

Dr.-Ing. Reiner Möll,
Dipl.-Ing. Rudolf Roßbach

Entwicklung auf dem Gebiet der Lagertechnik. Neueste Erkenntnisse aufgezeigt am Beispiel des Palettenregals

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Das Tragverhalten der Stützen,
Palettenträger und Anschlüsse

Experimentelle Verfahren zur
Ermittlung von Rechengrundlagen

Druckversuche

Biegeversuche

Einhängeverbindung bei
Palettenregalen

Schubversuche mit Regalscheiben

Stützenfüße

Stützenstöße

Auswertung der Versuchsergebnisse

Statische Berechnungen
und Nachweise

Grenzzustände

Querschnittswerte

Das Regal in Längsrichtung

Das Regal in Tiefenrichtung

Zusammenfassung und Schluss

Einleitung

Die Gütesicherung von Regalen ist in Deutschland der Verdienst der Gütegemeinschaft [1]. Mit ihrer Unterstützung und mit Hilfe der in ihr zusammengeschlossenen Mitgliedsfirmen hat das Büro Dr. Möll im Laufe der letzten 15 Jahre Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Regalanlagen entwickelt [2] bis [5]. Erwähnt werden müssen in diesem Zusammenhang auch die Impulse, die aus anderen europäischen Ländern in die Berechnung von Regalanlagen einfließen (z.B. [6], [7] und [8]). Mit dem Fachhandbuch Lagertechnik und Betriebseinrichtung im Jahre 1985 erschien eine Zusammenfassung der gütesichernden Maßnahmen in der Regaltechnik in Deutschland. Die in diesem Handbuch abgedruckte Veröffentlichung „Forschung auf dem Gebiet der Lagertechnik. Neueste Erkenntnisse, aufgezeigt am Beispiel des Palettenregals“ von Dr. Möll [9] gibt einen Überblick über den damaligen Stand der Berechnungsmethoden am Beispiel der Palettenregale.

Die zwischenzeitlich im europäischen Rahmen und in Deutschland erschienenen Normen, Entwurfsfassungen zu Normen und Richtlinien, die sich besonders mit der Berechnung derartiger kaltgeformter Profile befassen, machen eine Neuorientierung erforderlich. So wird auch in [12] über neue Ansätze zur Berechnung von Palettenregalen aus Stahl unter Berücksichtigung europäischer Normen und Richtlinien diskutiert.

Beide Entwicklungen, nämlich das Erscheinen neuer Normen und Entwürfe sowie die immer stärkere Verbreitung preisgünstiger und leistungsfähiger Rechenanlagen, machten die Überarbeitung von [9] notwendig.

Das Tragverhalten der Stützen, Palettenträger und Anschlüsse

Dünnwandige Bauteile sind gekennzeichnet durch geringe Blechdicken und große Breiten-Dicken-Verhältnisse von Teilquerschnitten. Ihr Tragverhalten wird beeinflusst durch örtliches Beulen vor Erreichen der rechnerischen Tragfähigkeit des Bauteiles, ermittelt aus Nettoquerschnitt multipliziert mit

der Fließspannung des Materials. In [10], [11] und [12] ist angegeben, wie man das Tragverhalten dünnwandiger Profile rechnerisch beurteilen kann. Danach werden beulgefährdete druckbeanspruchte Querschnittsteile als nicht mittragend betrachtet und bei der Querschnittberechnung weggelassen. Die Methode setzt die Kenntnis des Spannungsverlaufes zumindest näherungsweise voraus und ihre Anwendung ist bei gelochten, insbesondere regelmäßig gelochten Profilen, wie sie im Regalbau für die Regalstützen Verwendung finden, äußerst zweifelhaft, denn Löcher beeinflussen entscheidend das Beulverhalten. Häufig sind die Löcher die Ursache örtlichen Versagens, das immer ein Versagen des Gesamtquerschnittes nach sich zieht. Außerdem ist die Spannungsverteilung über den Querschnitt bei Normalkraft nicht konstant bzw. bei Biegung nicht nur linear veränderlich, wie dies aus der technischen Biegetheorie resultiert, sondern es gibt im Bereich der Löcher erhebliche Spannungsspitzen und dazwischen bis auf Null absinkende Spannungstäler (Abb. 1).

Den genannten approximativen rechnerischen Methoden stehen experimentelle Verfahren gegenüber, aus denen das Tragverhalten besser und mit höherem Vertrauensniveau abgeleitet werden kann (z.B. [1], [3] und [9]). Bei den gelochten Profilen sind nach [12] Traglastversuche sogar obligatorisch.

