

Hochregallager werden seit den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts zur platzsparenden Lagerung von Gütern verwendet. Sie werden derzeit nahezu ausschließlich aus Stahlprofilen hergestellt. Seit dem Jahr 2005 wird jedoch auch erfolgreich der nachwachsende Rohstoff Holz für den Bau von Hochregallagern verwendet. Ein Forschungsprojekt der Technischen Universität München befasst sich mit den Vor- und Nachteilen der Holzbauweise und versucht diese für die breite Masse nutzbar zu machen.

POTENZIALE VON HOCHREGALLAGERN AUS HOLZ

Dipl.-Ing. Christopher Ludwig, Peter Glaser M.Sc., Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W. Günthner, Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Einleitung

Das Thema Nachhaltigkeit hat mittlerweile einen sehr hohen Stellenwert in unserer Gesellschaft. Aus diesem Grund ist die Industrie daran interessiert, die Umweltauswirkungen ihrer Maschinen und Anlagen zu reduzieren. Dieser Trend hat auch die Intralogistik erreicht. Hier werden große Anstrengungen unternommen, um die Energieeffizienz zu verbessern sowie den Kohlenstoffdioxid-Fußabdruck zu senken. In der Lagertechnik versucht man dies seit einigen Jahren durch den Einsatz eines neuen Werkstoffs: Holz. So wurden europaweit bereits sechs Hochregallager aus dem nachwachsenden Rohstoff gebaut. Mit diesem Thema beschäftigt sich ein Forschungsprojekt an der Technischen Universität München. Ziel des Projekts¹ ist es die Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit von Hochregallagern aus Holz zu bestimmen und mit bestehenden Stahlausführungen zu vergleichen. Des Weiteren sollen die bestehenden Hürden für den Werkstoff Holz in der Lagertechnik genommen werden, um so eine größere Anwendung zu ermöglichen. Aus diesem Grund werden den Marktanforderungen angepasste, neue Konstruktionsvarianten für Holz-Hochregale entwickelt. Durch die Herleitung vereinfachter Berechnungsansätze sollen die Konstruktionsvarianten ausführenden Unternehmen zugänglich gemacht werden.

Hochregallager dienen zur Lagerung großer Gütermengen auf kleiner Grundfläche bzw. kleinem Volumen. Sie sind für Palettenware das am weitesten verbreitete Lagermittel in Industrie und Handel. In den letzten zwanzig Jahren wurden allein in Deutschland über 1000 neue Anlagen gebaut.

Als Hochregale werden Regallager mit einer Höhe (Oberkante Lagergut) von mehr als 9 Metern bezeichnet. Sie können entweder freistehend in der Halle oder in Silobauweise realisiert werden. Bei einem Silo-Hochregal stellt die Regalkonstruktion gleichzeitig auch die tragende Gebäudekonstruktion dar, da an ihr das Dach sowie die Fassade befestigt sind. Daher müssen in diesem Fall Gebäudelasten wie zum Beispiel Schnee und Wind bei der Bemessung berücksichtigt werden. Hochregale in Silobauweise werden im Moment bis zu einer Höhe von 40 Metern gebaut. Die Bedienung bzw. Ein- und Auslagerung von Gütern erfolgt bei den meisten Hochregalen über computergesteuerte Roboter, welche Regalbediengeräte RBG genannt werden. Aufgrund der weiten Verbreitung und der guten Handhabung werden hauptsächlich Paletten als Ladehilfsmittel verwendet.

Stand der Technik - Hochregallager

Zum Bau von Hochregalen wurde zu Beginn der Entwicklung Stahl und Stahlbeton verwendet. Im Laufe der Jahre setzte sich jedoch die Stahlvariante aus wirtschaftlichen Gründen durch, weshalb im Moment nahezu alle Regale aus Stahl gefertigt werden. Diese bestehen aus offenen und komplex geformten Profilen, welche eine Dicke von nur wenigen Millimetern aufweisen. Die Hersteller sind bestrebt die verwendeten Profile stetig weiter zu optimieren, da die Regalkosten stark von der verbrauchten Stahlmenge und damit vom Stahlpreis abhängen. Die Profile haben eine hohe Steifigkeit in Stabrichtung, besitzen aber kaum Widerstand gegenüber Querkräften, weshalb diese bei Fehlbedienungen schnell verbogen werden und aufwendig ausgewechselt werden müssen.

