamma_G \cdot G_k \oplus 0,9 \cdot \gamma_Q \cdot \sum_{i \geq 1} Q_{k,i}$$

Berücksichtigung aller ungünstigsten veränderlichen Einwirkungen.

Erläuterung der Symbolik siehe Kapitel 7.3.2.

Nach Eurocode sind im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit in Abhängigkeit der Lasteinwirkungsdauer verschiedene Lastfallkombinationen zu berücksichtigen. Das bedeutet, dass zusätzlich zu den Verformungen zum Zeitpunkt  $t = 0$  infolge ständiger und veränderlicher Einwirkungen ein Zeitpunkt  $t = \infty$  betrachtet werden muss, bei dem Langzeiteffekte des Materials berücksichtigt werden. Im Holzbau wird dieses Verhalten über den Verformungsbeiwert (Kriechfaktor)  $k_{def}$  in Abhängigkeit der Nutzungsklasse beschrieben. Betrachtet wird zum einen die seltene (charakteristische) Kombination zur Ermittlung der maximalen lateralen Verformung des Hochregallagers. Zum anderen wird die quasi-ständige Kombination im Hinblick auf die maximale Stauchung der Steher sowie Durchbiegung der Palettenträger analysiert. Die häufigen Kombinationen werden nicht weiter betrachtet. Diese werden in der Regel für umkehrbare Auswirkungen am Tragwerk verwendet. Aufgrund der Anpassung der Nachweise an die Bemessungsmethoden von Hochregallagern nach DIN EN 15512 und DIN EN 15620 und zur Sicherstellung einer dauerhaften Funktionalität der Anlage werden lediglich die maximalen Verformungen für die beiden Betrachtungszeitpunkte analysiert. Die Kombinationen nach DIN EN 1990:2010-12 lauten:

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

charakteristische Kombination

$$E_d = \sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$$

quasi-ständige Kombination.

Erläuterung der Symbolik siehe Kapitel 7.3.2.

### 7.3.4 Vorgehen und Bildung der Lastfallkombinationen für Hochregallager aus Holz

Hochregallager aus Holz könnten aufgrund der bauaufsichtlichen Regelungen nach Eurocode bemessen werden. Aufgrund der Besonderheiten von Hochregallagern regeln die Eurocodes jedoch nicht alle potenziell vorkommenden Einwirkungen. Eine vollständige Bemessung nach Eurocode ist nicht möglich, da bemessungsrelevante, lagerspezifische Angaben fehlen. Für Hochregallager aus Holz ergibt sich die zusätzliche Problematik, dass die in Tabelle 1 angegebenen bemessungsrelevanten Richtlinien für Hochregallager auf die Verwendung von Stahl beschränkt sind. Aus diesem Grunde wird für die Bemessung von Hochregallager aus Holz folgendes Nachweiskonzept vorgeschlagen:

1. Die Lastfallkombinationen und die Bemessung erfolgt auf Basis der bauaufsichtlich eingeführten Eurocodes.
2. Erforderliche Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte werden, soweit vorhanden, ebenfalls den Eurocodes entnommen.

3. In den Eurocodes fehlende lagerspezifische Lasten und Teilsicherheitsbeiwerte werden in Anlehnung an DIN EN 15512 gewählt. Lasten aus der Regalbedienung können abweichend zu DIN EN 15512 durch Herstellerangaben ersetzt werden (siehe auch Kapitel 7.2.2 oder DIN EN 15512). Für Beschickungslasten als veränderliche Einwirkungen wird abweichend zu DIN EN 15512 in Anlehnung an die Bemessung nach Eurocode ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,5 anstatt 1,4 angesetzt. Als Kombinationsbeiwert für Lasten aus der Lagerbedienung wird der Faktor 0,9 (im Nachweiskonzept der DIN EN 15512 vorgesehen für die Kombination mehrerer Lasten) verwendet. Die Verwendung des Faktors liegt aufgrund der Häufigkeit des Auftretens der Last auf der sicheren Seite. Durch die Untersuchung der Häufigkeit der Einwirkung ist eine zukünftige Reduzierung möglich.
4. Für die Kombinationsbeiwerte der Einwirkungen der Ladeeinheiten bei der Gesamtsystemanalyse wird, in Abweichung zum Eurocode, die Berücksichtigung eines geringeren Kombinationsbeiwertes vorgeschlagen. Dieser wird nutzerspezifisch im Lastenheft definiert und gibt den maximalen Auslastungsgrad des Hochregallagers an. Wird ein maximaler Auslastungsgrad definiert, so muss dieser im Lagerverwaltungssystem ebenfalls berücksichtigt werden. Durch diese Berücksichtigung erfolgt die Einlagerung der Ladeeinheiten so, dass keine Überbelastung der Regalblöcke eintritt. Dies gilt nicht für die Auslegung der Palettenträger, die immer für die volle Fachlast zu bemessen sind.  
Wird kein maximaler Auslastungsgrad definiert (theoretisch wäre eine volle Befüllung des Lagers möglich), so muss der Kombinationsbeiwert für Lagerräume nach Eurocode angesetzt werden.
5. Für die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit wird in Anlehnung an DIN EN 15620:2010-05 und FEM 9.831-1 die Windgeschwindigkeit nach Eurocode nur zu 70% angesetzt. Durch den Zusammenhang

$$q_w \sim v_w^2$$

mit:

$q_w$  Windgeschwindigkeitsdruck,

$v_w$  Windgeschwindigkeit

ergibt sich ein Abminderungsfaktor für Wind im GZG von 0,49 (Für die Lastfallkombinationen wird im Folgenden der Abminderungsfaktor über den Kombinationsbeiwert eingerechnet). Die Abminderung ist nicht zulässig, falls in den Spezifikationen zum Projekt anderes definiert ist.

Die empfohlenen Lastfallkombinationen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit sind in nachfolgenden Tabelle 18 und Tabelle 19 für Lager bis 1000m ü. d. M. dargestellt. Für höher gelegene HRL muss der Kombinationsbeiwert der Schneelast angepasst werden.

**GZT**  
**Tabelle 18: Zusammenstellung der Lastfallkombinationen für den Grenz Zustand der Tragfähigkeit**

LF	$\gamma_g$	$\beta_k$	$\gamma_q$	$\psi_{0,pal} \phi_k$	$\gamma_s$	$\psi_{0,i}$	$s_k$	$\gamma_w$	$\psi_{0,i}$	$w_{k,x}$	$\gamma_w$	$\psi_{0,i}$	$w_{k,z}$	$\gamma_{besch,x}$	$\psi_{0,i}$	$\gamma_{besch,x}$	$\psi_{0,i}$	$\gamma_{ph,x}$	$\psi_{0,i}$	$\gamma_{ph,z}$	$\psi_{0,i}$	$\gamma_{bed,z}$	$\psi_{0,i}$	$R_{Fakt}$	$Q_{bed,z}$	KLED	kmod	Schiefstellung			
101	1,35	x																								ständig	0,6	JA	NEIN		
102	1,35	x																									ständig	0,6	NEIN	JA	
103	1,35	x	1,5	0,8	x																						lang	0,7	JA	NEIN	
104	1,35	x	1,5	0,8	x																						lang	0,7	NEIN	JA	
105	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	1,0	x																			kurz	0,9	JA	NEIN	
106	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	1,0	x																			kurz	0,9	NEIN	JA	
107	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	1,0	x	1,5	0,6	x																kurz/	1,0	JA	NEIN	
108	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	1,0	x	1,5	0,6	x																kurz/	1,0	NEIN	JA	
109	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	0,5	x	1,5	1,0	x																kurz/	1,0	JA	NEIN	
110	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	0,5	x	1,5	1,0	x																kurz/	1,0	NEIN	JA	
111	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	1,0	x		1,5	0,6	x															kurz/	1,1	JA	NEIN	
112	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	1,0	x		1,5	0,6	x															kurz/	1,1	NEIN	JA	
113	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	0,5	x		1,5	1,0	x															kurz/	1,1	JA	NEIN	
114	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	0,5	x		1,5	1,0	x															kurz/	1,1	NEIN	JA	
115	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	1,0	x	1,5	0,6	x			1,5	0,9	x											sehr	1,1	JA	NEIN	
116	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	1,0	x	1,5	0,6	x			1,5	0,9	x											sehr	1,1	NEIN	JA	
117	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	0,5	x	1,5	1,0	x			1,5	0,9	x											sehr	1,1	JA	NEIN	
118	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	0,5	x	1,5	1,0	x			1,5	0,9	x											sehr	1,1	NEIN	JA	
119	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	0,5	x		1,5	0,6	x						1,5	0,9	x							sehr	1,1	JA	NEIN	
120	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	0,5	x		1,5	0,6	x						1,5	0,9	x							sehr	1,1	NEIN	JA	
121	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	0,5	x		1,5	1,0	x						1,5	0,9	x							kurz/	1,0	JA	NEIN	
122	1,35	x	1,5	0,8	x	1,5	0,5	x		1,5	1,0	x						1,5	0,9	x							kurz/	1,0	NEIN	JA	
123	1,0	x							1,5	1,0	x																	kurz/	1,0	JA	NEIN
124	1,0	x							1,5	1,0	x																	kurz/	1,0	NEIN	JA
125	1,0	x								1,5	1,0	x																kurz/	1,0	JA	NEIN
126	1,0	x								1,5	1,0	x																kurz/	1,0	NEIN	JA
127	1,0	x							1,5	1,0	x							1,5	0,9	x							sehr	1,1	JA	NEIN	
128	1,0	x							1,5	1,0	x							1,5	0,9	x							sehr	1,1	NEIN	JA	
129	1,0	x								1,5	1,0	x						1,5	0,9	x							sehr	1,1	JA	NEIN	
130	1,0	x								1,5	1,0	x						1,5	0,9	x							sehr	1,1	NEIN	JA	

nach DIN EN 15512:2010-09, Tabelle 1

Anmerkung:  $\psi_{0,pal}$  wird abweichend vom EC 5 gewählt, da dieser Wert von den Lagerbetreibern festgelegt wird. Häufig ist eine maximale Lagerausnutzung von 80% gefordert

$R_{Fakt}$  Faktor zur Reduzierung der Einwirkung in Abhängigkeit der Anzahl der Regalbediengeräte nach DIN EN 15512:2010-09, Tabelle 1

Tabelle19: Zusammenstellung der Lastfallkombinationen für den Grenz Zustand der Gebrauchstauglichkeit

GZG	Einwirkung													Zeitpunkt	kdef	Schiefstellung														
	$\gamma_g$	$g_k$	$\gamma_q$	$\psi_{0,i}$	$q_k$	$\gamma_s$	$\psi_{0,i}$	$s_k$	$\gamma_w$	$\psi_{0,i}$	$w_{k,x}$	$\gamma_w$	$\psi_{0,i}$			$w_{k,z}$	$\gamma_{\text{besch},x}$	$\psi_{0,i}$	$Q_{\text{ph},x}$	$\gamma_{\text{besch}}$	$\psi_{0,i}$	$Q_{\text{ph},i}$	$Q_{\text{ph},z}$	$\gamma_{\text{bed},z}$	$\psi_{0,i}$	$R_{\text{Fakt}}$	$q_{\text{bed},z}$	x-Richt.	z-Richt.	
201	1,0	x																										JA	NEIN	
202	1,0	x																											NEIN	JA
203	1,0	x																											JA	NEIN
204	1,0	x																											NEIN	JA
205	1,0	x	1,0	0,8	x																								JA	NEIN
206	1,0	x	1,0	0,8	x																								NEIN	JA
207	1,0	x	1,0	0,6	x																								JA	NEIN
208	1,0	x	1,0	0,6	x																								NEIN	JA
209	1,0	x	1,0	0,8	x	1,0	0,5	x																					JA	NEIN
210	1,0	x	1,0	0,8	x	1,0	0,5	x																					NEIN	JA
211	1,0	x	1,0	0,8	x	1,0	0,5	x	1,0	0,29	x																		JA	NEIN
212	1,0	x	1,0	0,8	x	1,0	0,5	x	1,0	0,29	x																		NEIN	JA
213	1,0	x	1,0	0,8	x	1,0	0,5	x				1,0	0,29	x															JA	NEIN
214	1,0	x	1,0	0,8	x	1,0	0,5	x				1,0	0,29	x															NEIN	JA
215	1,0	x	1,0	0,8	x	1,0	0,5	x	1,0	0,29	x																		JA	NEIN
216	1,0	x	1,0	0,8	x	1,0	0,5	x	1,0	0,29	x																		NEIN	JA
217	1,0	x	1,0	0,8	x	1,0	0,5	x				1,0	0,29	x															JA	NEIN
218	1,0	x	1,0	0,8	x	1,0	0,5	x				1,0	0,29	x															NEIN	JA
219	1,0	x	1,0	0,64	x	1,0	0,5	x	1,0	0,49	x																		JA	NEIN
220	1,0	x	1,0	0,64	x	1,0	0,5	x	1,0	0,49	x																		NEIN	JA
221	1,0	x	1,0	0,64	x	1,0	0,5	x				1,0	0,49	x															JA	NEIN
222	1,0	x	1,0	0,64	x	1,0	0,5	x	1,0	0,49	x																		NEIN	JA
223	1,0	x										1,0	0,49	x															JA	NEIN
224	1,0	x										1,0	0,49	x															NEIN	JA
225	1,0	x													1,0	0,49	x												JA	NEIN
226	1,0	x													1,0	0,49	x												NEIN	JA
227	1,0	x										1,0	0,49	x															JA	NEIN
228	1,0	x										1,0	0,49	x															NEIN	JA
229	1,0	x													1,0	0,49	x												JA	NEIN
230	1,0	x													1,0	0,49	x												NEIN	JA

**Anmerkung:**  $\psi_{0,pal}$  wird abweichend vom EC 5 gewählt, da dieser Wert von den Lagerbetreibern festgelegt wird. Häufig ist eine maximale Lagerausnutzung von 80% gefordert.  $\psi_{2,pal}$  in Anlehnung an EC 0 um 0,2 kleiner gewählt. Diese Werte sind bei der tatsächlichen Bemessung dem Lastenheftentsprechend anzusetzen (d.h. ggf. Abweichungen von den hier angegebenen Werten). Die Windgeschwindigkeit darf im GZG nach DIN EN 15620 nur zu 70% der vollen Windgeschwindigkeit nach EC 1 angenommen werden, für die Last gilt folglich  $=0,7 \times 0,7 = 0,49$

Zukünftige Forschungen und Entwicklungen im Hinblick einer wirtschaftlichen Bemessung von Hochregallagern aus Holz sollten die Einführung spezifischer Regelwerke für Regalanlagen aus Holz zum Ziel haben. Ähnlich dem Stahlbau könnte hierauf die Regelung von Regalkonstruktionen über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen basieren. Alternativ wäre aus Gründen der Wirtschaftlichkeit eine Anpassung der Teilsicherheitsbeiwerte der Ladeeinheiten für Hochregallager aus Holz in Anlehnung an DIN EN 15512 denkbar. Anlass hierzu ist die Tatsache der verminderten statistischen Unbestimmtheit der Lasten der Ladeeinheiten im Vergleich zu herkömmlichen Einwirkungen sowie gegebenenfalls vorhandene Ladeeinheitskontrollen vor der Einlagerung ins Hochregallager.

### **7.4 Modellbildung und Methoden der Berechnung**

#### **7.4.1 Allgemeines**

Anhand des Kapitels sollen Möglichkeiten der Berechnung für Hochregallager aus Holz vorgestellt werden. Ebenso wird die Modellbildung für eine zweidimensionale oder dreidimensionale Gesamtsystemanalyse aufgezeigt. Wichtige Punkte bei der Modellbildung werden beschrieben. Die Modellierung von Hochregallagern sollte die Nachgiebigkeit der Verbindungen berücksichtigen. Anhand einer tabellarischen Zusammenstellung wird für die in Kapitel 6.6 ausgewählte Brettspertholzbauweise die im Rahmen einer durchgeführten Gesamtsystemanalyse berücksichtigte Modellierung der Verbindungen dargestellt. Auf die abschließende Bemessung wird nur kurz eingegangen, da diese für Hochregallager aus Holz im Vergleich zu regulären Holzbauten keine Besonderheit darstellt.

#### **7.4.2 Regelungen für die Gesamtsystemanalyse von Hochregallager aus Holz**

Regeln für die Analyse von Hochregallagern aus Holz werden in Anlehnung an die der Stahlager nach [DIN-15512] vorgeschlagen. Hiernach erfolgt die Auslegung des Systems in zwei Stufen. Im ersten Schritt findet zur Ermittlung der Schnittgrößen und der Verformungen eine Gesamtsystemanalyse statt, wobei hierfür zwei unterschiedliche Vorgehensweisen in Anlehnung an [DIN-15512] empfohlen werden. Im zweiten Schritt werden einzelne Bauteile (z. B. Steher, Palettenträger, Dachträger, Längsaussteifungsverbände) kontrolliert um die Tragfähigkeit und ggf. die Gebrauchstauglichkeit der ersten Berechnung zu verifizieren.

Die Gesamtsystemanalyse hat anhand einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung zu erfolgen und kann mittels zweier Betrachtungsweisen durchgeführt werden. Möglich ist die Untersuchung mittels zwei- oder dreidimensionaler Systeme.

Bei der Betrachtung mittels zweidimensionaler Systeme sind die Regalzeilen in Lagerlängsrichtung und die Rahmen in Lagerquerrichtung zu untersuchen. Außerdem wird ein horizontaler Schnitt durch das Lager gelegt und analysiert. Effekte aus Theorie II. Ordnung brauchen nur ebenenweise betrachtet zu werden. Im Rahmen der Bemessung sind jedoch die Auswirkungen auf die anderen Ebenen zu berücksichtigen. Die Bemessung ist so auszuführen, dass zunächst die Lagerlängs- und anschließend die Lagerquerrichtung betrachtet wird. In Abhängigkeit von der Gleichmäßigkeit der Regalauslegung sind unterschiedliche Belastungsverteilungen der Ladeeinheiten zu berücksichtigen (z. B. gleichmäßige Verteilung, schachbrettartige Verteilung). Diese sollten analog den Vorgaben der DIN EN 15512:2010-09, Kapitel

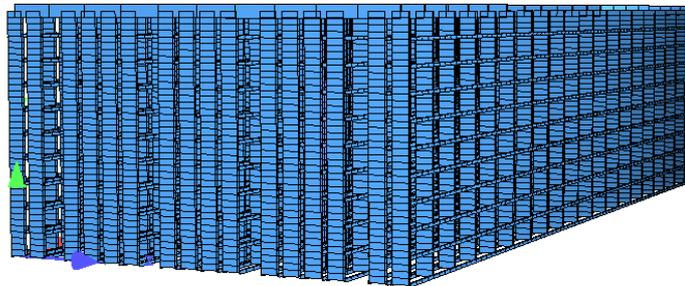
10.2.2.2 für Regalkonstruktionen aus Holz angesetzt werden. In Gangquerrichtung ist die Betrachtung eines voll beladenen Systems ausreichend.

Alternativ kann die Gesamtsystemanalyse durch eine dreidimensionale Systembetrachtung erfolgen. Die Modellbildung hat so zu erfolgen, dass alle Imperfektionen und Anschluss-exzentrizitäten mit abgebildet werden.

Die Berechnung von Hochregallagern aus Holz erfolgt auf linear elastischer Basis. Einzig zur Berücksichtigung der Steifigkeit und Tragfähigkeit der Verbindungen wird die Verwendung von bilinearen Steifigkeitskennlinien vorgeschlagen (siehe Erläuterungen Kapitel 7.4.3).

### 7.4.3 Modellbildung

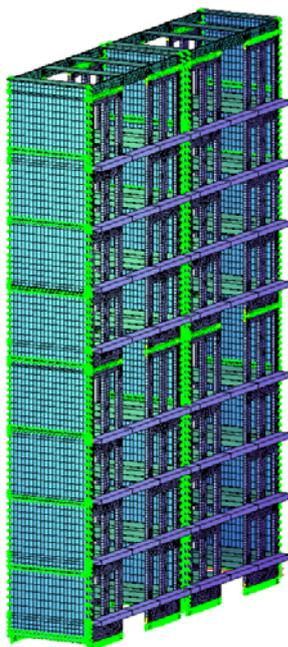
Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, erfolgt die Gesamtsystemanalyse am zwei- oder dreidimensionalen System. Das Modell der Bemessung ist in Abhängigkeit vom System ein FEM- oder Stabwerksmodell.



**Abbildung 77: Aufbau eines 3D-Stabwerksmodells eines Hochregallagers aus Holz nach Bauart Alnatura**

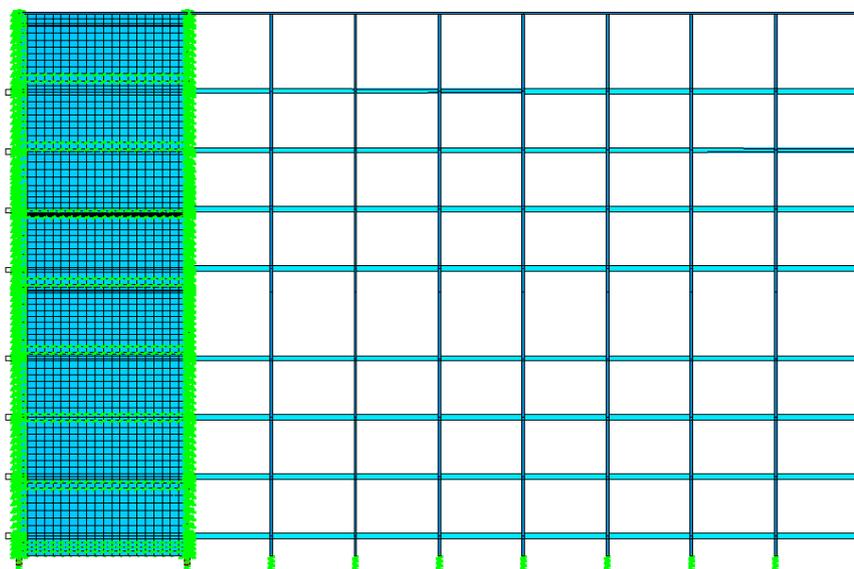
Die weiteren Erläuterungen beziehen sich auf das in Kapitel 6.6 selektierte System.

Bei der dreidimensionalen Systemanalyse erfolgt die Modellierung der Steher und Längsaussteifungsverbände (wandartige Bauteile) mittels FEM. Die Palettenträger, die Querverteilungsriegel und die Koppelträger/Lastensammler werden mittels Stäben abgebildet. Für die Dachträger können im Rahmen der projektbezogenen Modellbildung ebenfalls Stabelemente verwendet werden. Im Rahmen der Untersuchungen des Forschungsvorhabens werden diese ebenfalls mittels FEM abgebildet.

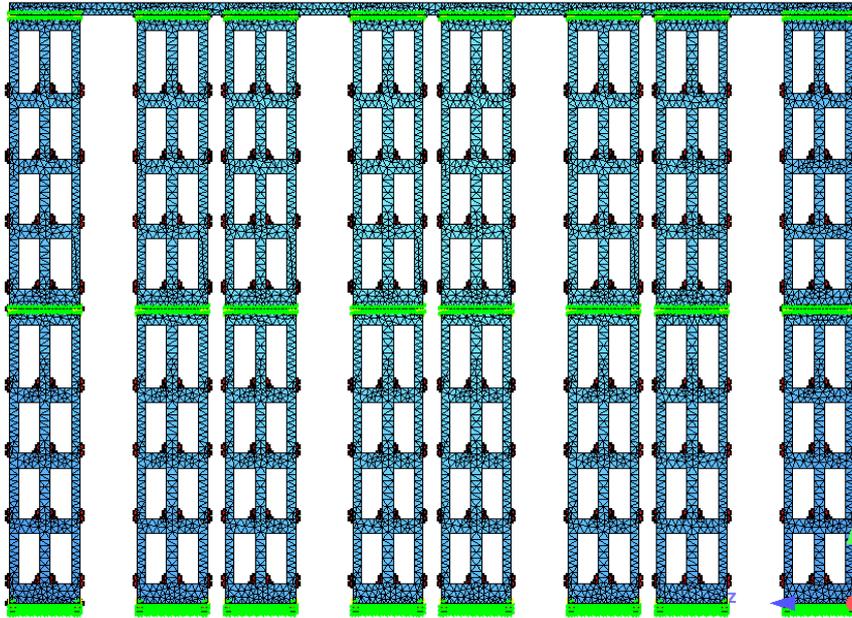


**Abbildung 78: Ausschnitt des Längsaussteifungsverbandes eines beispielhaften Aufbaus eines Modells der Bauweise mit Brettsperrholz in Lagerlängsrichtung**

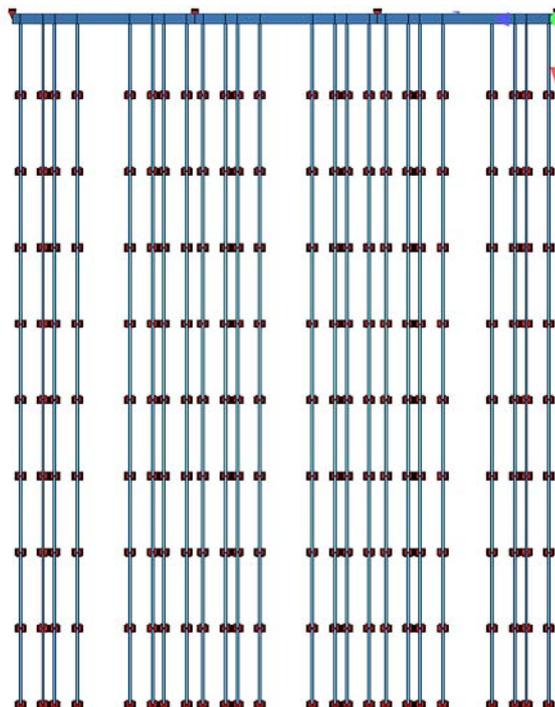
Die Modellierung der Bauteile für die Bemessung mittels zweidimensionaler Analyse erfolgt in Gangquerrichtung (Rahmen) analog der der dreidimensionalen. In Ganglängsrichtung werden abweichend von der dreidimensionalen Analyse die Steher aufgrund der geringen Bauteildicken als Stäbe abgebildet (siehe Abbildung 79 und Abbildung 80).



**Abbildung 79: Beispielhafter Aufbau des Modells bei einer 2D-Analyse der Brettsperrholzbauweise in Lagerlängsrichtung**



**Abbildung 80: Beispielhafter Aufbau des Modells bei einer 2D-Analyse der Brettsperrholzbauweise in Lagerquerrichtung**



**Abbildung 81: Beispielhaftes Modell in der horizontalen Ebene mit Querverteilungsriegel am Lagerende**

Besondere Beachtung im Rahmen der Modellbildung ist auf die Modellierung der Verbindungen zu legen. Die Berücksichtigung der Steifigkeit der Verbindungsmittel ist bei der Bemessung von Hochregallagern aus Holz unverzichtbar. Die Steifigkeit der Verbindungen  $k_{ser}$  im GZG bzw.  $k_u$  im GZT erfolgt anhand den Vorgaben der DIN EN 1995-1-1:2010-12 bzw. durch

die Regelungen in allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (z.B. für Vollgewindeschrauben). Bei einer Berechnung mit der Methode der Finiten Elemente können die Steifigkeiten direkt im System z. B. durch Wegfedern berücksichtigt werden. Bei einer Berechnung mit Stabwerksmodellen ist es gegebenenfalls erforderlich über das polare Trägheitsmoment die Rotationssteifigkeit von zusammenwirkenden Verbindungsmittelgruppen abzubilden (z. B. Stoß von Steher und Gründung, Steherstoß oder Stoß von Steher und Dachträger).

Um das reale Tragverhalten möglichst genau abzubilden und außerdem die tatsächlich vorhandenen Systemsteifigkeit anzusetzen, sollte die Kontaktpressung zwischen gestoßenen Bauteilen berücksichtigt werden. Da die Pressung nur Druckkräfte übertragen kann, kann die Tragfähigkeit und Steifigkeit beispielsweise über bilineare Federkennlinien angesetzt werden, indem die Federkennlinie im Zugbereich im Kraft-Verformungsdiagramm eine Horizontale (keine Steifigkeit) aufweist und somit keine Kräfte überträgt.

Bei der durchgeführten Modellierung wurden die Steifigkeiten der Verbindungsmittel über Senkfedern abgebildet. Die in Tabelle 20 dargestellten Verbindungseigenschaften wurden berücksichtigt:

**Tabelle 20: Berücksichtigte mechanische Modellierung der Verbindungen im Berechnungsmodell in Bezug zum globalen Koordinatensystem**

Verbindung	Modellierung der Verbindung			
	x-Richtung (Lagerlängsrichtung)	y-Richtung (Lagerquerrichtung)	z-Richtung (vertikale Richtung)	Weitere
Steher-Palettenträger	gelenkig	gelenkig	gelenkig	Torsionshalterung aufgrund Aussparungen
Dachträger-Lastensammler	gelenkig	gelenkig	gelenkig	Torsionshalterung der Verschraubung und vollflächigen Auflage
Längsaussteifungswände	Senkfedern der Verschraubungen / Verzahnung (Schubfeld)	Senkfedern zwischen Wandscheiben und Stehern aufgrund von Verschraubungen	Senkfedern bei Verschraubung	
Querverteilungsriegel-Palettenträger	gelenkig	gelenkig	gelenkig	
Querverteilungsriegel-Längswände	gelenkig	gelenkig	gelenkig	Torsionshalterung der Verschraubung mit den Längswänden

Verbindung	Modellierung der Verbindung			
	x-Richtung (Lagerlängsrichtung)	y-Richtung (Lagerquerrichtung)	z-Richtung (vertikale Richtung)	Weitere
Steher-Bodenplatte	gelenkig	Senkfedern der Verbindungsmittel Bettungsfedern der Aufstandsfläche (Bilineare Federkennlinie)	Senkfedern der Verbindungsmittel	
Steher-Steher	gelenkig	Senkfedern der Verbindungsmittel Bettungsfedern der Aufstandsfläche (Bilineare Federkennlinie)	Senkfedern der Verbindungsmittel	
Steher-Dachträger	Senkfedern der Verbindungen	Senkfedern der Verbindungsmittel Bettungsfedern der Aufstandsfläche (Bilineare Federkennlinie)	Senkfedern der Verbindungsmittel	

Finale Werte für die Steifigkeit für Verbindungsmittelgruppen können an dieser Stelle nicht angegeben werden. Diese sind objektspezifisch in Abhängigkeit der erforderlichen Verbindungsmittelanzahl zu bestimmen. Als Ausgangswerte der Berechnung für die im Konstruktionskatalog aufgezeigten Verbindungen kann angesetzt werden:

**Tabelle 21: Ausgangswerte für Steifigkeiten der Verbindungsmittelgruppen  $k_{ser}$  der Anschlüsse**

Anschluss	Steifigkeiten Verbindungsmittelgruppe $k_{ser}$
Steher-Bodenplatte	$30000 \frac{kN}{m}$
Steher-Steher	$50000 \frac{kN}{m}$
Steher-Dachträger	$15000 \frac{kN}{m}$
Schubfeld Längsaussteifung horizontal	$30000 \frac{kN}{m^2}$
Schubfeld Längsaussteifung vertikal	$30000 \frac{kN}{m^2}$

Anhand der Schnittkräfte erfolgt die Bemessung der Bauteile. Aufgrund der Berechnung nach Theorie II. Ordnung und der direkten Berücksichtigung der Steifigkeit der Verbindungsmittel

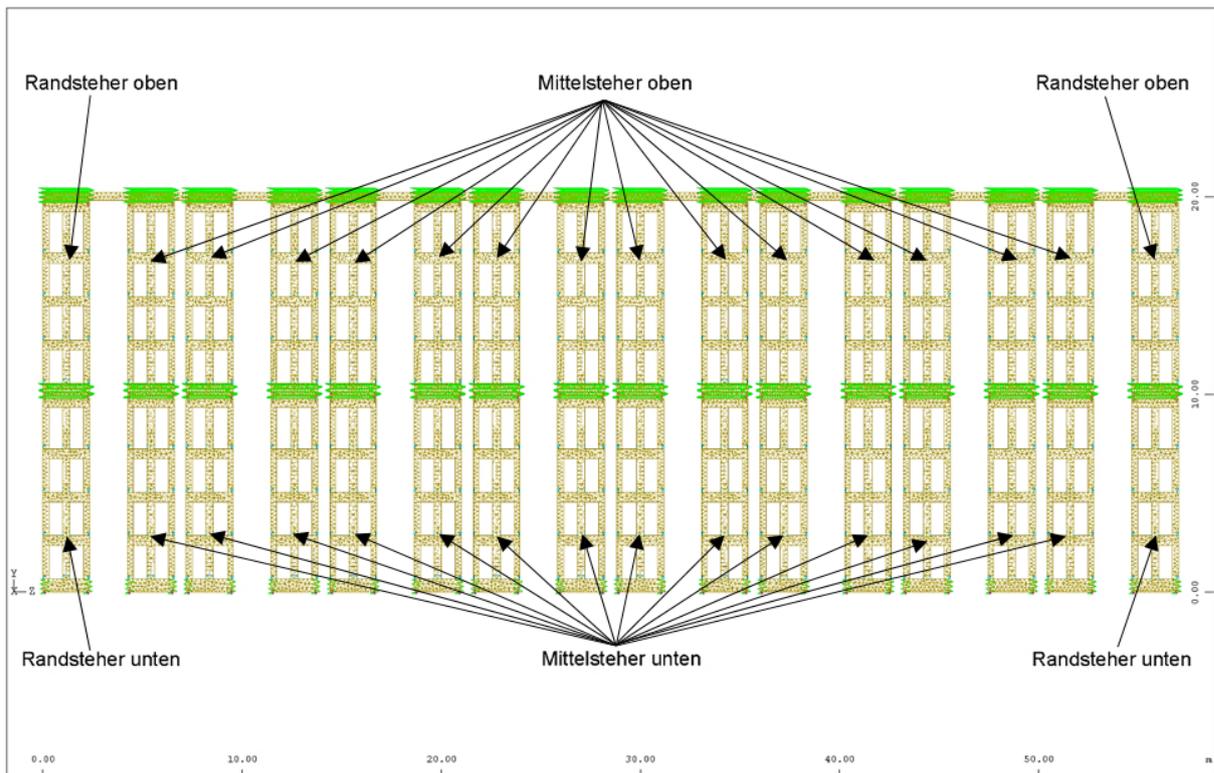
bei der Modellierung ist ein iteratives Vorgehen mit nachträglicher Anpassung der Verbindungssteifigkeiten erforderlich.

### 7.4.4 Bemessung

Die Bemessung der Bauteile und Verbindungen erfolgt für die maßgebenden Lastfälle aufgrund der Schnittgrößenermittlung nach den anerkannten Regeln der Technik im Holzbau. Im Hinblick auf die Verwendung von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsperrholz sei außerdem auf [Bla-2007] und bei der Bemessung der Scheiben aus Brettsperrholz beispielsweise auf [Wal-2013] hingewiesen.

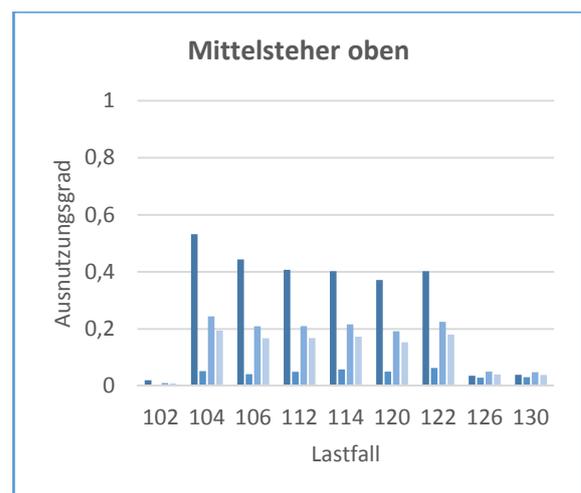
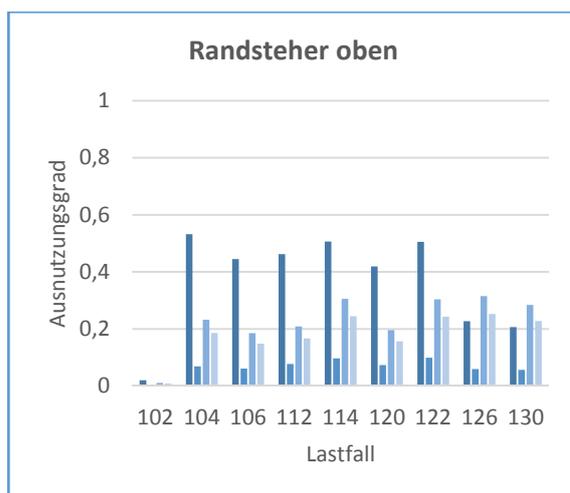
Bei der Gesamtsystemanalyse am zweidimensionalen System können ungleiche Belastungen der Steher aufgrund der Lastfallkombinationen (Imperfektionen, Horizontallasten) auftreten. Zur Betrachtung der Stabilität senkrecht zur Lagerquerrichtung muss die Dimensionierung gleicher Bauteile gegebenenfalls an mehreren Stellen durchgeführt werden, falls die Regalfachhöhen über die Lagerhöhe variieren.

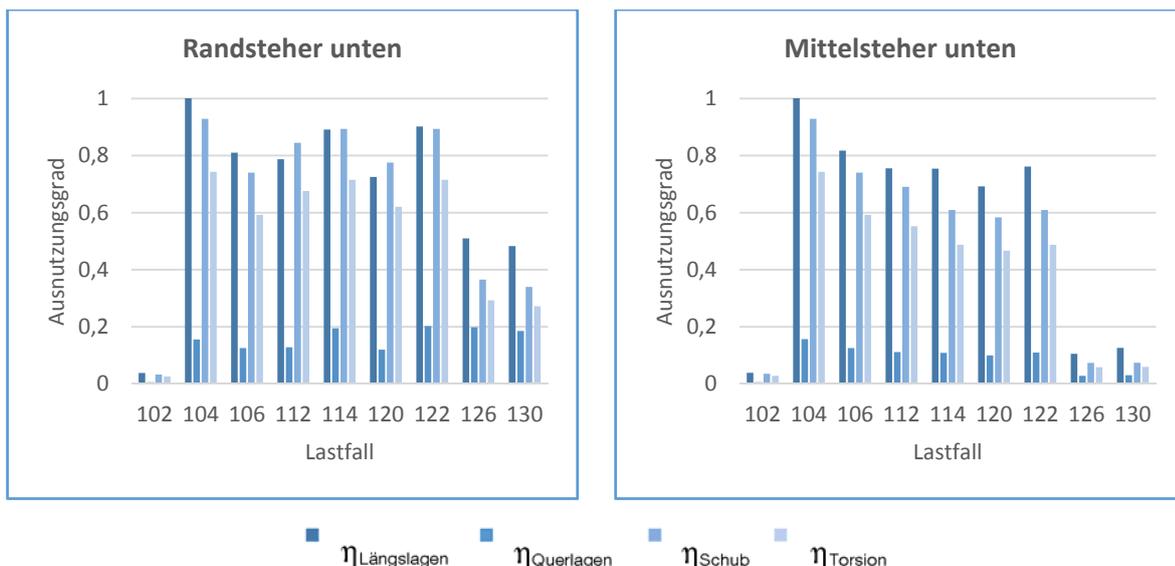
Auf eine detaillierte Darstellung der Bemessung der „Standard“ Holzbauteile und der Verbindungsmittel wird an dieser Stelle verzichtet. Beispielhaft wird lediglich die Auswertung der Steherbemessung eines Hochregallagers gezeigt. Die Abmessungen des Lagers werden analog dem zuletzt gebauten Hochregallager von Alnatura gewählt. Gezeigt und analysiert werden die Ausnutzungsgrade der Steher aus Brettsperrholz. Ziel der Darstellung ist die Besonderheit bei der Ausnutzung der Steher aufzuzeigen. Die Steher stellen den Hauptteil der Regalkonstruktion mit dem größten Holzverbrauch dar. Sie bergen folglich das größte Potenzial an Optimierung und Materialeinsparungen. Die Bemessung erfolgt für ein prototypisches Lager mit den Abmessungen des Lagers von Alnatura. Die Modellbildung wird anhand des im vorigen Kapitel beschriebenen Vorgehens durchgeführt. Als Einwirkungen werden die in Kapitel 7.3.4 dargestellten Lastfallkombinationen angesetzt. Das Modell der Schnittgrößenermittlung in Lagerquerrichtung ist nachfolgend dargestellt.



**Abbildung 82: Aufbau des Modells in Lagerquerrichtung der beispielhaften Bemessung am Lager von Alnatura in Brettsperrholzbauweise**

Gewählt wurden einheitliche Steher aus Brettsperrholz mit dem Querschnittsaufbau 30/40/30 (Längslage/Querlage/Längslage). Das System wird mit einem Steherstoß in vertikaler Richtung konzipiert. Die detaillierten Aufbauten der Bauteile sind in der Auswahl in Kapitel 6.6 und im Konstruktionskatalog dargestellt.





**Abbildung 83: Darstellung der Ausnutzungsgrade der Steher in Abhängigkeit der maßgebenden Lastfälle**

Modelliert wurden die Steher mittels FEM. Anhand den Schnittgrößen (Normalkräfte in vertikaler Richtung ( $n_{xx}$ ), Normalkräfte in horizontaler Richtung ( $n_{yy}$ ) sowie den Schubkräften ( $n_{xy}$ )) erfolgen die Nachweise der Steher für die Längsspannungen in den beiden Richtungen der Brettlagen des Brettspertholzes, den Schub- und Torsionsspannungen nach [Wal-2013].

Abbildung 83 zeigt eine Gegenüberstellung der am meisten beanspruchten Rand- und Mittelsteher für die maßgebenden Lastfälle. Beim gewählten Aufbau sind alle Nachweise im GZT erfüllt. Die höchste Ausnutzung ergibt sich für die Bretterlagen in Steherlängsrichtung aus dem Lastfall 104, maximale Beladung durch die Ladeeinheiten. Die unteren Rand- und Mittelsteher sind hier gleichermaßen ausgelastet. Aufgrund der Öffnungen ergeben sich in den unteren Ecken große Schubspannungen. Die Öffnungen sind, obwohl sie derzeit meist noch aus der ganzen Platte geschnitten werden, aus Sicht der Materialeinsparung wie auch aus Gründen der Montage (Einbringen der Palettenträger, ggf. aufschrauben der im Konstruktionskatalog dargestellten horizontalen Platten zur Lagerlängsaussteifung) sinnvoll. Die Lastfälle mit horizontalen Einwirkungskomponenten (in Abbildung 80 ab Lastfall 112) ist die höhere Beanspruchung der Randsteher (Windeinwirkung) zu erkennen.