Nur experimentell und kaum rechnerisch lassen sich die Tragfähigkeiten und das elastische Verhalten der Anschlüsse in Systemregalen aus Kaltprofilen bestimmen. Die Grundlagen für Be-

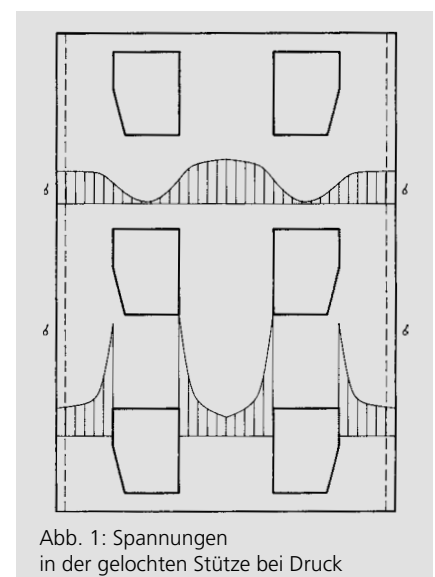


Abb. 1: Spannungen
in der gelochten Stütze bei Druck

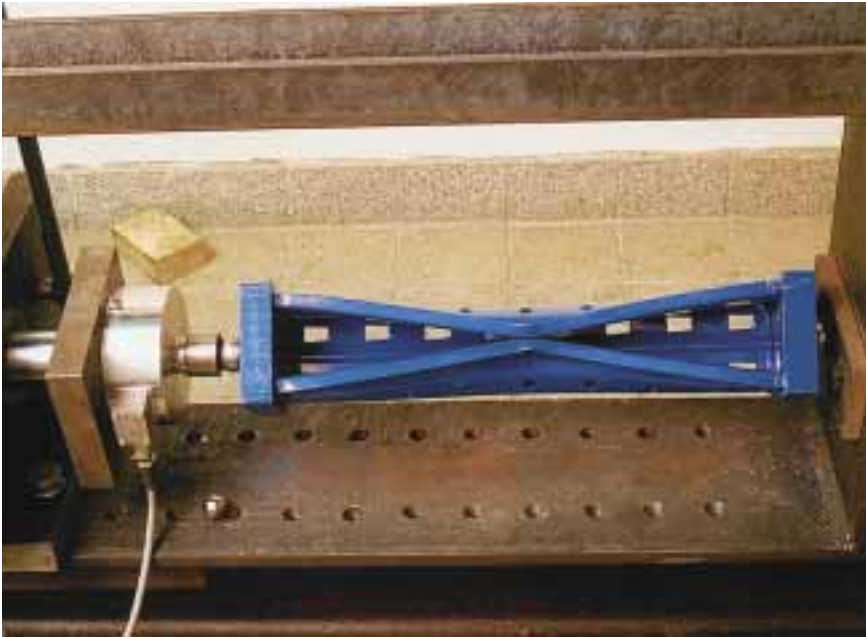


Abb. 2: Druckversuch am kurzen Stützenstück, Versuchsaufbau

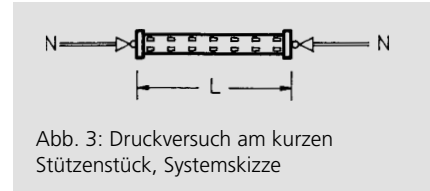


Abb. 3: Druckversuch am kurzen Stützenstück, Systemskizze

ge des Versuchsstückes soll zwischen den Grenzen

$$3 b_{\max} \leq L \leq 20 i_{\min}$$

liegen. Dabei ist

b_{\max} = größte Profilbreite

i_{\min} = kleinster Trägheitsradius

L = Länge des Versuchsstückes (einschl. Endplatten)

Die Druckkraft wird über Kugeln und dicke Endplatten eingeleitet. Druckversuche mit ungelochten und nicht beulgefährdeten Profilen haben ihr Traglastmaximum im rechnerischen Schwerpunkt. Demgegenüber zeigen gelochte und dünnwandige, beulgefährdete Profile ein anderes Verhalten. Die Querschnittsberechnung ergibt zunächst unterschiedliche Schwerpunktlagen zwischen den lochfreien Brutto-, den Netto- und den mittleren Querschnitten. Wegen der nicht-konstanten Normalspannungsverteilung und weil beulgefährdete Teile vor Erreichen der Materialstreckgrenzen versagen, läßt sich der Ort des Traglastmaximums rechnerisch nicht bestimmen. Im Test findet man ihn durch Probieren (Abb. 4 und [9]). Die Versagenslast erhält man aus den Druckversuchen mit Lastangriff im Abstand $e \leq L/200$ um den Ort des Traglastmaximums (Abb.5).