Bei der Stahlherstellung werden große Mengen finiter Ressourcen sowie Energie verbraucht und zahlreiche Schadstoffe freigesetzt. Trotz moderner Recyclingkreisläufe entsteht pro Kilogramm Stahl durchschnittlich circa ein Kilogramm Kohlenstoffdioxid. Ein weiteres Problem stellt die geringe Korrosionsbeständigkeit von Stahl in anspruchsvollen

Umgebungen dar. Hier wird meist auf eine Beschichtung durch Feuerverzinken zurückgegriffen, die sich ebenfalls negativ auf die Umwelt auswirkt. In besonders aggressiven Atmosphären, mit zum Beispiel hohem Schwefel- oder Salzgehalt, bietet auch diese Nachbehandlung nur einen vorübergehenden Schutz, weshalb Stahl hier nur bedingt wirtschaftlich ist.



Abbildung 1: Holz-Hochregallager, Alnatura GmbH, Lorsch
Foto: Marc Doradzillo, Alnatura

Seit circa 10 Jahren werden Hochregallager nun auch erfolgreich aus Holz gebaut. Weltweit gibt es derzeit 8 Holz-Palettenregale, wobei laut Definition 6 davon als Hochregale zu zählen sind. Das größte Lager wurde bei der Firma Alnatura GmbH in Lorsch (Hessen) errichtet und hat über 31.000 Stellplätze verteilt auf 9 Gassen. Das im Moment höchste Hochregallager aus Holz steht bei der Josera GmbH (Bayern) und weist eine Höhe von 30 Metern auf.

Hauptmotivationen für die Holzbauweise

Im Jahr 2005 entschied sich ein Verpackungsunternehmen aus Österreich zum Bau des ersten Hochregallagers mit Holzelementen. Der Auslöser war der zu diesem Zeitpunkt sehr hohe Stahlpreis. Als wirtschaftliche Lösung wurde eine Holz-Stahl-Hybrid-Konstruktion realisiert, wobei die vertikalen Steher aus massivem Brettschichtholz und die horizontalen Palettenträger aus konventionellen Stahlprofilen gebaut wurden.

Ebenfalls im Jahr 2005 wurde für den Salzproduzenten Salinen Austria AG das erste reine Holz-Hochregallager aufgestellt, bei welchem nahezu alle Bauteile aus Holz bestehen. Aufgrund der stark korrosiven Umgebung wäre eine Stahlausführung nur mit mehrfacher Beschichtung möglich gewesen. Eine solche Lösung war nicht wirtschaftlich.

Bei älteren Anlagen (Jahre 2005 bis 2007) war die Motivation für die Holzbauweise hauptsächlich am hohen Stahlpreis begründet. Da dieser in den letzten Jahren wieder gesunken ist, hat sich der Fokus auf die Nachhaltigkeit der verwendeten Materialien verschoben. Bauherren der neueren Anlagen waren Firmen mit besonders ökologischer bzw. sozialer Unternehmenspolitik.

Ergebnisse Betreiberbefragungen / Datenauswertung

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden Betreiberbefragungen durchgeführt, um Erfahrungen über den Betrieb von Hochregalen aus Holz aufzunehmen. Die vier stellplatzmäßig größten Anlagen wurden dabei besichtigt und deren Betreiber befragt. Die durchschnittliche Betriebsdauer der betrachteten Anlagen betrug zum Zeitpunkt der Befragung knapp fünf Jahre, wobei das älteste Lager bereits seit 2005 betrieben wird.

Bisher konnten, bis auf eine Ausnahme, keine unzulässigen Verformungen an den Holz-Regalkonstruktionen festgestellt werden. Die automatische Bedienung durch die Regalbediengeräte funktioniert meist ohne Probleme. Auftretende Fehler bei Ein- und Auslagerungen sind der Fördertechnik zuzuschreiben.

Bei einem der betrachteten Holz-Hochregallager befindet sich unter den mittleren drei Regalzeilen jeweils ein Kommissioniertunnel. Diese werden von Staplern befahren. Die Lagergüter werden dabei direkt vom Regalbediengerät im Tunnel bereitgestellt. Im Kommissioniertunnel kam es bereits mehrfach zu Kollisionen von Staplern mit den Regalstützen. Aufgrund der massiven Holzbauweise sind jedoch keine Schäden entstanden. Nachteil der massiven und vollflächigen Bauweise ist, dass große Sprüschatten für die Sprinklerung vorliegen. Es müssen vergleichsweise mehr Sprinkler verbaut werden, wodurch zusätzliche Kosten entstehen.