Deutliche Unterschiede der Ausnutzungsgrade ergeben sich in Abhängigkeit der Anordnung der Module im Lager. Während die unteren Steherreihen aufgrund des Lastfalles 104 zu 100% ausgelastet sind, beträgt der Ausnutzungsgrad der oberen Steher lediglich 55%. Durch die Konzeption mit kleineren Modulen und nicht durchgehenden Stehern ergibt sich eine Skalierbarkeit und dadurch die Möglichkeit der Anpassung der Bauteilabmessungen (BSP-Plattendicke) weiter oben liegender Module. Aufgrund der relativ geringen Lagerhöhe mit nur etwa 20m ist dies im betrachteten Fall aufgrund der Ausbildung des Steherstoßes nur bedingt möglich. Das Potenzial kann daher vor allem bei höheren Hochregallagern mit massiveren unteren Stehern genutzt werden.

## 7.5 Besonderheiten und Anforderungen der Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

### 7.5.1 Normative Regelung der Grenzwerte

Die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) beeinflussen die Dimensionierung der Regalstrukturen von automatisch bedienten Hochregallagern erheblich. Der Grund liegt in den sehr strengen Vorgaben der [DIN-15620] und [FEM-9831] bezüglich den zulässigen Grenzwerten von den Verformung. Die Einhaltung der Grenzabweichungen ist im Hinblick auf einen funktionellen Betrieb wichtig, um eine bestmögliche Interaktion zwischen Regalstruktur und Regalbedienung sicherstellen zu können. Dies stellt die Basis für die Zuverlässigkeit der logistischen Anlage dar. Abweichungen müssen mit den Planern der Regalbedienung abgestimmt werden.

Hinsichtlich der Nachweise im GZG geben die Richtlinien Grenzwerte der Verformungen für den Boden, die vertikale Verformung der Träger der Ladeeinheiten (Palettenträger), die Führungsschiene und die laterale Verschiebung der Regalstruktur in Lagerlängs- und -querrichtung an. Außerdem ist die elastische Stauchung der Steher unter Belastung durch die Ladeeinheiten auszuweisen und dem Lieferanten der Regalbedienenanlagen mitzuteilen. Diese Angabe fließt in die Festlegung des Höhenauswahlsystems ein.

Da der Gegenstand des Forschungsprojektes Hochregallager aus Holz sind, findet eine weitere Betrachtung der Führungsschiene und der Bodenplatte nicht statt. Die Bauteile sowie deren Anforderungen sind unverändert zu Hochregallagern aus Stahl. Die Anforderungen bezüglich Verformungen, Herstell- und Montagetoleranzen werden dementsprechend auch [FEM-9831] und [DIN-15620] entnommen. Für die Nachweise im GZG verbleibt somit die Lagerstruktur. Die Anforderungen an die Palettenträger werden bereits in Kapitel 6.3.3 gezeigt. Gegenstand des Kapitels ist die Erläuterung der Besonderheiten im GZG für die horizontale Lagerverschiebung in x- und z-Richtung (Lagerlängs- und -querrichtung).

Die zulässigen Grenzwerte der horizontalen Verformung für Hochregallager aus Stahl mit Beschickung durch Regalbediengeräte sind nach [FEM-9831] und [DIN-15620] identisch. Unterschiede bezüglich der zulässigen Verformungen werden in Abhängigkeit der Steuerungsart angegeben (siehe Tabelle 22). Folgende Steuerungsarten der Regalbediengeräte werden für die Regalklassen 100 und 200 unterschieden:

- A manuelle Steuerung,
- B teilweise oder voll automatische Steuerungen des Koordinatenpositioniersystems,
- C wie B mit zusätzlicher Feinpositionierung für das Regalfach in y-Richtung,
- D wie B mit zusätzlicher Feinpositionierung für das Regalfach in x- und y-Richtung.

Tabelle 22: Zulässige Verschiebungen für die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für Hochregallager zu Einlagerung von Europoolpaletten, in Anlehnung an Tabelle 14 der [DIN-15620]

Regalhöhe [m]	Horizontale Ver- schiebung in z- Richtung	Horizontale Ver- schiebung in x- Richtung	Horizontale Ver- schiebung in x- Richtung
	Lagerquerrichtung $u_z$ [mm]	Lagerlängsrichtung $u_x$ [mm]	Lagerlängsrichtung $u_x$ [mm]
RBG-Steuerung	A, B, C, D	A und D	B und C
15	15	12 <sup>a)</sup>	10
20	20	16 <sup>a)</sup>	10
25	25	20 <sup>a)</sup>	10
30	30	20 <sup>a)</sup>	10
35	35	20 <sup>a)</sup>	10
40	40	20 <sup>a)</sup>	10

a) Für Steuerungstyp D gelten die Werte für Teleskopgabeln mit den Maßen 165 x 60 mm. Die Werte dürfen von Planer, Lieferanten oder Hersteller des RBG's bei Verwendung von Teleskopgabeln mit projektbezogenen Maßen erhöht werden.

Neben den Vorgaben bezüglich der horizontalen Verschiebung des Lagers ist in Querrichtung eine maximal zulässige Durchbiegung der Steher vorgeschrieben. Aufgrund der Lasteinwirkung bauchen die Randsteher auf der druckbeanspruchten Seite des Lagers aus und beengen den angrenzenden Gang des Regalbediengerätes. Um eine erforderliche Mindestgangbreite einzuhalten gilt für die Durchbiegung  $u_{db} < 15mm$  (siehe Abbildung 84).

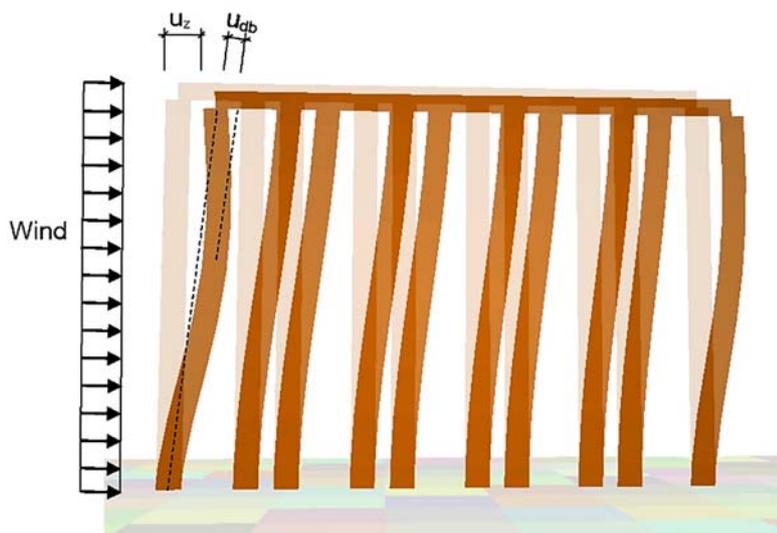


Abbildung 84: Verformung der Regalkonstruktion in Querrichtung (z-Richtung) infolge Wind

Auch für den Fall der horizontalen Lagergesamtverformungen wird eine objektspezifische Festlegung ermöglicht. Explizit wird dies für die Verformungen in Lagerquerrichtung ausgewiesen. Außerdem können Abweichungen zu den festgelegten Grenzwerten in Abhängigkeit den zu lagernden Ladeeinheiten und der angewendeten Bedientechnik zulässig sein [DIN-15620]. In der Projektbearbeitung hat sich allerdings gezeigt, dass gewünschte Abweichungen in Form zu größeren Verformungen kaum umsetzbar sind. Die Hersteller der Regalbediengeräte verweisen vielmehr auf die Grenzwerte der Richtlinien, an die sich bei der Bemessung der Regalstruktur zu halten ist. Falls die Verformungen im GZG dennoch die zulässigen Grenzwerte übersteigen, ist dies vom Tragwerksplaner den verantwortlichen Planern der Regalbedienung mitzuteilen, um das weitere Vorgehen bzw. Anpassungen abstimmen zu können.

### 7.5.2 Auswertung einer Parameterstudie zur Lagergesamtgeometrie

Aufgrund der Maßgeblichkeit der Nachweise im GZG werden in einer Parameterstudie beispielhaft Hochregalkonstruktionen in der zuvor ausgewählten Brettsperrholzbauweise untersucht. Anhand der Studie soll die Machbarkeit hoher Regalkonstruktionen mit dieser Bauweise gezeigt aber auch die Schwierigkeiten der Einhaltung der Grenzwerte der Verformungen veranschaulicht werden.

Im Rahmen der Studie werden die Lagergeometrien (Gesamtabmessungen) und die Bauteilabmessungen der Brettsperrholzsteher sowie der Längsaussteifungswände parametrisiert. Untersucht werden soll der Einfluss des Aufbaus des Hochregallagers auf die horizontalen Verformungen. Im Rahmen von Voruntersuchungen konnten als maßgebende Faktoren die Lagergesamtabmessungen, die Bauteildicken der Steher in Lagerquerrichtung und die Länge der Aussteifungswände in Lagerlängsrichtung identifiziert werden. Betrachtet werden Lager mit Höhen von  $h_{ges} = 20m; 30m; 40m$ , Längen von  $l_{ges} = 30m \text{ bis } 150m$  und Breiten von  $b_{ges} = 10m \text{ bis } 60m$  (in Anlehnung an die Ergebnisse der Marktanalyse).

Betrachtet werden alle Lastfälle im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach Tabelle 19. Gegenstand der Auswertung stellt jeweils nur der maßgebende Lastfall dar, der die maximale Verformung bedingt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die restlichen Lastfälle nicht dargestellt.

Die Parameterstudie wird für die Einwirkungen der Windzone 2, Geländekategorie III geführt. Wie Abbildung 33 zeigt, stehen Hochregallager häufig in Windzone 1 oder 2. Im Rahmen der Parameterstudie wird die Windzone mit den höheren Beanspruchungen betrachtet. Die betrachtete Geländekategorie III resultiert aus der häufig vorkommenden lokalen Ansiedlung von Hochregallagern am Rande von Städten und in Industrie- und Gewerbegebieten. Die weiteren Parameter werden anhand bisheriger Ergebnisse des Forschungsprojektes gewählt (siehe auch Kapitel 6.3). In Anlehnung an die in Kapitel 6.4.3 dargestellte Ermittlung der Fachfrei- maße werden die Abmessungen der Brettsperrholzsteher ermittelt. Die festgelegten Parameter sind in Tabelle 22 zusammengestellt.

Tabelle 23: Festlegung der Parameter

Parameter	Festlegung
Einwirkungen aus Wind	Windzone 2 Geländekategorie III
Modulhöhe	10 m
Stehertiefe Rand einfachtiefe Lagerung	1,25m
Stehertiefe Mitte einfachtiefe Lagerung	2,65m
Stehertiefe doppeltiefe Lagerung	2,35m
Fachbreiten als (Achsabstand Steher)	3,1m
Plattenaufbau BSP Längsaussteifung	30/40/30 mm
Fächer / Fachhöhen	4 Ebenen je Modul, gleichmäßige Verteilung über die Höhe
Querschnitt Dachträger	$h = 400\text{mm}, b = b_{BSP, Steher}$
Ladehilfsmittel	Europoolpalette mit Warenüberstand (l(b=1300/900))
Ladeeinheitsgewicht	1000kg
Lagerauslastungsgrad	80%
Platzlagerung	Dreiplatzlagerung
Lagerungstiefe	einfachtief und doppeltief
Imperfektionen	Nach DIN EN 1995-1-1:2010-12, Kapitel 5.4.4

Als Verbindungsmittelsteifigkeiten werden die Werte der Tabelle 21 zugrunde gelegt. Die angegebenen Steifigkeiten stellen praxisnahe Werte dar. Sie liegen für die betrachteten Lagerstrukturen mit Lagergesamthöhen ab  $h_{ges} = 20\text{m}$  auf der sicheren Seite. Das bedeutet, dass aufgrund der Tragfähigkeitsanforderungen bei höheren Lagern die Verbindungsmittelanzahl und folglich auch die Steifigkeit ansteigen. Die Steifigkeiten werden in der Auswertung nicht parametrisch dargestellt, da aufgrund deren Größenordnung Änderungen nur einen untergeordneten Einfluss auf die Gesamtsystemsteifigkeit haben. Die Steifigkeiten aus Effekten der Materialpressung (Holz und Vergussmörtel oder Holz auf Holz) werden anhand von bilinearen Federkennlinien berücksichtigt. Die Berechnung erfolgt nach Theorie II. Ordnung.

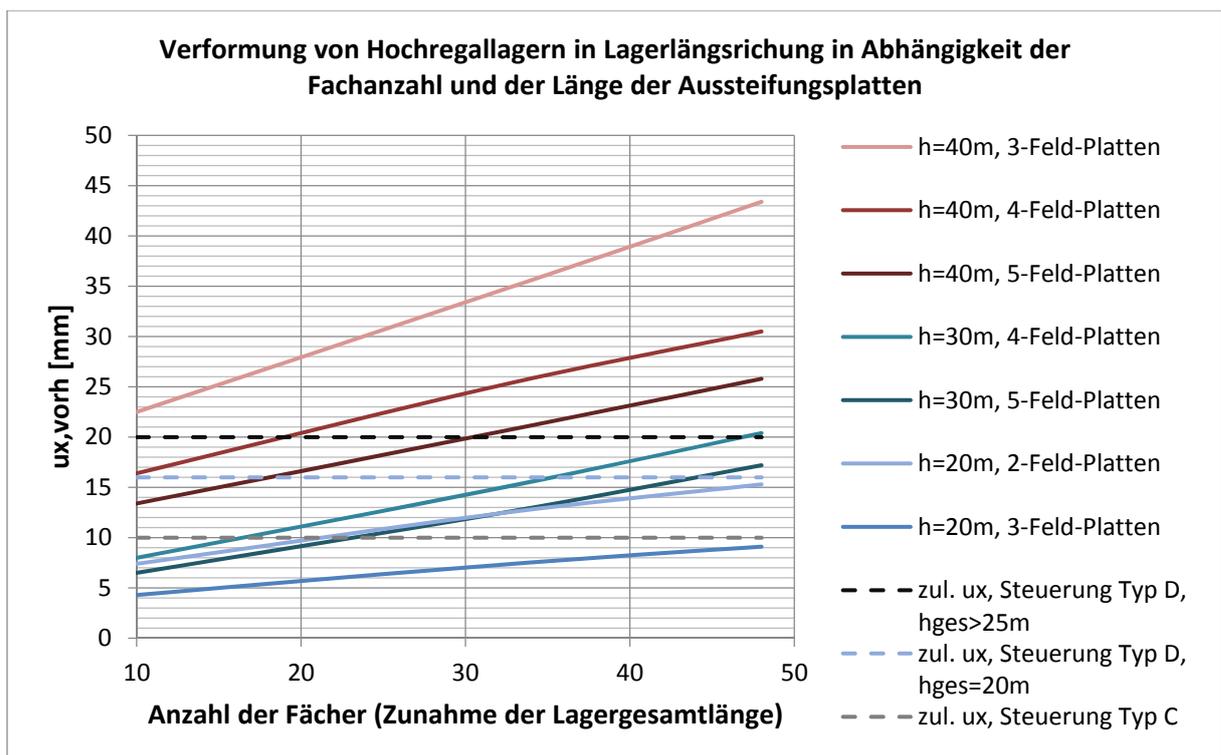
Die Berechnung der Verformungen in Lagerlängsrichtung erfolgt am zweidimensionalen Modell analog dem in Abbildung 79.

Bei der Auswertung der Verformungen in Lagerlängsrichtung werden diese in Abhängigkeit der Anzahl der Fächer in Längsrichtung dargestellt. Die Anzahl der Fächer ist direkt mit der Lagergesamtlänge gekoppelt. Die Längen der betrachteten Hochregallager in Abhängigkeit der zugehörigen Gassenzahl sind in nachfolgender Tabelle zusammengestellt.

**Tabelle 24: Gesamtlänge des Hochregallagers in Abhängigkeit der Anzahl der Fächer bei einer Dreiplatzlagerung**

Anzahl Fächer	Gesamtlänge des Hochregallagers [m]
10	31
20	62
30	93
40	124
50	155

Die Ergebnisse der Verformungen sind in Abbildung 85 dargestellt. Die Abbildung zeigt die sich einstellende Kopfverschiebung  $u_{x,vorh}$  für verschiedene Lagerhöhen und Längen der BSP Längsaussteifungsplatten in Abhängigkeit der Anzahl der an den Aussteifungsverband angehängten Regalfächer. Die Strichlinien stellen die Grenzwerte der zulässigen Verformung für die verschiedenen Lagerhöhen dar.



**Abbildung 85: Darstellung der Verformungen in Längsrichtung in Abhängigkeit der BSP-Nennstärken der Längsaussteifungen und der Anzahl der Fächer (Gesamtlänge des Hochregallagers)**

Maßgebend wird für das der Parameterstudie zugrunde gelegte Szenario der Lastfall mit der maximaler Windlast und den horizontalen Komponenten der Lasten der Ladeeinheiten aufgrund den Imperfektionen. Die Zunahme der Verformungen in Abhängigkeit der angehängten

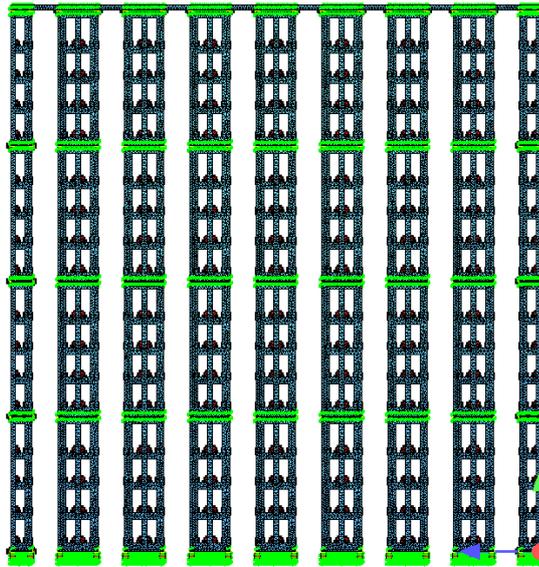
Querrahmen entspricht nahezu einem linearen Verlauf. Durch die Länge der Aussteifungs-scheiben in Lagerlängsrichtung sind die Effekte aus der Berechnung nach Theorie II. Ordnung gering.

Die Vorgaben der zulässigen Kopfverformung für automatische Bediengeräte ohne Feinpositionierung in y-Richtung (Typ C) sind mit  $u_x = 10\text{mm}$  (siehe auch Tabelle 22) besonders streng und für Lagerhöhen  $h_{ges} > 20\text{m}$  nur schwer einzuhalten. Im Rahmen der parametrischen Studie konnten die Nachweise lediglich für Lager mit  $h_{ges} = 20\text{m}$  und einer durchgehenden Aussteifung über drei Regalfächer in Lagerlängsrichtung erfüllt werden. Für Hochregallager mit Höhen  $h_{ges} > 20\text{m}$  empfiehlt sich die Anwendung eines RBGs mit Feinpositionierung in x- und y-Richtung (Typ D).

Hochregallager mit Höhen  $20\text{m} < h_{ges} \leq 30\text{m}$  erfüllen die Anforderungen der zulässigen Verformungen, wenn die Aussteifungsplatten über mindestens vier Fächer  $l_{platte} = 12,4\text{m}$  durchgeführt werden.

Gerade bei großen Lagerhöhen im Bereich um  $h_{ges} > 30\text{m}$  gestaltet sich die Längsaussteifung unter Einhaltung der geforderten Grenzwerte der Gebrauchstauglichkeit schwierig. Bei großen Lagerhöhen und großen Lagerlängen (ab ca.  $l_{ges} > 60\text{m}$ , entspricht ca. 20 Regalfächern) empfiehlt sich zusätzlich die Einbringung eines zweiten oder dritten, innenliegenden Längsverbandes mit horizontalen Schubplatten im Bereich der Palettenträger (siehe Kapitel 6.5.2 und Konstruktionskatalog). Der zweite Verband wird an der gegenüberliegenden Lagerseite angeordnet. Falls erforderlich, wird noch ein dritter Verband in Lagermitte angesiedelt. Der Vorteil durch die Verwendung mehrerer Verbandsebenen ist, dass nicht die gesamten abtreibenden Kräfte aufgrund von Imperfektionen durch das ganze Lager in eine Aussteifungsebene geleitet werden müssen und zusätzlich für jeden Aussteifungsverband geringere abhebende Kräfte zu verankern sind.

Neben der Lagerlängsverformung wird die Verformung in Querrichtung parametrisch untersucht. Die Analyse erfolgt am zweidimensionalen Modell (für doppeltiefe Lager analog Abbildung 80). Das Modell für einfachtiefe Hochregallager mit einer Höhe von  $h_{ges} = 40\text{m}$  und acht Gassen ist in Abbildung 86 dargestellt.



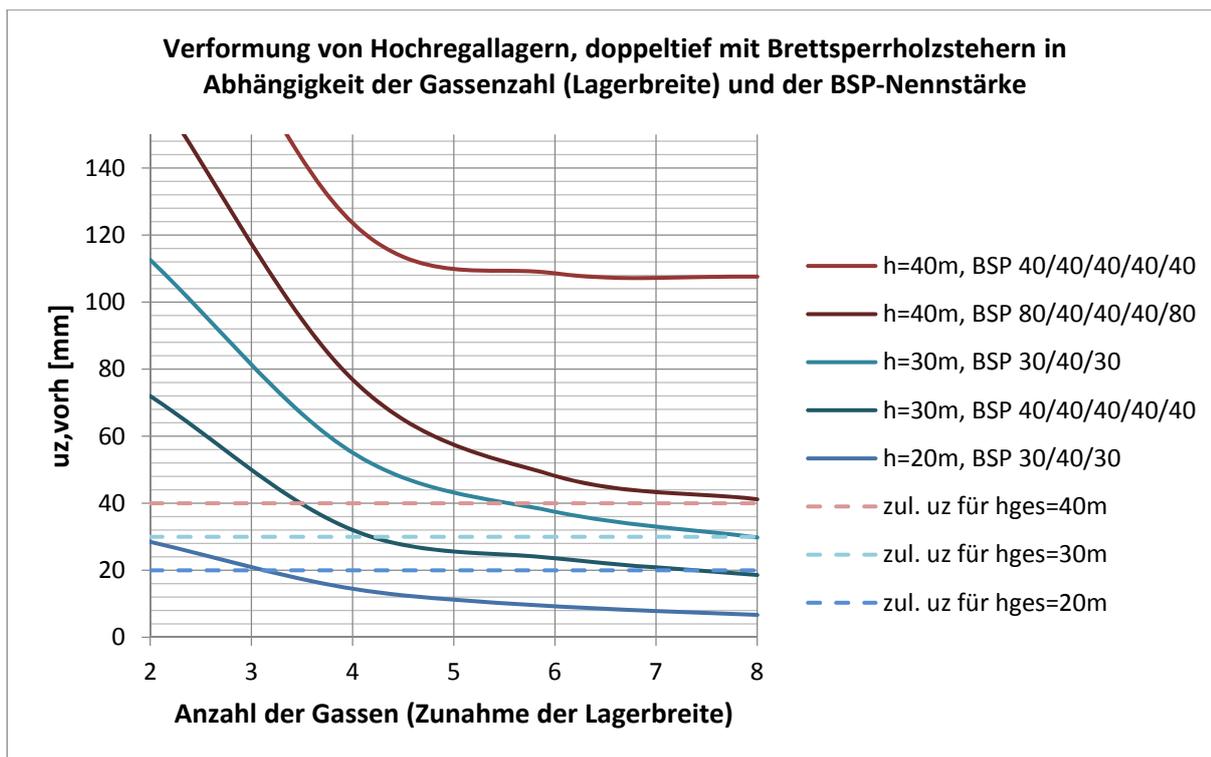
**Abbildung 86: Modell des Hochregallagers in Querrichtung für die Untersuchung der Verformungen**

Die Darstellung der Verformungen erfolgt in Abhängigkeit der Regalgassen. Diese beeinflussen die Hochregallagergesamtbreite direkt. Die Breiten der betrachteten Hochregallager in Abhängigkeit der zugehörigen Gassenzahl sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

**Tabelle 25: Breiten der Regalstruktur für einfachtiefe und doppeltiefe Lager in Abhängigkeit der Anzahl der Gassen**

Anzahl Gassen	Breite für einfachtiefe Lager	Breite für doppeltiefe Lager
	[m]	[m]
2	9,0	13,8
3	13,6	21,0
4	18,1	28,2
5	22,7	35,4
6	27,2	42,6
7	31,8	49,8
8	36,3	57,0

In Abbildung 87 sind die Verformungen von doppeltiefen Hochregallagern in Querrichtung dargestellt. Die Abbildung zeigt die sich einstellende Kopfverschiebung  $u_{z,vorh}$  für verschiedene Lagerhöhen und BSP-Aufbauten in Abhängigkeit der Anzahl der Gassen. Die Strichlinien zeigen die Grenzwerte der zulässigen Verformung für die verschiedenen Lagerhöhen.

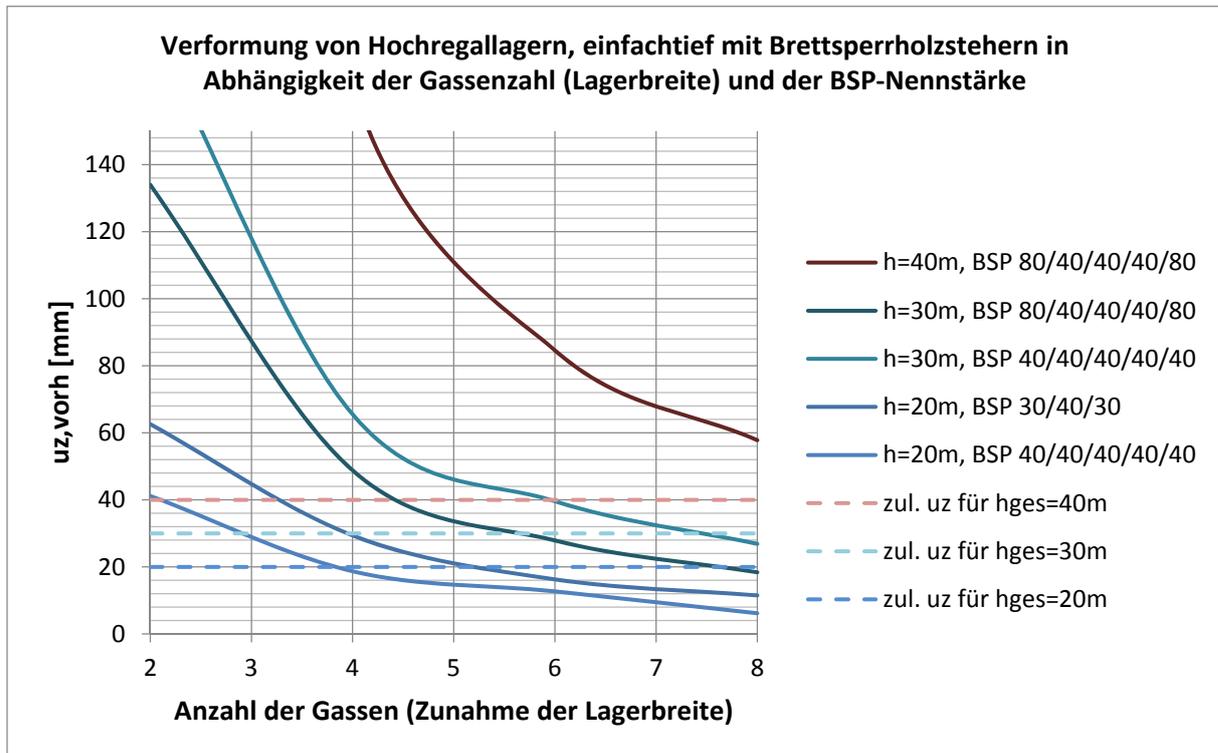


**Abbildung 87: Darstellung der Verformungen in Querrichtung in Abhängigkeit der BSP-Nennstärken und der Anzahl der Gassen (Lagerbreite) für doppeltiefe Hochregallager**

Deutlich zu erkennen ist der Anstieg der Verformungen mit zunehmender Höhe. Aufgrund der strengen Anforderungen bezüglich der zulässigen Verformungen stellen Hochregallager mit großen Höhen eine besondere Herausforderung an die Konzeption und Planung dar. Einen entscheidenden Einfluss auf die Systemsteifigkeit hat die Rahmentragwirkung in Lagerquerrichtung. Mit zunehmender Anzahl der Gassen und somit Vergrößerung der Lagerbreite ist ein überproportionaler Rückgang der Verformungen der Kopfpunkte der Regalstruktur festzustellen. Durch die Planung von Anlagen mit einer großen Gesamtbreite können selbst bei Lagern mit einer Höhe von  $h_{ges} = 40m$  die Nachweise im GZG erfüllt werden. Die Herausforderungen der Erfüllung der Grenzwerte im GZG in Lagerquerrichtung steigen besonders bei schmalen, sehr hohen Konstruktionen an. Die größte Reduzierung der Verformung wird bis zu der Gassenzahl auf vier erreicht, was bei doppeltiefer Lagerung in Abhängigkeit des Lagerguts in etwa einer Hochregallagerbreite von  $b_{ges} = 25$  bis  $30m$  entspricht. Die Einhaltung der Nachweise im GZG bei schmalen, hohen Konstruktionen unter Verwendung wirtschaftlicher Querschnittsabmessungen ist selbst bei der Konzeption mit der sehr steifen Brettsperrholzkonstruktion nicht möglich.

Die Untersuchung verschiedener Nennstärken der Brettsperrholzbauteile zeigt, dass hierin ebenfalls Potenzial zur Erhöhung der Gesamtsystemsteifigkeit steckt. Der Effekt ist im Vergleich zur Rahmentragwirkung jedoch gering. Die Maße sind aus Gründen der Verfügbarkeit der Produkte aber vor allem aus den Gesichtspunkten der Wirtschaftlichkeit nicht beliebig erweiterbar. Bei der Planung und Bemessung sollten daher stets die Lagergesamtabmessungen beachtet werden, um eine realistische und wirtschaftlich angemessene Lösung der Regalstruktur anbieten zu können.

Die Durchbiegung der Randsteher mit dem zulässigen Wert von  $u_{db} = 15\text{mm}$  stellt bei doppeltiefen Hochregallagern der Brettsperrholzbauweise im Vergleich zur Kopfverschiebung der Rahmenstruktur kein Problem dar. Im Rahmen der Parameterstudie waren die Verformungen bei allen Systemen mit Ausnahme der Systeme mit  $h_{ges} = 40\text{m}$  eingehalten. Hier konnten maximale Durchbiegungen von  $u_{db,vorh} = 35\text{mm}$  beim Lager mit BSP 40/40/40/40/40 festgestellt werden. Im speziellen Fall können vergrößerte Durchbiegungen durch breitere Randgassen für die RBGs kompensiert werden.



**Abbildung 88: Darstellung der Verformungen in Querrichtung in Abhängigkeit der BSP-Nennstärken und der Anzahl der Gassen (Lagerbreite) für einfach tiefe Hochregallager**

Abbildung 88 zeigt analog Abbildung 87 die sich einstellende Kopfverformung in Lagerquerrichtung, allerdings für einfach tiefe Lager. Entsprechend den geringeren Lagerbreiten sind die Verformungen im Vergleich zu doppeltiefen Lagern größer. Hochregallager mit  $h_{ges} = 40\text{m}$  und einfach tiefer Lagerung sind für Holz im Hinblick auf die Kopfverschiebung des Rahmens in Querrichtung nur bei sehr großen Gassenzahlen  $Anz_{Gasse} \geq 10$  in Betracht zu ziehen. Wird nur die Lagerbreite unabhängig von der Gassenzahl betrachtet, so liegen einfach tiefe Hochregallager bezüglich der Kopfverformung in der Größenordnung von doppeltiefen Lagern. Aufgrund der reduzierten Anzahl der Stellplätze in Querrichtung sind für vergleichbare Hochregallagerbreiten bei einfach tiefen Lagern jedoch deutlich mehr Gassen und somit RBGs erforderlich.

Eine größere Herausforderung bei einfach tiefen Lagern stellt die Durchbiegung der Randsteher dar. In der Parameterstudie liegt die Durchbiegung der Randsteher  $u_{db,vorh} = 110\text{mm}$  beim Lager mit einer Höhe von  $h_{ges} = 40\text{m}$  und BSP 80/40/40/40/80 und überschreiten somit die zulässige Durchbiegung  $u_{db} = 15\text{mm}$  deutlich. Potenzial steckt in einer massiveren Ausbildung der Randsteher im Vergleich zu den Mittelstehern. Massivere Querschnitte bedingen

allerdings eine Vergrößerung der Hochregallagerlänge. Alternativ oder zusätzlich können die angrenzenden Gassen der RBGs breiter ausgeführt werden. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit sind unter Berücksichtigung der zulässigen Verformungen einfachtiefe Hochregallager mit Höhen  $h_{ges} = 40m$  nicht realistisch.

### 7.5.3 Fazit

Die Einhaltung der Grenzwerte der Verformungen stellt bei der Planung von Hochregallagern eine besondere Herausforderung dar.

Das entscheidende für die Funktionsfähigkeit der Längsaussteifung ist die Verwendung vollflächiger, schubsteif verbundener Platten. Unter Beachtung dieser Vorgabe kann für Hochregallagerhöhen  $h_{ges} \leq 30m$  durch lange Aussteifungswände über vier oder fünf Fächer eine sehr steife Konstruktion erzeugt werden, die die Anforderungen der Gebrauchstauglichkeit erfüllt. Die Herausforderung stellen Hochregallager mit Höhen  $h_{ges} > 30m$  dar. Durch den Einsatz weiterer, innenliegender Aussteifungsebenen können die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit in Lagerlängsrichtung auch für Lagerhöhen bis  $h_{ges} = 40m$  erfüllt werden.

Bezüglich der Nachweise in Lagerquerrichtung sind Schmale und hohe Konstruktionen besonders kritisch. Doppeltiefe Hochregallager mit einer Höhe  $h_{ges} \leq 20m$  stellen in Bezug wegen der Nachweise im GZG keine besondere Herausforderung dar. Lediglich bei sehr schmalen Konstruktionen mit  $b_{ges} \leq 20m$  sind ggf. massivere Steherquerschnitte erforderlich. Im Lagerhöhenbereich von  $20m < h_{ges} \leq 30m$  steigt die Maßgeblichkeit der Nachweise im GZG. Ab Lagerbreiten von  $b_{ges} > 25m$  bis  $30m$  können die Nachweise der Kopfverschiebung der Rahmen in Querrichtung ohne wesentliche Erhöhung der Querschnittsbreiten im Vergleich zum Nachweis im GZT eingehalten werden. Schmale Lager bedürfen jedoch auch hier einer besonderen Beachtung. Der Lagerbereich mit Höhen von  $30m < h_{ges} \leq 40m$  ist bei doppel tiefen Hochregallagern für große Lagerbreiten  $b_{ges} > 50m$  im Hinblick auf die Nachweise im GZG ebenfalls realisierbar. Schmalere Hochregallager bedingen aufgrund der erforderlichen Grenzwerte der Verformung die Ausführung mit massiveren Querschnitten, was zu Lasten der Wirtschaftlichkeit geht. Einfachtiefe Lager sind im Höhenbereich von  $30m < h_{ges} \leq 40m$  aufgrund der Durchbiegung der Randsteher nur sehr schwer mit massiven Querschnitten umzusetzen.

Falls der Hersteller der Fördertechnik für die automatische Regalbedienung größere Verformungen zulassen kann, sind auch schmale, hohe Systeme in einem wirtschaftlich angemessenen Rahmen möglich.

## 7.6 Zusammenstellung einer Konzeptions- und Berechnungsanleitung für Hochregallager aus Holz

Zur Erleichterung der praktischen Anwendung für die Planung und Konzeption von Hochregallagern aus Holz in Silobauweise wird nachfolgend das Vorgehen in einer Konzeptions- und Berechnungsanleitung dargestellt.

1. Zusammenstellung der Entwurfsgrundlagen und Vorgaben
  - a. Analyse des Lastenheftes (siehe Kapitel 6.4.2)

- b. ggf. Rücksprache/Abstimmung mit dem Betreiber und Hersteller der Regalbedienanlage bei Besonderheiten und Unklarheiten
  - c. Anforderungen und Auswirkungen des Lagerguts – Einwirkungen auf die Regalstruktur
  - d. Ermittlung der klimatischen Randbedingungen und der Nutzungsklasse
2. Ermittlung der erforderlichen Freiräume (Fachfreimaße) der Regalstruktur (siehe Kapitel 6.4.3)
    - a. Bestimmung der Fachgrößen (Berücksichtigung der Platzlagerung) und deren erforderlicher Anzahl – siehe auch Vorgabe der Stellplätze des Lastenheftes
    - b. Beachtung gegebenenfalls erforderlicher Variabilität im Hinblick auf die einzulagernden Ladeeinheitsabmessungen – siehe auch Vorgabe zu den Ladeeinheiten des Lastenheftes
  3. Entwurf einer logistisch und statisch sinnvollen Regalstruktur (Anordnung der Fächer)
    - a. Beachtung logistischer Anforderungen; z. B. Häufigkeit der Ein- und Auslagevorgänge bestimmter Ladeeinheiten (Vorgabe aus dem Lastenheft oder ggf. mit dem Betreiber oder Bediengerätehersteller Rücksprache halten)
    - b. Berücksichtigung einer statisch sinnvollen Ladeeinheitsanordnung; z. B. bei variierenden Lasten hohe Lasten unten im Lager anordnen, Fächer für Ladeeinheiten mit geringerer Höhe unten im Lager anordnen (Stabilität)

*Beachte:* logistische Anordnung vor statischer Anordnung der Fächer

4. Abstimmung mit der zuständigen Bauaufsichtsbehörde und dem Prüfsachverständigen bezüglich spezieller, für die Konzeption relevanter Brandschutzforderungen (siehe Kapitel 3.4.5 und 3.7)
5. Wahl der Bauteilaufbauten für Steher, Dachträger, Palettenträger, Längsaussteifung, Koppelpfetten/ Lastensammler und ggf. Durchschubsicherungen (siehe Kapitel 6.5) und Festlegung sinnvoller Modulgrößen im Hinblick auf:
  - a. Anforderungen und Einwirkungen durch die Lagernutzung
  - b. Verfügbarkeit
  - c. Herstellbarkeit
  - d. Montageaufwand
  - e. Transportierbarkeit
  - f. große Stückzahlen (geringe Variabilität der jeweiligen Bauteile)
6. Zusammenstellung der Einwirkungen (Beachte: Besondere Lastfälle bei der Planung von Hochregallagern) (siehe Kapitel 7.2)
7. Bildung der Lastfallkombinationen für Hochregallager aus Holz für die Bemessung (siehe Kapitel 7.3)
8. Modellbildung für die Gesamtsystemanalyse am dreidimensionalen System oder anhand von ebenen zweidimensionalen Systemen (siehe Kapitel 7.4.2 und 7.4.3)
9. Berechnung der Schnittgrößen und Verformungen des Modells / der Modelle für die Lastfallkombinationen aus 7 nach Theorie II. Ordnung

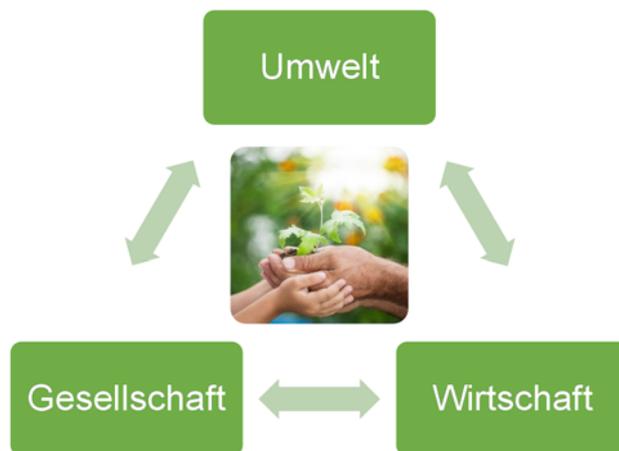
10. Bemessung der Bauteile und Verbindungen nach den Regeln des Holzbaus
11. Kontrolle der im Modell berücksichtigten Steifigkeiten und Querschnitte mit den Ergebnissen der Bemessung und ggf. Anpassung im Modell (iterativer Prozess)
12. Kontrolle der Gesamtsystemanalyse durch Überprüfung einzelner Bauteile (z. B. Steher, Palettenträger)

## 8 Untersuchung der Nachhaltigkeit

*Christopher Ludwig*

### 8.1 Einführung und Untersuchungsziel

Das Thema Nachhaltigkeit gliedert sich grundsätzlich in drei Teilbereiche: die ökologische, die ökonomische und die soziale Nachhaltigkeit (siehe Abbildung 89). Ziel ist es trotz allgemeiner stetiger Veränderungen diese drei Aspekte zu erhalten. Im vorliegenden Forschungsprojekt werden ökologische und ökonomische Auswirkungen betrachtet, weshalb nachfolgend nur Aussagen über diese Teilbereiche möglich sind.



**Abbildung 89: Die drei Aspekte der Nachhaltigkeit**

Zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden existiert die DIN EN 15643 inklusive ihrer relevanten Teilnormen:

- DIN EN 15643-1 allgemeine Rahmenbindungen [DIN-15643-1]
- DIN EN 15643-2 Bewertung der umweltbezogenen Qualität [DIN-15643-2]
- DIN EN 15643-4 Bewertung der ökonomischen Qualität [DIN-15643-4]

Die in den Normen enthaltenen Informationen werden als Richtlinie für die weiteren Arbeiten verwendet.

Im Rahmen dieses Kapitels werden die ökologischen und ökonomischen Auswirkungen von Hochregalen aus Holz und Stahl ermittelt und anschließend gegenübergestellt. Verglichen werden soll dabei die in Kapitel 6 und 7 neu entwickelte Brettsperrholzbauweise, die Brett-schichtholzbauweise (aktueller Stand der Holzbauweise, siehe Kapitel 3.6.3) sowie die konventionelle Stahlbauweise. Ziel ist es nur die Regalkonstruktionen bzw. deren Einflüsse auf andere Bereiche des Hochregallagerbereichs zu berücksichtigen, um allein die Auswirkungen der unterschiedlichen Regalwerkstoffe und -bauweisen zu vergleichen (keine vollständige Gebäudebetrachtung). Für die genannten Bauweisen werden zwei Einsatzszenarien untersucht. Eine normale Lagerumgebung (12-25°C, rel. Luftfeuchte 45-65%, keine aggressiven Medien [Sch-1996]) sowie eine chemisch aggressive Umgebung. Auf diese Weise sollen die wirtschaftlichen und ökologischen Vor- und Nachteile der drei Bauweisen sowie der zwei Einsatzszenarien sichtbar gemacht werden.