Abb. 4: Bruchbilder der gedrückten Stützenstücke mit unterschiedlichem Lastangriffspunkt

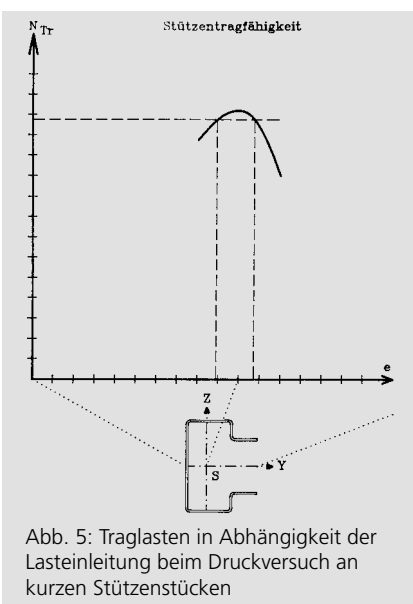


Abb. 5: Traglasten in Abhängigkeit der Lasteinleitung beim Druckversuch an kurzen Stützenstücken

rechnungen müssen aus Versuchen an Bauteilen abgeleitet werden. Hierzu gehören im wesentlichen Versuche zur Ermittlung der Anschlusskennwerte zwischen Palettenträger und Regalstütze (Einhängeverbindung), Schubversuche an fachwerk- oder rahmenartigen Regalscheiben und Kennwerte der Fußeinspannung.

Experimentelle Verfahren zur Ermittlung von Rechengrundlagen

Druckversuche:

Ein Versuchsstück wird zwischen beiden Enden bis zur Versagenslast gedrückt (Abb. 2 und Abb. 3). Die Län-

Biegeversuche:

Ein Prüfstück wird hierbei auf Biegung beansprucht und dabei werden die Verformungen gemessen (Abb. 6 und Abb. 7). Die Länge L des Prüfkörpers soll in den Grenzen

$$15 h \leq L \leq 30 h$$

liegen. Hierbei bedeutet h = Höhe des Profils in Lastrichtung. Belastet wird der Prüfkörper mit zwei Einzellasten, die in den Schubmittelpunkten etwa $L/3$ von den Auflagern eingeleitet werden (Abb. 7). Bei einfachsymmetrischen Profilen erreicht man diese Forderung, indem man zwei sich symmetrisch gegenüberliegende Profile,

die durch Bindebleche miteinander verbunden sind (Doppelprofil, Abb. 7, Profillage d), gleichzeitig getestet. Typische Momenten-Verformungsdiagramme enthält Abb. 8. Kurve a ist bezeichnend für Biegung der C-Profile um ihre starke (Symmetrie-) und Kurve b für Biegung um ihre schwache Achse. Bei Erreichen der Streckgrenze geht die anfänglich nahezu lineare in eine nichtlineare, parabelförmige Kurve über. Daraus lassen sich die elastische $M_{u,el}$ und plastische Momenten Tragfähigkeit M_{pl} , die Rotationskapazität und bei bekanntem Elastizitätsmodul die Trägheitsmomente des Profils ableiten.

Mit Abb. 7 ist:

$$I = \frac{M a^2}{8 v E}$$

und $v = v_3 - (v_2 + v_4)/2$.

Dabei sind

- M = Moment zwischen den Stellen mit den Messuhren 2 und 4
- a = Abstand der Lasteinleitungsstellen (2 und 4)
- E = Elastizitätsmodul = 210000 N/mm²
- vi = Verformungen an den Stellen i
- v = Verformungsdifferenz

Häufig liegen die Trägheitsmomente aus den Versuchen niedriger als die rechnerisch mit den Nettoquerschnittswerten ermittelten Trägheitsmomente. Dies ist bei hoch kaltverformten Stählen auf einen Elastizitätsmodul von weniger als 210000 N/mm² zurückzuführen.

Einhängeverbindung bei Palettenregalen:

Im Regalbau besitzen die Anschlüsse im Gegensatz zu den Anschlüssen des allgemeinen Stahlbaues wesentlich geringere Steifigkeiten und Tragfähigkeiten als die angeschlossenen Bauteile. Die Kennwerte sind in der Regel nur experimentell bestimmbar, weil rechnerische Methoden z.B. mit Finiten Elementen, insbesondere wenn man geometrische oder durch das Materialgesetz bedingte Nichtlinearitäten berücksichtigt, sehr aufwendig wären.