Im Moment werden die Steher bei Holz-Hochregalen aus einem Stück gefertigt und direkt mittels Spezialtransport zur Baustelle transportiert. Diese Bauweise bedingt höhere Transportkosten als bei Stahl-Hochregalen, aber auch eine verkürzte Montagezeit. Die Datenauswertung ergab, dass die Montagezeit im Schnitt 20% geringer war als bei funktionsgleichen Stahl-Hochregalen. Die verschiedenen Witterungsverhältnisse wurden dabei nicht berücksichtigt.

Bezüglich der Investitionskosten kann derzeit noch keine gesicherte Aussage getroffen werden, da die bestehenden Anlagen alle Prototypencharakter aufweisen und die Anzahl der gebauten Regale zudem sehr gering ist. Die momentanen Daten zeigen Mehrkosten von 3 bis 30 %. Nähere Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von Holz-Hochregalen folgen im späteren Projektverlauf.

Baustoffeigenschaften von Holz

Bei Holz handelt es sich um einen natürlich gewachsenen Rohstoff. Holz kommt als Nadel- und Laubholz vor, wobei im Bauwesen bisher größtenteils Nadelholz eingesetzt wird. Aufgrund des Wachses mit längsorientierten, stammparallelen Fasern ist Holz inhomogen und anisotrop. Dies bedeutet, dass die Eigenschaften von Holz, im Gegensatz zu homogenem Stahl, stark von der Belastungsrichtung abhängen.

Um Holz zu "homogenisieren" sowie in größeren Abmessungen herstellen zu können, wurden diverse Holzprodukte entwickelt. Am gängigsten ist Brettschichtholz BSH, das aus in Faserrichtung aufeinander geklebten Brettern besteht. Die Regalstruktur der bisherigen Hochregallager wurde aus Brettschichtholz gefertigt. Bei Brettschichtholz handelt es sich um linienförmige Bauteile.

Ebenso können flächige Bauteile aus Holz hergestellt werden. Das sog. Brettsperrholz BSP (vgl. Abbildung 2) wird durch die kreuzweise Verklebung von mindestens drei Brettlagen realisiert.

Analog zum BSH bzw. BSP gibt es Furnierschichtholz FSH. Der Unterschied liegt in einer deutlich geringeren Materialstärke der verklebten Lagen. FSH ist als stabförmiges wie auch flächiges Bauteil zu erhalten.



Abbildung 2: Brettsperrholz BSP

Bezüglich der mechanischen Eigenschaften unterscheidet sich Holz ebenfalls deutlich von Stahl. Stahl hat eine höhere Festigkeit und Steifigkeit, aber auch eine vielfach größere Dichte. Vergleicht man jedoch die spezifische Festigkeit, so liegt die von Holz deutlich über der von Stahl. Durch die bereits erwähnte Anisotropie sind die Eigenschaften von Holz außerdem richtungsabhängig.

Holz ist hygroskopisch, d. h. es hat die Fähigkeit Feuchtigkeit aufzunehmen und abzugeben. Holz steht dabei in einem dynamischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung, was bedeutet, dass die Feuchtigkeit des Holzes sich nach einer gewissen Zeit auf einen Wert einstellt, der der Ausgleichsfeuchte entspricht.

Für weitere Informationen zu den Materialeigenschaften von Holz wird auf die Literatur, wie z.B. „Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe“ von Peter Niemz, verwiesen.

Einsatzbereiche von Holzhochregalen

Der Werkstoff Holz ist von Natur aus korrosionsträge, d.h. er ist gegen chemisch aggressive Medien wie Säuren oder Laugen widerstandsfähiger als zum Beispiel Stahl. Dieser Vorteil kann für den Bau von Regalen in korrosiven Umgebungen genutzt werden. Die Lebensdauer von Holz unter chemischer Einwirkung unterliegt zahlreichen Einflussfaktoren, welche in Abbildung 3 dargestellt sind.



Abbildung 3: Einwirkung chemischer Medien auf Holz

Neben den Charakteristika des einwirkenden Mediums sind die zuvor beschriebenen Umgebungsbedingungen sowie die Dauer der Einwirkung entscheidend. Bei der Schädigung des Holzes entsteht an der Oberfläche eine nicht tragfähige Randschicht. Diese kann für eine bestimmte Lebensdauer abgeschätzt werden und ähnlich wie beim Brandschutz bei der Bauteildimensionierung berücksichtigt werden. [9]

Gewisse Einsatzgrenzen für Holz sind durch die Gefahr von Pilz- oder Insektenbefall bedingt.