Bevor nun Methoden zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit beschrieben werden, müssen ein Bewertungsgegenstand sowie eine für die folgenden Arbeiten passende Systemgrenze bestimmt werden. Danach wird ein funktionales Äquivalent festgelegt, welches die Grundlage für den späteren Vergleich der drei Bauweisen darstellt. Die allgemeinen Randbedingungen werden durch Bestimmung von für diesen Anwendungsfall passenden Szenarien und Phasen des Lebenszyklus abgeschlossen.

### 8.2 Bewertungsgegenstand

Die Bewertung der ökologischen und ökonomischen Nachhaltigkeit kann entweder anhand eines geplanten oder eines bereits bestehenden Gebäudes erfolgen. Im vorliegenden Fall bietet sich die Betrachtung eines bestimmten bestehenden Holz-Hochregals an (siehe Tabelle 26), da dieses zum einen den aktuellen Stand der Konstruktionsentwicklung (Brettschicht-holzbauweise) widerspiegelt und zum anderen Planungsdaten für mehrere funktionsgleiche Stahl-Hochregale aus der Planungsphase des Lagers vorliegen. Aufgrund dieser Tatsache wurde die in diesem Projekt entwickelte Brettsperrholzbauweise bereits in Kapitel 7 mit den Ausprägungen des hier gewählten Holz-Hochregals geplant und berechnet.

**Tabelle 26: Eckdaten Bewertungsgegenstand [Sim-2014]**

<b>Bauherr</b>	Alnatura Produktions- und Handels GmbH
<b>Baujahr</b>	2013/2014
<b>Hersteller</b>	Kaufmann Bausysteme GmbH
<b>Bauform</b>	Silobauweise, doppeltief
<b>Bedienart</b>	Regalbediengeräte, automatisch, gassengebunden
<b>Länge</b>	115,5 m
<b>Breite</b>	67 m
<b>Höhe</b>	19,5 m
<b>Ebenenanzahl</b>	8
<b>Gassenanzahl</b>	9
<b>Stellplatzanzahl</b>	31176
<b>Brandschutzeinrichtungen</b>	vollständige Sprinklerung
<b>Heizung/Kühlung</b>	Kellereffekt, Regal im Boden versenkt

### 8.3 Festlegung der Systemgrenze

Wie in Kapitel 4.6.2 beschrieben, werden in diesem Forschungsprojekt automatisch bediente Hochregale in Silobauweise näher erforscht. Durch die Untersuchungen in Kapitel 4.5 konnte gezeigt werden, dass die Einflüsse der Brettschicht-holzbauweise auf die übrigen Komponenten des Hochregallagerbereichs (Bodenplatte, Gebäudehülle, Förder-, Brandschutz-, Gebäudetechnik) vernachlässigbar gering sind. Auch bei der Regalinspektion sowie der Sachversicherung konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Diese Feststellungen gelten auch für die neu entwickelte Brettsperrholzbauweise, da diese ebenso aus Holz besteht und auch bei den Regalgesamtabmessungen, aufgrund gleicher Bauteildimensionen in den relevanten Richtungen, kaum von der Stahlbauweise abweicht.

Sehr wohl liegen aber Unterschiede zwischen Holz- und Stahl-Hochregalen bei den betrachteten Zeiträumen (Planung, Montage usw.) und der Robustheit und damit bei der Reparatur

von Hochregalkonstruktionen vor. Die in Kapitel 4.5.2 identifizierten Zeitvorteile gelten grundsätzlich für die Brettschichtholzbauweise. Bei der neuen Brettsperrholzbauweise kann bedingt durch den eingeführten Steherstoß von einer ähnlich hohen Montagezeit wie bei Stahl-Hochregalen ausgegangen werden. Die unterschiedlichen Montagezeiten werden bei den ökologischen und ökonomischen Auswirkungen berücksichtigt. Die übrigen Zeitunterschiede werden nicht explizit verwendet, da sich anhand der Auswertung keine eindeutigen Aussagen erkennen lassen. Die höhere Robustheit und damit geringere Reparaturanfälligkeit von Palettenträgern aus Holz wird in die Systemgrenze miteinbezogen. Dieser Vorteil gilt ebenso für die Brettsperrholzbauweise, da bei dieser die gleichen Palettenträger verwendet werden.

Zusammenfassend kann somit festgestellt werden, dass sich alle signifikanten Unterschiede zwischen Holz- und Stahlhochregalen allein auf die Regalkonstruktion beziehen, weshalb auch nur diese nachfolgend untersucht wird.

Hochregalkonstruktionen bestehen aus einer Vielzahl unterschiedlicher Bauteile. Von diesen werden folgende Elemente in die Systemgrenze eingeschlossen, weil sie als systemrelevant angesehen werden:

- Steher
- Palettenträger
- Kopfträger
- Fassadenanschlüsse
- Verbindungsmittel
- Steherfüße
- Vergussmörtel
- Bodenanker

Nicht berücksichtigt werden die Führungsschienen des Regalbediengeräts, Sprinklerhaltungen, Gassentrennungen und Bühnen. Diese Bauteile und Baugruppen sind unabhängig vom Regalwerkstoff. Durchschubsicherungen sind ebenfalls nicht Teil der Betrachtungen, weil sie nach den Vorgaben der DIN EN 528 nicht zwingend erforderlich sind [DIN-528].

#### **8.4 Funktionales Äquivalent**

Bewertungsergebnisse von Gebäuden dürfen später nur miteinander verglichen werden, wenn sie dasselbe funktionale Äquivalent aufweisen. Dieses beinhaltet die funktionalen und technischen Anforderungen sowie die vorgesehene Nutzung. [DIN-15643-1]

Im vorliegenden Anwendungsfall beschreibt das funktionale Äquivalent ein automatisches Hochregallager in Silobauweise, welches zur Lagerung von palettierten Gütern dient.

Da später allein die Auswirkungen der Regalwerkstoffe gegenüber gestellt werden sollen, müssen die funktionalen und technischen Anforderungen der zu vergleichenden Hochregale exakt gleich sein. Ein Vergleich allein aufgrund der Gesamtzahl der Stellplätze würde das Ergebnis durch andere Einflüsse (z. B. unterschiedliche Bauhöhen) verfälschen.

Die Anforderungen des funktionalen Äquivalents sind in Tabelle 26 zusammengefasst. Als funktionale Einheit wird 1 Stellplatz gewählt.

Tabelle 27: Anforderungen des funktionalen Äquivalents

<b>Gebäudeart</b>	Hochregallager in Silobauweise
<b>Nutzungsgefüge</b>	Lagerung palettierter Güter
<b>Nutzungsdauer</b>	50 Jahre
<b>Bedienart</b>	Regalbediengerät, automatisch, gassengebunden
<b>Gassenanzahl</b>	9
<b>Ebenenanzahl</b>	8
<b>Unteres Anfahrmaß RBG</b>	850 mm
<b>Anzahl Regalfächer in X-Richtung</b>	36
<b>Lagertiefe</b>	doppeltief
<b>Ladehilfsmittel</b>	Europoolpalette
<b>max. Höhe der Ladeinheit je Ebene</b>	1,15/1,15/1,55/1,55/1,95/1,95/1,95/2,0 m
<b>Fachdimension</b>	3-Platzlagerung
<b>max. Gewicht je Ladeinheit</b>	1000 kg
<b>max. Feldbelegung</b>	80%
<b>Lageratmosphäre</b>	Einsatzszenario 1: 12-25°C, rel. Luftfeuchte 45-65%, keine aggressiven Medien Einsatzszenario 2: 12-25°C, rel. Luftfeuchte 45-80%, aggressive Medien (Salzlagerung)

### 8.5 Lebenszyklusphasen

Bei der Untersuchung der Nachhaltigkeit reicht es nicht aus nur Auswirkungen innerhalb der Erstellungsphase, welche Planung A0, Herstellung A1-3, Transport A4 und Montage A5 beinhaltet, zu betrachten. Ein qualitativer Vergleich der Regalwerkstoffe muss über das gesamte Lagerleben und somit über alle Auswirkungen geführt werden. Darin eingeschlossen sind neben den bereits genannten Phasen auch die Nutzung B1-7, der Abriss C1, der Abtransport C2 sowie die Entsorgung bzw. das Recycling C3-4. Vorteile und Belastungen, welche durch die Wiederverwendung, die Rückgewinnung und das Recycling der Baustoffe entstehen, befinden sich außerhalb der Systemgrenze in Phase D (vgl. Abbildung 90).

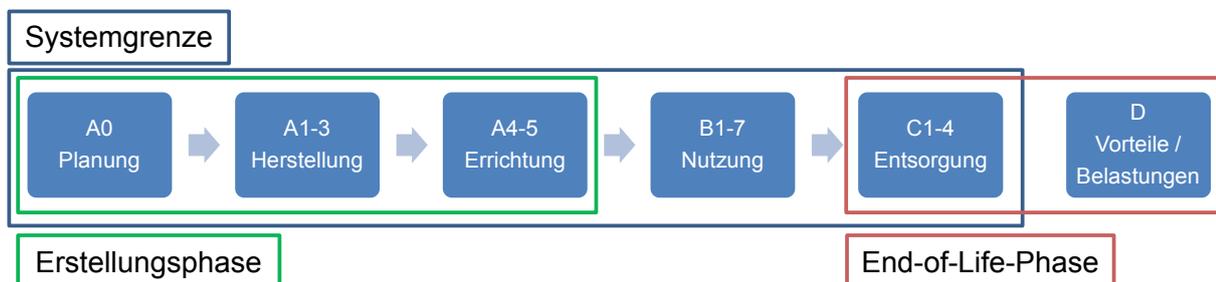


Abbildung 90: Phasen des Hochregallebens in Anlehnung an [DIN-15643-4]

## 8.6 Szenarien

Für die Nutzung von Gebäuden sowie deren Lebensende gibt es meist mehrere mögliche Szenarien. Wie in Kapitel 5 gezeigt werden konnte, wäre ein Einsatz von Hochregalen aus Holz besonders bei chemisch aggressiven Bedingungen sinnvoll. Daher wird für die Nutzungsphase neben einer normalen Lageratmosphäre (12-25°C, rel. Luftfeuchte 45-65%, keine aggressiven Medien) auch ein solches Szenario in Form einer Salzlagerung betrachtet. Für die End-of-Life-Phase gibt es ebenfalls zwei Möglichkeiten.

Am Lebensende werden Hochregale entweder abgerissen und anschließend entsorgt bzw. recycelt oder sie werden geordnet rückgebaut, verkauft und an anderer Stelle wiederverwendet. Nach Rücksprache mit einem auf den Wiederverkauf von Palettenregalen spezialisierten Unternehmen kann ein Verkauf eines Regals nach der geplanten Nutzungsdauer von 50 Jahren jedoch ausgeschlossen werden. Hochregale können in der Regel nur innerhalb der ersten 30 Jahre verkauft werden. Sie verlieren in den ersten 3 bis 5 Jahren bereits 70 bis 80% ihres ursprünglichen Wertes. [Fre-2015]

Zudem werden Hochregale in Silobauweise für einen definierten Standort ausgelegt, d. h. Wind- und Schneelasten werden anhand der entsprechenden regionalen Vorgaben bestimmt. Bei einem Verkauf mit anschließendem Wiederaufbau an einem anderen Standort dürfen die dort vorherrschenden Wind- und Schneelasten maximal gleich hoch oder niedriger sein. Aus den genannten Gründen wird für die End-of-Life-Phase nur das Szenario Recycling bzw. Entsorgung betrachtet.

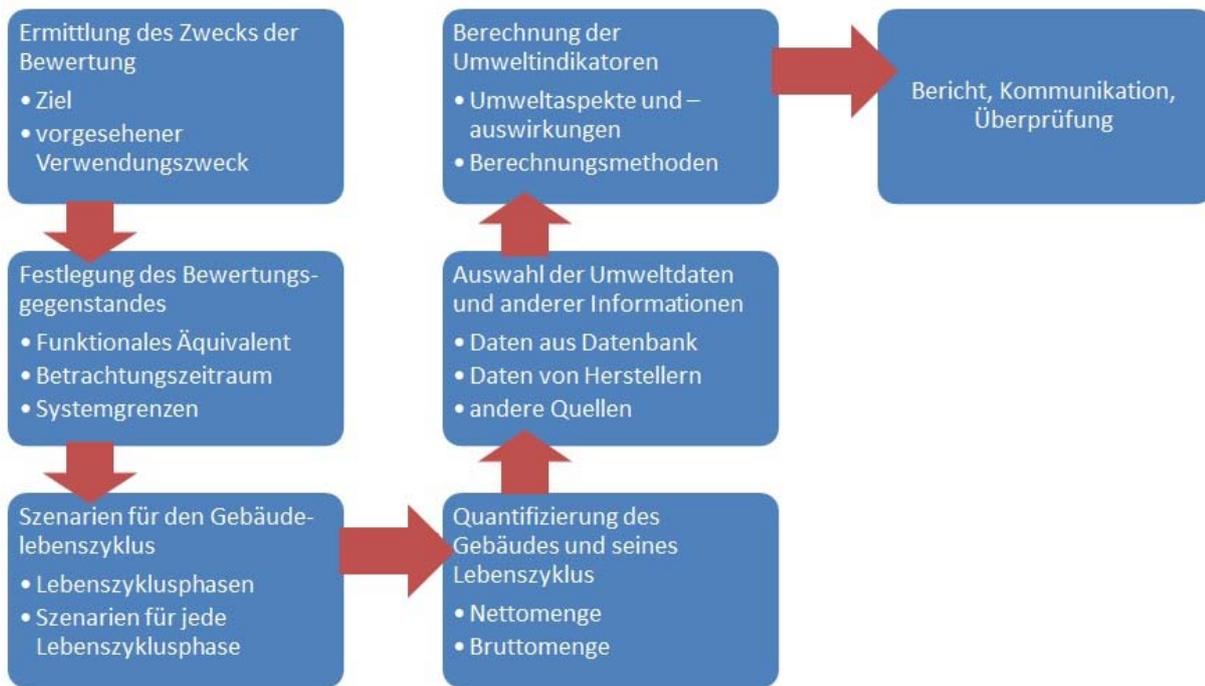
## 8.7 Ökologische Nachhaltigkeit

### 8.7.1 Motivation und Vorgehensweise

Einer der Hauptgründe für den Bau von Hochregallagern aus Holz war bisher die vermutete besseren ökologischen Nachhaltigkeit im Vergleich zur Stahlbauweise (siehe Kapitel 4.3). Beweise für diese Annahme liegen derzeit jedoch nicht vor. Zur Untersuchung dieses möglichen Vorteils der Holzbauweise sollen Ökobilanzen der Brettschichtholz-, der Brettsperrholz- sowie der Stahlbauweise für die zwei definierten Einsatzszenarien erstellt und anschließend miteinander verglichen werden. Auf diese Weise ist nicht nur eine Gegenüberstellung der beiden Werkstoffe Holz und Stahl möglich, sondern auch ein Vergleich der derzeitigen Holzbauweise (Brettschichtholzbauweise) mit der Neuentwicklung dieses Projekts (Brettsperrholzbauweise).

Zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden wird die DIN EN 15978 verwendet [DIN-15978]. Diese gibt einen Ablaufplan für die Ökobilanzierung vor, welcher in Abbildung 91 dargestellt ist.

Die Festlegung des Bewertungsziels bzw. Zwecks, die Charakterisierung des Bewertungsgegenstandes sowie die Definition von Szenarien und Lebenszyklusphasen wurden bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben. Somit ist der Rahmen für die geplanten Ökobilanzierungen schon gesetzt. Nachfolgend können nun die Lebenszyklen der drei zu betrachtenden Bauweisen quantifiziert werden. Diesen werden dann Umweltdaten zugeordnet, aus denen sich später Umweltindikatoren bzw. -auswirkungen berechnen lassen.



**Abbildung 91: Prozess der Bewertung der umweltbezogenen Qualität, in Anlehnung an [DIN-15978]**

### 8.7.2 Quantifizierung der Hochregallebenszyklen

Bei den Stoff- und Energieflüssen im Laufe des Hochregallebens haben manche große Auswirkungen auf das Gesamtergebnis und manchen nur geringe. Um die Komplexität der Ökobilanzierung in einem vertretbaren Maß zu halten wird ein Abschneidekriterium definiert.

Dieses besagt, dass alle Prozesse, deren erwarteter Anteil am erneuerbaren und nicht erneuerbaren Einsatz von Primärenergie sowie an der Masse des Gesamteinsatzes weniger als 1% beträgt, vernachlässigt werden können. Die Summe der vernachlässigten Prozesse muss dabei kleiner sein als 5 % des gesamten Energie- und Masseinsatzes. [DIN-15804]

Durch diese niedrige Grenze wird sichergestellt, dass das Abschneiden von Prozessen das Ergebnis nicht verfälscht.

Für die Ökobilanzierung müssen die Energie- und Stoffströme im Laufe des Hochregal-Lebenszyklus erfasst, quantifiziert und den in Kapitel 8.5 festgelegten Phasen des Lebenszyklus zugeordnet werden. Daten bezüglich der Herstellung A1-3, dem Transport A4 und der Montage A5 der Brettschichtholz- und Stahlbauweise werden von entsprechenden Herstellern zur Verfügung gestellt. Die nötigen Informationen für die neu entwickelte Brettsperrholzbauweise liegen größtenteils aus den vorangegangenen Kapiteln vor. Fehlende Aspekte werden in Abstimmung mit den projektbeteiligten Holz-Hochregal-Herstellern ergänzt. Bei der Brettsperrholzbauweise wird bereits von der Herstellung der Steher mit vorgefertigten Aussparungen ausgegangen (siehe Kapitel 6.6).

Der Lebenszyklus eines Hochregals beginnt für die Ökobilanzierung mit seiner Herstellung A1-3, da die Planungsphase nach den Vorgaben der DIN EN 15978 nicht berücksichtigt wird [DIN-15978].

Die Herstellungs- und die End-of-Life-Phase von Hochregalbauteilen müssen für die Ökobilanzierung nur so weit auf ihre Prozesse und Rohstoffe heruntergebrochen werden, wie es später für die Zuordnung von Umweltdaten nötig ist. So gibt es zum Beispiel bereits berechnete Umweltauswirkungen von 1 m<sup>3</sup> Brettschichtholz, welche die gesamte Herstellungsphase A1-3, die Aufbereitung C3 sowie die Verwertung bzw. das Recycling D berücksichtigen. Für die übrigen Materialien sind solche Daten ebenfalls verfügbar, weshalb nachfolgend keine detaillierten Beschreibungen der Herstell- und der End-of-Life-Phase erfolgen.

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf die normale Lageratmosphäre. Die Modifizierungen der Regalkonstruktionen für das Einsatzszenario zur Lagerung chemisch aggressiver Medien werden an den entsprechenden Stellen angegeben.

#### *Herstellung A1-3*

Je nach Bauweise müssen Steher und Palettenträger aus verschiedenen Werkstoffen erstellt werden. Die Verbindungsmittel, die Bodenanker sowie die Steherfüße bestehen bei allen drei zu untersuchenden Hochregalbauweisen aus Stahl. Bei allen Hochregalen wird außerdem Vergussmörtel zur Unterfütterung der Steherfüße verwendet. Insgesamt müssen zum Bau der drei Hochregale die in Tabelle 28 dargestellten Stoffe hergestellt werden.

**Tabelle 28: benötigte Stoffmengen der drei zu untersuchenden Bauweisen zur Herstellung des Betrachtungsgegenstandes**

<b>Baustoff</b>	<b>Brettschichtholz- bauweise</b>	<b>Brettsperrholz- bauweise</b>	<b>Stahlbauweise</b>
Brettschichtholz BSH	3807 m <sup>3</sup>	1569 m <sup>3</sup>	-
Brettsperrholz BSP	-	2040 m <sup>3</sup>	-
3-Schichtplatten	242 m <sup>3</sup>	31 m <sup>3</sup>	-
Schnittholz	50 m <sup>3</sup>	50 m <sup>3</sup>	-
Stahl (stückverzinkt)	29,8 to	25,8 to	216,6 to
Stahl (bandverzinkt)	-	-	892,6 to
Stahl-Verbindungsmittel/Anker	15,9 to	10,0 to	16,8 to
Vergussmörtel	25,5 to	20,7 to	15,0 to
<b>Gesamtmasse</b>	<b>1792 to</b>	<b>1606 to</b>	<b>1141 to</b>

Es ist ersichtlich, dass sich sowohl die Brettschichtholzbauweise als auch die Brettsperrholzbauweise nicht nur aus Brettschicht- bzw. Brettsperrholz zusammensetzen. Bei ersterer werden 3-Schichtplatten für die Lastensammler sowie für Teile der Aussteifungstürme verwendet (siehe Kapitel 3.6.3). Die übrigen Bauteile, welche den Großteil des Holzvolumens ausmachen, bestehen aber aus Brettschichtholz. Die für die Brettschichtholzbauweise eingesetzten Hartholzdübel (ca. 3000 Stk  $\approx$  0,13m<sup>3</sup>) sowie der Holzleim (ca. 250kg) werden bedingt durch die geringe verwendete Menge abgeschnitten. Bei der Brettsperrholzbauweise werden nur die

Steher aus Brettsperrholz gefertigt. Die Palettenträger werden wie bei der Brettschichtholzbauweise aus Brettschichtholz ausgeführt. Für beiden Holzbauweisen werden Schablonen bei der Montage benötigt, welche aus Schnittholz hergestellt werden. Zur Verbindung der Holzsteher mit dem Boden werden Stahlfüße aus warmgewalztem und stückverzinktem Stahlblech benötigt.

Hochregale aus Stahl bestehen in der Regel aus zwei verschiedenen Stahlprofiltypen. Die kaltgeformten und bandverzinkten dünnen Profile, welche aus bereits verzinktem Blech durch Walzprofilieren produziert werden, machen dabei den größten Anteil an der Gesamtmasse aus. Aus ihnen werden die Palettenträger sowie die Mehrzahl der Steher hergestellt. Beim zweiten Profiltyp, den warmgewalzten und nachträglich stückverzinkten dicken Profilen, handelt es sich um im Stahlbau übliche I- und L-Profile. Sie werden in statisch hoch beanspruchten Zonen, üblicherweise am Anfang und Ende des Regals, zur Aussteifung der dazwischen liegenden Bereiche eingesetzt. Der Anteil der beiden Profiltypen ist je nach Hochregalgesamt- abmessungen und Hersteller stark unterschiedlich. Je höher und schmaler ein Hochregal gebaut wird, desto mehr Stahlbauprofile müssen verwendet werden. Für das hier betrachtete Lager, für welches den beteiligten Herstellern noch Daten aus der Angebotsphase vorliegen, wird ein Anteil der Stahlbauprofile von 20% angenommen.

Bei allen Hochregalen werden die einzelnen Bauteile der Regalkonstruktion durch Stahl-Verbindungsmitel vereinigt. Für die Hochregale aus Holz werden hauptsächlich Holzschrauben mit Vollgewinde bis zum Kopf sowie Nägel eingesetzt. Bei Stahl-Hochregalen werden hingegen Sechskantschrauben mit Muttern und Scheiben verwendet. Gleich sind bei den drei Bauweisen die Stahl-Verbindungsanker mit der Betonbodenplatte sowie der Vergussmörtel. Die Massen des Mörtels und der Anker hängen dabei von der Anzahl der Verbindungspunkte mit der Bodenplatte ab.

In Tabelle 28 ebenfalls ersichtlich sind die Gesamtmassen der betrachteten Regalkonstruktionen. Diese weichen stark voneinander ab. Die Stahlbauweise wird ihrem Ruf als stark optimierte Konstruktion, zumindest bei der Gegenüberstellung der Massen, gerecht. Sie weist die geringste Gesamtmasse auf. Zwischen den beiden Holzbauweisen gibt es ebenfalls große Unterschiede, welche durch den neuen Werkstoff sowie die geänderte Bauteilform bei den Stehern begründet werden können. Die Palettenträger sind bei beiden Bauweisen gleich ausgebildet. Ein kleiner Beitrag zur geringeren Masse der Brettsperrholzbauweise entsteht auch durch die verminderte Masse der Bodenanker sowie des Vergussmörtels. Dies ist die Folge der geringeren Anzahl an Steherfüßen bzw. Verbindungspunkten. Die Massenunterschiede müssen beim Transport der Hochregale zur Baustelle berücksichtigt werden. Für das Hochregallagergebäude, insbesondere für die Betonbodenplatte, ergeben sich dadurch keine Auswirkungen, da die Hauptbelastung aus den eingelagerten Gütern stammt und die Masse der Hochregale dazu vergleichsweise gering ist.

Für das Einsatzszenario zur Lagerung aggressiver Medien müssen die Holzbauweisen nur marginal modifiziert werden. Der Werkstoff Holz wird, wie bereits in Kapitel 5.2.5 abgeschätzt, nur wenig geschädigt (Randschichtdicke ca. 1mm). Die Festigkeitsminderung kann in Hinblick auf die bestehenden Ausnutzungsreserven vernachlässigt werden, weshalb die Holzkonstruk-

tion somit unverändert bleibt. Die Steherfüße aus Stahl müssen durch eine Beschichtung entsprechend geschützt werden. Es wird die Korrosivitätskategorie C5-I angenommen. Nach den Angaben der DIN EN ISO 12944-5 sowie in Rücksprache mit einem Sachverständigen für Korrosionsschutz wird eine dreischichtige Beschichtung gewählt [DIN-12944-5]:

- Grundsicht: 80µm Epoxid-Zinkphosphat
- Zwischenschicht: 120µm Epoxid-Eisenglimmer
- Deckschicht: 80µm Polyurethan

Da die Holzschrauben zur Verbindung der Holzbauteile als Vollgewindeschrauben ausgeführt sind, ist bei diesen eine Korrosion im Kopfbereich unkritisch. Gefährlich ist jedoch ein Angriff in der Kontaktfuge der zu verbindenden Bauteile. Diese muss mit einer Kunststoffabdichtung vor der Lageratmosphäre geschützt werden. An nicht einsehbaren Stellen werden zur Sicherheit Edelstahlschrauben verwendet. [Sim-2015]

Bei Stahlhochregalen muss die gesamte Konstruktion mit der beschriebenen dreischichtigen Beschichtung versehen werden. Die Profile werden dazu sandgestrahlt und anschließend mittels Airless-Spritzverfahren mehrmals bis zum Erreichen der gewünschten Schichtdicken beschichtet. Die Verbindungsmittel sowie etwaige Transport- und Montageschäden werden auf der Baustelle im vormontierten Zustand nachbeschichtet. [Höl-2016]

#### *Errichtung A4-5*

Nach der Herstellung müssen die einzelnen Bauteile einer Hochregalkonstruktion zunächst zur Baustelle transportiert werden. Um einen fairen Vergleich der Transportauswirkungen zu erhalten, wird für jede Bauweise dieselbe Transportstrecke von 1000km angenommen. In dieser Entfernung sind in Mitteleuropa und insbesondere Deutschland alle möglichen Standorte für Hochregale zu erreichen. Die nötigen Transportmassen sind bereits in Tabelle 28 angegeben.

Bei der bestehenden Brettschichtholzbauweise wurden für den Transport LKW in Überlänge mit einem Gesamtgewicht von 40 Tonnen verwendet. Diese mussten aufgrund der Stehertlänge als Sondertransport durchgeführt werden. Die durchschnittliche Nutzlast je LKW betrug ca. 18,6 Tonnen.

Die Brettsperrholzbauweise verfügt über Steherstöße, weshalb diese nicht mehr in einem Stück transportiert werden müssen. Die Maße der Bauteile wurden in Kapitel 6.3.4 bereits, in Hinblick auf den Transport, den Abmessungen eines 40 Tonnen LKW angepasst. Als durchschnittliche Nutzlast je LKW werden 19 Tonnen angenommen.

Hochregale aus Stahl werden üblicherweise auch mit 40 Tonnen LKWs zur Baustelle gebracht. Die einzelnen Bauteile sind dabei so ausgelegt, dass alle im normalen Laderaum verstaut werden können. In Rücksprache mit den Herstellern wird eine Nutzlast von 19 Tonnen für das vorliegende Lager bestimmt.

Die Bauteile der Holzbauweisen werden in der Regel für den Transport mit Kunststofffolien verpackt und dadurch vor Fremdeinflüssen geschützt. Für einen kurzen Feuchteschutz wäh-

rend der Montage werden alle Holzbauteile zudem vor dem Transport mit einem dünnen temporären Schutzanstrich (Verbrauch BSH-Bauweise ca. 6000 Liter, BSP-Bauweise ca. 5700 Liter) versehen. Des Weiteren werden ca. 80 (BSH-Bauweise) bzw. 100 (BSP-Bauweise) Liter Hirnholzschutzanstrich bei beiden Bauweisen eingesetzt. Dieser Anstrich wird bedingt durch die geringe Menge abgeschnitten.

Die Profile und Verbindungsmittel der Stahlbauweise werden unverpackt transportiert. Sie werden lediglich auf wiederverwendbaren Paletten mittels Umreifungen festgezurr.

Der Transport der Regalbauteile wird bei Hochregalen montageabhängig geplant. Dadurch entfallen größere Lagerungen der Bauteile auf der Baustelle. Als nötige Montagezeit wird für die Brettschichtholzbauweise eine Zeit von 560 Arbeitsstunden (70 Arbeitstage) und für die Brettsperrholz- sowie Stahlbauweise ein Zeitraum von 640 Arbeitsstunden (80 Arbeitstage) angesetzt. Die höhere Montagezeit bei der Brettsperrholzbauweise wird aufgrund der eingeführten Steherstöße gewählt. Die angegebenen Arbeitsstunden ergeben sich aus der Multiplikation der Montagemonate aus Kapitel 4.5.2 mit einer durchschnittlich Anzahl von 20 Arbeitstagen je Monat sowie 8 Arbeitsstunden je Arbeitstag.

Bei der Montage werden je Regalwerkstoff unterschiedliche Maschinen eingesetzt. Der An- und Abtransport sowie etwaige Aufbau dieser Geräte wird bedingt durch die lokale Anmietung und das geringe Ausmaß als unbedeutend eingeschätzt und daher abgeschnitten. Für die neu entwickelte Brettsperrholzbauweise wird bezüglich der Montage angenommen, dass die gleichen Baumaschinen wie bei der bestehenden Brettschichtholzbauweise verwendet werden können. Gleich ist bei allen drei Bauweisen der Einsatz von drei elektrisch betriebenen Scherenhebebühnen (Nennleistung 16kW, 2 Motorbetriebsstunden pro Tag angenommen) sowie einem dieselbetriebenen Teleskopstapler (129kW Motorleistung, durchschnittl. Verbrauch 12,5L/h [Kun-2015]). Des Weiteren werden die einzelnen Bauteile bei allen Regalen zuvor zu größeren Modulen vormontiert und erst anschließend mit der Hauptkonstruktion verbunden. Für die Holzbauweisen ist dazu eine Montageschablone nötig, welche mengenmäßig bereits in der Herstellungsphase berücksichtigt wurde (siehe Tabelle 28). Ebenfalls gleich ist der Einsatz von verschiedenen elektrischen Werkzeugen wie zum Beispiel Handbohrmaschinen. Deren Verbräuche sind aber sehr gering und werden daher abgeschnitten.

Zum Materialhandling werden bei den Holzbauweisen zwei Fahrzeugkräne (129kW Motorleistung Oberwagen, durchschnittl. Verbrauch 7L/h angenommen) eingesetzt. Diese sind sehr mobil und verfügen über eine hohe Traglast. Die einzelnen Holzbauteile weisen teils hohe Gewichte auf, weshalb entsprechend große Turmdrehkräne nicht wirtschaftlich sind.

Bei Stahlhochregalen werden je nach Hersteller entweder Fahrzeug- oder Turmdrehkräne zur Montage verwendet. Für das vorliegende Hochregal wird ein Turmdrehkran mit einer Anschlussleistung von 63kVA (45kW Hubmotor, 15kW Drehmotor, 7,5kW Katzenmotor, 15kW Fahrwerk [Lie-2016]) und einer Mindesttragfähigkeit von 5 Tonnen bei 50m Auskrangung benötigt. Durch das Verfahren auf Bodenschienen kann auch dieser den nötigen Arbeitsbereich abdecken. Als Betriebszeiten pro Arbeitstag werden folgende Werte angenommen:

- Hubwerk: 2h/Tag
- Drehmotor: 1h/Tag

- Katzenmotor: 1h/Tag
- Fahrwerk 0,1h/Tag

### *Nutzung B1-7*

Hochregale stellen eine statische Konstruktion dar. Sie weisen selbst keinen Energie- oder Stoffverbrauch während des Betriebs auf. Die einzige Ausnahme stellen etwaige Reparaturen dar, bei welchen beschädigte Regalbauteile ausgewechselt werden müssen. Wie in Kapitel 4.5.5 gezeigt werden konnte sind bei Hochregalen aus Holz bedingt durch die massiven Bauteile bzw. Querschnitte keine Schäden an der Regalkonstruktion während der Nutzung zu erwarten. Bei Hochregalen aus Stahl müssen nach den Angaben der Hersteller hingegen öfter Palettenträger nach Zusammenstoßen mit dem Lastaufnahmemittels des Regalbediengeräts ausgewechselt werden. Ein solcher Dreifeldträger hat durch seine dünne Blechbauweise ein Gewicht von nur wenigen Kilogramm, weshalb der Reparaturvorgang bei der Ökobilanzierung abgeschnitten werden kann. Für die Reparatur sind An- und Abfahrten entsprechender Experten notwendig. Da diese meist aus dem lokalen Umfeld bezogen werden und die Umweltauswirkungen der Fahrten vergleichsweise gering sind, werden die An- und Abreisen nicht weiter berücksichtigt.

Sonstige Energie- und Stoffflüsse aufgrund der Gebäudetechnik sowie anderer Komponenten bzw. Prozesse des Hochregallagergebäudes wurden auf ihre Relevanz hin bereits überprüft und werden durch die gewählte Systemgrenze ausgeschlossen.

### *Entsorgung C1-4, Verwertung und Recycling D*

Nach der gewählten Nutzungsdauer von 50 Jahren werden die betrachteten Hochregalbauweisen, wie in Kapitel 8.6 beschrieben, abgerissen und recycelt. Für den Abriss von Hochregalen gibt es in Deutschland einige wenige spezialisierte Unternehmen, welche für die folgenden Überlegungen zu Rate gezogen werden.

Mit der bewährten Abrissmethode mittels Abbruchbagger mit Ausleger und Zange ist nach den Angaben der Abbruchunternehmen auch ein Abriss von Holz-Hochregalen möglich. Unterschiede zwischen den drei Bauweisen gibt es beim Abbruchvorgang selbst keine. [Pet-2015]

Für den vollständigen Abriss der alleinigen Hochregalkonstruktion des gewählten Betrachtungsgegenstandes wird eine Zeit von 192 Arbeitsstunden (24 Arbeitstage) angenommen. Dies entspricht ca. 30% der Montagezeit. Den eigentlichen Abriss übernimmt ein dieselbetriebener Raupenbagger mit Abrissausleger und Abbruchzange (Motorleistung 190kW, durchschnitt. Verbrauch 40L/h angenommen). Zusätzlich wird noch ein Radbagger (Motorleistung 120kW, durchschnitt. Verbrauch 20L/h angenommen) zur Verladung der abgebrochenen Teile verwendet.

Zum Abtransport der zu untersuchenden Hochregallager sollten nach Auskunft der befragten Abbruch- sowie Aufbereitungsunternehmen Container mit einem Fassungsvermögen von 40m<sup>3</sup> eingesetzt werden. Diese werden mit LKWs mit einem Gesamtgewicht von 26 Tonnen transportiert. Da die Aufbereitung, das Recycling und die Entsorgung hauptsächlich von lokalen Unternehmen übernommen werden, wird eine Strecke von 100km für den Abtransport

angenommen. Bezüglich der zu erwartenden durchschnittlichen Füllmasse je 40m<sup>3</sup>-Container wurden zahlreiche Aufbereitungsunternehmen befragt. Die daraus erhaltenen Daten lassen unabhängig von der Hochregalbauweise bzw. dem Regalwerkstoff auf eine Füllmasse von 10 Tonnen je Container schließen.

Die betrachteten Hochregalbauweisen bestehen im Grunde aus Holz-, Stahl- und Mörtelwerkstoffen. Holzwerkstoffe werden nach ihrer Nutzung zerkleinert und anschließend entweder verbrannt (thermisch verwertet) oder für die Produktion von Spanplatten eingesetzt. Nach Mantau wird Altholz in Deutschland zu 78% energetisch verwertet, weshalb diese Form der Nachnutzung für die vorliegenden Holzwerkstoffe gewählt wird [Man-2012, S. 54]. Stahlwerkstoffe können inklusive Beschichtung ohne nennenswerte Aufbereitung recycelt und der Produktion von neuen Baustoffen zugeführt werden. Für den Vergussmörtel ist vor dem Recycling eine Aufbereitung zwingend erforderlich.

Die energetischen und stofflichen Vorteile durch die Verwertung bzw. das Recycling werden in der Lebensphase D gutgeschrieben. Aufwendungen für die Aufbereitung der Abbruchstoffe sind der Phase C3 zugeordnet. Eine Entsorgung C4 findet bei keinen der vorliegenden Werkstoffe statt, da alle Baustoffe entweder verwertet oder recycelt werden.

### 8.7.3 Auswahl und Modellierung der Umweltdaten

Nachdem nun die Stoff- und Energieflüsse charakterisiert und quantifiziert wurden, müssen diesen Daten von Umweltauswirkungen zugeordnet werden. Daraus können anschließend Gesamtauswirkungen der drei Hochregallagerbauweisen sowie der zwei Einsatzszenarien berechnet und somit die ökologische Nachhaltigkeit bestimmt werden.

Für die verwendeten Baustoffe sind bereits größtenteils vorgefertigte Ökobilanzierungen in Form von Umweltproduktdeklarationen –kurz EPD- für deren Herstellung sowie End-of-Life vorhanden. EPDs werden in der Regel von entsprechenden Herstellern oder Industrieverbänden erstellt. Eine weitere wichtige Datenquelle im Baubereich ist die ÖKOBAUDAT des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Dabei handelt es sich um eine Datenbank mit Informationen zu Umweltauswirkungen von Baustoffen und Prozessen.

Neben den Umweltdaten für die verwendeten Baustoffe sind auch Daten zu den zahlreichen Prozessen für Transport, Montage und Abriss notwendig. Die Umweltproduktdeklarationen behandeln nur Baustoffe und berücksichtigen bei diesen nur vereinzelt einen An- oder Abtransport. Daten zu Montage oder dem Abriss werden aufgrund der zahlreichen Möglichkeit äußerst selten angegeben. In der ÖKOBAUDAT-Datenbank sind ebenfalls nur sehr wenige Prozesse enthalten. Die dort angegebenen Daten bezüglich des Transports können nicht verwendet werden. Die Auswirkungen der Transportprozesse wurden mit der Ökobilanzierungssoftware thinkstep GaBi für vordefinierte Szenarien berechnet (z. B. definierte Nutzlast je LKW), die nicht zu den Daten dieses Projekts passen. Aus diesem Grund müssen die Transport- A4/C2, Montage- A5 und Abrissprozesse C1 sowie deren Auswirkungen selbst mit der Ökobilanzierungssoftware GaBi modelliert und berechnet werden. Die Software verfügt dazu über eine Datenbank für Stoffe und Prozesse. Für Informationen zu den beschriebenen Baumaschinen mit Verbrennungsantrieb wird das Emissionsberechnungsmodell „TREMOMM“ nach *Lambrecht et al.* [Lam-2004] in GaBi implementiert, da hierzu auch die GaBi-Datenbank

keine Daten bereit hält. Die Umweltauswirkungen der Diesel- und Strombereitstellung können wieder mit GaBi ermittelt werden.

Eine Modellierung der vollständigen Lebenszyklen der drei Hochregalbauweisen mit der Ökobilanzierungssoftware wird nicht durchgeführt, da die genannten Umweltproduktdeklarationen sowie ÖKOBAUDAT-Daten nicht in der GaBi-Datenbank enthalten sind. Die allgemeine Berechnung findet in Microsoft Excel statt, in welche auch die Ergebnisse aus der Ökobilanzierungssoftware GaBi übertragen werden.

Für das Einsatzszenario zur Lagerung chemisch aggressiver Stoffe müssen die Holzbauweisen geringfügig und die Stahlbauweise vollständig beschichtet werden. In keiner der zur Verfügung stehenden Quellen sind Umweltdaten zur gewählten Beschichtung oder zu ähnlichen Oberflächenschutzschichten enthalten. Auch die Beschichtungshersteller verfügen dazu über keine Daten. Eine Abschätzung der Umweltauswirkungen ist aufgrund fehlender Anhaltswerte ebenfalls nicht möglich. Daher muss auf die Ökobilanzierung dieses Einsatzszenarios in weiterer Folge verzichtet werden. Es kann jedoch angenommen werden, dass bei diesem Einsatzszenarios im Vergleich zur normalen Lageratmosphäre die Gesamtumweltauswirkungen der Stahlbauweise stärker steigen werden als bei den Holzbauweisen.

Die Datenqualität der Umweltproduktdeklarationen und der ÖKOBAUDAT-Daten kann durch die Konformität zur DIN EN 15804 als sehr gut eingeschätzt werden. Bei den Umweltdaten aus der Datenbank der Ökobilanzierungssoftware GaBi sind nur wenige explizit nach DIN EN 15804 berechnet. Bei den übrigen muss bei der Datenauswahl manuell auf die Übereinstimmung mit der genannten Norm geachtet werden. Bedingt durch die meist knappe Beschreibung der GaBi-Daten kann hier eine Abweichung nicht ausgeschlossen werden. Die Genauigkeit des TREMOD-MM-Modells ist aufgrund der zu Grunde liegenden Abgasnormen sowie zahlreicher Messungen als gut anzunehmen.

#### *Umweltdaten der Baustoffe*

Tabelle 29 zeigt die für die verschiedenen Baustoffe ausgewählten Datenquellen. Allgemein sollten bei der Ökobilanzierung möglichst alle Daten aus einer Quelle bezogen werden. Dies ist im vorliegenden Fall nicht möglich, weil keine der beschriebenen Datenquellen Informationen zu allen Baustoffen liefern kann. Es war jedoch möglich ausschließlich Baustoffdaten zu verwenden, welche der DIN EN 15804 entsprechen. Bei der Datenauswahl werden Umweltproduktdeklarationen sowie ÖKOBAUDAT-Daten präferenziert, da deren Datenqualität als höher eingeschätzt wird. Bei Werkstoffen, die in beiden Datenquellen verfügbar sind, wird jene mit den höheren Umweltauswirkungen gewählt (konservative Auswahl, vgl. Abbildung 93).

Nahezu alle in Tabelle 29 angeführte Quellen beschreiben die gesamte Herstellungsphase A1-3 sowie die Verwertung bzw. das Recycling D. Bei Baustoffen bei denen eine Aufbereitung vor dem Recycling nötig ist (z. B. Holzwerkstoffe), sind auch Umweltdaten für den Aufbereitungsprozess C3 angegeben. Daten zu An- oder Abtransport A4/C2 werden nicht aus den Quellen bezogen, sondern selbst modelliert.