Abb. 6: Biegeversuch an Stützen, Versuchsaufbau

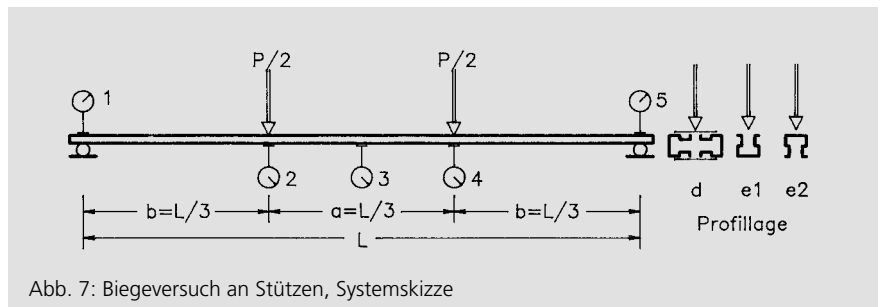


Abb. 7: Biegeversuch an Stützen, Systemskizze

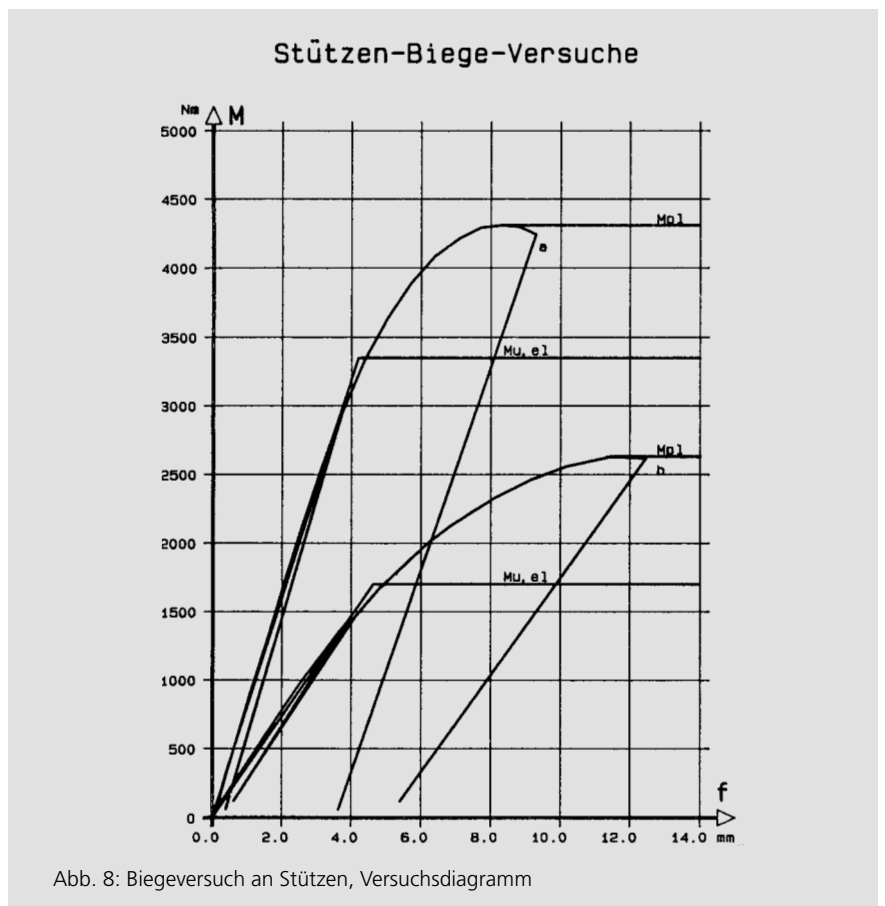


Abb. 8: Biegeversuch an Stützen, Versuchsdiagramm



Abb. 9: Versuch an Einhängeverbindung, Versuchsaufbau

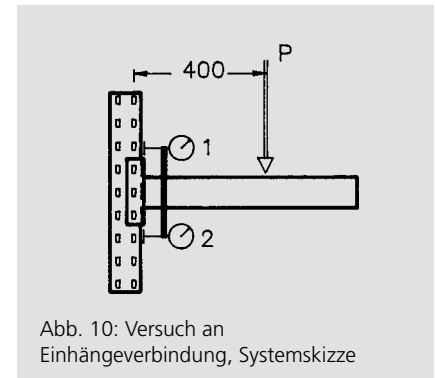


Abb. 10: Versuch an Einhängeverbindung, Systemskizze

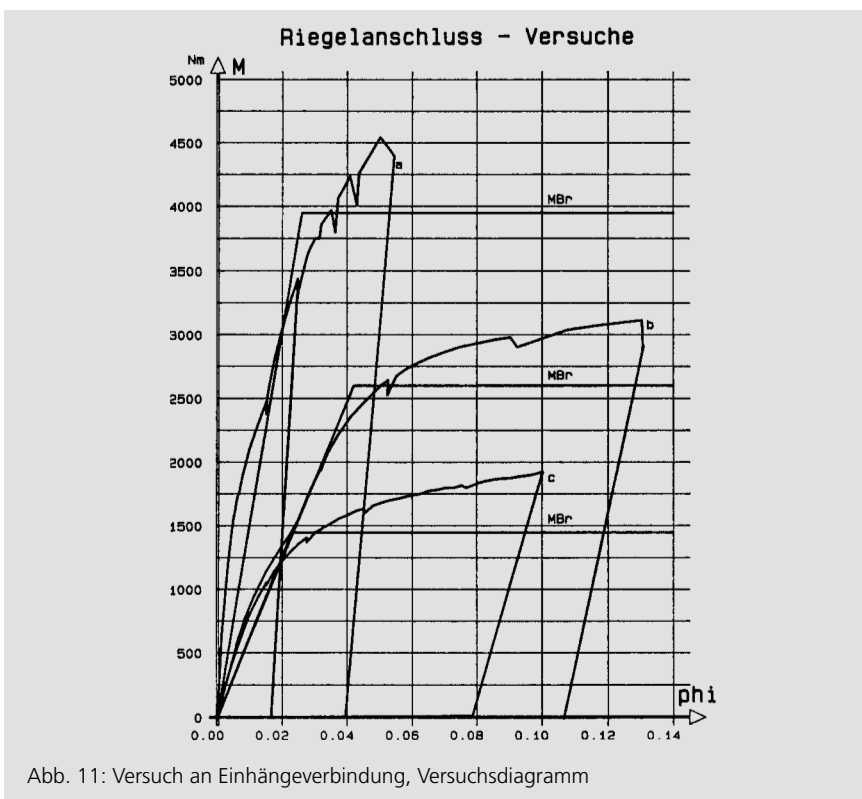


Abb. 11: Versuch an Einhängeverbindung, Versuchsdiagramm

Zur Ermittlung der Kenngrößen der Einhängeverbindung zwischen Paletenträger und Regalstütze wird an einem am Versuchsrahmen festgespannten Stützenstück ein Paletenträgerstück eingehängt, mit einer Einzellast im Abstand a belastet und die Verformungen gemessen (Abb. 9 und 10). Die grafische Auftragung des Drehwinkels in Abhängigkeit des Momentes ist eine anschauliche Darstellung der Drehfedercharakteristik. Das anfänglich nahezu lineare Verhalten geht in einen nichtlinearen Verlauf über. Für die spätere Rechnung benötigt man eine angenäherte und lineari-