Bis zur Holzfeuchte von 20% ist mit ausreichender Sicherheit davon auszugehen, dass es zu keinem Pilz- oder Schimmelbefall kommt. Dies entspricht einer relativen Luftfeuchte von 85% bei einer Temperatur von 20°C. Ein Insektenbefall ist bei Brettschichtholz nicht zu erwarten, sofern es nicht dauerhaft der Witterung ausgesetzt ist. [10] Dadurch ist unter normalen Bedingungen (12-25°C, rel. Luftfeuchte 45-65% [11]) in Hochregallagern mit keinem Pilz- oder Schimmelbefall zu rechnen.

Unter konventionellen Lagerbedingungen ist Holz somit als Konstruktionswerkstoff für Hochregallager gleich gut geeignet wie Stahl. Bei besonders hoher Luftfeuchte, wie zum Beispiel bei der Lagerung von schnell verderblichen Gütern wie Obst und Gemüse, ist es ökonomisch verzinkten Stahl einzusetzen. Für aggressive Medien wie Salze, Düngemittel oder Chemikalien ist hingegen Holz wirtschaftlicher.

Brandschutz

Bei richtiger Auslegung sind Konstruktionen aus Holz im Brandfall berechenbar und damit sicherer als Stahlkonstruktionen. Das Holzregal trägt zwar durch seinen eigenen Abbrand zur Brandlast bei, jedoch ist dieser Beitrag gering im Vergleich zu den Brandlasten der Lagergüter. Der Vorteil von Holz ist seine geringe Wärmeleitfähigkeit. Auch wenn Holz an seiner Oberfläche brennt, so sind die inneren Bereiche davon relativ unberührt, sie behalten ihre Festigkeit. Holzkonstruktionen bleiben somit innerhalb dieses Restquerschnitts tragfähig. Zudem bildet sich im Laufe des Abbrands an der Oberfläche eine passivierende Kohleschicht, welche die weitere Abbrandgeschwindigkeit senkt. Bei Fichtenholz, welches hauptsächlich verwendet wird, beträgt die Abbrandgeschwindigkeit ca. 0,7mm/min. Es lässt sich daher relativ einfach errechnen und nachweisen wie lange eine Holzkonstruktion im Brandfall noch tragfähig ist.

Im Vergleich zu Holz hat Stahl eine sehr große Wärmeleitfähigkeit. Die nur wenige Millimeter dicken Stahlprofile von Stahl-Hochregalen erwärmen sich im Brandfall innerhalb kürzester Zeit vollständig. Schon ab 500°C besitzt Stahl nur noch 50% seiner ursprünglichen Festigkeit, wodurch Stahltragwerke bei Bränden schnell an Tragfähigkeit verlieren und nicht mehr berechenbar sind.

Die meisten Lagergüter in Hochregalen sind zu Verpackungszwecken oder zur Ladungssicherung von Karton- oder Kunststoffschichten umgeben. Diese Stoffe sind leicht entflammbar und erzeugen eine außerordentlich hohe Brandlast. Hinzu kommt, dass die so verpackten Lagergüter dicht nebeneinander auf kleinem Volumen gelagert werden. Die Hohlräume zwischen den Gütern erlauben eine allseitige Luftzufuhr und erzeugen in vertikaler Richtung eine Art Kamineffekt. Dadurch kommt es im Brandfall zu einer besonders schnellen Brandausbreitung zur Gebäudedecke hin und durch die hohe Wärmestrahlung bzw. herabfallendes Brandgut auch auf alle umstehenden Regalbereiche (vgl. Abbildung 4). Ziel ist es Brände bereits in ihrer Entstehungsphase zu erkennen und zu löschen