Nachfolgend werden einige Anmerkungen zur Datenauswahl und Prozessmodellierung angeführt.

**Tabelle 29: Zuordnung der Umweltdaten zu den Baustoffen**

<b>Baustoff</b>	<b>Datenquelle</b>	<b>gültig bis</b>
Brettschichtholz BSH	EPD-SHL-20120017-IBG1-DE	09.01.2018
Brettsperrholz BSP	EPD-SHL-2012211-DE	19.09.2016
3-Schichtplatten	ÖKOBAUDAT: 3- und 5- Schicht Massivholzplatte (Durchschnitt DE)	2017
Schnittholz	ÖKOBAUDAT: Nadelschnittholz getrocknet (Durchschnitt DE)	2017
Stahl (stückverzinkt)	EPD-BFS-20130173-IBG1-DE	25.10.2018
Stahl (bandverzinkt)	ÖKOBAUDAT: Stahl Feinblech (20µm bandverzinkt) (de)	2018
	GaBi EU-27: Eisenbahntransport inkl. Treibstoff PE	2016
	GaBi GLO: Stahl Blech Stanzen und Biegen (5% Verl.) PE	2016
	GaBi EU-27: Druckluft PE	2016
	GaBi DE: Schmierstoffe ab Raffinerie PE	2016
	GaBi DE: Strommix (Produktionsmix)	2019
Stahl-Verbindungsmittel/Anker	GaBi DE: Befestigungsmittel Schrauben, verzinkt (EN 15804 A1-A3) PE	2016
	GaBi DE: Recyclingpotential Stahlblech verzinkt (EN 15804 D) PE	2016
Vergussmörtel	EPD-DIV-20130129-IBE1-DE	01.08.2018
Montageschutzanstrich Holz	f. ÖKOBAUDAT: Lacksysteme Holzfassade halb-pigmentiert (Lasursystem) (de)	2018

Bei den Umweltproduktdeklarationen für Brettschicht- und Brettsperrholz sind die Bearbeitung sowie die Verpackung der Bauteile für den Transport bereits enthalten. Für die mengenmäßig untergeordneten 3-Schichtplatten kann die fehlende Verpackung vernachlässigt werden. Das eingesetzte Schnittholz muss nicht verpackt werden. Alle Umweltdaten der Holzwerkstoffe berücksichtigen die in Kapitel 8.7.2 ausgewählte thermische Verwertung am Lebensende der Produkte.

Die Umweltproduktdeklaration des stückverzinkten Stahls ist für Stahlbauprofile und Grobbleche definiert. Somit kann sie sowohl für die Profile der Stahl-Hochregale als auch die Steherfüße bei den Holzbauweisen herangezogen werden. Etwaige Schweißarbeiten und Bohrungen, welche bei den genannten Stahlteilen durchgeführt werden, sind nicht Teil der EPD. Sie können aufgrund ihres geringen Ausmaßes aber abgeschnitten werden.

Für die bandverzinkten Profile der Stahl-Hochregale sind keine passenden Datenquellen verfügbar. Die Herstellung muss daher selbst modelliert werden. Als Ausgangsprodukt wird der

Datensatz „bandverzinktes Stahlblech“ aus der ÖKOBAUDAT verwendet. Für den Transport des Blechs vom Stahlwerk zur Weiterverarbeitung wird eine Strecke von 1000 Kilometer, welche mit der Eisenbahn zurückgelegt wird, angenommen. Für das Walzprofilieren sind weder Datensätze in den bekannten Quellen verfügbar, noch haben Hersteller oder Betreiber solcher Anlagen Daten zu Energie- und Stoffverbräuchen sowie Umweltauswirkungen. Aus diesem Grund wird in grober Näherung der GaBi-Verarbeitungsprozess Stanzen und Biegen inklusive dessen Stoff- und Energieverbrauch gewählt (Strommix nach [Kem-2015] selbst modelliert). Dieser berücksichtigt einen Materialverlust beim Stanzen von 5%. Für das Einstellen der Walzprofiliermaschine wird nach Rücksprache mit den Stahl-Hochregalherstellern ein zusätzlicher Verlust von 3% berücksichtigt. Für das Recycling der bandverzinkten Profile sowie der Verluste nehmen die ÖKOBAUDAT-Daten eine Sammelrate von nur 95% an. Bei allen anderen betrachteten Stahlwerkstoffen, mit Ausnahme der Verbindungsmittel, liegt eine Sammelrate von 99% vor. Die Gutschriften D für die bandverzinkten Profile werden daher im entsprechenden Verhältnis auf 99% Sammelrate hochgerechnet.

Bei den Verbindungsmitteln und Ankerstangen aus verzinktem Stahl wird approximativ für alle Hochregalbauweisen der GaBi-Datensatz für verzinkte Befestigungsmittel (Schraube M6) eingesetzt. Da kein entsprechender Recyclingprozess vorhanden ist, wird hier näherungsweise jener von verzinktem Stahlblech herangezogen. Die festgelegte Sammelrate von 95% wird für die Verbindungsmittel und Ankerstangen als realistisch eingeschätzt.

Die Umweltproduktdeklaration für Vergussmörtel berücksichtigt neben der Herstellung A1-3 auch den Einbau A5. Diese Daten werden für die Ökobilanzierung übernommen. Die Aufbereitung C3 und das Recycling D fehlen in den Angaben der EPD. Diese werden bedingt durch den geringen Masseneinsatz vernachlässigt.

Für den temporären Schutzanstrich der Holzbauteile für die Montage sind keine exakt passenden Umweltdaten verfügbar. In Rücksprache mit dem Hersteller des Anstrichs wird in grober Näherung der ÖKOBAUDAT-Datensatz einer Lasur für Holzfassaden gewählt. Darin enthalten sind die Lebenszyklusphasen A1-3 und A5. Die Aufbereitung C3 sowie die Gutschriften aus der thermischen Verwertung D werden nicht berücksichtigt.

### *Umweltdaten der Prozesse*

Anhand den Vorgaben aus der Quantifizierung der Hochregallebenszyklen werden zur Modellierung der Phasen Transport A4, Montage A5, Abriss C1 und Abtransport C2 die in Tabelle 30 dargestellten Datenquellen gewählt. Die Lebenszyklusphasen werden anschließend mit diesen Umweltdaten in der Ökobilanzierungssoftware GaBi modelliert.

Bei den Umweltauswirkungen von Maschinen mit Verbrennungsantrieb hat die vorherrschende Abgasnorm einen bedeutenden Einfluss. Diese hängt vom Baujahr der Maschine ab. Für den An- und Abtransport der Hochregalbauteile werden GaBi-Daten zu Lastkraftwagen der Abgasstufe Euro 5 gewählt, da diese Abgasnorm seit 01.10.2008 gilt und angenommen wird, dass die Mehrzahl der bestehenden LKW dieser Norm entspricht. Bezüglich der Transportstrecke sowie der Nutzlast je Fahrt werden Daten aus Kapitel 8.7.2 verwendet.

Tabelle 30: Zuordnung der Umweltdaten zu den Prozessen

Prozess	Datenquelle	gültig bis
Transport zur Baustelle	GaBi GLO: LKW-Zug/Sattel-Zug PE (34-40 to, Euro 5) DE: Diesel Mix ab Tankstelle PE	2016 2016
Scherenhebebühne	GaBi DE: Strommix (Produktionsmix) 2014	2019
Teleskopstapler	TREMOM MM [Lam-2004] GaBi DE: Diesel Mix ab Tankstelle PE	- 2016
Fahrzeugkran	TREMOM MM [Lam-2004] GaBi DE: Diesel Mix ab Tankstelle PE	- 2016
Turmdrehkran	GaBi DE: Strommix (Produktionsmix) 2014	2019
Abtransport	GaBi GLO: LKW PE (26-28 to, Euro 5) GaBi DE: Diesel Mix ab Tankstelle PE	2016 2016
Abbruchbagger	TREMOM MM [Lam-2004] GaBi DE: Diesel Mix ab Tankstelle PE	- 2016
Verladebagger	TREMOM MM [Lam-2004] GaBi DE: Diesel Mix ab Tankstelle PE	- 2016

Für die Modellierung der Baumaschinen mit Verbrennungsantrieb wird das TREMOD-MM-Emissionsberechnungsmodell in GaBi implementiert. Mit diesem kann der Ausstoß von Stickoxiden, Feinstaub, Kohlenstoffmonoxid und Kohlenwasserstoffe für Dieselverbrennungsmotoren abgeschätzt werden. Der Ausstoß von Kohlenstoffdioxid ist bei der Dieselverbrennung direkt proportional zum verbrannten Kraftstoffvolumen. Nach [Min-2012, S. 25] werden bei der Verbrennung pro Liter Diesel 2,62 kg CO<sub>2</sub> emittiert. Die Berechnungen der Emissionen für die vorliegenden Baumaschinen mit Verbrennungsantrieb sind dem Anhang zu entnehmen. Die Umweltauswirkungen der Dieselbereitstellung werden in GaBi ermittelt.

Zur Berechnung des Energieverbrauchs der elektrisch betriebenen Baumaschinen wird näherungsweise die Nennleistung mit der Anzahl an Betriebsstunden multipliziert. Die Umweltauswirkungen für die Strombereitstellung berücksichtigen den Strommix aus dem Jahr 2014.

#### 8.7.4 Berechnete Umweltauswirkungen

Zur Beschreibung der Umweltauswirkungen werden nach DIN EN 15978 die in Tabelle 31 dargestellten Indikatoren verwendet. Diese können nach ihrer ökologischen Gefährdung in die Prioritäten A (höchste) bis D (niedrigste) eingeteilt werden [Sch-1999, S. A2-64 ff.]. Die Potenziale zur globalen Erwärmung und zum Abbau der stratosphärischen Ozonschicht weisen dabei die höchste Hierarchiestufe auf. Die geringste Wichtigkeit wird dem Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon zugesprochen.

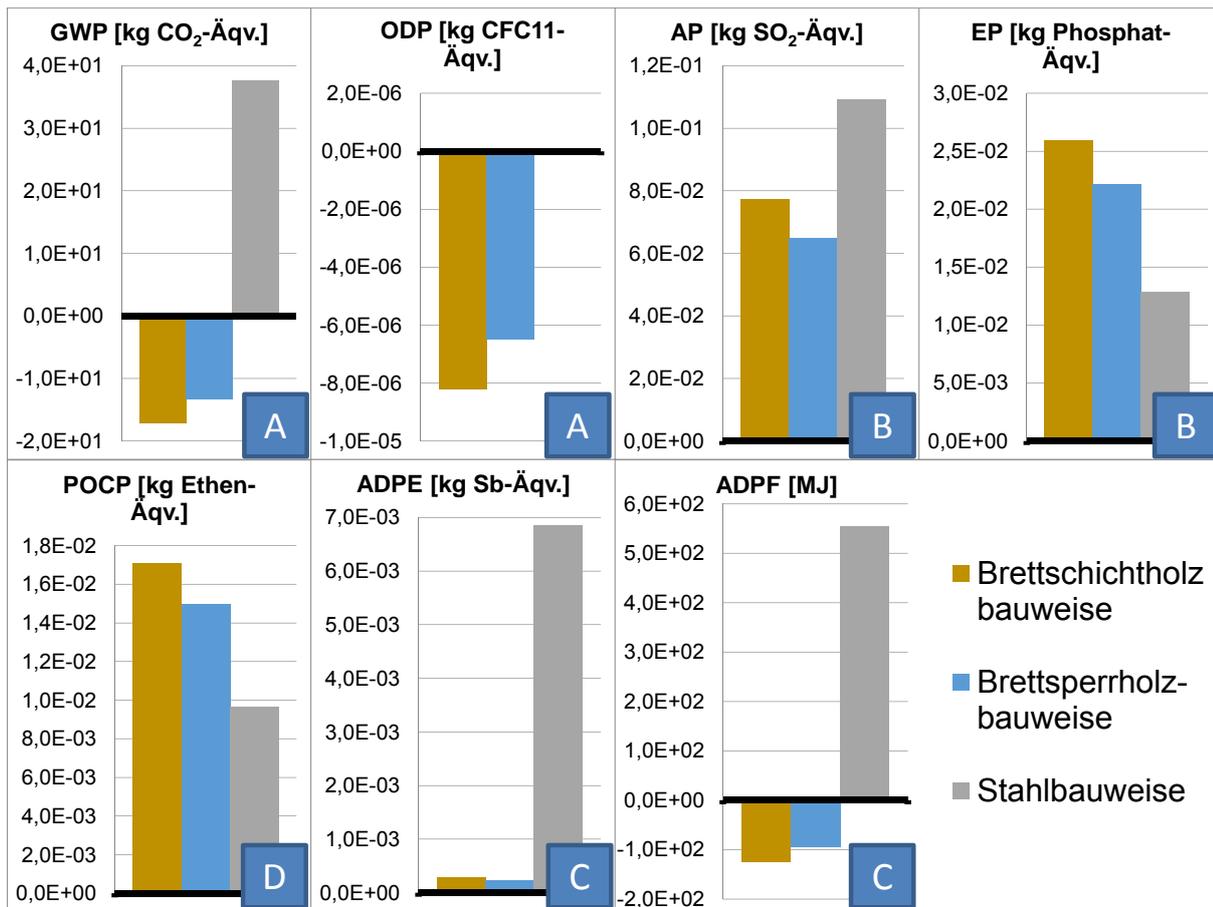
Tabelle 31: verwendete Umweltindikatoren

Indikator	Bezeichnung	Einheit	Priorität
GWP	Globales Erwärmungspotenzial (Treibhauspotenzial)	[kg CO <sub>2</sub> -Äqv.]	A
ODP	Abbaupotenzial der stratosphärischen Ozonschicht (Abbau Ozonschicht)	[kg CFC11-Äqv.]	A
AP	Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (Saurer Regen)	[kg SO <sub>2</sub> -Äqv.]	B
EP	Eutrophierungspotenzial (Überdüngung)	[kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3-</sup> -Äqv.]	B
POCP	Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon (Sommersmog)	[kg Ethen-Äqv.]	D
ADPE	Potenzial für den abiotischen Abbau elementarer Ressourcen (Metalle usw.)	[kg Sb-Äqv.]	C
APDF	Potenzial für den abiotischen Abbau fossiler Brennstoffe (Erdöl, Erdgas usw.)	[MJ]	C

Abbildung 92 zeigt die Ergebnisse der Ökobilanzierungen für die drei untersuchten Hochregalbauweisen für das Einsatzszenario 1 (normale Lageratmosphäre). Die Daten sind für die funktionale Einheit von einem Stellplatz angegeben. Die Berechnung der Umweltauswirkungen erfolgte in Microsoft Excel unter Verwendung des Matrizenverfahrens.

Es ist ersichtlich, dass die Holzbauweisen bei drei Umweltindikatoren einen negativen Wert aufweisen und sich daher positiv auf die Umwelt auswirken. Die Ursache dieses Phänomens kann durch die Betrachtung des Lebenszyklus von Holz erklärt werden. Der natürliche Rohstoff Holz nimmt während seines Wachstums Kohlenstoffdioxid aus der Luft auf und benutzt den Kohlenstoff für sein Wachstum. Aus diesem Grund weist Holz bereits in Phase A1 einen negativen Beitrag zum Treibhauspotenzial GWP auf (CO<sub>2</sub> wird aus der Atmosphäre entfernt). Der Kohlenstoff wird im Holz bis zu dessen Lebensende gespeichert. Dann wird Holz thermisch verwertet und dabei wird der gespeicherte Kohlenstoff in Form von Kohlenstoffdioxid wieder frei. Weil bei der Verbrennung aber auch nutzbare Energie entsteht, welche andere – teils fossile- Energiequellen substituiert, sind einige der gewählten Umweltindikatoren in Summe über alle Lebenszyklusphasen negativ.

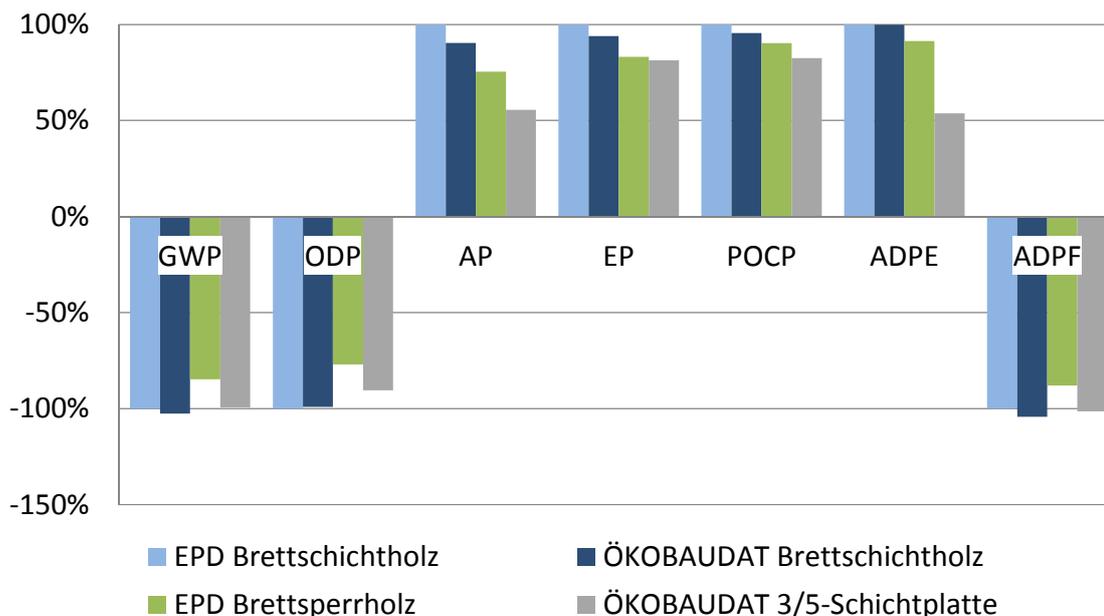
Beim Vergleich der Holzbauweisen mit der Stahlbauweise fällt auf, dass diese bei fünf der sieben Wirkungsindikatoren besser abschneiden. Die entsprechenden Indikatoren haben zudem eine höhere Wertigkeit. Insgesamt können die Holzbauweisen somit als ökologisch nachhaltiger bezeichnet werden. Der Unterschied zwischen Holz und Stahl ist bei Wirkungsindikatoren, bei denen die Holzbauweisen negativ sind, besonders groß.



**Abbildung 92: Berechnete Umweltauswirkungen pro Stellplatz der drei Hochregalbauweisen für das Einsatzszenario 1 (normale Lageratmosphäre)**

Nur beim Eutrophierungspotenzial EP sowie dem Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon POCP weist die Stahlbauweise geringere Umweltauswirkungen auf. Die hohen Umweltindikatoren der Holzbauweisen werden dabei durch die Trocknung des Rohholzes und den Verbrennungsprozess bei der Verwertung hervorgerufen. Die eingesparte Menge an CO<sub>2</sub>-Äquivalent beim Bau des Betrachtungsgegenstands in Brettsperrholz- anstatt der konventionellen Stahlbauweise beträgt ca. 1585 Tonnen (bei der Brettschichtholzbauweise 1700 Tonnen). Dies entspricht dem jährlichen CO<sub>2</sub>-Ausstoß von über 1000 PKW (130g CO<sub>2</sub>/km nach [Eur-2009], geschätzte jährliche Fahrleistung 12.000km).

Die Abweichungen der Umweltauswirkungen zwischen der Brettschicht- und Brettsperrholzbauweise werden größtenteils durch den geringeren Einsatz von Holz sowie anderen Baustoffen bei der neu entwickelten Brettsperrholzbauweise verursacht. Einen weiteren Einfluss haben die unterschiedlichen Umweltauswirkungen der eingesetzten Holzwerkstoffe. Abbildung 93 zeigt einen Vergleich, bei dem die Auswirkungen der Werkstoffe auf die Umweltauswirkungen der Umweltproduktdeklaration EPD von Brettschichtholz bezogen werden.

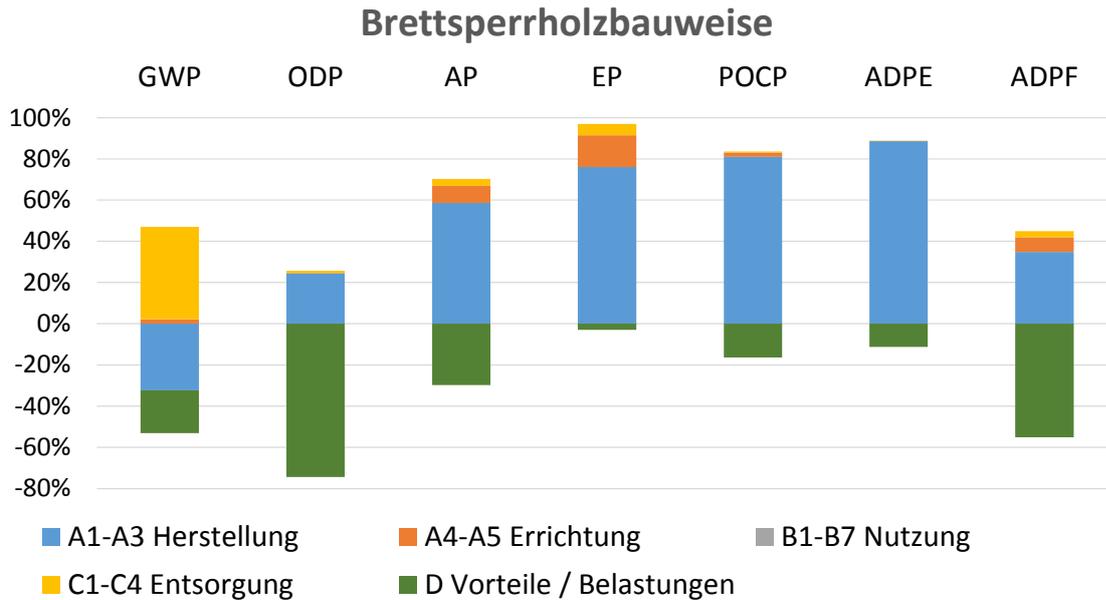


**Abbildung 93: Umweltauswirkungen verschiedener Holzwerkstoffe bezogen auf die EPD von Brettchichtholz**

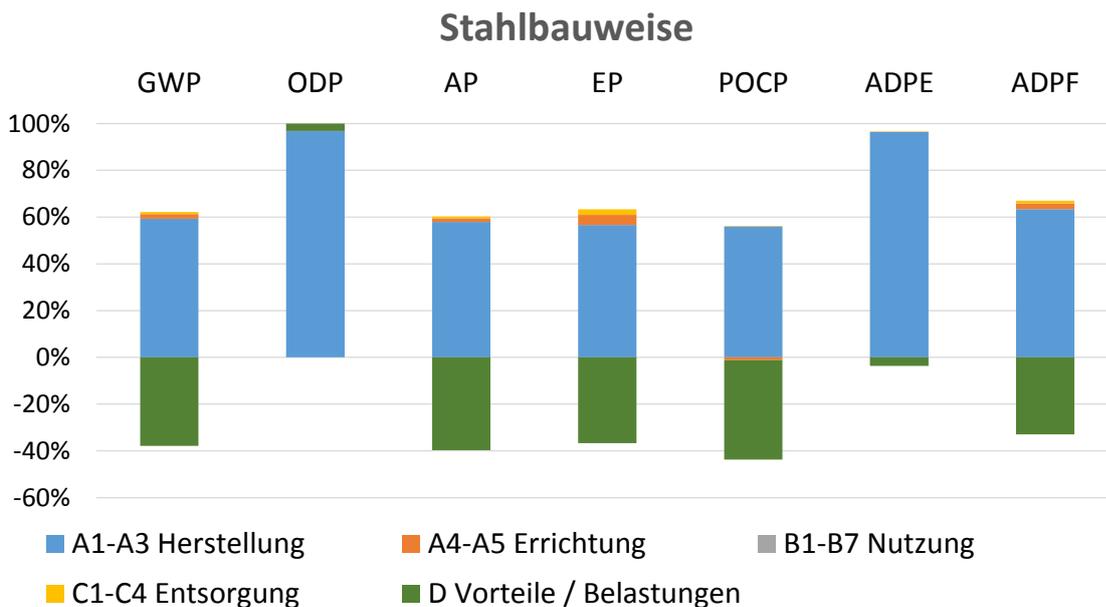
Für Brettchichtholz sind sowohl EPD- als auch ÖKOBAUDAT-Daten dargestellt, wobei letztere niedrigere Umweltauswirkungen aufweist. Die Auswirkungen von Brettsperrholz sowie den 3-Schichtplatten sind im Vergleich zur EPD von Brettchichtholz ebenfalls deutlich geringer. Dies bedeutet jedoch auch, dass die negativen Auswirkungen, welche sich positiv auf die Umwelt auswirken, ebenfalls kleiner sind. Möchte man also zum Beispiel einen möglichst hohen negativen Beitrag zum Treibhauspotenzial GWP erzeugen, so müsste man grundsätzlich möglichst viel Brettchichtholz verbauen.

Neben den Gesamtergebnissen müssen auch die relativen Beiträge der einzelnen Lebensphasen betrachtet werden, um mehr über die Ursachen der Umweltauswirkungen zu erfahren. In nachfolgenden Diagrammen (siehe Abbildung 94 und Abbildung 95) kann man erkennen, dass vor allem die Herstellungsphase A1-A3 und die Gutschriften D aus dem Recycling den größten Anteil besitzen und somit die Gesamtumweltauswirkungen hauptsächlich durch die Baustoffe bestimmt werden. Die Transporte A4/C2 sowie die Montage A5 und der Abriss C1 spielen nur eine untergeordnete Rolle. Der große Anteil der Phasen C1-C4 beim Treibhauspotenzial der Brettsperrholzbauweise wird durch die Freisetzung des gespeicherten Kohlenstoffs bei der thermischen Verwertung verursacht. Da die relativen Beiträge der Brettchichtholzbauweise nahezu identisch jenen der Brettsperrholzbauweise sind, wird auf deren Darstellung verzichtet.

Beim Vergleich der Umweltauswirkungen der Errichtungsphasen der Holz- und Stahlbauweise fällt auf, dass diese bei ersterer deutlich höher ausfallen. Gründe hierfür sind zum einen die höheren Transportmassen und zum anderen die unterschiedlichen Baumaschinen bei der Errichtung.



**Abbildung 94: Relative Beiträge zu den Gesamtumweltauswirkungen der Brettsperrholzbauweise**



**Abbildung 95: Relative Beiträge zu den Gesamtumweltauswirkungen der Stahlbauweise**

*Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit*

Da der Großteil der Umweltauswirkungen durch die Baustoffe selbst hervorgerufen wird, bieten auch diese den größten Stellhebel für Verbesserungen. Bei den Holzbauweisen kann die ökologische Nachhaltigkeit zum einen durch die Wahl der eingesetzten Holzwerkstoffe beeinflusst werden und zum anderen durch Optimierung der Herstellungsprozesse. Geringere Mengen an Verbindungsmitteln oder Vergussmörtel wirken sich ebenfalls positiv aus. Die Umweltauswirkungen der Stahlbauweise hängen nahezu ausschließlich von der Stahlherstellung bzw. dem Anteil der zwei möglichen Prozessketten ab (siehe Kapitel 3.5.2). So führt zum Bei-

spiel ein höherer Anteil der Elektroofenroute (Wiederverwendung Schrott) zu geringeren Auswirkungen. Neben einer Verbesserung der allgemeinen Herstellungsprozesse können aber auch höhere Wiederverwendungs- und Recyclingraten der Bauteile am Lebensende zu einer besseren ökologischen Nachhaltigkeit beitragen.

### *Zusammenfassung und Fazit*

Durch Ökobilanzierung von zwei Holz-Hochregalbauweisen sowie eines funktionsgleichen Stahl-Regals konnten die Umweltauswirkungen der drei Bauweisen ermittelt und miteinander verglichen werden. Bezüglich der Einsatzszenarien war aufgrund der verfügbaren Umweltdaten nur eine Untersuchung der normalen Lageratmosphäre möglich. Es hat sich gezeigt, dass sich die Holzbauweisen bei fünf der sieben Wirkungsindikatoren günstiger auf die Umwelt auswirken als die konventionelle Stahlbauweise und diese Kategorien zudem eine höhere Priorität besitzen. Somit stellen die Holz-Hochregale insgesamt die ökologisch nachhaltigeren Bauweisen dar.

## **8.8 Ökonomische Nachhaltigkeit**

### **8.8.1 Motivation und Vorgehensweise**

Die für Unternehmen meist wichtigste Zielgröße bei Investitionen sind die dafür nötigen monetären Aufwendungen. Aus diesem Grund sind bei Hochregalen neben der Funktionalität sowie den Umweltauswirkungen auch die ökonomischen Auswirkungen zu untersuchen.

Zu diesem Zweck werden zunächst die Aufwendungen der Erstellungsphase (Planung bis Inbetriebnahme) mit Hilfe der am Projekt beteiligten Hersteller für die drei Hochregalbauweisen sowie die zwei Einsatzszenarien ermittelt. Aufbauend auf diese Informationen können anschließend die weiteren Lebenszyklusphasen berechnet und somit die Lebenszykluskosten bestimmt werden, anhand derer die ökonomische Nachhaltigkeit bewertet werden kann. Abgeschlossen wird die Untersuchung durch die Betrachtung möglicher Rohstoffpreisentwicklungen sowie deren Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten.

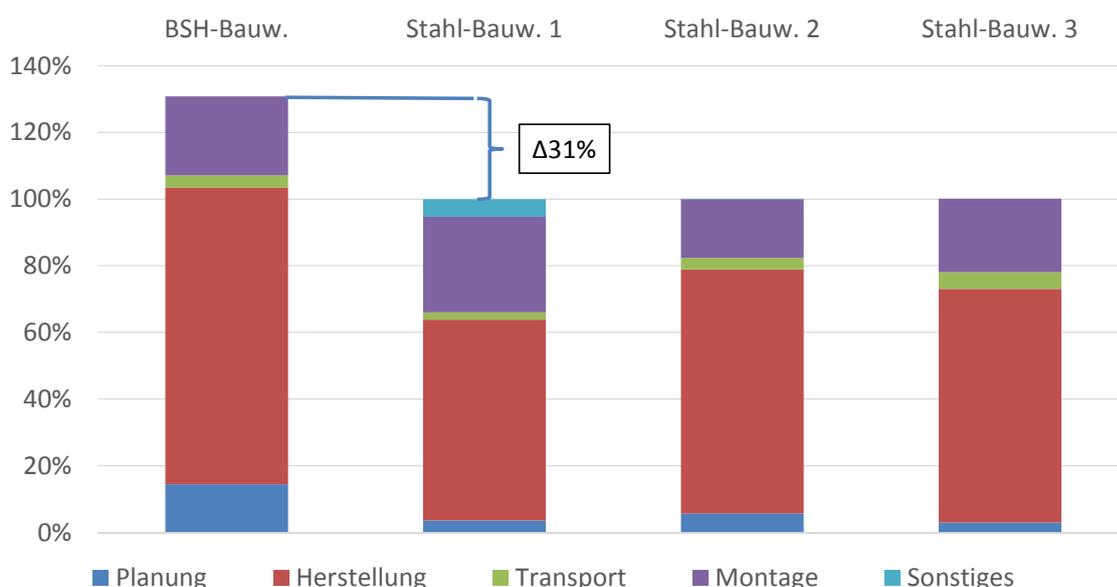
Da es sich bei monetären Aufwendungen um sensible Daten sowohl für Hersteller als auch Betreiber handelt, werden nachfolgend keine absoluten Beträge sowie Namen der Unternehmen dargestellt. Es sind daher nur Aussagen zu relativen Unterschieden zwischen den drei Bauweisen möglich.

### **8.8.2 Vergleich des Invest**

Alle anfallenden Aufwendungen während Planung, Herstellung, Transport und Montage werden mit dem Begriff Invest zusammengefasst. Informationen zum Invest des Betrachtungsgegenstandes werden von einem Holz-Hochregal- sowie drei Stahl-Hochregal-Herstellern zur Verfügung gestellt. Die Daten stammen beim Hersteller der real gebauten Brettschichtholzbauweise aus einer Nachkalkulation während des Projekts (Datengrundlage 1. Quartal 2013). Von den Stahl-Hochregalherstellern werden geplante Aufwendungen aus der Angebotsphase (4. Quartal 2012) verwendet. Für die neu entwickelte Brettspertholzbauweise sowie die Modifizierung der Holzbauweisen für das Einsatzszenario mit aggressiver Lageratmosphäre werden vom beteiligten Holz-Hochregalhersteller erstellte Angebote (3. Quartal 2015 bzw. 4. Quartal 2015) genutzt. Bezüglich der Steherausparungen hat dieser bedingt durch fehlende

eigene Produktionsanlagen mit einer Herstellung der vollflächigen Brettsper Holzplatten und anschließendem Ausschnitt kalkuliert. Die nötige Beschichtung der Stahlhochregale für das genannte Einsatzszenario (siehe Kapitel 8.7.2) wird in Rücksprache mit einem Unternehmen für Korrosionsschutz selbst kalkuliert (1. Quartal 2016). Beinhaltet sind darin Kosten für die Beschichtung der Profile am Herstellungsort, der Verbindungsmittel im vormontierten Zustand auf der Baustelle sowie Nachbesserungen aufgrund von Transport- und Montageschäden. Die unterschiedliche Datenqualität (Vor- und Nachkalkulation) sowie die abweichenden Zeitpunkte der Kalkulationen können die tatsächlichen Unterschiede zwischen den Bauweisen verzerren. Bezüglich der Datenqualität ist keine Anpassung möglich, sehr wohl jedoch bei den unterschiedlichen Zeitpunkten. Zunächst werden aber die Investitionen der Brettschichtholz- und Stahlbauweise für den Zeitpunkt 1.Quartal 2013 gegenübergestellt, um den damaligen Unterschied sichtbar zu machen. Die zeitliche Abweichung zwischen den Kalkulationen wird in diesem Fall vernachlässigt.

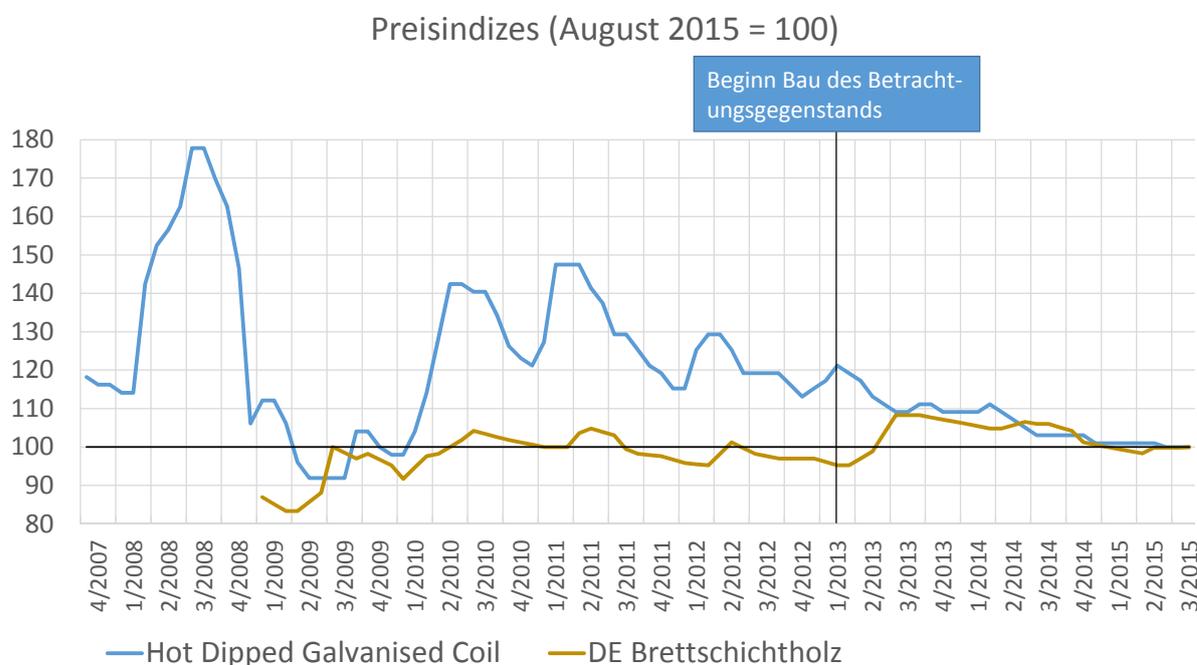
Abbildung 96 zeigt das Ergebnis des Investitionsvergleichs (1.Quartal 2013) für das Einsatzszenario mit normaler Lageratmosphäre. Es ist ersichtlich, dass der monetäre Gesamtaufwand für die Erstellungsphase bei den drei dargestellten Stahlbauweisen beinahe identisch ist. Nur die Zusammensetzungen der Investitionen unterscheiden sich deutlich. Grund hierfür sind verschiedene Herstellungs- (Eigen- oder Fremdfertigung) sowie Montagearten (z. B. Turmdrehkran oder Fahrzeugkran). Unter „Sonstiges“ werden von einem Stahl-Hochregalhersteller Aufwendungen für Zulassungen, Versuche, Gutachten und Ankerstangen angegeben. Alle übrigen Hersteller weisen diese Posten nicht separat aus. Der Gesamtunterschied zwischen den Stahlbauweisen und der Brettschichtholzbauweise beträgt ca. 31%. Die Abweichung ist die Folge deutlich höherer Planungs- und Herstellkosten bei der Holzbauweise. Dieses Ergebnis stimmt mit den Aussagen der Herstellerbefragung überein (vgl. Kapitel 4.4.2). Dort wurde bereits der hohe Planungsaufwand angesprochen. Die Aufwendungen für Transport und Montage sind nahezu gleich.



**Abbildung 96: Investitionsvergleich (1.Quartal 2013) der Brettschichtholz- und Stahlbauweisen für normale Lageratmosphäre**

Der ermittelte Gesamtunterschied für den gewählten Betrachtungsgegenstand deckt sich zum Teil mit den Aussagen aus den Betreiberbefragungen (vgl. Kapitel 4.4.3). Dort wurde von Mehrkosten zwischen 5 und 30 Prozent bei den bestehenden Holz-Hochregalen (alle in Brett-schichtholzbauweise) gesprochen. Die geringeren Mehrkosten (<30%) bei einigen älteren Holz-Hochregalen könnten durch veränderte Rohstoffpreise bedingt sein.

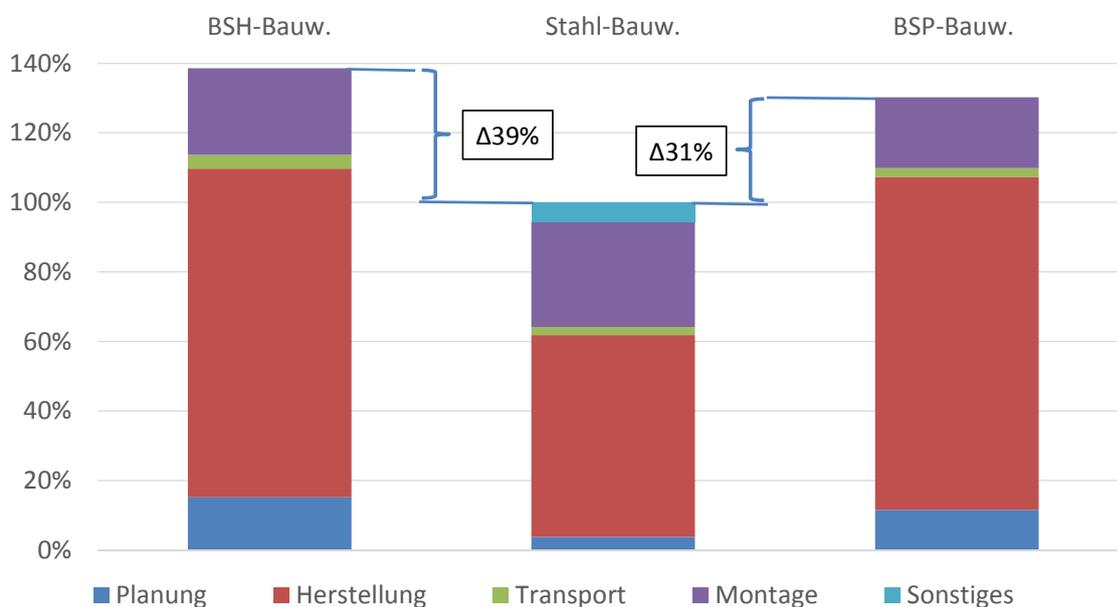
Um die gezeigten Hochregalbauweisen mit der neu entwickelten Brettsperrholzbauweise vergleichen zu können, müssen die Kalkulationsdaten zeitlich angepasst werden. Zu berücksichtigen sind die Inflation, Lohnsteigerungen sowie Veränderungen der Rohstoffpreise. Für die Betrachtung der Rohstoffpreisentwicklungen werden Daten der MEPS International LTD [MEP-2007] für Stahlwerkstoffe sowie des Europäischen Wirtschaftsdienst EUWID Holz und Holzwerkstoffe [EUW-2015] für Brett-schichtholz verwendet (keine BSH-Daten vor 1.Quartal 2009 verfügbar). Abbildung 97 zeigt die Preisentwicklungen für Brett-schichtholz und band-verzinktes Stahlblech. Die Preise sind normiert auf das Ende der verfügbaren Datenbasis (August 2015). Im Zeitraum von 2008 bis 2011 sind starke Preisschwankungen beim Stahlwerkstoff erkennbar. Mitte 2008 war der Preis für eine Tonne Stahlband zum Beispiel 80% höher als im August 2015. Der Preis für Brett-schichtholz ist trotz des sehr volatilen Rohholzpreises im Zeitraum von Mitte 2009 bis August 2015 nahezu konstant geblieben (Abweichung <10%). Er ist im Moment nur ca. 5% höher als im 1.Quartal 2013. Informationen zur Inflation sowie den Lohnsteigerungen können vom Statistischen Bundesamt bezogen werden (siehe Anhang). Mit Hilfe der Verbraucherpreisindizes wird für die Zeit vom 1.Quartal 2013 bis August 2015 eine mittlere monatliche Inflationsrate von 0,08% berechnet. Die durchschnittliche quartalsbezogene nominale Lohnsteigerung wird für denselben Zeitraum mit 1,1% ermittelt.



**Abbildung 97: Preisentwicklung bandverzinktes Stahlblech sowie Brett-schichtholz**

Zusammen mit dem Hersteller der Brettschichtholzbauweise sowie einem Stahl-Hochregalhersteller wird ein Kalkulationsmodell entwickelt. Mit diesem Modell sowie den angeführten Anpassungsdaten zu Inflation, Lohnsteigerungen und Rohstoffpreisen können die Investitionsdaten der zwei Bauweisen auf den Stand von August 2015 hochgerechnet werden. Dies entspricht dem Zeitpunkt des Angebots der neu entwickelten Brettsperrholzbauweise. Als gemeinsamer Vergleichszeitpunkt kann somit der August 2015 festgelegt werden.