sierte Kurve (Abb. 11). Wenn man die plastischen Tragreserven des Anschlusses ausnutzen will, muß in den Anschlussversuchen eine ausreichende Rotationskapazität nachgewiesen werden, wie sie die Anschlüsse mit den Kennlinien b und c (Abb. 11) besitzen. Die Rotationskapazität des Anschlusses mit der Kennlinie a (Abb. 11) ist nicht ausreichend. Anhaltswerte sind wenigstens 3- bis 5-fache plastische, bezogen auf die zu M_{Br} gehörenden elastischen, Verformungen.

Eine Möglichkeit, die Kenngrößen der Einhängeverbindung wirklichkeitsnä-

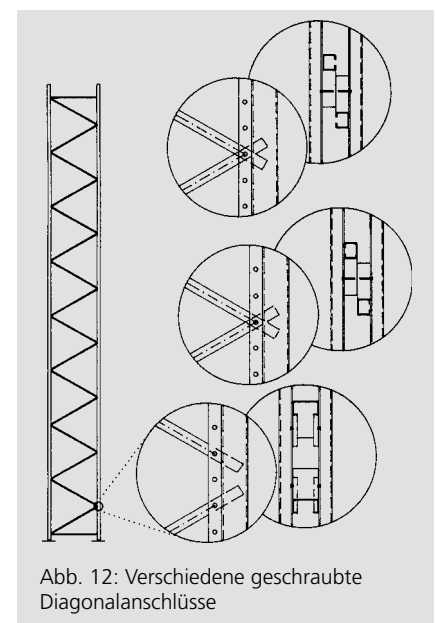


Abb. 12: Verschiedene geschraubte Diagonalanschlüsse

her zu ermitteln, zeigt Bild 6 in [9]. Hier wird ein belastetes Regalfeld einer horizontalen Beanspruchung unterzogen. Die Überlagerung der antisymmetrischen Beanspruchung des Paletenträgers aus dem Horizontalzug mit der symmetrischen Beanspruchung aus der vertikalen Belastung des Paletenträgers aktiviert an zwei Trägerenden auch das Tragverhalten der Einhängeverbindung entlang der Entlastungsgeraden. Somit wird mit diesem Versuch die Wirkungsweise der Einhängeverbindungen durch die infolge der Horizontalkraft auftretenden gegensätzlichen Drehwinkel besser eingefangen.