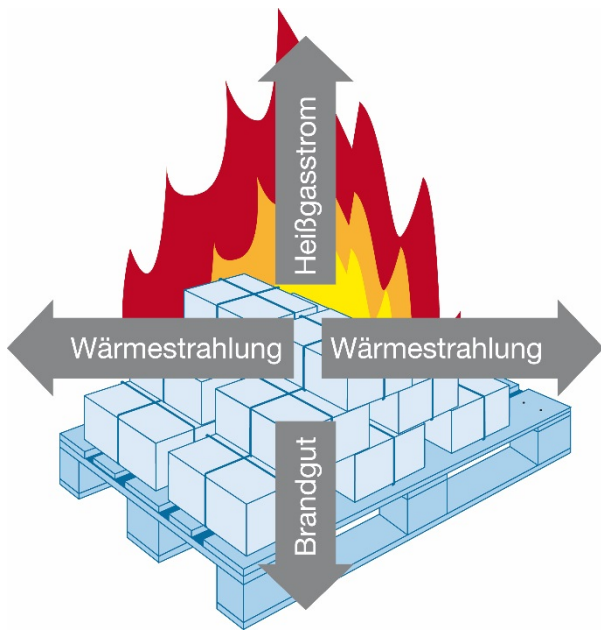


Abbildung 4: Brandausbreitung im Regallager

Hochregale werden somit unabhängig von ihrem Konstruktionswerkstoff mit einer selbsttätigen Feuerlöschanlage versehen. Sollte diese jedoch nicht aktiv werden, so ist unabhängig vom Baustoff ein Totalausfall zu erwarten. Die Holzkonstruktion würde allerdings ein gewisses Zeitfenster für Notfallmaßnahmen eröffnen.

Statistik gebauter Lagerdimensionen mit Auswirkung auf die Konstruktionsanalyse

Weiterführend wurden im Laufe des Projekts über 2200 Daten gebauter Hochregallagern analysiert. Der Betrachtungszeitraum umfasste die Jahre 1998 bis 2013. Ziel dieser Auswertung ist festzustellen, welche Lagerabmessungen in der Industrie am häufigsten Anwendung finden. Hieraus sollen nachfolgend günstige Ansätze für ein modulares System aus Holz abgeleitet werden. Besonders interessant ist die Entwicklung der Lagerhöhen im Untersuchungszeitraum.

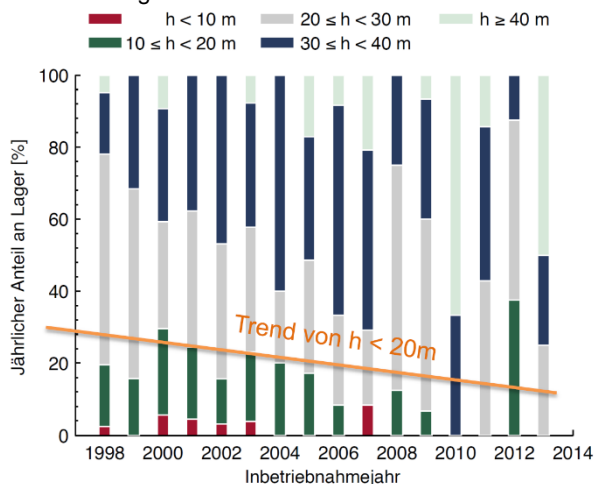


Abbildung 5: Entwicklung der Höhen der in Deutschland errichteten Hochregallager

Abbildung 5 zeigt, dass der Anteil der in Deutschland errichteten HRL mit einer Höhe von mehr als 20m bzw. 30m ansteigt, während im gleichen Zeitraum der Anteil der Hochregallager mit einer Höhe von weniger als 20m sinkt. Außerdem hat sich die durchschnittliche Größe der Lager in Bezug auf die Stellplatzanzahl in dieser Zeitspanne in etwa verdoppelt.

Für die Konstruktionsanalyse bedeutet dies, dass ein Konzept zu entwickeln ist, welches auch die Realisierung höherer Lagerstrukturen aus Holz ermöglicht. Die bisher gebauten Lager reichen nicht über 30m. Die Besonderheit der bestehenden Lager war, dass die Steher immer an einem Stück geliefert wurden. Dies stellt eine enorme logistische Herausforderung dar und erreicht bei größeren Abmessungen Grenzen bzw. wird unwirtschaftlich.

Aus diesem Grunde wird ein modulares System entwickelt, das durch die Implementierung eines Steherstoßes auch Lager aus Holz mit größeren Höhen ermöglicht. Eingesetzt werden soll bei diesem System Brettsperholz, Brettschichtholz und Furnierschichtholz.

Ausblick

Im weiteren Projektverlauf werden als sinnvoll erachtete modulare Lagerkonstruktionen entwickelt und hinsichtlich eines möglichen und wirtschaftlichen Einsatzes untersucht. Hierzu sollen im Anschluss geeignete Berechnungsansätze hergeleitet werden, um eine spätere Verbreitung der Holzbauweise von Hochregallagern zu fördern.

Um die Investitionskosten von Holz-Hochregalen bereits in der Planungsphase zu quantifizieren, wird ein Modell zur groben Kostenabschätzung für beliebige Regalabmessungen entwickelt. Zum Vergleich der Umweltauswirkungen sind Berechnung von Ökobilanzen für Hochregallager aus Holz, Stahl und Holz-Stahl-Hybrid geplant.