In Abbildung 98 sind die Ergebnisse des Investitionsvergleichs der drei Bauweisen dargestellt. In Folge der zeitlichen Anpassung ist der Unterschied zwischen der Brettschichtholz- und der Stahlbauweise auf ca. 39% gestiegen. Verantwortlich für die Zunahme der Mehrkosten sind hauptsächlich die niedrigeren Stahl- sowie höheren Brettschichtholzpreise. Die Brettsperrholzbauweise weist einen geringeren Invest als die Brettschichtholzbauweise auf, sie liegt jedoch immer noch 31% über der Stahlbauweise. Der Grund für den geringeren Invest im Vergleich zur bestehenden Brettschichtholzbauweise ist in gesunkenen Aufwendungen für Planung, Transport und Montage begründet. Die Planungskosten enthalten nach Angabe des Herstellers bei beiden Holzbauweisen hohe einmalige Kosten, weshalb die Planungskosten durch den Bau von mehreren Anlagen nahezu halbiert werden könnten. Die geringeren Kosten für den Transport entstehen aufgrund der neuen modularen Bauweise, welche keinen Sondertransport mehr benötigt. Die Montage gestaltet sich bedingt durch die doppeltiefen Steher sowie die einfachere Gestaltung der Aussteifungstürme weniger kostenintensiv. Die Aufwendungen für die Herstellung sind bei der Brettsperrholzbauweise hingegen leicht gestiegen. Wie bereits eingangs erwähnt, beziehen sich die hier dargestellten Daten auf eine Steherherstellung mit nachträglichem Ausschneiden der Aussparungen.

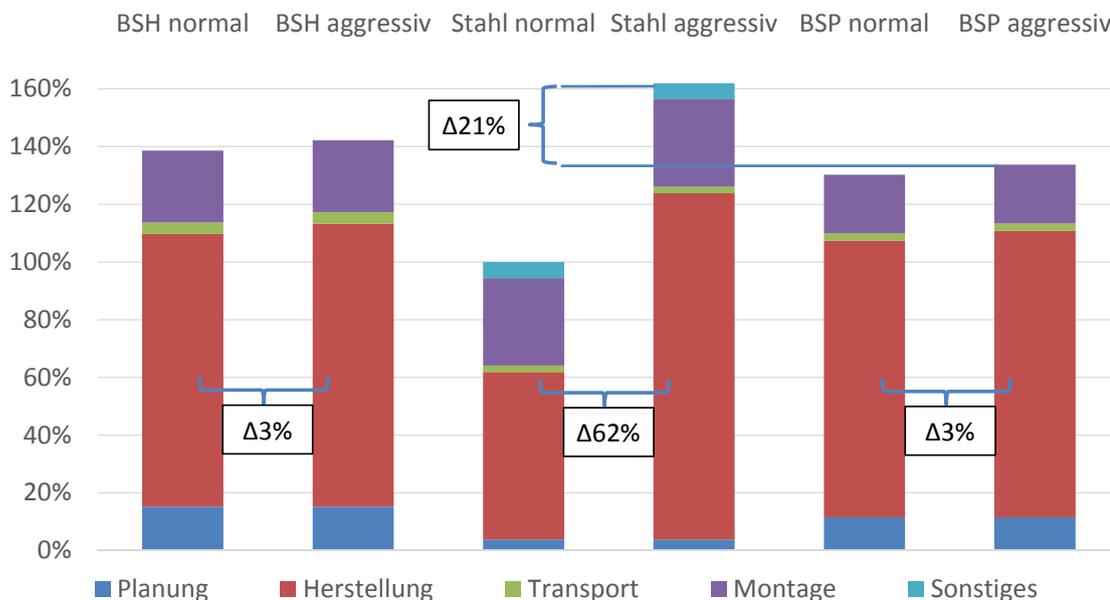


**Abbildung 98: Investitionsvergleich (August 2015) der Holz- und Stahlbauweisen für normale Lageratmosphäre**

Für einen Vergleich dieser Steherherstellkosten mit jenen automatisch gefertigter Aussparungen wird allein für die Steher ein Angebot eines entsprechenden Herstellers eingeholt. Dabei

zeigt sich, dass beide Herstellungsmethoden momentan nahezu gleich hohe monetäre Aufwendungen verursachen. In Zukunft ist jedoch zu erwarten, dass die Kosten der automatischen Herstellung sinken werden.

Für das Einsatzszenario mit aggressiver Lageratmosphäre können ebenfalls alle Aufwendungen während der Erstellungsphase gegenübergestellt werden. Abbildung 99 zeigt den Investitionsvergleich der drei Bauweisen.



**Abbildung 99: Investitionsvergleich (August 2015) der drei Hochregalbauweisen für normale und aggressive Lageratmosphäre**

Die Kosten für den notwendigen Korrosionsschutz unterscheiden sich dabei je nach Regalwerkstoff stark. Bei den beiden Holzbauweisen sind, wie bereits in Kapitel 8.7.2 beschrieben, nur geringe Anpassungen der Konstruktion notwendig, weshalb lediglich geringe Mehrkosten von ca. 3% entstehen. Hingegen müssen bei der Stahlbauweise alle Profile sowie Verbindungsmittel aufwendig beschichtet werden. Der Gesamtinvest steigt dadurch bei der Stahlbauweise um ca. 62%. Bei einem Vergleich der Brettsperrholz- mit der Stahlbauweise bei aggressiver Atmosphäre weist die beschichtete Stahlbauweise einen um ca. 21% höheren Invest auf (14% bei BSH-Bauweise). Alle Prozentangaben sind auf die jeweils kleinere Investition bezogen.

### 8.8.3 Lebenszykluskosten

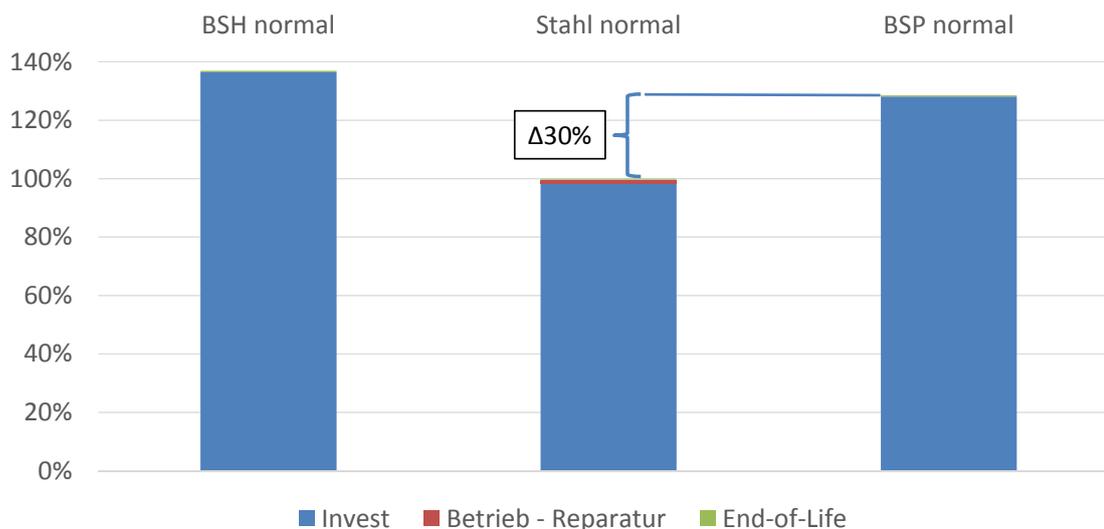
Nachdem die Aufwendungen der Erstellungsphase bestimmt und verglichen wurden, können nun die Kosten und Erlöse der restlichen Lebenszyklusphasen berechnet und dadurch die Lebenszykluskosten bestimmt werden. Während der Nutzung fallen bei Hochregalen nur Kosten für Reparaturen der Palettenträger an. In Anbetracht der Informationen aus Kapitel 4.5.5 wird für Holz-Hochregale keine Reparatur und für Stahl-Hochregale ein Austausch eines Palettenträgers alle 5 Jahre berechnet. Für das Einsatzszenario mit aggressiver Lageratmosphäre wird das Ausbessern etwaiger Schäden an der Beschichtung nicht berücksichtigt, da die gewählte Beschichtung als robust gilt und in der Regel kein Abrieb auftritt. Am Ende des Regallebenszyklus müssen Kosten für den Abriss, den Abtransport sowie die Entsorgung

beachtet werden. Für manche Baustoffe sind beim Recycling auch Erlöse möglich. In der End-of-Life-Phase gibt es zwischen den beiden Szenarien keine Unterschiede.

All die genannten Zahlungen treten zeitlich versetzt auf. Um den zeitlichen Anfall der Kosten und Erlöse bei der ökonomischen Bewertung zu berücksichtigen, werden alle Zahlungen auf einen Zeitpunkt auf- bzw. abgezinst (Kapitalwertmethode). Dafür wird als Bezugszeitpunkt der August 2015 gewählt. Die Berechnung nimmt also an, dass alle drei Hochregalbauweisen zu diesem Zeitpunkt erstellt werden. Näherungsweise werden alle Aufwendungen der Erstellungsphase konzentriert am Bezugszeitpunkt angenommen, weshalb sie nicht verzinst werden. Alle nachfolgenden Zahlungen werden entsprechend ihres Auftretens mit einem Zinssatz auf den Bezugszeitpunkt abgezinst. Die Höhe des Zinssatzes wird mit 5,5%, entsprechend der Vorgaben des DGNB [DGN-2015] (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V.) für Logistikgebäude, festgelegt. Darin ist die Inflation bereits enthalten. Als jährliche Preissteigerung wird zudem ein Prozentsatz von 2% (ebenfalls nach DGNB Vorgaben) verwendet.

Die Höhe der Kosten während der Nutzungsphase werden in Rücksprache mit den Regalherstellern und Betreibern geschätzt. Für die Reparatur der Regale wird beim Stahl-Hochregal alle 5 Jahre ein Austausch eines Palettenträgers berücksichtigt. Bei den Holzbauweisen werden keine Reparaturen angesetzt. Zur Bestimmung der Zahlungen in der End-of-Life-Phase werden mehrere Abrissunternehmen, Aufbereiter und Verwerter befragt. Auf Grundlage von deren Aussagen werden Kosten und Erlöse angenommen. Der Ablauf der End-of-Life-Phase wurde bereits in Kapitel 8.7.2 beschrieben. Für die abgebrochenen Stahlprofile der Stahlbauweise können entsprechend des aktuellen Schrottpreises Erlöse erzielt werden. Bei den Holzwerkstoffen ist derzeit bei keinem der befragten Unternehmen eine Vergütung der Holzabgabe möglich.

Die Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnung für das Szenario mit normaler Lageratmosphäre sind in Abbildung 100 dargestellt. Man kann erkennen, dass die Zahlungen während der Erstellungsphase nahezu den vollständigen Kapitalwert der betrachteten Bauweisen ausmachen. Die Kosten bzw. Erlöse in der Nutzungs- und End-of-Life-Phase verringern den Unterschied zwischen der Brettsperrholz- und Stahlbauweise nur geringfügig auf ca. 30% (37% bei BSH-Bauweise). Die Aufwendungen für Abriss und Entsorgung bzw. Recycling sind am Lebensende vergleichsweise hoch. Sie werden jedoch durch die Abzinsung auf den Bezugszeitpunkt (Nutzungsdauer 50 Jahre) stark reduziert, weshalb sie in Abbildung 100 kaum mehr zu erkennen sind. Dies gilt auch für Kosten der Nutzungsphase, welche weit entfernt vom Bezugszeitpunkt auftreten. Für das Einsatzszenario mit aggressiver Lageratmosphäre ergibt sich ein ähnlicher Sachverhalt. Auch hier ist die Höhe des Invests bestimmend für die Lebenszykluskosten. Der Unterschied zwischen der Brettsperrholz- und der beschichteten Stahlbauweise vergrößert sich marginal auf ca. 22% (14% bei BSH-Bauweise).



**Abbildung 100: Vergleich der Lebenszykluskosten anhand der Kapitalwerte für das Einsatzszenario mit normaler Lageratmosphäre**

#### *Zusammenfassung und Fazit*

Nach Betrachtung der berechneten Kapitalwerte kann die Stahlbauweise für das Szenario mit normaler Lageratmosphäre als die ökonomisch nachhaltigere Bauweise bezeichnet werden. Hauptgründe für das schlechtere Abschneiden der beiden Holzbauweisen sind vor allem die höheren Planungs- sowie Herstellungskosten. Diese Probleme könnten durch zusätzlichen Erfahrungsgewinn (Forschung, Bau weiterer Hochregale) und stetige Konstruktionsoptimierung gesenkt werden. Für das Szenario mit aggressiver Lageratmosphäre stellen hingegen die Holz-Hochregale die günstigeren Bauweisen dar. Bedingt wird dies durch die immensen Kosten für die nötige Beschichtung der Stahl-Hochregal-Konstruktion. Bei den beiden Holz-Hochregalen ist die neu entwickelte Brettsperrholzbauweise die ökonomisch nachhaltigere Bauweise.

Allgemein kann festgestellt werden, dass die Investitionen bzw. Lebenszykluskosten bei Hochregalen nur moderat von den vorliegenden Rohstoffpreisen abhängen. Unter Zuhilfenahme der Kalkulationsmodelle zur zeitlichen Anpassung können die Lebenszykluskosten für die Brett-schichtholz- und Stahlbauweise für verschiedene Rohstoffpreise berechnet und miteinander verglichen werden. Unter Annahme eines wie in der Vergangenheit gleichbleibenden Holzpreises müsste der Stahlpreis um ca. 85% steigen (in Bezug zu August 2015), damit der Mehraufwand bei den Lebenszykluskosten der Brett-schichtholzbauweise in Bezug zur Stahlbauweise von 39% auf unter 10% sinkt (normale Lageratmosphäre). Für die neu entwickelte Brettsperrholzbauweise liegt kein Kalkulationsmodell vor. Es kann durch den ohnehin geringeren Kapitalwert aber erwartet werden, dass bereits eine geringere Stahlpreissteigerung zur Erfüllung des genannten Ziels führen wird.



## **9 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick**

Abschließend werden das Vorgehen und die wesentlichen erzielten Ergebnisse des Forschungsprojekts zusammengefasst. Anhand der Ergebnisse wird die Nutzung und mögliche industrielle Anwendung aufgezeigt. Der im Rahmen des Projektes identifizierte Forschungsbedarf wird im Ausblick geschildert.

### **9.1 Zusammenfassung**

Gegenstand des Forschungsprojektes stellen Hochregallagerkonstruktionen aus Holz dar. Derzeit werden Hochregale in der Regel in einer hoch optimierten und durch spezifische Normen geregelten Stahlbauweise ausgeführt. Der Einstieg des Holzbaus wird in diesem Markt-bereich durch den Wissensvorsprung des Stahlbaus deutlich erschwert. Zur Steigerung des Know-hows der Planer und Holzbauer für den Anwendungsbereich „Holz als Regalstruktur in Hochregallagern“ wird die Thematik anhand eines ganzheitlichen Ansatzes betrachtet.

Einführend werden Hochregalanlagen mit ihren Komponenten allgemein beschrieben und die baurechtlichen Besonderheiten und Unterscheidungen herausgearbeitet. Verschiedene Normen und Richtlinien werden benannt und hinsichtlich der relevanten Vorgaben für Hochregal-lager zusammengefasst. Anhand dieser Erläuterungen wird dem fachfremden Leser ein Ein-stieg in die Thematik ermöglicht.

Weiterführend wird ein Überblick über die materiellen Besonderheiten von Stahl und Holz gegeben. Mittels einer abschließenden Gegenüberstellung werden die Baustoffe für die An-wendung im Hochregallager verglichen und bewertet. Die Zusammenstellung soll den unter-schiedlichen Parteien (Betreiber, Holzbauplaner, Logistikplaner) einen kurzen Überblick zu den Baustoffen und deren Besonderheiten ermöglichen. Des Weiteren werden ausgehend von den spezifischen Materialeigenschaften von Holz und Stahl mögliche und bevorzugte Einsatzbereiche für Hochregallager aus Holz und Stahl erarbeitet. Holz eignet sich für alle Anwendungsbereiche mit Ausnahme von Anlagen zur Lagerung von offenen Lebensmitteln. Zu vermeiden sind ebenso Anwendungen, in denen Holz durch übermäßige Feuchtigkeit im Lager beansprucht wird. Besondere Vorzüge von Hochregallagern aus Holz gegenüber Hoch-regallagern aus Stahl zeigen sich in chemisch aggressiven Umgebungen.

Ein besonderes Thema bei Hochregallagern stellt der Brandschutz dar. Allgemein werden die Besonderheiten von Bränden in Hochregallagern beschrieben und rechtliche Vorgaben vor-gestellt. Auf materieller Basis weist Holz in Bezug auf den Brandschutz gute Eigenschaften auf. Zwar ist Holz brennbar, bleibt jedoch im Brandfall kalkulierbar. Gekoppelt mit der Massi-vität der Bauteile kann im Vergleich zu Hochregallagern aus Stahl eine gewisse Feuerwider-standsdauer erreicht werden. Gekoppelt mit einem ohnehin vorzusehenden anlagentechni-schen Brandschutz stellt die Planung von Hochregallagern aus Holz aus Gesichtspunkten des Brandschutzes kein Problem dar.

Aufbauend auf der Zusammenstellung wichtiger Grundlagen erfolgt die Konzeption potenziell geeigneter Hochregalstrukturen. Ein wichtiger Schritt zu Beginn stellt die Festlegung und Ein-schränkung der diversen die Lagerstruktur beeinflussenden Faktoren dar. Anhand der Aus-wertung von über 1600 Lagerdaten, einer Befragung von Betreibern und Herstellern von

Hochregallagern aus Holz, der Besichtigung von vier der bisher acht gebauten Holzhochregallager und einer Recherche zu normativen, logistischen und geometrischen Anforderungen erfolgt die Festlegung von Grenzwerten und die Konzeption der Bauteile von Hochregallagern aus Holz. Aufgrund der Ergebnisse der Datenanalyse werden Hochregallager in Silobauweise mit automatischer Regalbedienung betrachtet. Für diese Bauweise werden mögliche Bauteilaufbauten für die Steher, die Dachträger, die Paletenträger, die Längsaussteifungen und die Koppelpfetten/Lastensammler aufgezeigt und bewertet. Die Bewertung erfolgt hinsichtlich Herstellungs- und Montageaspekten, Standsicherheitsfaktoren und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Die Bauteile sowie mögliche Verbindungspunkte sind in einem Konstruktionskatalog zusammengefasst. Durch die Addition der einzelnen Bauteile werden schließlich Module hergestellt die gefügt die Lagerstruktur ergeben. Für den Planer der Regalanlagen werden zur Ermittlung der Fach- sowie Modulgrößen und der Anordnung der Module im System wichtige Entwurfsgrundlagen zusammengestellt und beschrieben.

Im Hinblick auf die Berechnung von Hochregallagern aus Holz werden Methoden der Modellbildung und Berechnung vorgestellt. Die zur Bemessung erforderlichen Einwirkungen werden aufgezeigt, wobei die relevanten lagerspezifischen Lasten, die nicht in den Eurocodes zu finden sind, erweitert beschrieben werden. Zu den Einwirkungen werden anzuwendende Lastfallkombinationen für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit in Anlehnung an die Bemessungsmethode nach Eurocode mit Besonderheiten der lagerspezifischen Normen vorgeschlagen. Zur Erleichterung der Planung in der Praxis ist, unabhängig von der Wahl der Bauteile und Verbindungen, das gesamte Vorgehen der Konzeption und Berechnung abschließend in einer kompakten Konzeptions- und Berechnungsanleitung zusammengestellt.

Im Rahmen der Bearbeitung des Forschungsprojekts haben sich die Vorgaben bezüglich der Gebrauchstauglichkeit als besonders kritisch herausgestellt. Das bedeutet, dass aufgrund der automatischen Regalbedienung für Hochregallager hohe Anforderungen bezüglich der Maßhaltigkeit und strenge Grenzen hinsichtlich der zulässigen Lagerverformung existieren. Durch die Marktanalyse wurde zudem festgestellt, dass bei Hochregallagern ein Trend hin zu höheren Anlagen zu beobachten ist. Mit dem Anspruch dieser Marktentwicklung bestmöglich gerecht zu werden, wird anhand einer Parameterstudie der in der Konzeption entwickelte Aufbau eines Hochregallagers mit wandartigen Stehern aus Brettsperrholz untersucht. Ergebnis ist, dass Hochregallager mit diesem Aufbau bis zu Lagergesamthöhen von 30m sehr gut aus Holz umsetzbar sind. Im Höhenbereich zwischen 30m und 40m sind Hochregallager mit Regalstrukturen aus Holz, unter Beachtung der Vorgaben der zulässigen horizontalen Verformungen, ebenfalls realisierbar, jedoch mit einem deutlichen Mehraufwand.

Im letzten Kapitel erfolgen Untersuchungen zur Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit. In einer Ökobilanzierung werden zwei Hochregallager aus Holz und ein Hochregallager aus Stahl verglichen. Das neueste und derzeit größte Hochregallager Holz, welches nahezu vollständig aus Brettschichtholz besteht, dient hierbei als repräsentatives Vergleichsobjekt. Bei den übrigen zwei Lagern handelt es sich um eine funktionsgleiche Stahlbauweise sowie um die in diesem Projekt neu entwickelte Brettsperrholzbauweise. Zur Untersuchung der ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit wird jeweils eine Betrachtung des Regalgesamtlebens von der Planung bis zur Entsorgung bzw. dem Recycling vorgenommen. Auf diese Weise kann eine

ganzheitliche Aussage zu den Auswirkungen der gewählten Hochregallagerbauweisen getätigt werden.

Die Ökobilanzierungen zeigen, dass Hochregale aus Holz bei fünf der sieben Umweltindikatoren besser abschneiden als die Stahlbauweise. Diese Indikatoren weisen zudem eine höhere Priorität bezüglich ihrer ökologischen Gefährdung auf, weshalb Hochregale aus Holz die ökologisch nachhaltigere Bauweise darstellen. Zwischen den zwei betrachteten Holzbauweisen gibt es nur relativ kleine Unterschiede, welche größtenteils auf die geringen Holzmenge bei der Brettsperrholzbauweise zurückzuführen sind. Ein Vergleich der drei Bauweisen für eine aggressive Lageratmosphäre ist aufgrund fehlender Umweltdaten zu den nötigen Beschichtungen derzeit nicht möglich. Es kann jedoch erwartet werden, dass die negativen Umweltauswirkungen der Stahlbauweise zunehmen und die der Holzregale nahezu unverändert bleiben.

Im Rahmen der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit werden Investitionsdaten aus verschiedenen Quellen verwendet. Für einen fairen Vergleich werden diese zunächst auf einen gemeinsamen Zeitpunkt hochgerechnet. Dabei zeigt sich der große Einfluss der Rohstoffpreise. Nach dem Vergleich der Investitionen werden die Zahlungen der Nutzungs- sowie End-of-Life-Phase ermittelt und dadurch die Lebenszykluskosten berechnet. Die Ergebnisse für den Bezugszeitpunkt August 2015 zeigen, dass nahezu die gesamten Lebenszykluskosten durch die Erstellungsphase (Planung bis Inbetriebnahme) verursacht werden. Die Aufwendungen während der Nutzung sowie am Regallebensende sind vergleichsweise gering. Insgesamt ist die Brettsperrholzbauweise bei normaler Lageratmosphäre im Vergleich zu konventionellen Stahlregalen ca. 30% teurer. Die Aufwendungen für die Brettschichtholzbauweise liegen sogar noch höher. Für aggressive Lageratmosphären sind hingegen die Holzbauweisen ökonomisch nachhaltiger. Hier würde eine Stahlausführung einen Mehraufwand von 22% in Bezug zur Brettsperrholzbauweise bedeuten. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit sind weitere Optimierungen von Hochregallagern aus Holz möglich (siehe hierzu auch Kapitel 9.3 Ausblick).

### **9.2 Nutzen und industrielle Anwendungsmöglichkeiten**

Durch die Untersuchung der Anforderungen und Besonderheiten von Holz für den Einsatz als Baustoff der Lagerstruktur von Hochregallagern wird der Branche der Einstieg in einen neuen Markt erleichtert. Anhand der vorgeschlagenen Einsatzgebiete ist für Planer von Hochregallagern sofort ersichtlich, welcher Baustoff für welches Lager die günstigsten Eigenschaften mit sich bringt und vorteilig eingesetzt werden kann.

Die Planung von Hochregallagern aus Holz wird deutlich vereinfacht. Anhand der Konzeptions- und Berechnungsanleitung wird, auch für im Umgang mit Hochregallagern unerfahrene Planer, ein einfach nachvollziehbares und strukturiertes Vorgehen bei der Planung und Bemessung der Regalstruktur von Hochregallagern aus Holz veranschaulicht.

Die dargestellten Entwurfsgrundlagen ermöglichen eine schnelle Konzeption und Modularisierung der Bestandteile der Regalgesamtstruktur. Anhand des entwickelten Konstruktionskatalogs werden verschiedene Bauteilaufbauten und Konstruktionsmöglichkeiten aufgezeigt. Planer und Holzbaufirmen können in Abhängigkeit der Herstellungsmöglichkeiten Hochregallager anhand dieser Bauteile konzipieren. Gleichmaßen stellt der Konstruktionskatalog eine Basis für weitere Entwicklungen der Hochregallager aus Holz dar.

Die Angaben der Besonderheiten bei der Modellbildung und Berechnung sowie die vorgeschlagenen Lastfallkombinationen ermöglichen eine spezifische Bemessung für Hochregallager aus Holz, so lange diese noch nicht über eigene Richtlinien und Normen geregelt sind.

Durch die Kostenanalyse ist für den derzeitigen Stand eine grobe Abschätzung der Kosten für die Betreiber möglich um gegebenenfalls frühzeitig eine Entscheidung hinsichtlich des einzusetzenden Lagerbaustoffs treffen zu können. Im Sinne der ökologischen Nachhaltigkeit wird den Herstellern von Hochregallagern aus Holz mit der Ökobilanzierung ein Hilfsmittel zur Bewerbung der Holzbauweise an die Hand gegeben. Derzeit in Abhängigkeit des Einsatzgebietes noch anfallende Mehrkosten stellen folglich nicht mehr das alleinige Entscheidungskriterium für Betreiber bei der Wahl der Regalkonstruktion dar.

### **9.3 Ausblick**

Abschließend kann festgestellt werden, dass Konstruktionen aus Holz im Hinblick auf die Verwendung in spezifischen Einsatzgebieten, einer Entkopplung zu steigenden Stahlpreisen und zuletzt auch im Sinne der Nachhaltigkeit eine interessante Alternative zur gängigen Stahlbauweise darstellen.

In Bezug auf die Umsetzung von Hochregallagern ist der Investitionsbedarf aktuell meist das entscheidende Kriterium. Aufgrund der nötigen Mehrinvestition haben Hochregallager aus Holz gegenüber Hochregallagern aus Stahl meist das Nachsehen. Zukünftige Forschungsvorhaben müssen daher eine weitere Steigerung der Wirtschaftlichkeit der Holzkonstruktionen zum Ziel haben.

Zum einen sollten mit Blick auf eine einfache Planung die vorhandenen spezifischen Normen und Regelungen für den Baustoff Holz erweitert oder eigene Regelungen geschaffen werden. Ein weiteres Ziel muss außerdem die Regelung für Hochregallager aus Holz über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen, analog denen des Stahlbaus, sein. Hierin könnten Besonderheiten von Hochregallagern mit z. B. reduzierten Teilsicherheitsbeiwerten zur Berücksichtigung der verringerten statistischen Unbestimmtheit der Ladeeinheitslasten berücksichtigt werden.

Zum anderen sollte das tatsächliche Verformungsverhalten von Hochregallagern sowie die Interaktion von Hochregallagern und Regalbedienung untersucht werden. Die im Forschungsprojekt identifizierten entscheidenden und begrenzenden Faktoren betrafen die Nachweise der zulässigen Lagerverformungen. Die aktuellen Grenzwerte entsprechen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit nicht den zwischenzeitlich technischen Möglichkeiten. Durch Weiterentwicklungen der Regalbedienung bei gleichzeitig ausbleibenden Anpassungen der Grenzwerte der zulässigen Verformungen birgt eine Anpassung der Vorgaben eine deutliche Optimierung der Lagerstruktur, ermöglicht den Einsatz verschiedenster konstruktiver Lösungsmöglichkeiten und steigert folglich die Wirtschaftlichkeit.

**10 Literaturverzeichnis**

- [Amb-2005] Ambrozy, H. G.: Planungshandbuch Holzwerkstoffe – Technologie, Konstruktion, Anwendung. Springer, Wien, 2005.
- [ARG-2012] ARGEBAU: Musterbauordnung – MBO, 2012.
- [Arn-2008] Arnold, D.: Handbuch Logistik. Springer, Berlin, 2008.
- [Ber-2016] Berger, A.: Landratsamt München, Frankenthaler Str. 5-9, 81539 München. Expertengespräch am 10.02.2016.
- [Bin-2014] Binck, C.: Untersuchung geeigneter Anwendungsgebiete für Hochregallager aus Holz sowie Entwurf einer beispielhaften Lagerkonstruktion. Masterarbeit. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, Technische Universität München, München, 2014.
- [Bla-2003] Blaß, H. J.; Fellmoser, P.: Bemessung von Mehrschichtplatten. Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktion, Universität Karlsruhe, 2003.
- [Bla-2007] Blaß, H. J.; Uibel, T.: Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettspertholz. In: Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau (2007) Nr. 8
- [Bla-2015] Blaß, H. J.; Streib, J.: Ingenious hardwood – BauBuche Buchen-Furnierschichtholz Bemessungshilfe für Entwurf und Berechnung nach Eurocode 5, 2015.
- [Bod-1993] Bodig, J.; Jayne, B.: Mechanics of wood and wood composites. Krieger Pub, Malabar, Fla., 1993.
- [Bru-2011] Bruckner, H.; Hiese, W.; Möhring, R.; Scholz, W.: Baustoffkenntnis – [Natursteine, keramische und mineralisch gebundene Baustoffe, Bauglas, anorganische Bindemittel, Gesteinskörnungen für Mörtel und Beton ...]. Werner, Köln, 2011.
- [Bun-2010] Bundesrechtsverordnung: Verordnung über Arbeitsstätten – ArbStättV, 2010.
- [Bun-2011a] Bundesgesetz: Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt – ProdSG, 2011.
- [Bun-2011b] Bundesrechtsverordnung: Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung) (9. ProdSV), 2011.
- [Bun-2014] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (Hrsg.): Der Wald in Deutschland – Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur, 2014.

- [Bun-2015a] Bundesgesetz: Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit – ArbSchG, 2015.
- [Bun-2015b] Bundesrechtsverordnung: Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln – BetrSichV, 2015.
- [Bun-2015c] Bundesrechtsverordnung: Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen – GefStoffV, 2015.
- [Bun-2016a] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Informationszentrum: Normenverzeichnisse. [www.baua.de/de/Produktsicherheit/Produktinformationen/Normenverzeichnisse.html](http://www.baua.de/de/Produktsicherheit/Produktinformationen/Normenverzeichnisse.html), Aufruf am 20.03.2016.
- [Bun-2016b] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin Informationszentrum. Expertengespräch am 29.02.2016.
- [CEA-4001] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.: Richtlinien für Sprinkleranlagen - Planung und Einbau. CEA Nr. 4001, 2014.
- [Cor-2007] Corvo, F.; Torrens, A. D.; Betancourt, N.; Perez, J.; Gonzalez, E.: Indoor atmospheric corrosion in Cuba. A report about indoor localized corrosion. In: Corrosion Science (2007) Nr. 49
- [Dan-1995] Dantzer, H.: Techniken der Qualitätssicherung im Lagerwesen und Güterversand. expert Verlag, Renning-Malmsheim, 1995.
- [Deu-2009] Deutsche Gesellschaft für Holzforschung (Hrsg.): Holz Brandschutz Handbuch. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2009.
- [Deu-2012] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: Sicherheit von Regalen – BGI/GUV-I 5166, 2012.
- [Deu-2014] Deutsches Institut für Bautechnik: Muster-Liste der technischen Baubestimmungen, 2015.
- [Deu-2015] Deutsches Institut für Bautechnik: Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C, 2015.
- [DGN-2015] DGNB GmbH: Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus – Neubau Industriebauten Typ 1 (Logistikgebäude) Version 2015, 2015.
- [DGU-108-007] Berufsgenossenschaft Handel und Warendistribution: Lagereinrichtungen und -geräte. DGUV Nr. 108-007, Fassung 2006.
- [DIB-Z-9a] Deutsches Institut für Bautechnik: Brettschichtholz aus Buchen-Furnierschichtholz. DIBt Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-837, 2013.

- [DIB-Z-9b] Deutsches Institut für Bautechnik: Furnierschichtholz aus Buche zur Ausbildung stabförmiger und flächiger Tragwerke "Buchen-FSH längslagig" "Buchen-FSH querlagig". DIBt Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-838, 2013.
- [DIN-10025-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für unlegierte Baustähle. DIN EN Nr. 10025-2, 2005.
- [DIN-10025-6] Deutsches Institut für Normung e.V.: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen - Teil 6: Technische Lieferbedingungen für Flacherzeugnisse aus Stählen mit höherer Streckgrenze im vergüteten Zustand. DIN EN Nr. 10025-6, 2009.
- [DIN-10346] Deutsches Institut für Normung e.V.: Kontinuierlich schmelztauchveredelte Flacherzeugnisse aus Stahl zum Kaltumformen - Technische Lieferbedingungen. DIN EN Nr. 10346, 2015.
- [DIN-10528] Deutsches Institut für Normung e.V.: Lebensmittelhygiene - Anleitung für die Auswahl von Werkstoffen für den Kontakt mit Lebensmitteln - Allgemeine Grundsätze. DIN Nr. 10528, 2009.
- [DIN-11844-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Korrosion von Metallen und Legierungen - Einteilung der Korrosivität in Räumen mit geringer Korrosivität- Teil 1: Bestimmung und Abschätzung der Korrosivität in Räumen. DIN EN ISO Nr. 11844-1, 2008.
- [DIN-12944-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme Teil 1: Allgemeine Einleitung. DIN EN ISO Nr. 12944-1, 1998.
- [DIN-12944-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme Teil 2: Einteilung der Umgebungsbedingungen. DIN EN ISO Nr. 12944-2, 1998.
- [DIN-12944-5] Deutsches Institut für Normung e.V.: Beschichtungsstoffe –Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungssysteme –Teil 5: Beschichtungssysteme. DIN EN ISO Nr. 12944-5, 2008.
- [DIN-13698-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Produktspezifikation für Paletten - Teil 1: Herstellung von 800 mm x 1200 mm Flachpaletten aus Holz. DIN EN Nr. 13698-1, 2004.
- [DIN-13698-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: Produktspezifikation für Paletten - Teil 2: Herstellung von 1000 mm x 1200 mm Flachpaletten aus Holz. DIN EN Nr. 13698-2, 2009.

- [DIN-13943] Deutsches Institut für Normung e.V.: Brandschutz - Vokabular. DIN EN ISO Nr. 13943, 2011.
- [DIN-14374] Deutsches Institut für Normung e.V.: Holzbauwerke - Furnierschichtholz für tragende Zwecke - Anforderungen. DIN EN Nr. 14374, 2004.
- [DIN-15146-4] Deutsches Institut für Normung e.V.: Vierwege-Flachpaletten aus Holz. DIN Nr. 15146-4, 1991.
- [DIN-15512] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ortsfeste Regalsysteme aus Stahl – Verstellbare Palettenregale –Grundlagen der statischen Bemessung. DIN EN Nr. 15512, 2010.
- [DIN-15620] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ortsfeste Regalsysteme aus Stahl – Verstellbare Palettenregale –Grenzabweichungen, Verformungen und Freiräume;. DIN EN Nr. 15620, 2010.
- [DIN-15629] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ortsfeste Regalsysteme aus Stahl – Spezifikation von Lagereinrichtungen. DIN EN Nr. 15629, 2010.
- [DIN-15635] Deutsches Institut für Normung e.V.: Ortsfeste Regalsysteme aus Stahl - Anwendung und Wartung von Lagereinrichtungen. DIN EN Nr. 15635, 2009.
- [DIN-15643-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 1: Allgemeine Randbedingungen. DIN EN Nr. 15643-1, 2010.
- [DIN-15643-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 2: Rahmenbedingungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität. DIN EN Nr. 15643-2, 2011.
- [DIN-15643-4] Deutsches Institut für Normung e.V.: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden - Teil 4: Rahmenbedingungen für die Bewertung der ökonomischen Qualität. DIN EN Nr. 15643-4, 2012.
- [DIN-15804] Deutsches Institut für Normung e.V.: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. DIN EN Nr. 15804, 2014.
- [DIN-15978] Deutsches Institut für Normung e.V.: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden - Berechnungsmethode. DIN EN Nr. 15978, 2012.
- [DIN-18230-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Baulicher Brandschutz im Industriebau - Teil 1: Rechnerisch erforderliche Feuerwiderstandsdauer. DIN Nr. 18230-1, 2010.

- [DIN-1993-1-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten. DIN EN Nr. 1993-1-1, 2010.
- [DIN-1993-1-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall. DIN EN Nr. 1993-1-2, 2010.
- [DIN-1993-1-3] Deutsches Institut für Normung e.V.: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten –Teil 1-3: Allgemeine Regeln –Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche. DIN EN Nr. 1993-1-3, 2010.
- [DIN-1995-1-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. DIN EN Nr. 1995-1-1, 2010.
- [DIN-528] Deutsches Institut für Normung e.V.: Regalbediengeräte - Sicherheitsanforderungen. DIN EN Nr. 528, 2009.
- [DIN-68800-1] Deutsches Institut für Normung e.V.: Holzschutz - Teil 1: Allgemeines. DIN Nr. 68800-1, 2011.
- [DIN-68800-2] Deutsches Institut für Normung e.V.: Holzschutz - Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. DIN Nr. 68800-2, 2012.
- [DIN-9223] Deutsches Institut für Normung e.V.: Korrosion von Metallen und Legierungen - Korrosivität von Atmosphären - Klassifizierung, Bestimmung und Abschätzung. DIN EN ISO Nr. 9223, 2012.
- [DIN-9224] Deutsches Institut für Normung e.V.: Korrosion von Metallen und Legierungen - Korrosivität von Atmosphären - Anhaltswerte für die Korrosivitätskategorien. DIN EN ISO Nr. 9224, 2012.
- [Dor-1974] Dorsch, A.: Technisch-wirtschaftliche Untersuchung zur kostenoptimalen Dimensionierung automatischer Hochregallager, Technische Universität Berlin, Berlin, 1974.
- [Dor-1975] Dorsch, A.: Kostenoptimale Abmessungen automatischer Hochregallager. In: VDI-Z, Jg. 117 (1975) Nr. 22, S. 1031–1040.
- [Dun-2002] Dunky, M.; Niemz, P.: Holzwerkstoffe und Leime – Technologie und Einflussfaktoren. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2002.
- [E D-16351] Deutsches Institut für Normung e.V.: Holzbauwerke –Brettsperrholz –Anforderungen. E DIN EN Nr. 16351, 2011.
- [Ehl-2001] Ehlbeck, J. e. a.: Holzbau Kalender 2002. Bruderverlag, Karlsruhe, 2001.
- [Eng-2016] Engel, M.: Martin Engel Sachverständigenbüro für Brandschutz, Quellenweg 1, 64757 Rothenberg. Expertengespräch am 18.02.2016.

- [Erl-1998] Erler, K.: Korrosion von Vollholz und Brettschichtholz. In: Bautechnik, Jg. 1998 (1998) Nr. Heft 8
- [Erl-2000] Erler, K.: Chemische Korrosion von Holz und Holzkonstruktionen -Abschlussbericht (Studie)-, 2000.
- [Eur-2002] Europäisches Parlament: Verordnung zur Festlegung der allgemeinen Grundsätze und Anforderungen des Lebensmittelrechts, zur Errichtung der Europäischen Behörde für Lebensmittelsicherheit und zur Festlegung von Verfahren zur Lebensmittelsicherheit – EG Nr. 178/2002, 2002.
- [Eur-2004a] Europäisches Parlament: Verordnung über Lebensmittelhygiene – EG Nr. 852/2004, 2004.
- [Eur-2004b] Europäisches Parlament: Verordnung über Materialien und Gegenstände, die dazu bestimmt sind, mit Lebensmitteln in Berührung zu kommen – EG Nr. 1935/2004, 2004.
- [Eur-2009] Europäisches Parlament: Verordnung zur zur Festsetzung von Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen im Rahmen des Gesamtkonzepts der Gemeinschaft zur Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von Personenkraftwagen und leichten Nutzfahrzeugen – EG Nr. 443/2009, 2009.
- [EUW-2015] EUWID Europäischer Wirtschaftsdienst GmbH: EUWID-Preisspiegel: Brettschichtholz Deutschland, 2015.
- [Fac-2014a] Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz: Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau – MIndBauRL, 2014.
- [Fac-2014b] Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz: Muster-Richtlinie über den baulichen Brandschutz im Industriebau - Erläuterungen – MInd-BauRL, 2014.
- [FEM-9831] Federation Europeenne de la Manutention: Basis of calculations for storage and retrieval machines - Tolerances, deformations und clearances in the storage system. FEM Nr. 9831, 2012.
- [Fle-2005] Fleischmann, M.: Numerische Berechnung von Holzkonstruktionen unter Verwendung eines realitätsnahen orthotropen elasto-plastischen Werkstoffmodells. Dissertation, Technische Universität Wien, Wien, 2005.
- [Fre-2015] Frederick, H.: Regalmontagen Hauce Frederick, Obernhagen 31, 31702 Lüdersfeld. Expertengespräch am 04.11.2015.
- [Gei-1976] Geissen, A.: Über den Einfluss von Temperatur und Holzfeuchtigkeit auf die Elastizitäts- und Festigkeitseigenschaften des Holzes im Gefrierbereich. Dissertation, Universität Hamburg, Hamburg, 1976.