Schubversuche mit Regalscheiben:

Häufig verwendete geschraubte Diagonalanschlüsse sind in Abb. 12 dar-

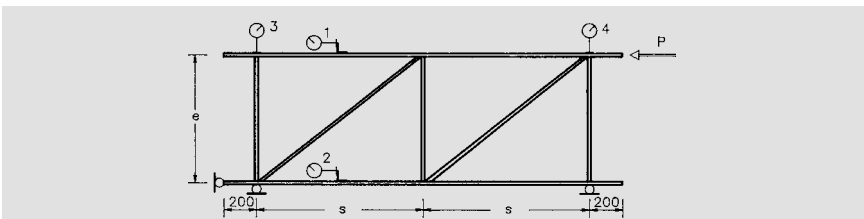


Abb. 14: Schubversuch, Systemskizze

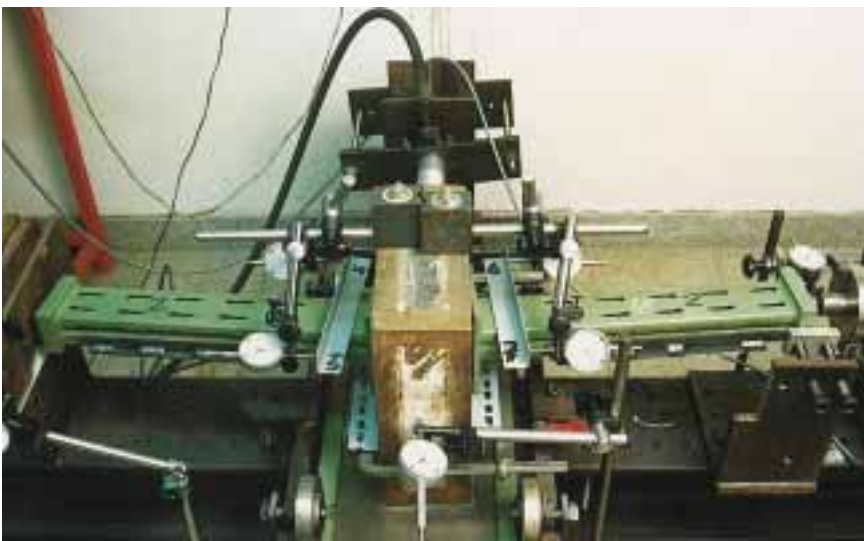


Abb. 16: Fußeinspannversuch, Versuchsaufbau

gestellt. Die örtliche Steifigkeit, Exzentrizitäten oder der Schlupf im Anschluss beeinflussen entscheidend die Schubsteifigkeit der Regalscheiben. Bei geschraubten Konstruktionen, bei denen in einem Anschluß zwei Diagonalen mit einer Schraube befestigt sind, wird die Schubsteifigkeit zusätzlich je nach Ausführung (Abb. 12) entweder durch die Verformung der Schraube oder durch die Verdrehung der Stützen infolge Torsion stark herabgesetzt. Die Schubsteifigkeit kann aus Schubversuchen mit Regalscheiben-Teilstücken direkt ermittelt wer-

den (Abb. 13 und Abb. 14). Beim Vergleich der Werte aus den Versuchen mit den rechnerischen erhält man Übereinstimmung, wenn man entweder den Schlupf rechnerisch berücksichtigt, oder, was häufiger angewendet wird, wenn man reduzierte Diagonalenflächen in die Formeln für die Schubsteifigkeit S_{id} einsetzt.

Mit Abb. 13 ist:

$$S_{id} = E A_{D,red} a e^2/d^3$$

für Fachwerk Form D (Abb. 15)

Abb. 13: Schubversuch, Versuchsaufbau

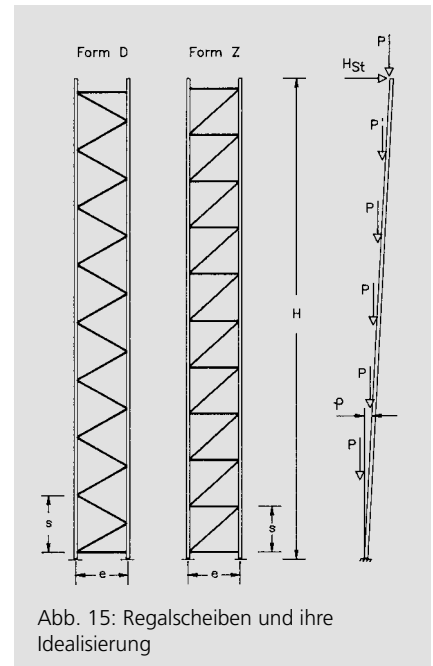


Abb. 15: Regalscheiben und ihre Idealisierung

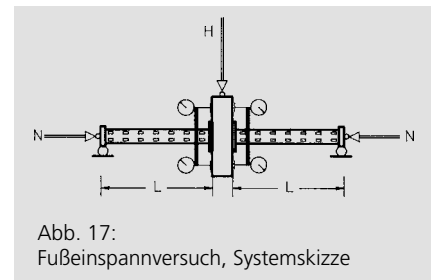


Abb. 17: Fußeinspannversuch, Systemskizze

$$S_{id} = \frac{E A_{D,red} a e^2/d^3}{1 + (e/d)^3 A_{D,red} / A_{R,red}}$$

für Fachwerk Form Z (Abb. 15)

mit $d = \sqrt{e^2 + s^2}$

und $A_{D,red} = f \cdot A_D$

$$A_{R,red} = f \cdot A_R$$

Für andere Fachwerksformen finden sich Angaben in der Literatur, wie z.B. „Petersen“.