- [Grö-2015] Grömminger, M.: Rubner Holzbau, Via Alfred Ammon 12, 39042 Brixen, Italien. Expertengespräch am 08.07.2015.
- [Gün-2007] Günthner, W. A.; Heptner, K.: Technische Innovationen für die Logistik. Huss, München, 2007.
- [Gün-2014] Günthner, W. A.; Freis, J.; Amberger, M.: Impact Study on Mobile Cranes, 2014.
- [Gün-2015] Günthner, W. A.: Förder- und Materialflusstechnik. Vorlesungsskript. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2015.
- [Hel-2009] Helms, H.; Lambrecht, U.; Knörr, W.: Aktualisierung des Modells TREMOD-Mobile Machinery, 2009.
- [Hel-2014] Helms, H.; Heidt, C.: Erarbeitung eines Konzepts zur Minderung der Umweltbelastung aus NRMM (non road mobile machinery) unter Berücksichtigung aktueller Emissionsfaktoren und Emissionsverminderungsoptionen für den Bestand, 2014.
- [Hen-2016] Henn, M.: Ausschuss für Gefahrenstoffe, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund. Expertengespräch am 14.01.2016.
- [Hep-2014] Heptner, O.: Positionspapier zur Zulassung von Regalen, Hagen, 2014.
- [Her-2003] Herzog, T.; Natterer, J.; Schweitzer, R.; Volz, M.; Winter, W.: Holzbau Atlas. Birkhauser, Berlin, 2003.
- [Hol-2010] Holzforschung München: Bauen mit Holz = aktiver Klimaschutz. Technische Universität München, 2010.
- [Höl-2016] Höltinger, R.: Bauschutz GmbH & Co KG, Dieselstrasse 9, 4600 Wels, Österreich. Expertengespräch am 01.03.2016.
- [Hom-2007] Hompel, M. ten; Schmidt, T.; Nagel, L.: Materialflusssysteme – Förder- und Lagertechnik ; mit 36 Tabellen. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [Hüb-2010] Hübner, K. T.: Tragsicherheit automatisierter Hochregallager unter stoßartiger Beschickungslasten durch Regalbediengeräte. Dissertation, Technische Universität München, München, 2010.
- [Kat-2010] Kathage, K.: Aktuelles aus dem Bereich Metallbau – Stahlregale. In: DIBt Mitteilungen (2010) Nr. 2, S. 52–55.

- [Kat-2011] Kathage, K.: Bauaufsichtliche Verwendbarkeitsnachweise für Stahlregale. In: DIBt Mitteilungen (2011), S. 124–125.
- [Kem-2015] Kempmann, J.: Bruttostromerzeugung nach Energieträgern 2014. <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/energiemix-de>, Aufruf am 23.03.2016.
- [Kla-2012] Klaus, P.; Krieger, W.; Krupp, M. (Hrsg.): Gabler, Lexikon Logistik – Management logistischer Netzwerke und Flüsse. Springer Gabler, Wiesbaden, 2012.
- [Kna-2014] Knapp, J.: Offsetdruckerei Schwarzach, Hofsteigstrasse 104, 6858 Schwarzach, Österreich. Expertengespräch am 19.03.2014.
- [Kol-1951] Kollmann, F.: Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Springer Verlag, Berlin, 1951.
- [Kuh-2015] Kuhlmann, U.: Stahlbau-Kalender 2015 – Eurocode 3 - Grundnorm, Leichtbau. Ernst & Sohn, a Wiley brand, Berlin, 2015.
- [Kun-1995] Kunkelmann, J.: Brandausbreitung bei verschiedenen Stoffen die in lagermäßiger Anordnung gestapelt sind. – Teil 12. Forschungsbericht. Forschungsstelle für Brandschutz, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1995.
- [Kun-2015] Kundenservice: Beyer Mietservice KG, Gewerbepark Rother Str. 1, 57539 Roth-Heckenhof. Expertengespräch am 19.11.2015.
- [Lam-2004] Lambrecht, U.; Helms, H.; Kulmer, K.; Knörr, W.: Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Luftschadstoffemissionen und der Kraftstoffverbrauchs von Verbrennungsmotoren in mobilen Geräten und Maschinen, 2004.
- [Län-2011] Länderarbeitsgemeinschaft Verbraucherschutz, Arbeitsgruppe Fleisch- und Geflügelfleischhygiene und fachspezifische Fragen von Lebensmitteln tierischer Herkunft: Verwendung von Holzpaletten in Kühlräumen, 2011.
- [Lie-2016] Liebherr-Werk Biberach GmbH: Turmdrehkran 280 EC-H 12 Litronic. [http://www.liebherr.com/CC/de-DE/region-DE/products\\_cc.wfw/id-15095-0/measure-nonMetric/tab-1649\\_1560?file=%7e%2fcatsmedia%2fcc-ccm%2fDocuments%2fCC\\_DB\\_280ECH12Litronic\\_EN\\_9319-0.pdf](http://www.liebherr.com/CC/de-DE/region-DE/products_cc.wfw/id-15095-0/measure-nonMetric/tab-1649_1560?file=%7e%2fcatsmedia%2fcc-ccm%2fDocuments%2fCC_DB_280ECH12Litronic_EN_9319-0.pdf), Aufruf am 21.03.2016.
- [Lim-2015] Limprecht, O.: Minimax GmbH & Co. KG, Heinrich-Hertz-Straße 1, 63303 Dreieich. Expertengespräch am 16.11.2015.
- [Man-2012] Mantau, U.: Holzrohstoffbilanz Deutschland, Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung von 1987 bis 2015. Forschungsbericht, Universität Hamburg, Hamburg, 2012.
- [May-2008] Mayer, F.; Braun, S.; Loew, T.; Clausen, J.: Megatrends der Nachhaltigkeit – Unternehmensstrategien neu denken, 2008.

- [Mec-2016] Mecalux: Automatische dreiseitige Regalbediengeräte. <http://www.mecalux.de/automatische-lagersysteme-paletten/automatische-dreiseitige-regalbediengerate>, Aufruf am 29.01.2016.
- [MEP-2007] MEPS (International) LTD: European Steel Review – Flat Rolled Products - Negotiated Domestic Basis Prices - Germany, 2007-2015.
- [Mil-2005] Milling, A.: Holz - ein natürlicher Werkstoff mit antibakteriellen Eigenschaften? Disseratation, Technischen Universität Braunschweig, 2005.
- [Min-2012] Ministerium für Verkehr und Infrastruktur Baden-Württemberg: Energiesparend fahren, 2012.
- [Möl-2001] Möll, R.: Stahlregale – Planung, Herstellung, Montage und Betrieb. In: Stahlbau, Jg. 70 (2001) Nr. 10, S. 737–757.
- [Mön-2004] Mönck, W.; Erler, K.: Schäden an Holzkonstruktionen – Analyse und Behebung ; [das Standardwerk für Sanierung + Denkmalpflege]. Huss-Medien, Verl. Bauwesen, Berlin, 2004.
- [Nee-2010] Neef, S.: Nicht mit dem Feuer spielen! In: Logistra, Jg. 2010 (2010) Nr. 5
- [Neu-1994] Neuhaus, H.: Lehrbuch des Ingenieurholzbaus. Teubner, Stuttgart, 1994.
- [Nie-1993] Niemz, P.: Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe – Holz: Anatomie - Chemie - Physik. DRW-Verl., Leinfelden-Echterdingen, 1993.
- [Oeh-2016] Oehmann, M.: Oehmann - Arbeitssicherheit & Seminare, Richard-Wagner-Straße 65. 69259 Wilhelmsfeld. Expertengespräch am 08.01.2016.
- [Pat-2016a] Patermann, K.: Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz. Expertengespräch am 01.03.2016.
- [Pat-2016b] Patermann, K.: Fachkommission Bauaufsicht der Bauministerkonferenz. Expertengespräch am 11.02.2016.
- [Pet-2012] Petersen, C.: Stahlbau – Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012.
- [Pet-2015] Peterhansl, K.: Karl Bau GmbH, Deggendorfer Str. 15, 94548 Innernzell. Expertengespräch am 14.12.2015.
- [Ric-1989] Richter, K.: IBM-Chemikalienlager im Werk Sindelfingen Hulb, 1989.
- [Rug-2011] Rug, W.; Lißner, A.: Untersuchungen zur Festigkeit und Tragfähigkeit von Holz unter dem Einfluss chemisch-aggressiver Medien. In: Bautechnik (2011) Nr. 88

- [Rum-2016] Rump, C.: Meta Regalbau GmbH & Co. KG, Eichenkamp, 59759 Arnsberg. Expertengespräch am 11.01.2016.
- [Rus-2015] Rusch, H.: VdS Schadenverhütung GmbH, Amsterdamer Str. 174, 50735 Köln. Expertengespräch am 20.11.2015.
- [Sch-1996] Schweizerische Gesellschaft für Logistik (Hrsg.): Temperaturen im Hochregallager - Empfehlung, 1996.
- [Sch-1997] Schatz, H.: Brandschutz von recyclingfähigen Stoffen – Teil 2: Literaturlauswertung, Brand- und Lösckversuche an Kunststoffballen und an Paletten mit Pappkarton und Kunststoffkästen. Forschungsbericht. Forschungssteller für Brandschutztechnik, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 1997.
- [Sch-1999] Schmitz, S.; Paulini, I.: Bewertung in Ökobilanzen – Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Randbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043, 1999.
- [Sch-2000] Schönwälder, A.; Kehr, R.; Wulf, A.; Smalla, K.: Antibakterielle Eigenschaften von Holz beachtenswert. In: Holz-Zentralblatt (2000) Nr. 147, S. 2037–2038.
- [Sch-2002] Schönwälder, A.; Kehr, R.; Wulf, A.; Smalla, K.: Wooden boards affecting the survival of bacteria? In: Holz als Roh- und Werkstoff (2002) Nr. 60, S. 249–257.
- [Sch-2014a] Schröder, M.: Anwenderstatistik Hochregallager. In: Materialfluss Markt, Jg. 1998-2013 (2014)
- [Sch-2014b] Schweigl, F.: VoestAlpine Krens Finaltechnik, Schmidhüttenstraße 5, 3500 Krens, Österreich. Expertengespräch am 29.10.2014.
- [Sch-2015] Schweigl, F.: VoestAlpine Krens Finaltechnik, Schmidhüttenstraße 5, 3500 Krens, Österreich. Expertengespräch am 02.06.2015.
- [Sic-2001] Sicherheitsinstitut: Brandschutz in Hochregallagern, 2001.
- [Sim-2014] Simma, M.: Kaufmann Bausysteme GmbH, Vorderreuthe 57, 6870 Reuthe, Österreich. Expertengespräch am 27.10.2014.
- [Sim-2015] Simma, M.: Kaufmann Bausysteme GmbH, Vorderreuthe 57, 6870 Reuthe, Österreich. Expertengespräch am 03.12.2015.
- [Sta-2008] Statistisches Bundesamt: Gliederung der Klassifikation der Wirtschaftszweige – WZ 2008, 2008.

- [Sta-2012] Staatliches Gewerbeaufsichtsamt Hildesheim: Immissionsmessprogramm Niedersächsische Küste 2011-2012 – Staubniederschlag sowie Schadstoffdepositionen Schwefeldioxid-, Stickstoffdioxid-, und Benzol-Konzentrationen, 2012.
- [Sta-2014] Statistisches Bundesamt: Statistische Ämter des Bundes und der Länder – Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen - Bruttoinlandsprodukt. [http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de\\_jb27\\_jahrab65.asp](http://www.statistik-portal.de/Statistik-Portal/de_jb27_jahrab65.asp), Aufruf am 25.02.2016.
- [Sta-2015] Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Verkehr – Verkehr im Überblick, Wiesbaden, 2015.
- [Sta-2016] Statistisches Bundesamt: Datenbank Genesis. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>, Aufruf am
- [Sto-2009] Stollmann, F.: Öffentliches Baurecht. Beck, München, 2009.
- [TRB-1203]: Technische Regeln für Betriebssicherheit - Befähigte Personen. TRBS Nr. 1203, 2010.
- [TRG-509] Bundesministerium für Arbeit und Soziales: Lagern von flüssigen und festen Gefahrstoffen in ortsfesten Behältern sowie Füll- und Entleerstellen für ortsbewegliche Behälter. TRGS Nr. 509, 2015.
- [TRG-510] Bundesministerium für Arbeit und Soziales: Lagerung von Gefahrstoffen in ortsbeweglichen Behältern. TRGS Nr. 510, 2015.
- [UIC-435-2] International Union of Railways: Standard of quality for EUR flat pallets made of wood measuring 800 mm x 1200 mm (EUR-1). UIC Nr. 435-2, 2014.
- [Umw-2016a] Umwelt Bundesamt: Emissionen von Luftschadstoffen, Aufruf am 07.03.2016.
- [Umw-2016b] Umwelt Bundesamt: Quellen der Luftschadstoffe, Aufruf am 07.03.2016.
- [VDI-2690-1] Verein deutscher Ingenieure: Material- und Datenfluss im Bereich von automatischen Hochregallagern - Grundlagen. VDI Nr. 2690-1, 1994.
- [VDI-3564] Verein deutscher Ingenieure: Empfehlungen für Brandschutz in Hochregalanlagen. VDI-Richtlinie Nr. 3564, 2011.
- [VdS-2199] Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.: Brandschutz im Lager. VdS Nr. 2199, 1998.
- [Ver-2012] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (Hrsg.): VDMA - Fördertechnik und Lagerlogistik – Positionspapier zu den Auswirkungen einer

Festlegung vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) bzgl. Regale, Frankfurt am Main, 2012.

- [Wal-2013] Wallner-Novak, M.; Koppelhuber, J.; Pock, K.: Brettspertholz Bemessung – Grundlagen für Statik und Konstruktion nach Eurocode : Informationen für die Berechnung und konstruktive Gestaltung von Holztragwerken. ProHolz Austria, Wien, 2013.

**11 Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1: Arbeitspakete des Forschungsprojekts .....	4
Abbildung 2: Einteilung Lagereinrichtungen nach [Gün-2015, S. 4-2ff.] .....	7
Abbildung 3: Bauformen von Hochregalen, links freistehendes Regal und rechts Regal in Silobauweise, in Anlehnung an [Gün-2007, S. 192] .....	8
Abbildung 4: Koordinatensystem im Hochregal, in Anlehnung an [Mec-2016] .....	9
Abbildung 5: Bauformen von Regalfächern, links Einplatz-/Quereinlagerung, rechts Mehrplatz-/Längseinlagerung als 3-Platzlagerung .....	10
Abbildung 6: Aufbau Regalbediengerät [Arn-2008, S. 685] .....	11
Abbildung 7: doppeltiefe Lagerung, Höhenversatz der Regalfächer, Vorder- und Seitenansicht .....	11
Abbildung 8: Modell eines Hochregallagers in Silobauweise, in Anlehnung an [VDI-3564] ..	13
Abbildung 9: Brettschichtholz BSH .....	25
Abbildung 10: Brettspertholz BSP fünfplagig .....	25
Abbildung 11: Mehrschichtplatte dreilagig .....	25
Abbildung 12: Furnierschichtholz .....	26
Abbildung 13: BauBuche als Platte, Träger und Paneel [Bla-2015, S. 6] .....	26
Abbildung 14: Schematischer Aufbau eine Hochregallagers in Silobauweise in Anlehnung an [Dor-1975] .....	28
Abbildung 15: Allgemeine Tragelemente von Hochregallagern in Anlehnung an [Möl-2001]	29
Abbildung 16: Auswahl möglicher kaltgeformter, dünnwandiger Stahlquerschnitte in Anlehnung an [DIN-15512] .....	30
Abbildung 17: Möglichkeiten der Ausbildung der Steher als Fachwerke [Bin-2014] .....	30
Abbildung 18: Verschraubung der Steherfüße beim Stahlregal mit der Bodenplatte, Quelle: Merz Kley & Partner ZT GmbH .....	31
Abbildung 19: Regalgasse mit Anordnung der Steher und Palettenträger beim Stahlregal, Quelle: Voestalpine Krems Finaltechnik GmbH .....	32
Abbildung 20: Blick auf den Rahmen aus Stehern und Dachträgern in Querrichtung beim Stahlregal, Quelle: Voestalpine Krems Finaltechnik GmbH .....	32
Abbildung 21: Montagezustand eines Regalmoduls aus Stahl mit Blick auf die Auskreuzungsverbände der Längsaussteifung, Quelle: Merz Kley & Partner ZT GmbH	32

Abbildung 22: Stahl-Auskreuzungen mit anschließender Regalkonstruktion am Hochregallager der (Quelle:) Salinen Austria AG .....	33
Abbildung 23: Aussteifungstürme mit anschließender Regalkonstruktion am Hochregallager der (Quelle:) Alnatura GmbH.....	33
Abbildung 24: Längsaussteifungsverbände mittels Stahldiagonalen am Beispiel des Hochregallagers der (Quelle:) Salinen Austria AG .....	34
Abbildung 25: Hochregallager in Hybridbauweise mit Palettenträgern aus Stahl und Stehern aus BSH, Quelle: Kaufmann Bausysteme GmbH.....	35
Abbildung 26: Hochregallager als reine Holzkonstruktion, Quelle: Alnatura GmbH.....	35
Abbildung 27: Lagerquerrichtung des Paletten-Hochregalsilos von (Quelle:) Josera GmbH & Co. KG .....	36
Abbildung 28: Lagerquerrichtung und liegende Montage eines Moduls in einer Schablone des Paletten-Hochregalsilos von (Quelle:) Alnatura GmbH.....	36
Abbildung 29: Vorsatzkonstruktion zur Anbringung der Fassade beim Hochregallager von (Quelle:) Alnatura GmbH.....	37
Abbildung 30: Brandausbreitung im Hochregallager.....	38
Abbildung 31: Kumulierte Inbetriebnahmen von Hochregallagern [Bin-2014] .....	42
Abbildung 32: Aufschlüsselung der Anzahl der gebauten unterschiedlichen Hochregallager für Paletten [Bin-2014] .....	42
Abbildung 33: Standorte der Hochregallagern für Paletten des Betrachtungszeitraums in Deutschland [Bin-2014] .....	43
Abbildung 34: Lagerdichte der dominierenden Lagerstandorte.....	43
Abbildung 35: Zusammenhang der Anzahl der Stellplätze und der gebauten Anzahl an Hochregallagern in Silobauweise [Bin-2014].....	45
Abbildung 36: Entwicklung der durchschnittlichen Stellplatzanzahl der Hochregallager in Silobauweise [Bin-2014] .....	45
Abbildung 37: Zusammenstellung der Anzahl der gebauten HRL in Bezug zur Lagerlängen [Bin-2014] .....	46
Abbildung 38: Zusammenstellung der Anzahl der gebauten HRL in Bezug zur Lagerbreiten [Bin-2014] .....	46
Abbildung 39: Zusammenstellung der Anzahl der gebauten HRL in Bezug der Lagerhöhe [Bin-2014].....	46
Abbildung 40: Entwicklung der Lagerhöhen im Betrachtungszeitraum.....	46

---

Abbildung 41: Zusammenstellung der Maße der Ladeeinheiten der HRL in Silobauweise in fünf Bereichen nach Abbildung 42 [Bin-2014] .....	47
Abbildung 42: Einteilung der Ladeeinheiten in fünf Bereiche [Bin-2014] .....	47
Abbildung 43: Zusammenstellung von Höhenbereichen der Ladeeinheiten [Bin-2014] .....	48
Abbildung 44: Zusammenstellung der maximal für die Regalstruktur zulässigen Massen der Ladeeinheiten [Bin-2014].....	48
Abbildung 45: Anzahl gebauter Hochregale in Deutschland sortiert nach Branchen .....	49
Abbildung 46: Anzahl gebauter Hochregale im verarbeitenden Gewerbe in Deutschland ...	50
Abbildung 47: Planungszeiten bestehender Holz-Hochregale sowie funktionsgleicher Stahl-Hochregale .....	55
Abbildung 48: Vergleich der Montagezeit von gebauten Holz-Hochregalen und funktionsgleichen Stahlregalen .....	55
Abbildung 49: Projektlaufzeit bei bestehenden Holz-Hochregalen und funktionsgleichen Stahl-Hochregalen .....	56
Abbildung 50: Einfluss der Steherbreiten und Palettenträgerhöhen auf die Regalgesamtabmessungen.....	57
Abbildung 51: Darstellung der beteiligten Subsysteme .....	60
Abbildung 52: Aufbau des Simulationsmodells (Draufsicht) .....	62
Abbildung 53: Faserorientierung verschiedener Zonen der Europoolpalette.....	64
Abbildung 54: zeitlicher Verlauf von Kraft und Verschiebung während des Anprallvorgangs .....	65
Abbildung 55: Lokale plastische Deformationszonen zum Zeitpunkt $t = 12\text{ms}$ .....	66
Abbildung 56: Schnittansicht und gewählte Spannungspfade in der lokalen Plastifizierungszone ( $t = 12\text{ms}$ ).....	66
Abbildung 57: Spannungsverlauf entlang ausgewählter Pfade in der lokalen Plastifizierungszone ( $t=12\text{ms}$ ).....	67
Abbildung 58: Schnittansicht und gewählte Spannungspfade in der lokalen Plastifizierungszone ( $t = 109\text{ms}$ ).....	68
Abbildung 59: Spannungsverlauf entlang ausgewählter Pfade in der lokalen Plastifizierungszone ( $t = 109\text{ms}$ ).....	68
Abbildung 60: Hygroskopische Isothermen für Fichtenholz im Bereich $0^\circ\text{C}$ bis $130^\circ\text{C}$ [Kol-1951, S. 378] .....	77

Abbildung 61: Zunahme der Randschichtdicke mit verminderter Festigkeit im Laufe der Nutzungsdauer bei Salzeinwirkung und unterschiedlichen Nutzungsklassen (Nk=NKL) [Mön-2004] .....	81
Abbildung 62: Überleben von E. coli pIE639 auf Holz und Kunststoff nach verschiedenen Auslagerungsdauern [Sch-2000, S. 2037] .....	84
Abbildung 63: Luftschadstoffindex der Emissionen in Deutschland von 1990 bis 2013 [Umw-2016a] .....	90
Abbildung 64: Festlegung der betrachteten Grenzwerte der Lagergesamtabmessungen....	95
Abbildung 65: Zulässige Durchbiegung der Palettenträger nach [DIN-15620].....	97
Abbildung 66: Darstellung der erforderlichen Trägerhöhen für Palettenträger aus BSH GL 24h in Abhängigkeit der Platzlagerung und der Art der Regalklasse .....	98
Abbildung 67: Darstellung der erforderlichen Trägerhöhen für Palettenträger aus BauBuche in Abhängigkeit der Platzlagerung und der Art der Regalklasse .....	98
Abbildung 68: Beispiel der Fachfreimaße eines einfachtiefen Lagers in Lagerlängs- und Lagerquerrichtung .....	103
Abbildung 69: Darstellung des Grundrisses, der Längs- und Lagerquerrichtung eines beispielhaften Hochregallagers .....	107
Abbildung 70: Gesamtansicht der für die weitere Betrachtung selektieren Hochregallagerkonstruktion .....	121
Abbildung 71: Möglicher Aufbau der Module für die Addition .....	122
Abbildung 72: Darstellung eines beispielhaften Steherstoßes .....	122
Abbildung 73: ungleichmäßig beladene Palette mit Lastaufteilung, in Anlehnung an [DIN-15629].....	126
Abbildung 74: Gegenüberstellung der charakteristischen Anteile der vertikalen Einwirkungen .....	130
Abbildung 75: Gegenüberstellung der charakteristischen Anteile der horizontalen Lasten in Lagerquerrichtung .....	131
Abbildung 76: Gegenüberstellung der charakteristischen Anteile der horizontalen Lasten in Lagerlängsrichtung .....	132
Abbildung 77: Aufbau eines 3D-Stabwerksmodells eines Hochregallagers aus Holz nach Bauart Alnatura.....	139
Abbildung 78: Ausschnitt des Längsaussteifungsverbandes eines beispielhaften Aufbaus eines Modells der Bauweise mit Brettsperrholz in Lagerlängsrichtung.....	140
Abbildung 79: Beispielhafter Aufbau des Modells bei einer 2D-Analyse der Brettsperrholzbauweise in Lagerlängsrichtung .....	140

---

Abbildung 80: Beispielhafter Aufbau des Modells bei einer 2D-Analyse der Brettsperrholzbauweise in Lagerquerrichtung .....	141
Abbildung 81: Beispielhaftes Modell in der horizontalen Ebene mit Querverteilungsriegel am Lagerende .....	141
Abbildung 82: Aufbau des Modells in Lagerquerrichtung der beispielhaften Bemessung am Lager von Alnatura in Brettsperrholzbauweise .....	145
Abbildung 83: Darstellung der Ausnutzungsgrade der Steher in Abhängigkeit der maßgebenden Lastfälle .....	146
Abbildung 84: Verformung der Regalkonstruktion in Querrichtung (z-Richtung) infolge Wind .....	148
Abbildung 85: Darstellung der Verformungen in Längsrichtung in Abhängigkeit der BSP-Nennstärken der Längsaussteifungen und der Anzahl der Fächer (Gesamtlänge des Hochregallagers) .....	151
Abbildung 86: Modell des Hochregallagers in Querrichtung für die Untersuchung der Verformungen.....	153
Abbildung 87: Darstellung der Verformungen in Querrichtung in Abhängigkeit der BSP-Nennstärken und der Anzahl der Gassen (Lagerbreite) für doppeltiefe Hochregallager .....	154
Abbildung 88: Darstellung der Verformungen in Querrichtung in Abhängigkeit der BSP-Nennstärken und der Anzahl der Gassen (Lagerbreite) für einfachtiefe Hochregallager .....	155
Abbildung 89: Die drei Aspekte der Nachhaltigkeit.....	159
Abbildung 90: Phasen des Hochregallebens in Anlehnung an [DIN-15643-4].....	162
Abbildung 91: Prozess der Bewertung der umweltbezogenen Qualität, in Anlehnung an [DIN-15978].....	164
Abbildung 92: Berechnete Umweltauswirkungen pro Stellplatz der drei Hochregalbauweisen für das Einsatzszenario 1 (normale Lageratmosphäre) .....	176
Abbildung 93: Umweltauswirkungen verschiedener Holzwerkstoffe bezogen auf die EPD von Brettschichtholz .....	177
Abbildung 94: Relative Beiträge zu den Gesamtumweltauswirkungen der Brettsperrholzbauweise.....	178
Abbildung 95: Relative Beiträge zu den Gesamtumweltauswirkungen der Stahlbauweise	178
Abbildung 96: Investitionsvergleich (1.Quartal 2013) der Brettschichtholz- und Stahlbauweisen für normale Lageratmosphäre.....	180
Abbildung 97: Preisentwicklung bandverzinktes Stahlblech sowie Brettschichtholz .....	181

Abbildung 98: Investitionsvergleich (August 2015) der Holz- und Stahlbauweisen für normale Lageratmosphäre .....	182
Abbildung 99: Investitionsvergleich (August 2015) der drei Hochregalbauweisen für normale und aggressive Lageratmosphäre .....	183
Abbildung 100: Vergleich der Lebenszykluskosten anhand der Kapitalwerte für das Einsatzszenario mit normaler Lageratmosphäre .....	185

## 12 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wichtige FEM-Richtlinien und abgeleitete EN-Normen für Palettenregale aus Stahl .....	18
Tabelle 2: Allgemeine Gegenüberstellung der Materialeigenschaften von Baustahl und Holz .....	26
Tabelle 3: Aufteilung der Hochregallager für Paletten in Abhängigkeit des Standortes.....	43
Tabelle 4: bestehende Hochregallager aus Holz, Lagergüter und Motivation für die Holzbauweise .....	51
Tabelle 5: Berechnung der Unterschiede bei den Regalgesamtabmessungen von Hochregalen aus Holz und Stahl am Beispiel Alnatura.....	58
Tabelle 6: Übersicht Materialkennwerte Brettschichtholz .....	63
Tabelle 7: Zusammenfassung der Materialkennwerte für Stahl .....	64
Tabelle 8: Korrosivitätskategorie für atmosphärische Umgebungsbedingungen und Beispiele für typische Umgebungen, in Anlehnung an [DIN-12944-2] .....	78
Tabelle 9: Gasförmige Medien und Beanspruchungsgrade, in Anlehnung an [Erl-1998].....	80
Tabelle 10: Umlaufende Reduzierung der Holzquerschnitte aus Nadelholz um die Breite d in [mm] in Abhängigkeit der Nutzungsklasse und Nutzungsdauer [Erl-2000].....	81
Tabelle 11: Einsatzgrenzen der Regalwerkstoffe für eine Nutzdauer von 50 Jahren .....	86
Tabelle 12: mögliche Einsatzszenarien für die Regalwerkstoffe Holz und Stahl (✓ möglich, ~ möglich aber kritisch, × nicht möglich) .....	92
Tabelle 13: Auswahl der maximalen Abmessungen verschiedener flächenförmiger Holzwerkstoffe.....	99
Tabelle 14: Auswahl der üblichen und möglichen Abmessungen verschiedener linienförmiger Holzprodukte.....	100
Tabelle 15: Einteilung in Bewertungskategorien der Bauteile .....	108
Tabelle 16: Beschreibung der Aufbauten der Bauteile und Bewertung .....	108
Tabelle 17: Anzusetzende horizontale Einwirkungen der oberen Führungsschiene bei regalgeführten Geräten in Abhängigkeit der Anzahl der Regalbediengeräte in Anlehnung an Tabelle 1 der [DIN-15512] .....	128
Tabelle 18: Zusammenstellung der Lastfallkombinationen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit.....	136
Tabelle 19: Zusammenstellung der Lastfallkombinationen für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit .....	137

Tabelle 20: Berücksichtigte mechanische Modellierung der Verbindungen im Berechnungsmodell in Bezug zum globalen Koordinatensystem .....	142
Tabelle 21: Ausgangswerte für Steifigkeiten der Verbindungsmittelgruppen <i>k<sub>ser</sub></i> der Anschlüsse .....	143
Tabelle 22: Zulässige Verschiebungen für die Nachweise im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit für Hochregallager zu Einlagerung von Europoolpaletten, in Anlehnung an Tabelle 14 der [DIN-15620].....	148
Tabelle 23: Festlegung der Parameter.....	150
Tabelle 24: Gesamtlänge des Hochregallagers in Abhängigkeit der Anzahl der Fächer bei einer Dreiplatzlagerung.....	151
Tabelle 25: Breiten der Regalstruktur für einfachtiefe und doppeltiefe Lager in Abhängigkeit der Anzahl der Gassen .....	153
Tabelle 26: Eckdaten Bewertungsgegenstand [Sim-2014].....	160
Tabelle 27: Anforderungen des funktionalen Äquivalents .....	162
Tabelle 28: benötigte Stoffmengen der drei zu untersuchenden Bauweisen zur Herstellung des Betrachtungsgegenstandes.....	165
Tabelle 29: Zuordnung der Umweltdaten zu den Baustoffen.....	172
Tabelle 30: Zuordnung der Umweltdaten zu den Prozessen.....	174
Tabelle 31: verwendete Umweltindikatoren.....	175

## 13 Anhang

### 13.1 Emissionsberechnung

Das nachfolgend beschriebene Modell zur Emissionsberechnung wurde von *Lambrecht et al.* veröffentlicht [Lam-2004]. Zur Abschätzung der Ausstöße von Dieselmotoren mobiler Arbeitsmaschinen wird folgende Gleichung verwendet:

$$E_A = \text{Anz} \times P \times Z \times \text{LF} \times \text{EF} \quad [\text{Lam-2004}]$$

$E_A$ ...Abgasemissionen [g]

Anz...Anzahl der Maschinen [-]

P...Mittlere Nennleistung [kW]

Z...Zahl der Betriebsstunden [h]

LF...mittlerer Lastfaktor [-]

EF...Emissionsfaktor [g/kWh]

Die Daten zur Anzahl, Nennleistung und Betriebsstunden der Maschinen sind in Kapitel 8.7.2 angegeben. Der mittlere Lastfaktor LF kann aus der Nennleistung, dem durchschnittlichen Dieserverbrauch in l/h, der Dichte des Dieseltreibstoffs (0,85 kg/l) sowie dem Kraftstoffverbrauch in g/kWh berechnet werden. Als Abgasstufe wird für alle betrachteten Baumaschinen in konservativer Näherung Stufe 3A angenommen. Der Kraftstoffverbrauch von Maschinen mit einer Nennleistung von 75 bis 130 kW bzw. 130 bis 300 kW wird in der Veröffentlichung von *Lambrecht et al.* mit 255 bzw. 250 g/kWh angegeben [Lam-2004, S. 26]. Da diese Zahl nach neueren Informationen die Realität eher überschätzt [Hel-2009, S. 23], wird für alle weiteren Berechnungen ein Wert von 230 g/kWh festgelegt.

$$\text{LF} = (\text{DV} \times 0,85 \times 1000) / (\text{KV} \times P)$$

DV...Dieselverbrauch [l/h]

KV...Kraftstoffverbrauch [g/kWh]

Die nach den beschriebenen Gleichungen bestimmten Lastfaktoren sind der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen. Der Lastfaktor für den Oberwagen der Fahrzeugkräne wird nach [Gün-2014, S. D-3ff.] mit 0,2 angenommen.

Baumaschine	Lastfaktor [-]
Teleskopstapler	0,36
Abbruchbagger	0,78
Verladebagger	0,62
Fahrzeugkran	0,2

Die Gleichung zur Berechnung des Emissionsfaktors lautet:

$$\text{EF} = \text{EF}_B \times \text{DF}_A \times \text{TAF}$$

EF<sub>B</sub>...Basis Emissionsfaktor für neue Motoren im stationären Zyklus

DF<sub>A</sub>...Verschlechterungs Faktor

TAF...Anpassung zwischen stationären und dynamischen Zyklus

Die Basisemissionsfaktoren betragen für den vorliegenden Nennleistungsbereich sowie die gewählte Abgasstufe [Hel-2009, S. 25]:

Abgase	Basis Emissionsfaktoren [g/kWh]
NO <sub>x</sub>	3,2
Partikel	0,27
CO	3,0
HC	0,36

Der Verschlechterungsfaktor DF<sub>A</sub> weißt für die gewählte Abgasstufe den Wert 1 auf. Der Transiente Anpassungsfaktor TAF kann aus folgender Tabelle bestimmt werden [Hel-2014, S. 85]:

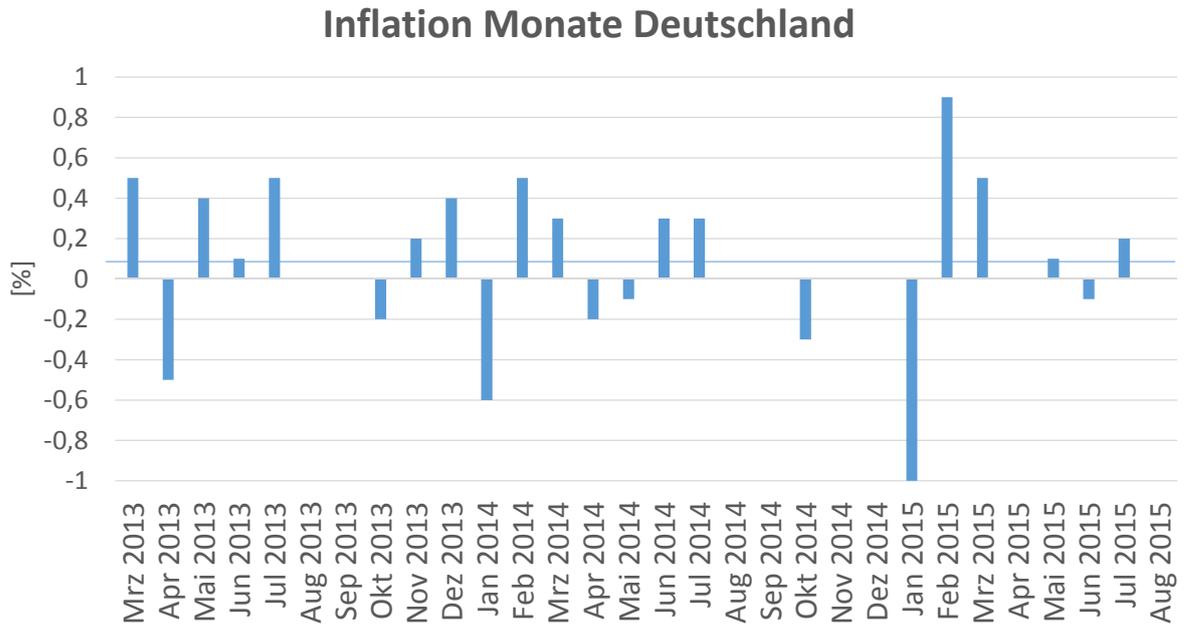
Lastfaktor	Partikel	NO <sub>x</sub>	CO	HC
LF>0,45	1,47	1,04	1,53	1,05
LF<0,25	2,37	1,21	2,57	2,29
0,25<LF<0,45	1,92	1,125	2,05	1,67

Abschließend erhält man die Emissionen der betrachteten Baumaschinen:

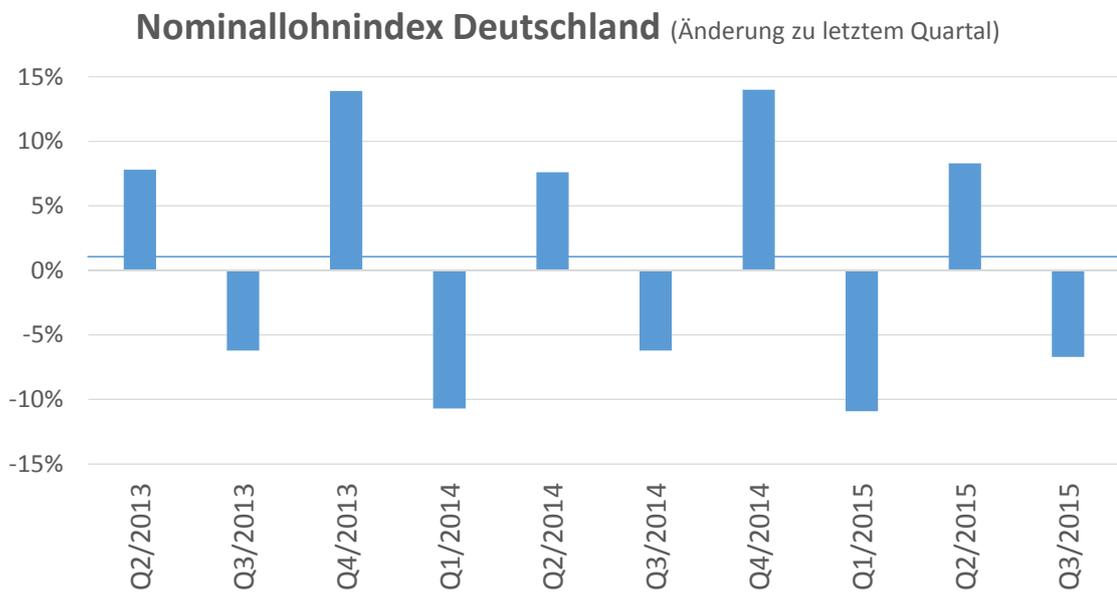
Baumaschine	Partikel [kg/h]	NO <sub>x</sub> [kg/h]	CO [kg/h]	HC [kg/h]	CO <sub>2</sub> [kg/h]
Teleskopstapler	0,024	0,166	0,284	0,027	32,7
Abbruchbagger	0,039	0,493	0,476	0,056	104,8
Verladebagger	0,029	0,246	0,339	0,027	52,4
Fahrzeugkran	0,016	0,099	0,198	0,021	18,3

### 13.2 Daten zu Inflation und Preissteigerungen

Verbraucherpreisindizes (inkl. Veränderungsrate): Deutschland, Monate [Sta-2016]



Nominallohnindex (inkl. Veränderungsrate): Deutschland, Quartale des Berichtszeitraums [Sta-2016]