Abb. 18: Versuch am Stützenstoß, Versuchsaufbau

Bisher in Versuchen gefundene Reduktionsfaktoren f sind:

$f = 0,20$ bis $0,10$
für geschweißte und

$f = 0,10$ bis $0,04$ für geschraubte Konstruktionen.

Stützenfüße:

Auf Betonfußböden haben die Palettenregalstützen bedingt durch ihre überwiegende Normalkraftbeanspruchung elastische Einspannungen, auch dann, wenn sie nicht verdübelt sind. Voraussetzung ist allerdings, dass der Betonfußboden eben ist und eine ausreichende Festigkeit besitzt. Die elastische Einspannung ist lastab-

hängig und kann in Einspannversuchen ermittelt werden (Abb. 16 und Abb. 17). Bei Division des abgeleiteten Momentes durch die Normalkraft erhält man bezüglich der Stützenachse die Exzentrizität der resultierenden Anschlusskraft, bei der das Moment Null ist (Siehe auch [9]).

Stützenstöße:

Die bei hohen Regalen erforderlichen Stützenstöße stellen meist eine Schwächung der Tragfähigkeit der Stützen dar. Bild 18 zeigt den Versuchsaufbau zur Ermittlung des Tragverhaltens der Stoßstelle. Die zunächst aufgebrachte Normalkraft N sollte die Stoßstelle ohne Auftreten eines größeren Knickes aufnehmen können. Zur weiteren Beurteilung des Stoßes wird unter konstant gehaltener Normalkraft über eine mittig angreifende Horizontalkraft H das Moment erhöht. Mit dem Gesamtmoment

$$M = H \frac{L}{4} + v_3 N$$

und dem Kontingenzwinkel

$$\varphi = \frac{2}{a} (v_3 - \frac{v_2 + v_4}{2})$$

wobei a = Abstand der Meßbuhren

läßt sich die Momenten-Drehwinkel-Beziehung auftragen. Nach Festlegung des Bruchmomentes M_{Br} und Linearisierung der Kurve zur Ermittlung der Steifigkeit des Stoßes über die Steigerung $K_H = dM/\varphi$ kann in der späteren Berechnung die Schwächung der Stütze im Bereich der Stoßlänge l_{St} durch Einsetzen des Ersatzträgheitsmomentes

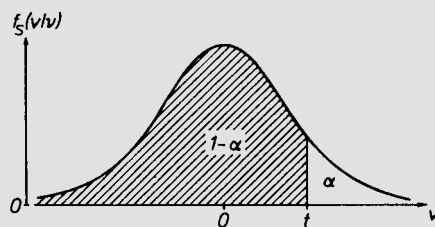
$$I_{St} = \frac{K_H l_{St}}{E}$$

berücksichtigt werden (siehe auch [9]).

Hinweis: Stützenstöße können in der Berechnung auch als „Gelenk“ betrachtet werden.

Auswertung der Versuchsergebnisse:

Aus n Einzelergebnissen einer Versuchsreihe erhält man den arithmetischen Mittelwert $x_m = \Sigma x_i/n$, der einen



$v =$ $n - 1$	$1 - \alpha$									
	0.600	0.700	0.750	0.800	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995	0.999
1	0.325	0.727	1.000	1.376	3.078	6.314	12.71	31.82	63.66	318.3
2	0.289	0.617	0.816	1.061	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.33
3	0.277	0.584	0.765	0.978	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.21
4	0.271	0.569	0.741	0.941	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173
5	0.267	0.559	0.727	0.920	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893
6	0.265	0.553	0.718	0.906	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208
7	0.263	0.549	0.711	0.896	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785
8	0.262	0.546	0.706	0.889	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501
9	0.261	0.543	0.703	0.883	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.297
10	0.260	0.542	0.700	0.879	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144
11	0.260	0.540	0.697	0.876	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025
12	0.259	0.539	0.695	0.873	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930
13	0.259	0.538	0.694	0.870	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852
14	0.258	0.537	0.692	0.868	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787
15	0.258	0.536	0.691	0.866	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733
16	0.258	0.535	0.690	0.865	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686
17	0.257	0.534	0.689	0.863	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646
18	0.257	0.534	0.688	0.862	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610
19	0.257	0.533	0.688	0.861	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579
20	0.257	0.533	0.687	0.860	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552
21	0.257	0.532	0.686	0.859	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.527
22	0.256	0.532	0.686	0.858	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.505
23	0.256	0.532	0.685	0.858	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.485
24	0.256	0.531	0.685	0.857	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.467
25	0.256	0.531	0.684	0.856	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.450
26	0.256	0.531	0.684	0.856	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.435
27	0.256	0.531	0.684	0.855	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.421
28	0.256	0.530	0.683	0.855	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.408
29	0.256	0.530	0.683	0.854	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.396
30	0.256	0.530	0.683	0.854	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.385
40	0.255	0.529	0.681	0.851	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.307
50	0.255	0.528	0.679	0.849	1.299	1.676	2.009	2.403	2.678	3.261
100	0.254	0.526	0.677	0.845	1.290	1.660	1.984	2.364	2.626	3.174
150	0.254	0.526	0.676	0.844	1.287	1.655	1.976	2.352	2.609	3.146
∞	0.253	0.524	0.674	0.842	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.090