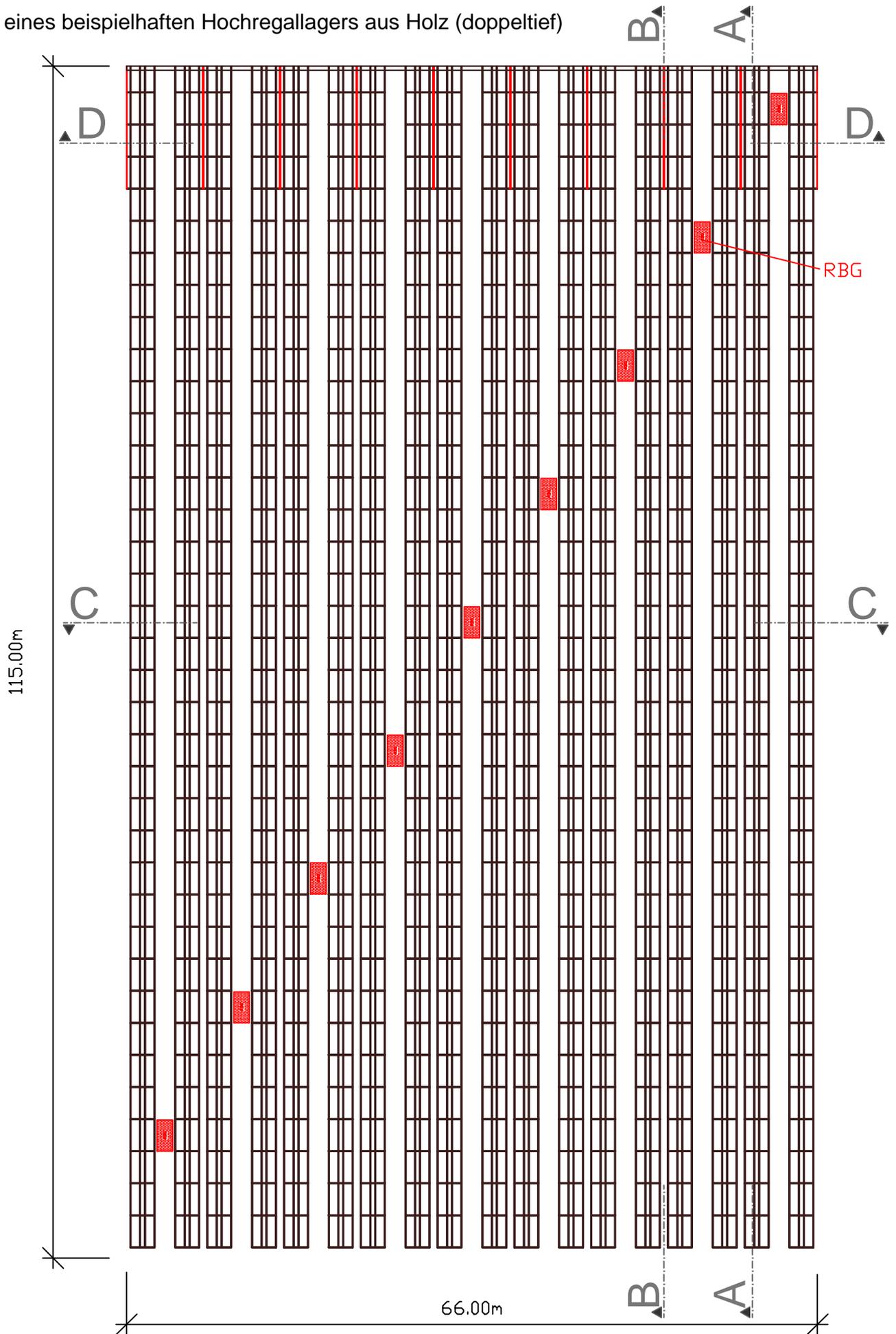


**Konstruktionskatalog**

*Peter Glaser*



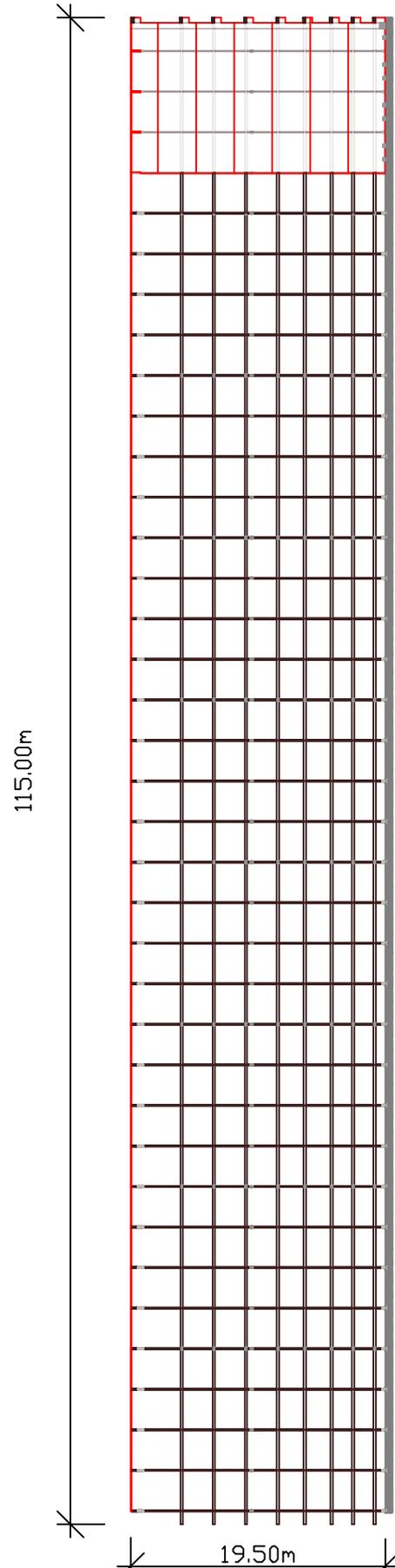
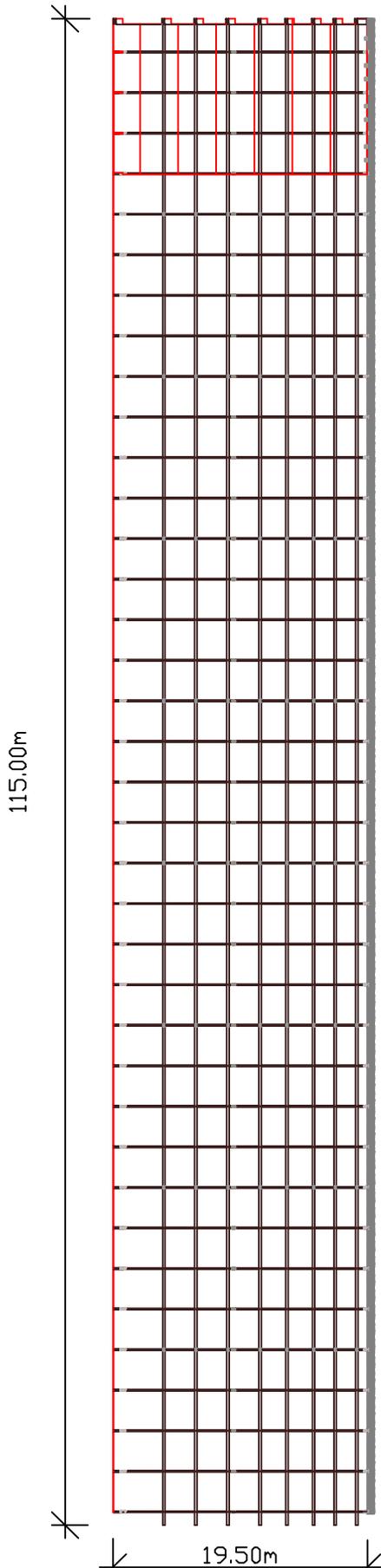
Grundriss eines beispielhaften Hochregallagers aus Holz (doppeltief)  
M 1:500



Lagerlängsrichtung mit Blick auf die Regalfächer (Dreiplatzlagerung) und Längsaussteifungswände  
M1:500

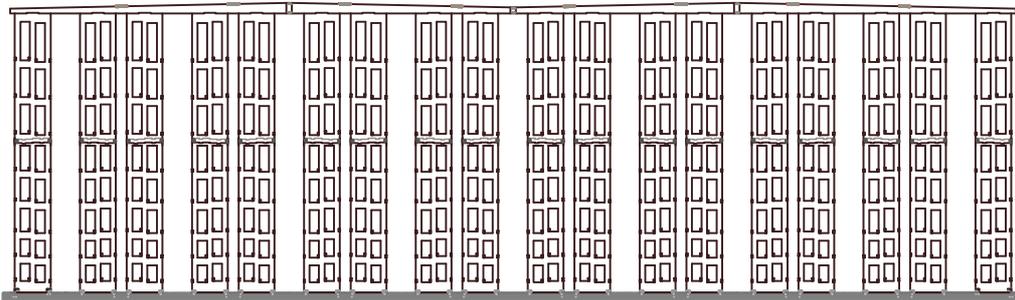
Schnitt A - A

Schnitt B - B

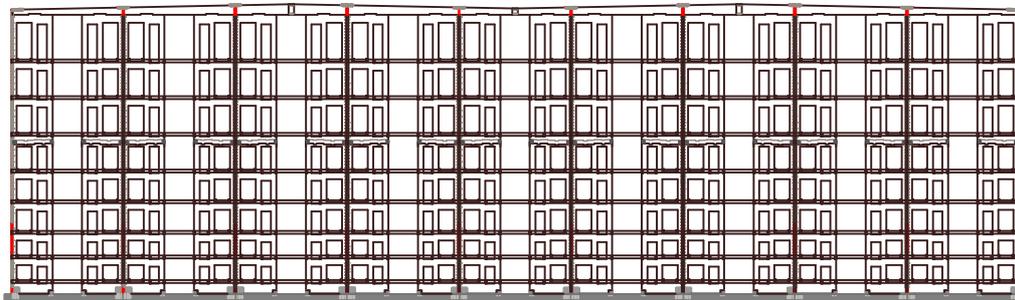


Lagerquerrichtung (Querrahmen) mit Blick auf die Regalgassen der Steher (Lager doppeltief)  
M1:500

Schnitt C - C (nicht im Bereich der Längsaussteifungsverbände)

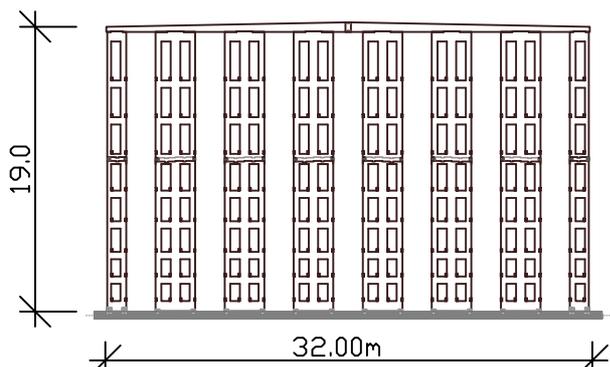


Schnitt D - D (im Bereich der Längsaussteifungsverbände)

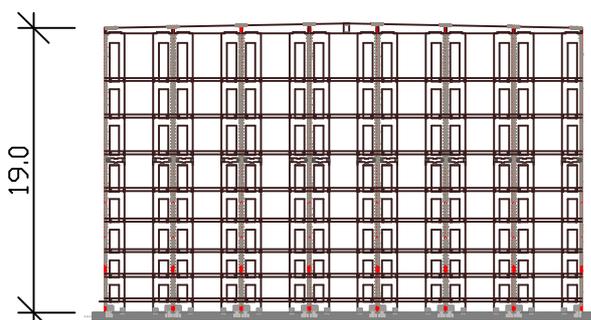


Beispiel Lagerquerrichtung (Querrahmen) mit Blick auf die Regalgassen der Steher (Lager einfachtief)  
M1:500

Schnitt (nicht im Bereich der Längsaussteifungsverbände)

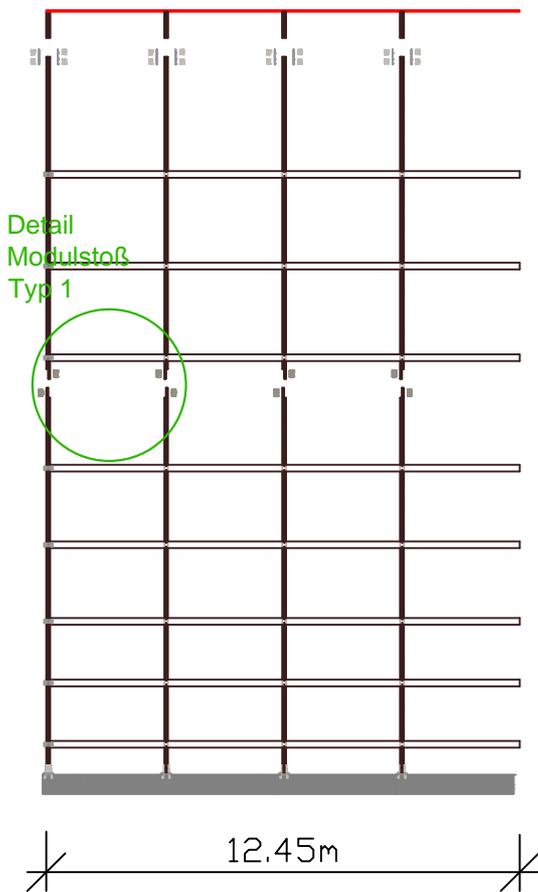


Schnitt (im Bereich der Längsaussteifungsverbände)



Aufbau der Module (Typ 1) mit Integration von Steherstößen, M 1:200

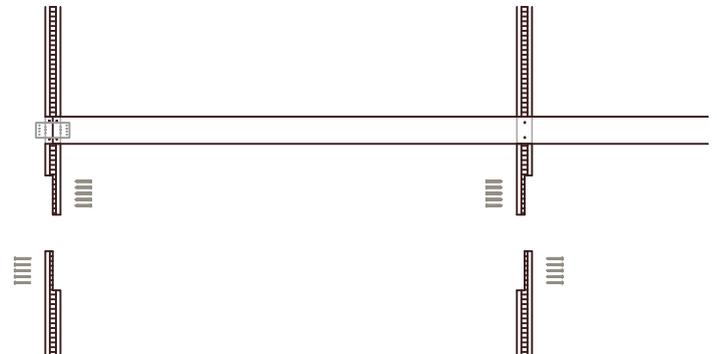
Ansicht auf die Palettenfächer (Modullänge)



Draufsicht Module mit und ohne Längsaussteifungswand Typ 1

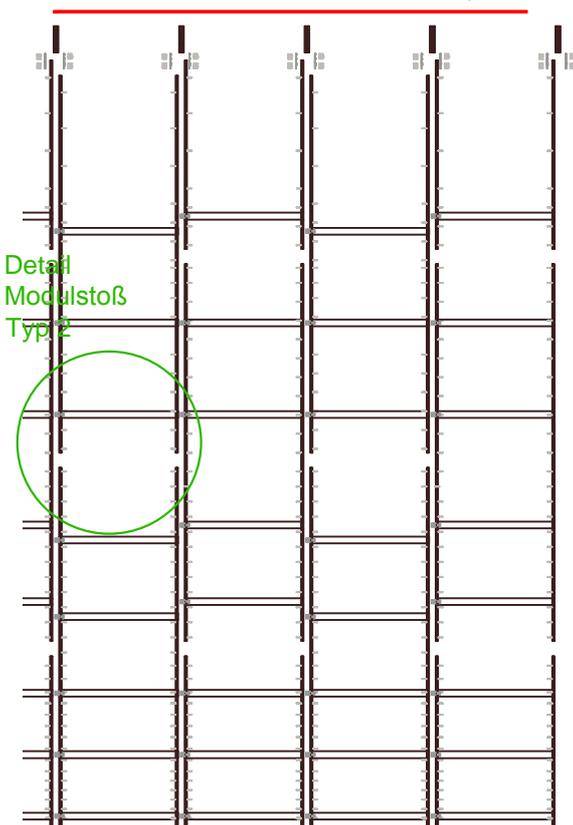


Detail Modulstoß Typ 1, M 1:20

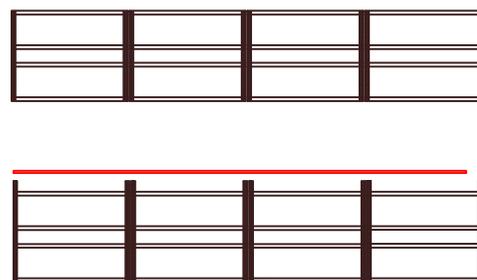


Aufbau der Module (Typ 2) mit Integration von Steherströßen, M 1:200

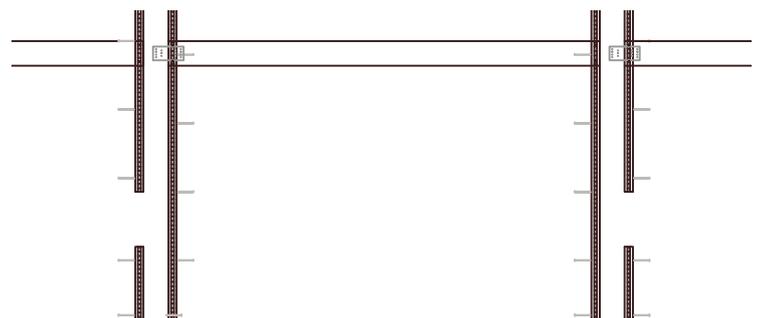
Ansicht auf die Palettenfächer (Modullänge)



Draufsicht Module ohne und mit Längsaussteifungswand Typ 2, Explosionszeichnungen



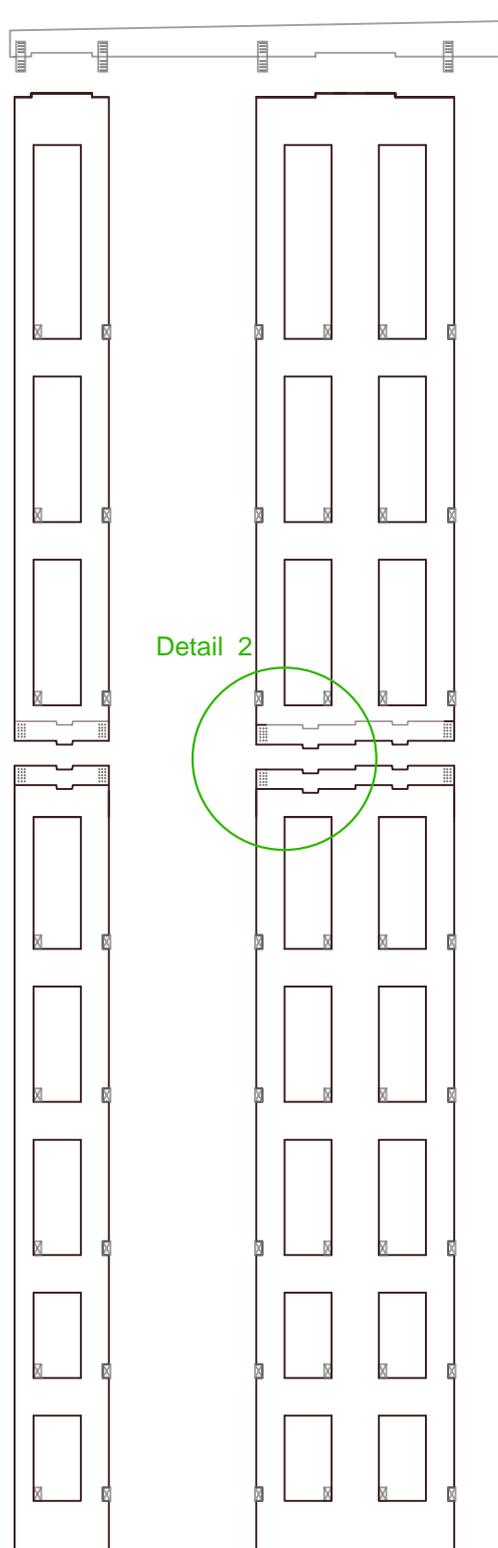
Detail Modulstoß Typ 1, M 1:20



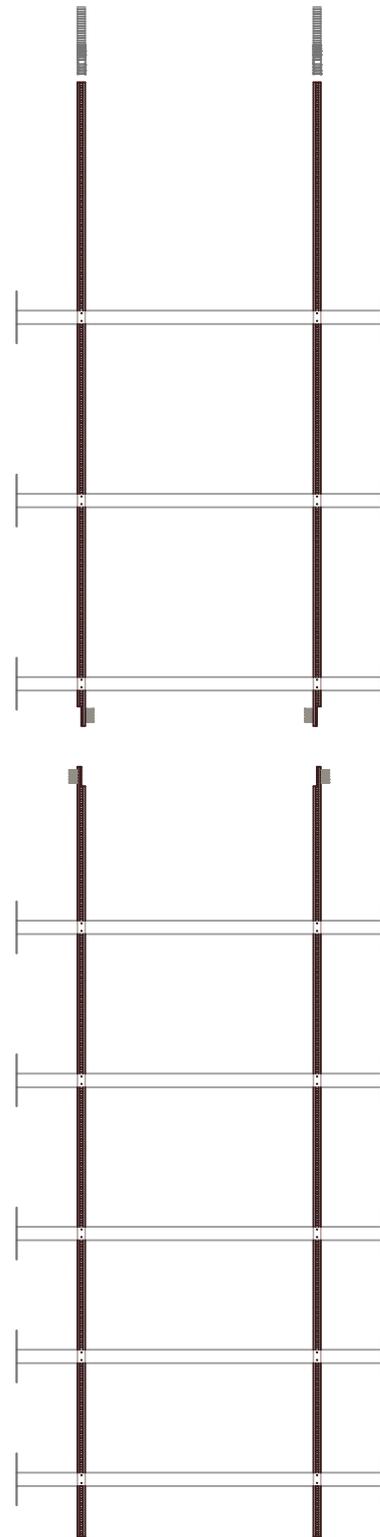
Darstellung der Bauteilaufbauten nach Kapitel 6

Steher Variante 1, M 1:100

Ausschnitt Querrichtung



Ausschnitt Lagerlängsrichtung



Materialien:

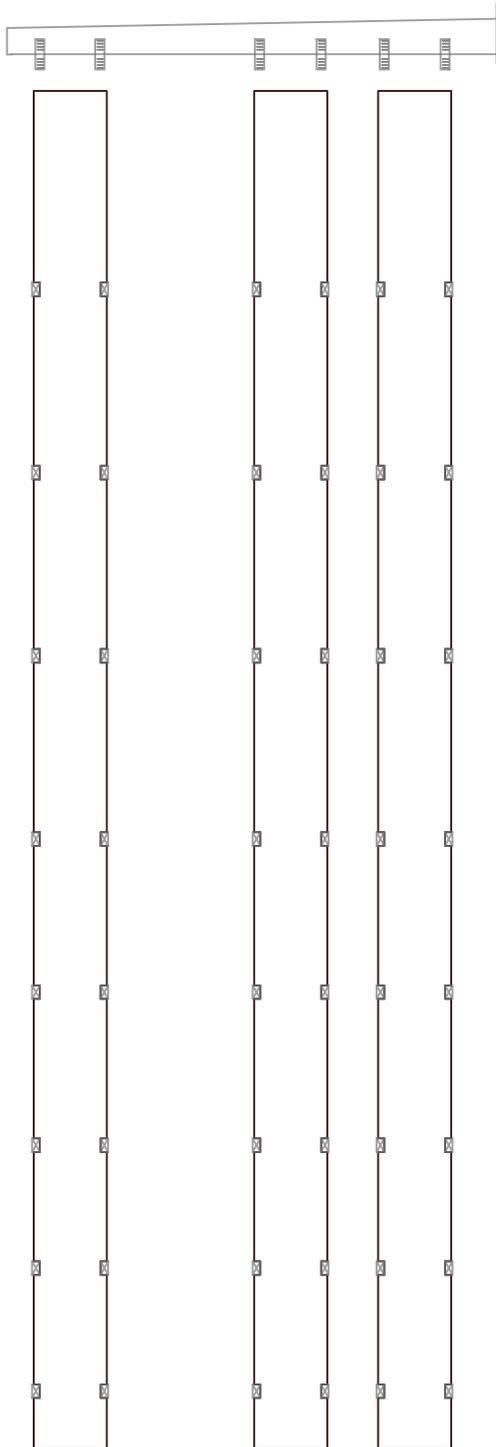
Steher: BSP

Palettenträger: BSH, FSH oder BauBuche

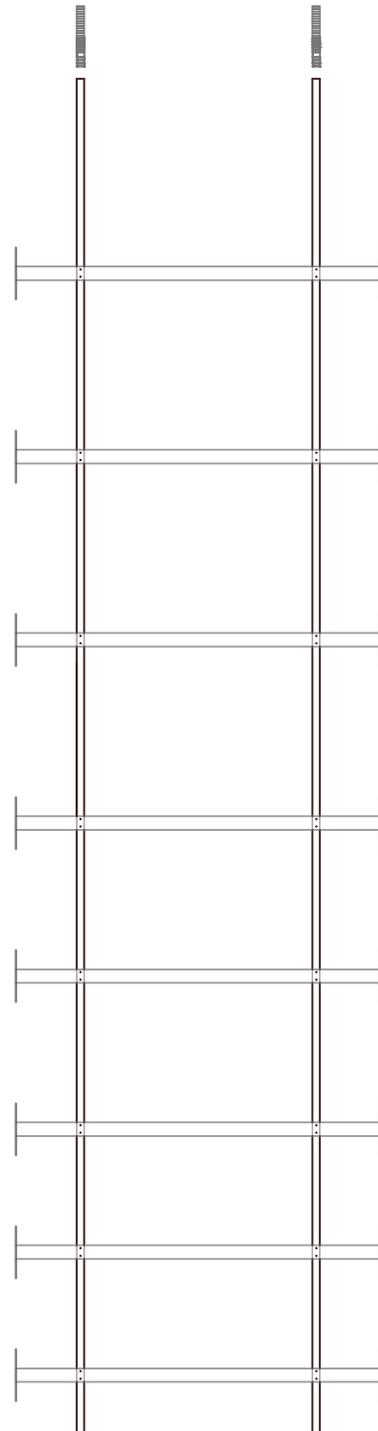
Darstellung der Bauteilaufbauten nach Kapitel 6

Steher Variante 2, M 1:100

Ausschnitt Querrichtung



Ausschnitt Lagerlängsrichtung

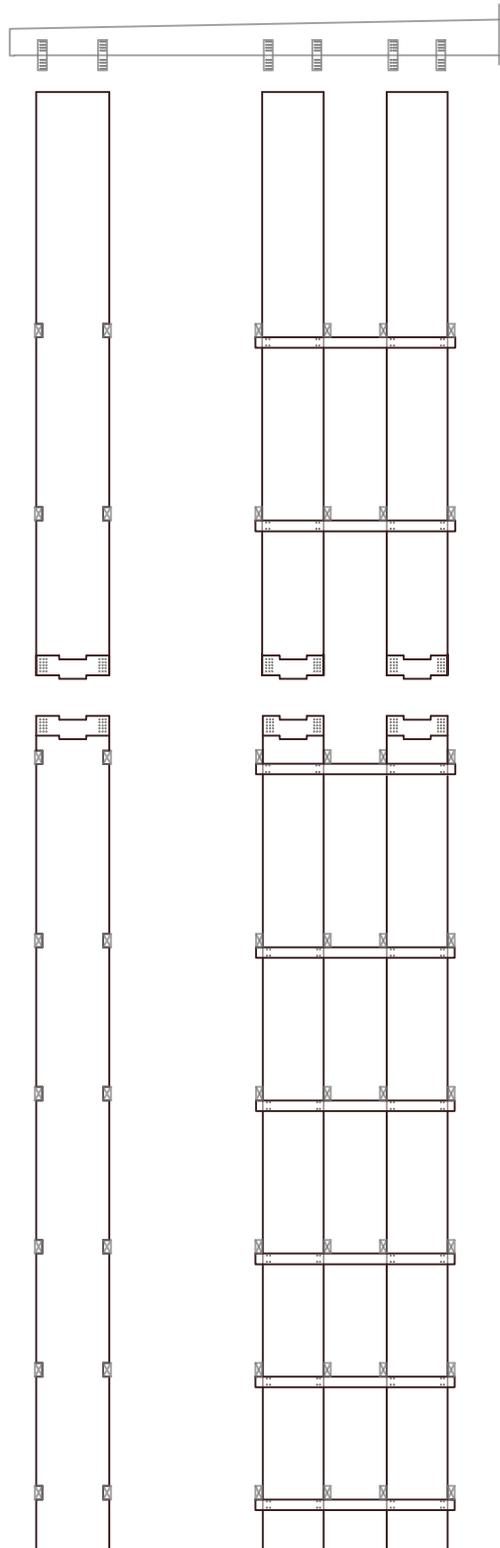


Materialien:  
Steher: BSH, BauBuche  
Palettenträger: BSH, FSH oder BauBuche

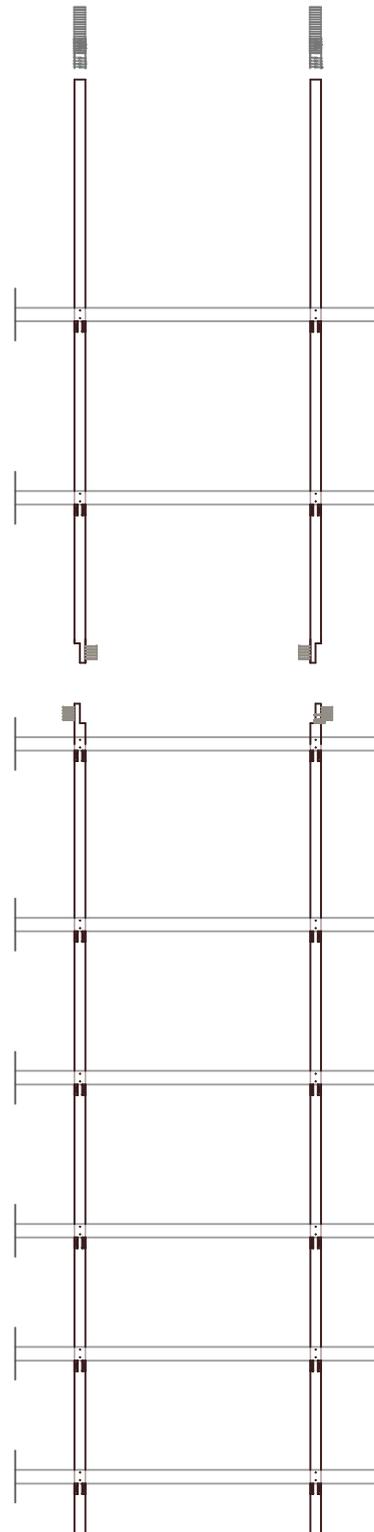
Darstellung der Bauteilaufbauten nach Kapitel 6

Steher Variante 3, M 1:100

Ausschnitt Querrichtung



Ausschnitt Lagerlängsrichtung

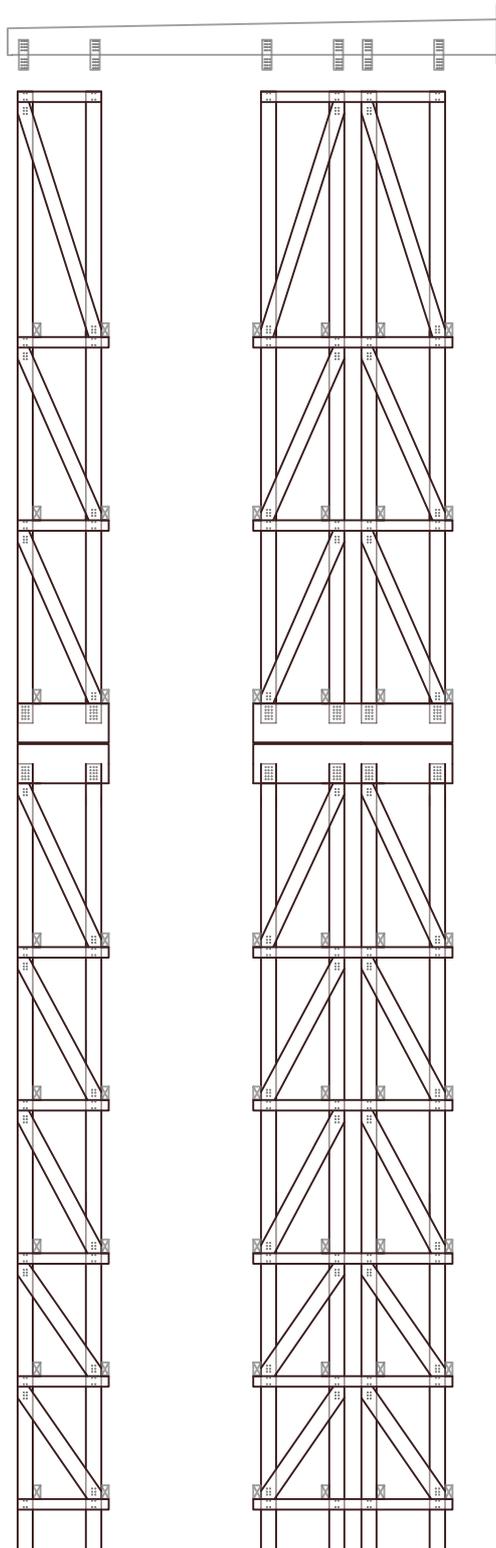


Materialien:  
Steher: BSH, BauBuche  
Koppelträger: Mehrschichtplatten, FSH,  
BauBuche, Flachstahl  
Palettenträger: BSH, FSH oder BauBuche

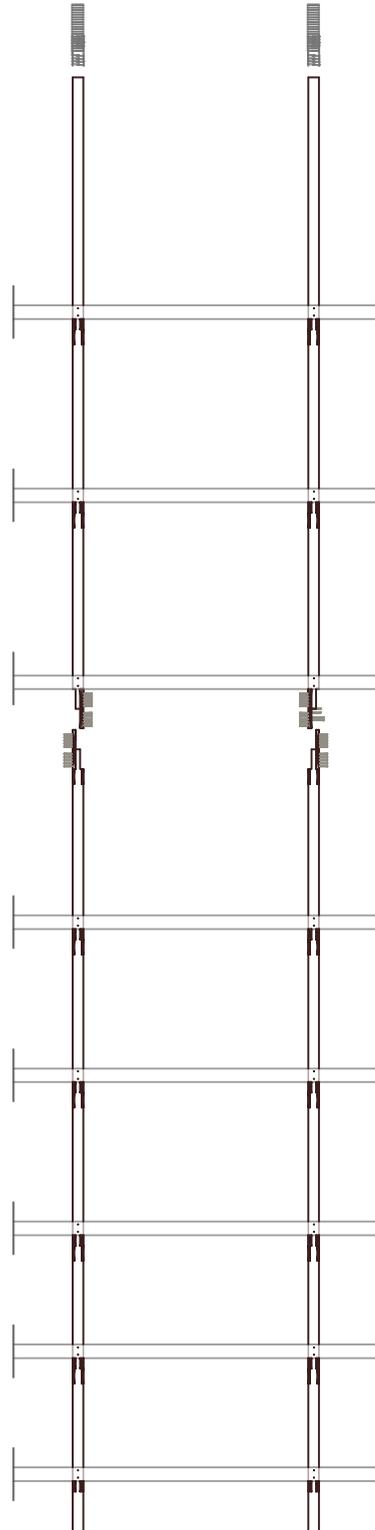
Darstellung der Bauteilaufbauten nach Kapitel 6

Steher Variante 4, M 1:100

Ausschnitt Querrichtung



Ausschnitt Lagerlängsrichtung

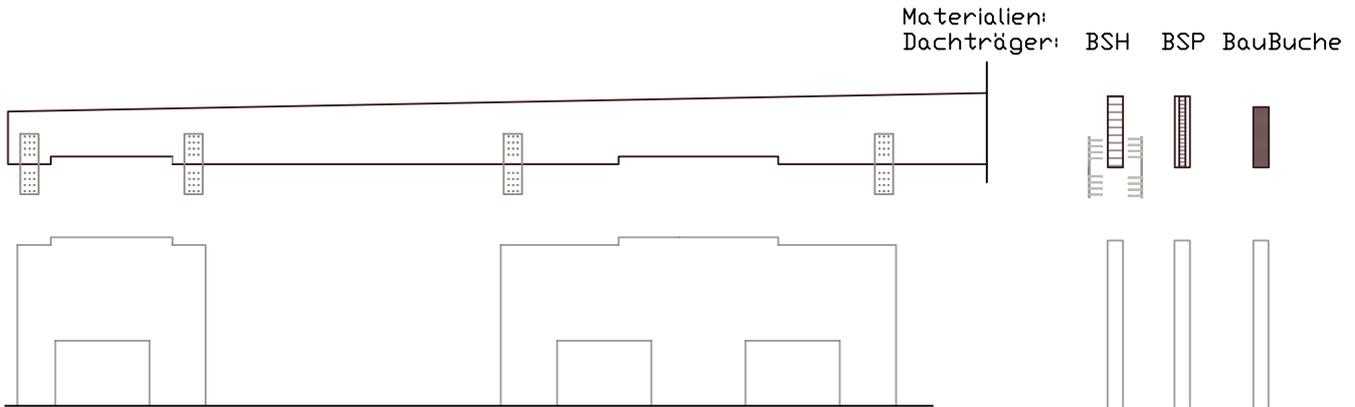


Materialien:  
Steher: BSH, BauBuche  
Koppelträger/  
Diagonalen: Mehrschichtplatten, FSH,  
BauBuche, Flachstahl  
Palettenträger: BSH, FSH oder BauBuche

Darstellung der Bauteilaufbauten nach Kapitel 6

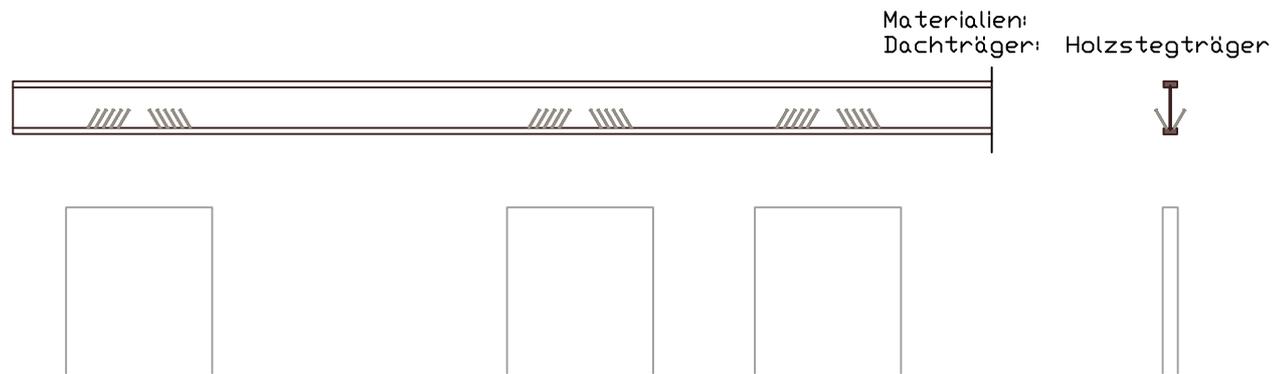
Dachträger Variante 1, M 1:50  
Ausschnitt Querrichtung

Detail Auflagerung  
Lagerlängsrichtung



Dachträger Variante 2, M 1:50  
Ausschnitt Querrichtung

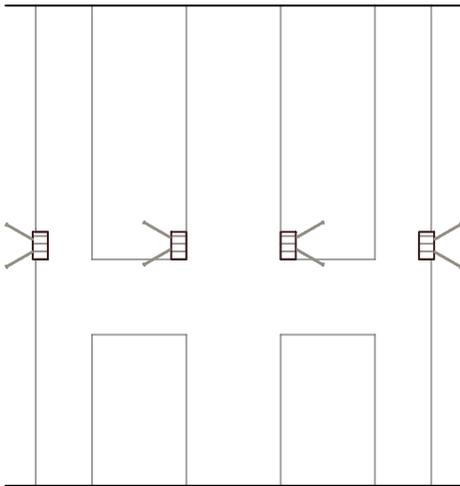
Detail Auflagerung  
Lagerlängsrichtung



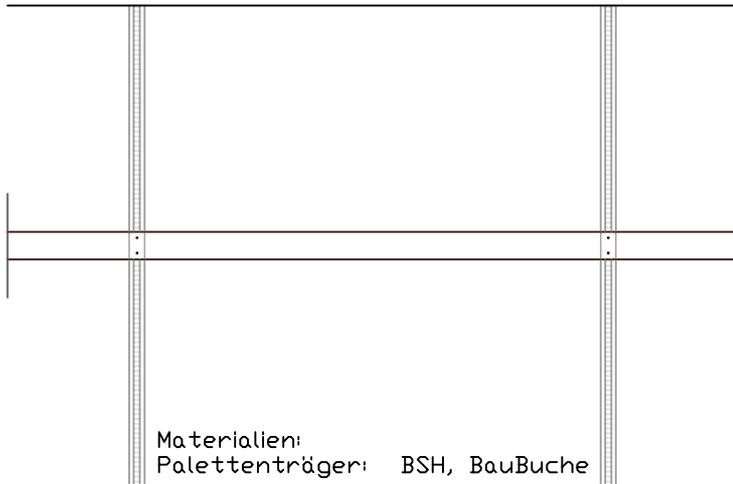
Darstellung der Bauteilaufbauten nach Kapitel 6

Palettenträger Variante 1, M 1:50

Ausschnitt Querrichtung

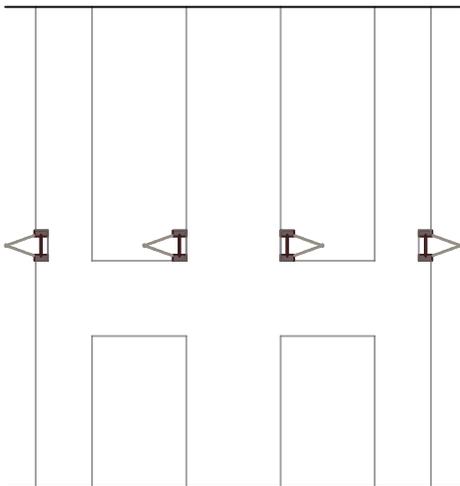


Ausschnitt Lagerlängsrichtung Regalfach für Dreiplatzlagerung

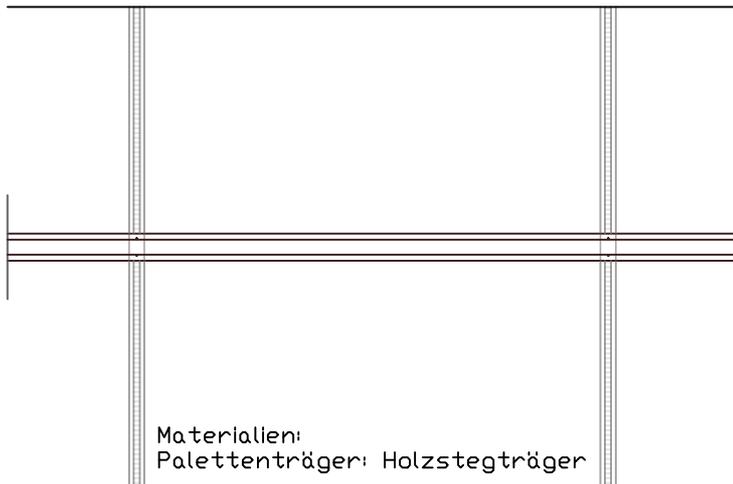


Palettenträger Variante 2, M 1:50

Ausschnitt Querrichtung



Ausschnitt Lagerlängsrichtung Regalfach für Dreiplatzlagerung

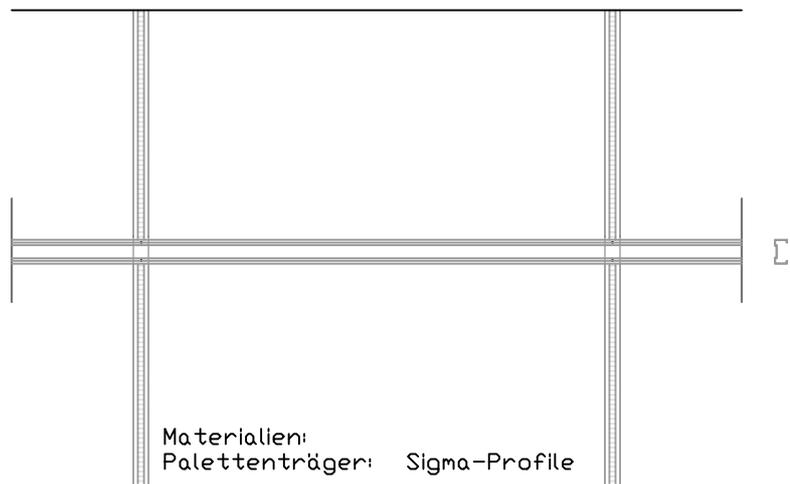


Palettenträger Variante 4

Skizze Sigma-Profil



Ausschnitt Lagerlängsrichtung Regalfach für Dreiplatzlagerung, M 1:50



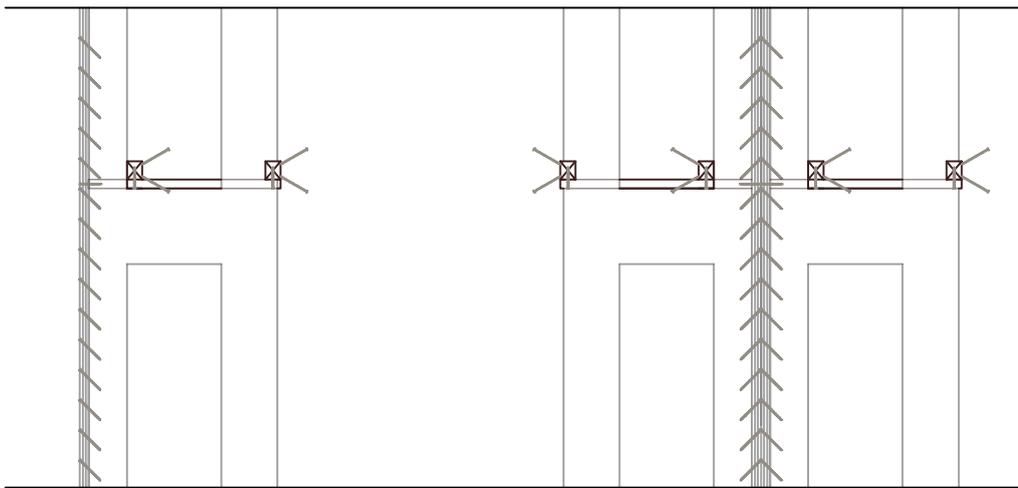
Darstellung der Bauteilaufbauten nach Kapitel 6

Palettenträger Variante 3, einfachtief

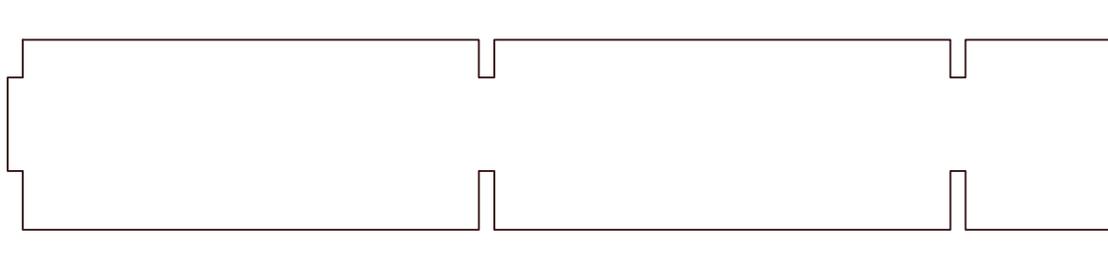
Querschnitt: System aus nachgiebig verbundener horizontaler Platte und Palettenträger M 1:10



Ausschnitt Querrichtung mit Längsaussteifungsfeld, M 1:50



Zuschnitt horizontale Platten (Ausschnitt), M 1: 50

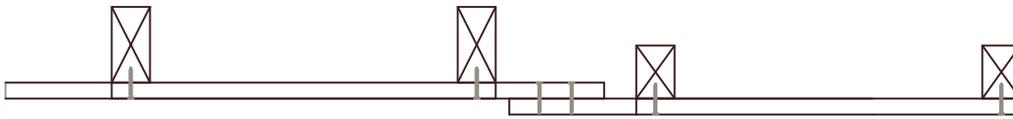


Materialien:  
horizontale Platten: Mehrschichtplatten,  
BSP, FSH, BauBuche

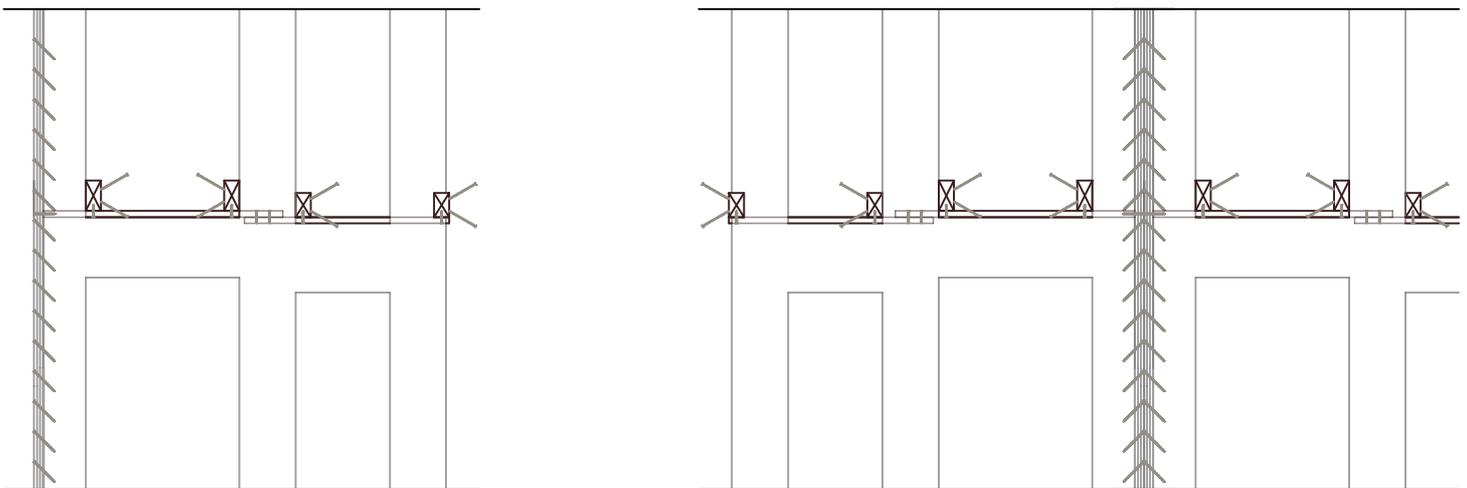
Darstellung der Bauteilaufbauten nach Kapitel 6

Palettenträger Variante 3, doppeltief

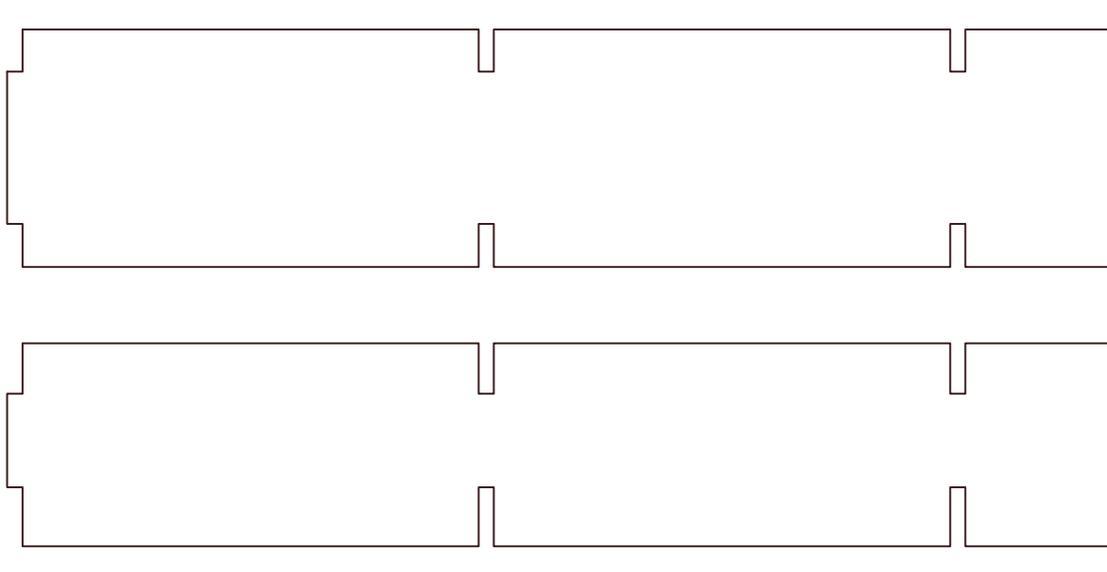
Querschnitt: System aus nachgiebig verbundener horizontaler Platte und Palettenträger M 1:20



Ausschnitt Querrichtung mit Längsaussteifungsfeld, M 1:50



Zuschnitt horizontale Platten - hintere und vordere Reihe (Ausschnitt), M 1: 50



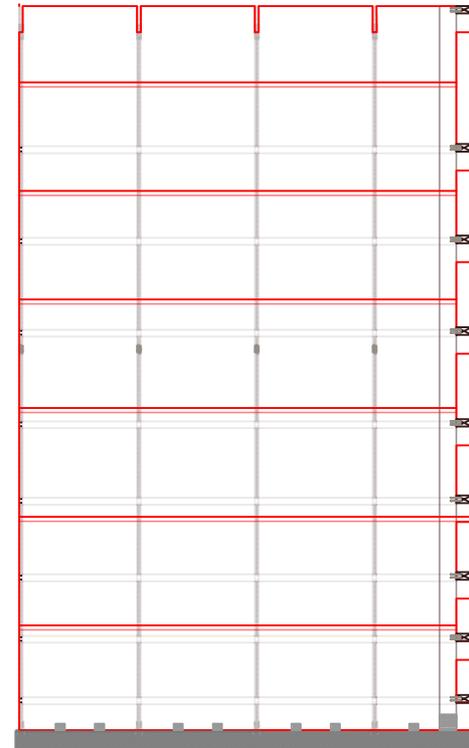
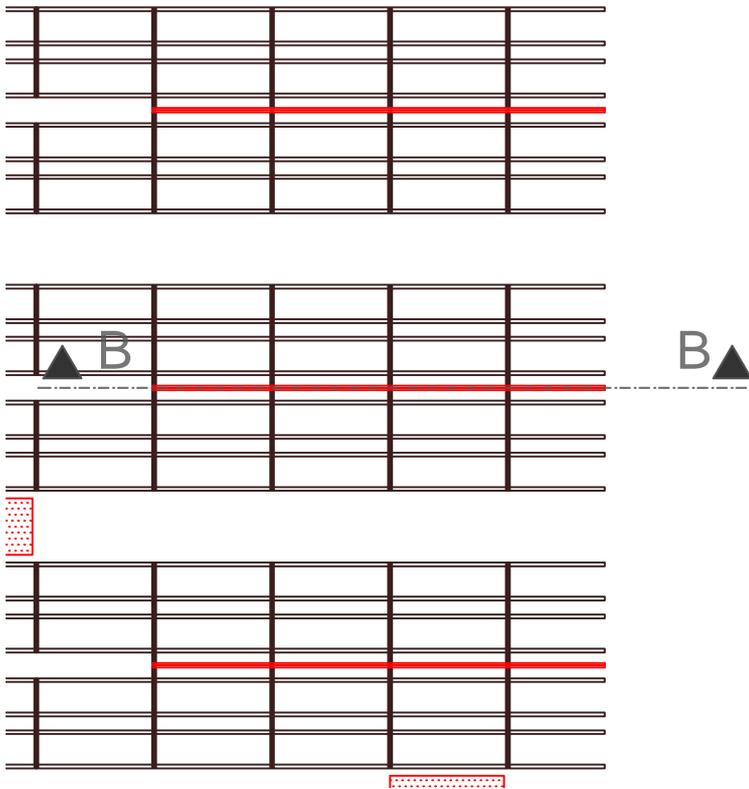
Materialien:  
horizontale Platten: Mehrschichtplatten,  
BSP, FSH, BauBuche

Darstellung der Bauteilaufbauten nach Kapitel 6

Längsaussteifungssysteme Variante 1, M 1:200

Ausschnitt Grundriss im Bereich der Längsaussteifung

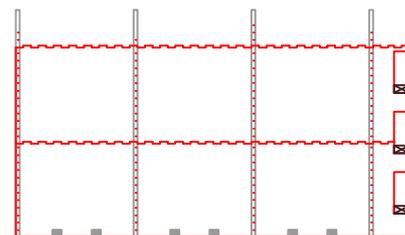
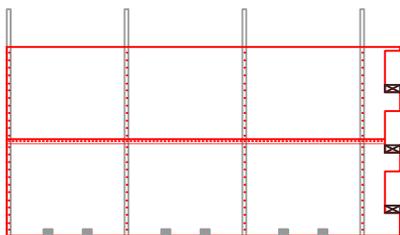
Schnitt E -E der mit Ansicht der Längsaussteifungsplatten



Ausbildung der horizontalen Plattenstöße zur Kraftübertragung, M 1:200

Ausschnitt Lagerlängsrichtung, verschraubter Plattenstoß

Ausschnitt Lagerlängsrichtung, verzahnter Plattenstoß



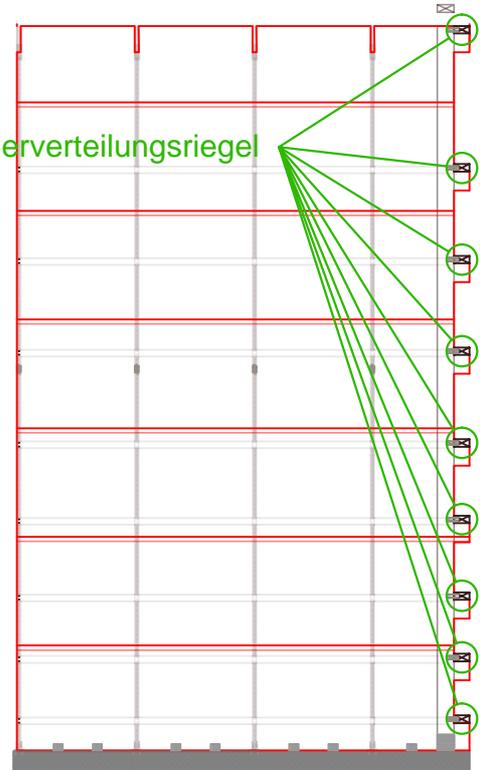
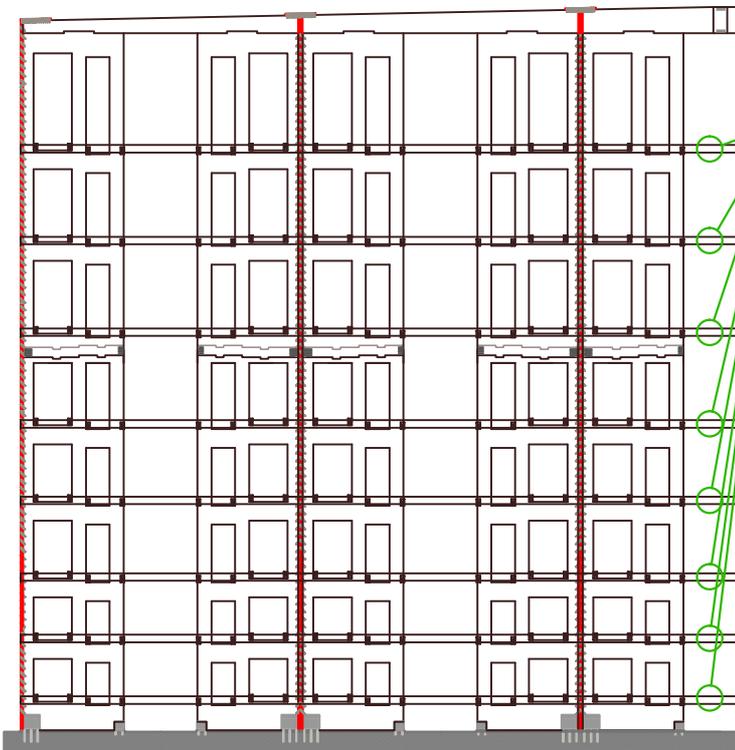
Materialien:  
Längsaussteifungsplatten: BSP

Darstellung der Bauteilaufbauten nach Kapitel 6

Längsaussteifungssysteme Variante 1a, M 1:200

Ausschnitt der Lagerquerrichtung mit  
mit Querverteiler für die Lasten am Lagerende

Ansicht Längsaussteifungsplatten mit  
Querverteilungsriegeln am Lagerende



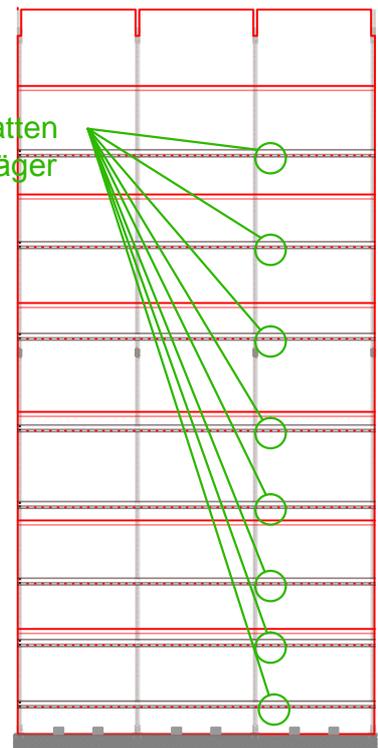
Längsaussteifungssysteme Variante 1b, M 1:200

Ausschnitt der Lagerquerrichtung mit  
mit horizontalen Scheiben im Fachbereich, vgl.  
Palettenträger 3

Ansicht horizontale Platten und Palettenträger  
in Lagerlängsrichtung

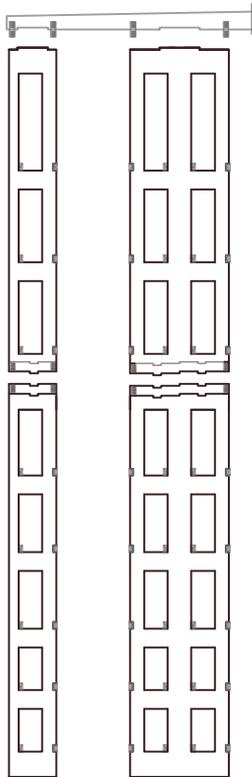


horizontale Platten  
und Palettenträger

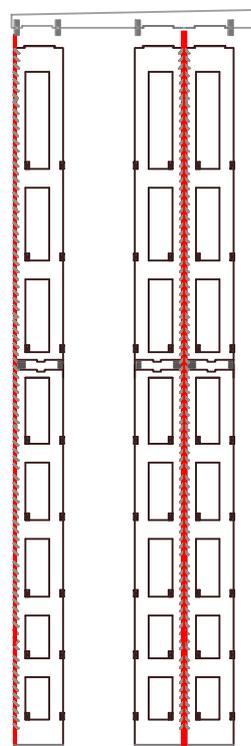


Module einfachtiefe Lager mit Stehervariante 1

Standard Randsteher und Mittelsteher, M 1:200  
Ausschnitt Querrichtung

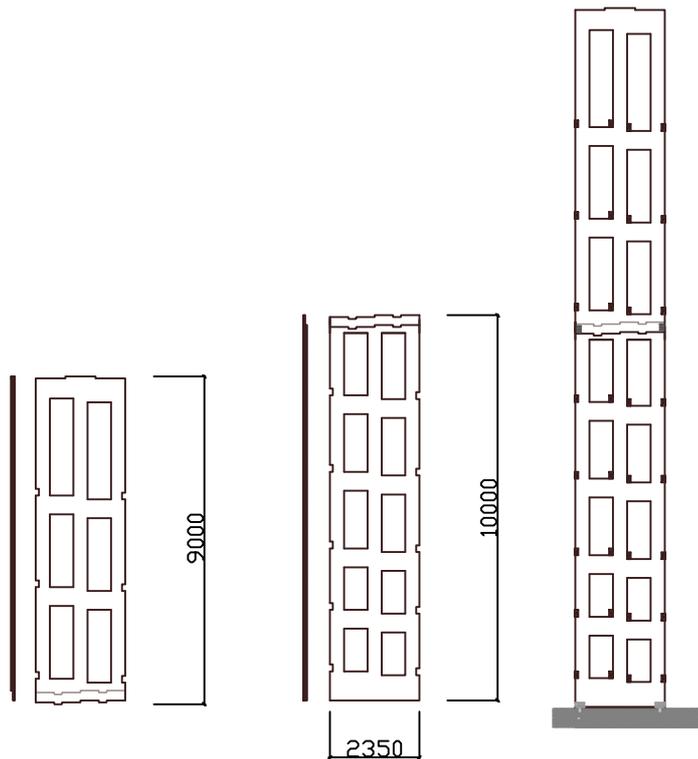


Steher im Bereich der Längsaussteifungsplatten  
(durchlaufende Platten, mit angrenzendem  
Modul verschraubt, M 1:200  
Ausschnitt Querrichtung

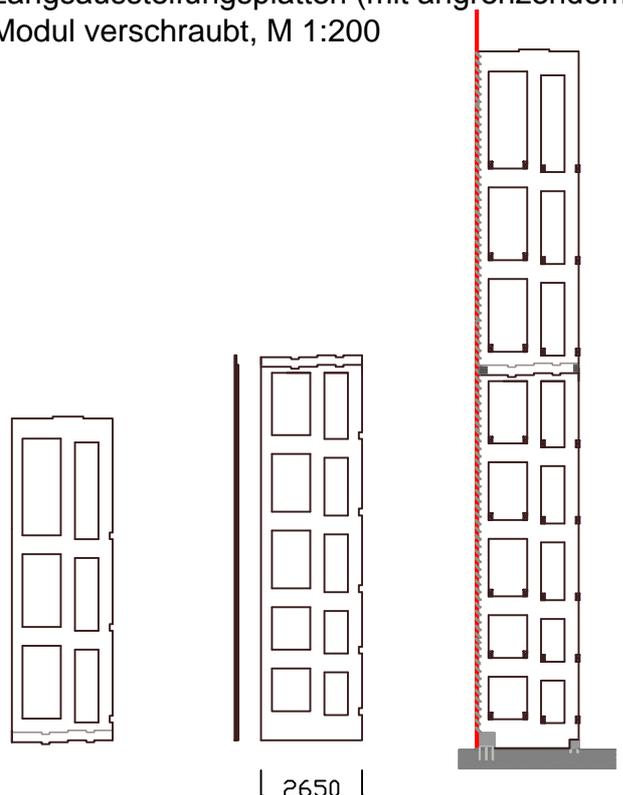


Module doppeltiefe Lager mit Stehervariante 1

Standard Randsteher und Mittelsteher, M 1:200  
Ausschnitt Querrichtung

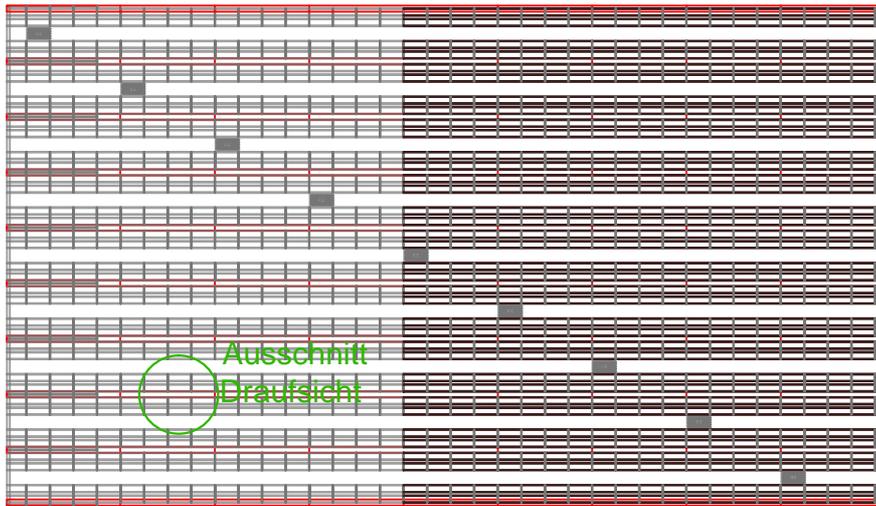


Bauteile und gefügter Steher im Bereich der  
Längsaussteifungsplatten (mit angrenzendem  
Modul verschraubt, M 1:200

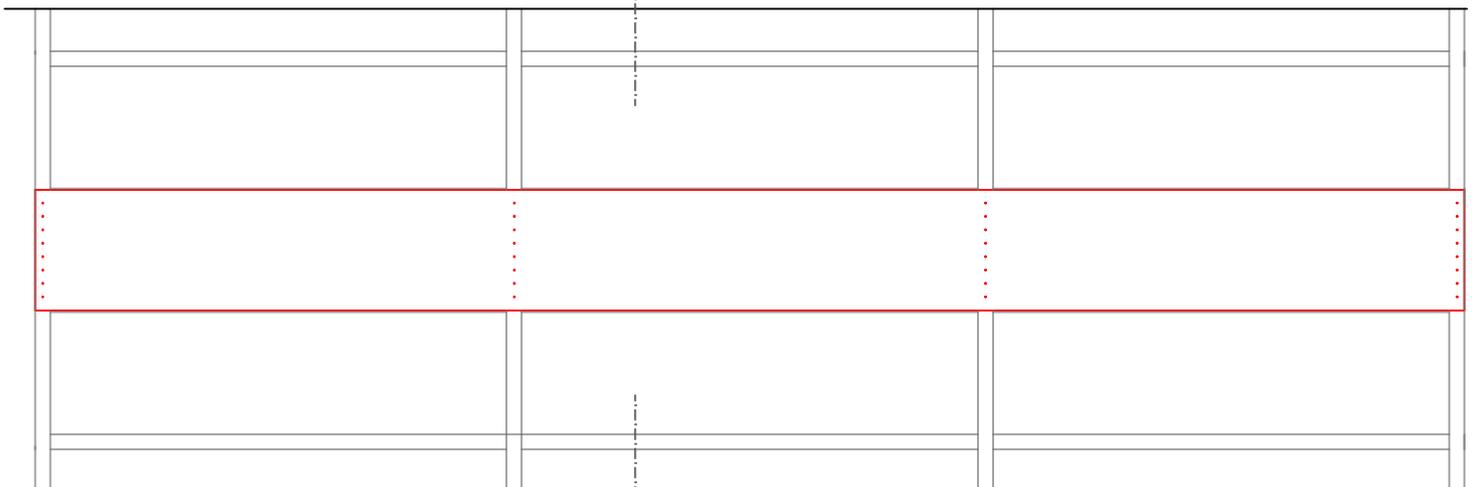


Darstellung der Bauteilaufbauten nach Kapitel 6

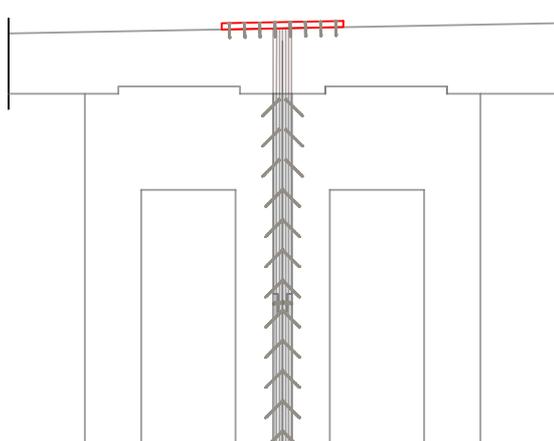
Draufsicht Hochregallager mit Anordnung der Koppelträger/Lastensammler, M 1:1000



Ausschnitt Draufsicht  
Koppelträger/Lastensammler, M 1:50



Schnitt F-F  
Koppelträger/Längsaussteifung, M 1:50

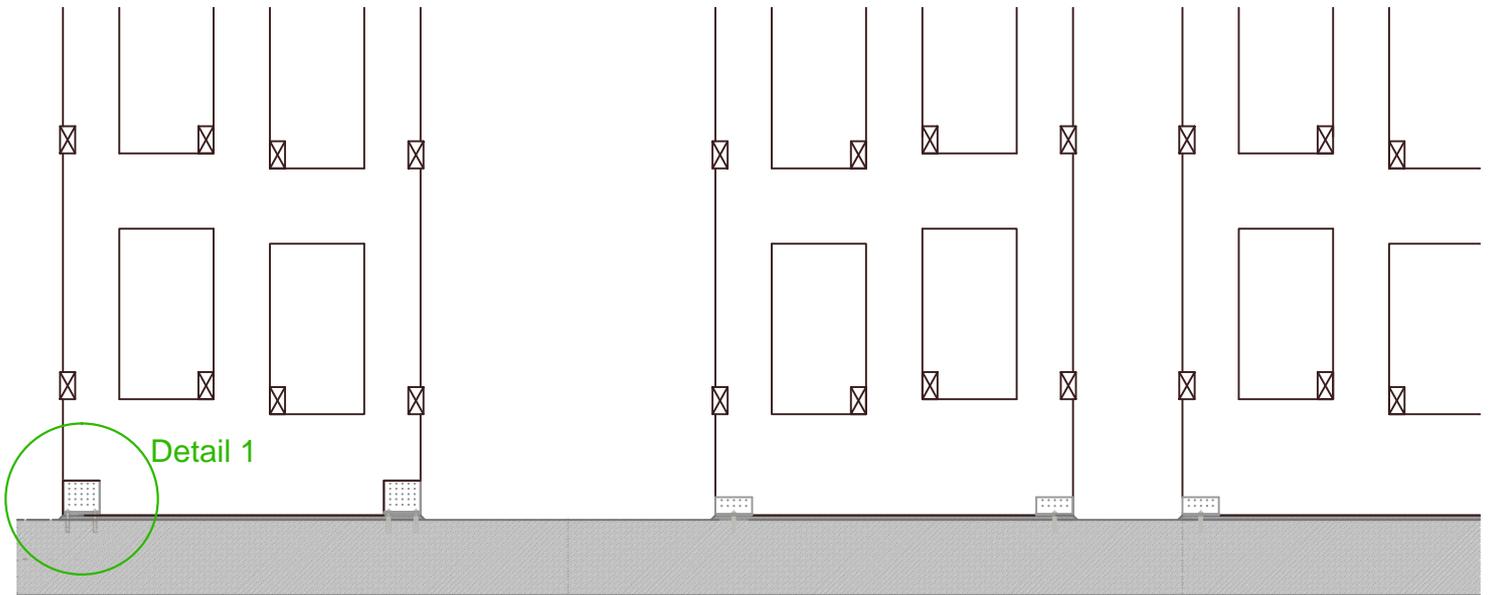


Materialien:  
Kopplungsträger/  
Lastensammler: Mehrschichtplatten, FSH, BauBuche

Mögliche Ausbildung von Verbindungen

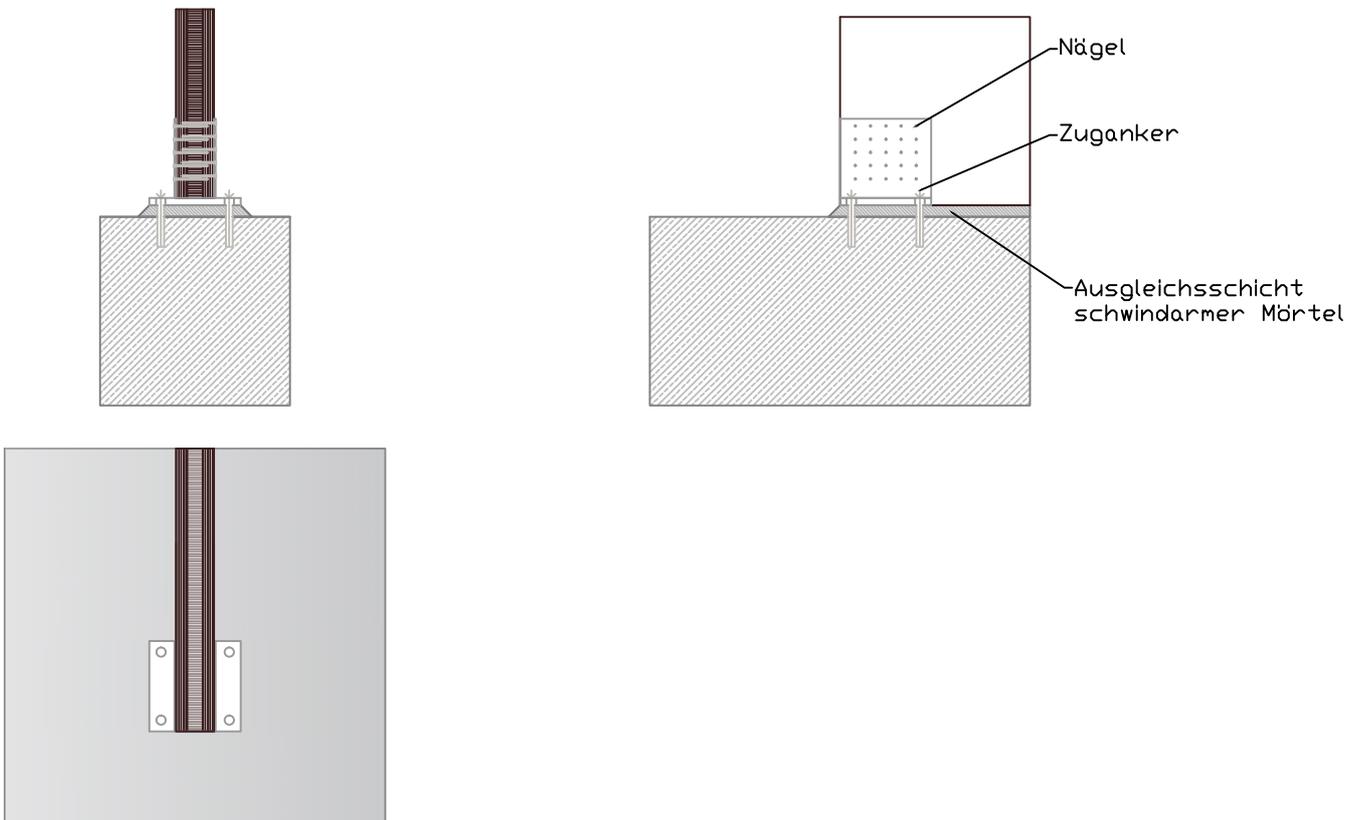
Verbindung Steher-Bodenplatte

Auschnitt Querrichtung eines doppeltiefen Hochregallagers M 1:50



Detail 1

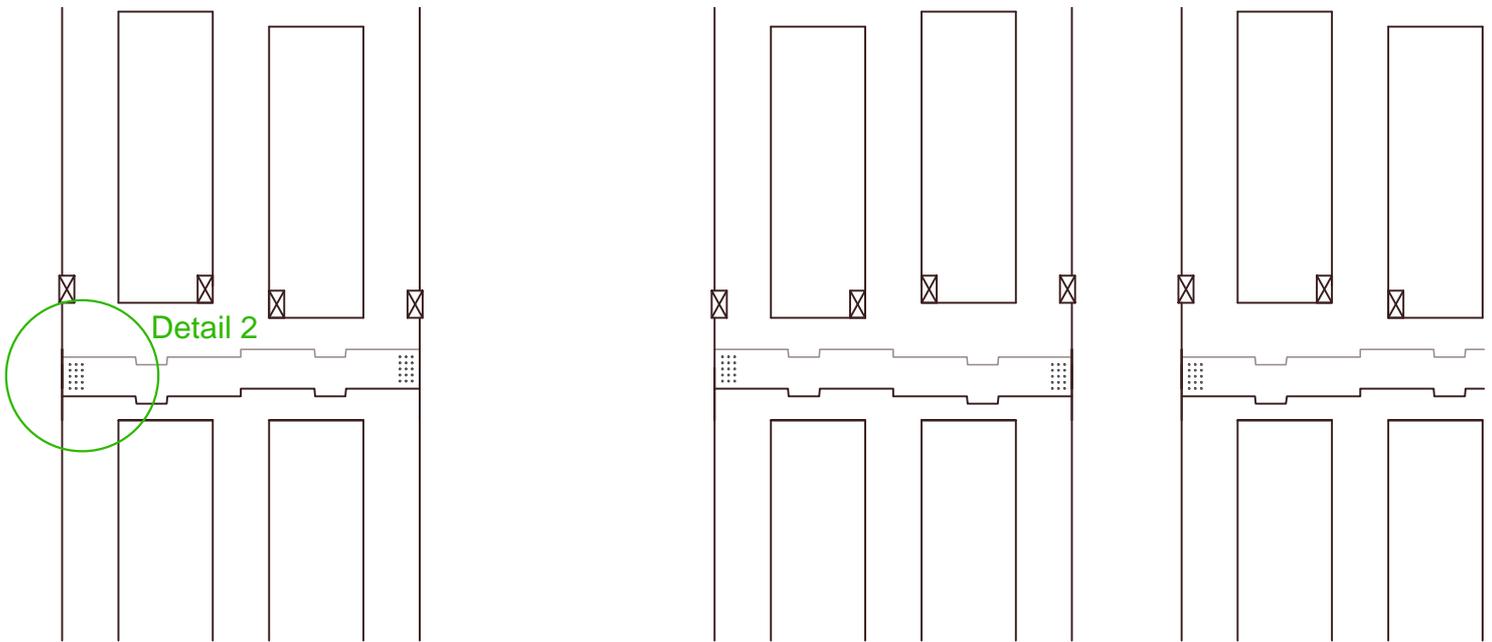
Verbindung Randsteher-Bodenplatte als zweiseitige Stahlblech-Holz-Verbindung mit Nägeln M 1:20



Mögliche Ausbildung von Verbindungen

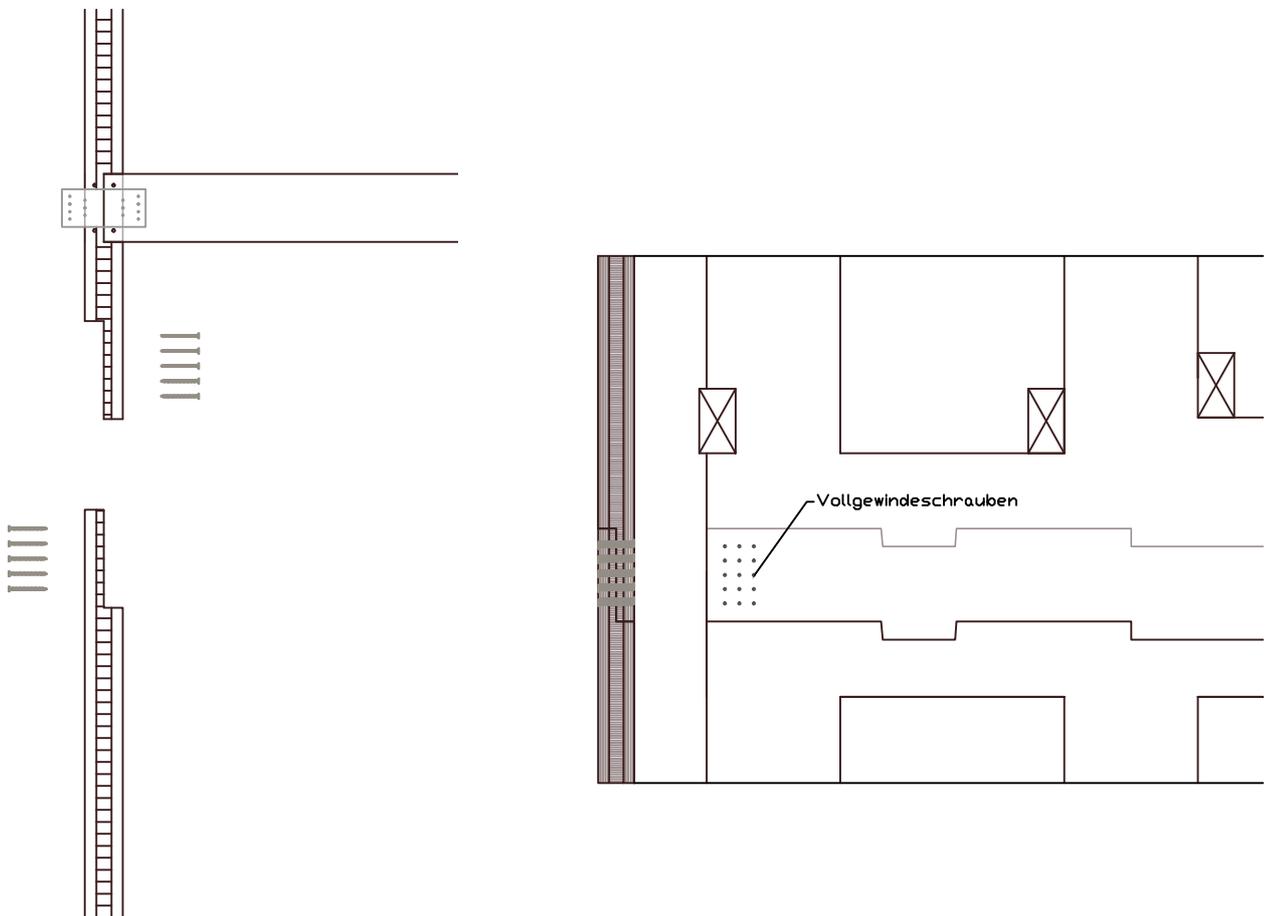
Verbindung Steher-Steher

Auschnitt Querrichtung eines doppeltiefen Hochregallagers M 1:50



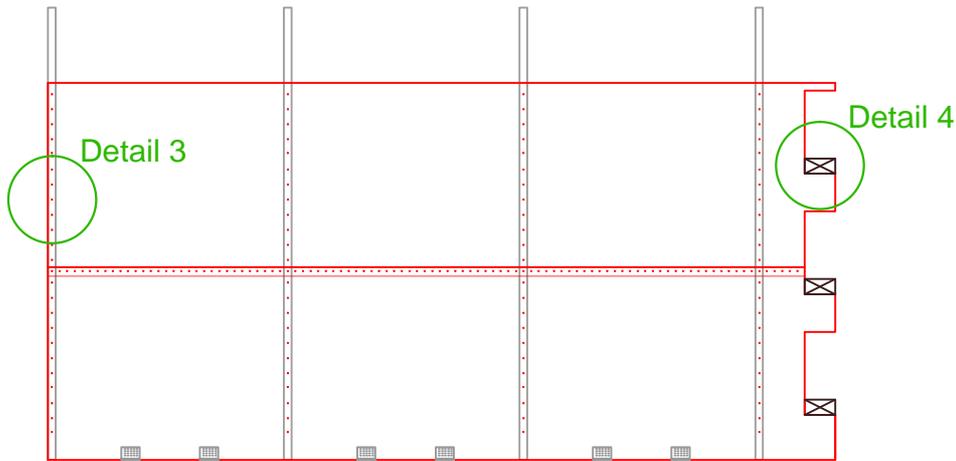
Detail 2

Verbindung Steher-Steher als gerade Verblattung mit Vollgewindeschrauben M 1:20

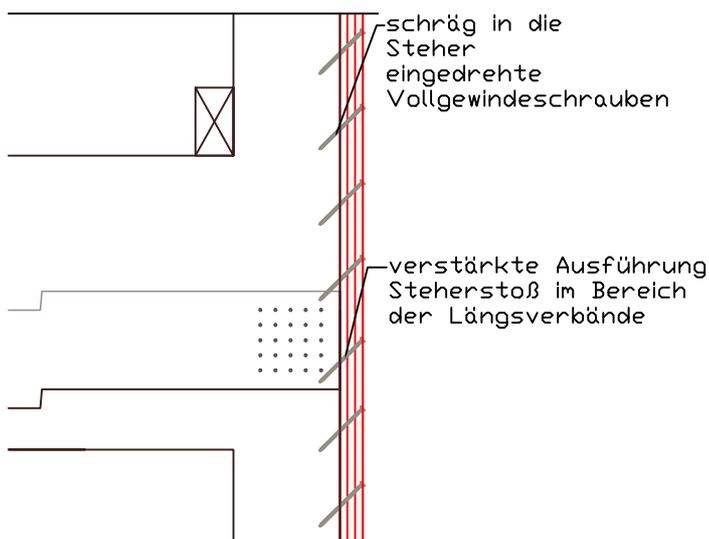


Mögliche Ausbildung von Verbindungen

Verbindung Längsaussteifung mit Querverteilungsriegel am Lagerende  
 Ausschnitt Längsrichtung mit Aussteifungsscheibe M 1:100



Detail 3  
 Verbindung Steher-Steher und Steher  
 Längsaussteifungswand mit Vollgewindeschrauben  
 M 1:20



Detail 4  
 Anschluss Querverteilungsriegel an Palettenträger  
 und Längsaussteifungswände mit schrägen  
 Vollgewindeschrauben (Bsp. Anschluss an  
 Längsaussteifungswand) M 1:20