Tabelle 1: Studentverteilung mit einseitiger Abgrenzung; Werte in Abhängigkeit von $v = n - 1$ und $1 - \alpha$ [1] wird von $1 - \alpha = 0,75$ ausgegangen

Schätzwert für den unbekanntem Erwartungswert μ darstellt. Die wichtigste Rechengröße für die zahlenmäßige Erfassung der Zufallsstreuung ist die empirische Standardabweichung s :

$$s = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x_m)^2}{(n - 1)}}$$

die ein Schätzwert der Standardabweichung σ ist.

Man darf nicht annehmen, dass der Mittelwert x_m , gleich dem Erwartungswert sei, auch dann nicht, wenn keine systematischen Abweichungen vorhanden sind. Es ist aber möglich, ein Intervall um den Mittelwert X_m anzugeben, der den Erwartungswert mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit $S=(1-a)$ überdeckt. Die Grenzen des Vertrauensbereiches sind

$$x_m - s \cdot t\sqrt{n} \leq \mu \leq x_m + s \cdot t\sqrt{n}$$

Der Faktor (aus t-Verteilung nach Student) hängt vom gewählten Vertrauensniveau $S = (1-\alpha)$ und von der Anzahl der Versuche ab. Tabelle 1 enthält t-Faktoren für verschiedene Vertrauenswahrscheinlichkeiten $S = (1-\alpha)$ in Abhängigkeit des Freiheitsgrades $\nu = n - 1$.

Statische Berechnungen und Nachweise

Grenzzustände:

Als Grenzzustand der Tragfähigkeit gilt der Verlust des stabilen Gleichgewichtes oder der Lagesicherheit [10]. Ursachen hierfür können lokale Fließ- oder Bruchzustände in Bauteilen und Verbindungen sein.

Der Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist gekennzeichnet durch das Erreichen der vorgegebenen Grenzverformungen [10].

In der Regel werden für Regale die Traglasten und daraus mit den erforderlichen Sicherheitsbeiwerten die zulässigen Gebrauchslasten mit den experimentell gewonnenen Rechnungsgrundlagen ermittelt. Verfahren, nach denen die Schnittgrößen ermittelt und die Nachweise geführt werden können:

- 1. Berechnung der Schnittgrößen nach der Elastizitätstheorie und Nachweis, dass elastische Grenztragfähigkeiten nicht überschritten werden. (Verfahren: „elastisch-elastisch“, Beginn des Fließens)
- 2. Berechnung der Schnittgrößen nach der Elastizitätstheorie und

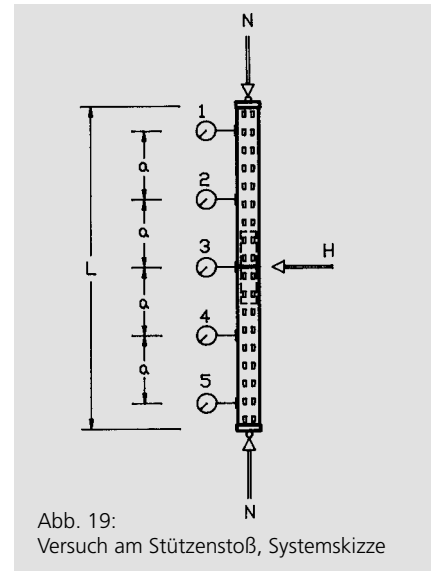


Abb. 19: Versuch am Stützenstoß, Systemskizze

Nachweis, daß die plastischen Grenztragfähigkeiten nicht überschritten werden. (Verfahren: „elastisch-plastisch“, Durchplastizieren eines Querschnittsteiles)

- 3. Berechnung der Tragsicherheit nach der Plastizitätstheorie. (Verfahren: „plastisch-plastisch“, ausbilden einer Fließgelenkkette)

Das Tragwerk besitzt bei Anwendung des Berechnungs- und Nachweisverfahrens 1 gegenüber der wirklichen Tragfähigkeit der Konstruktion noch Tragreserven, die vernachlässigt wer-

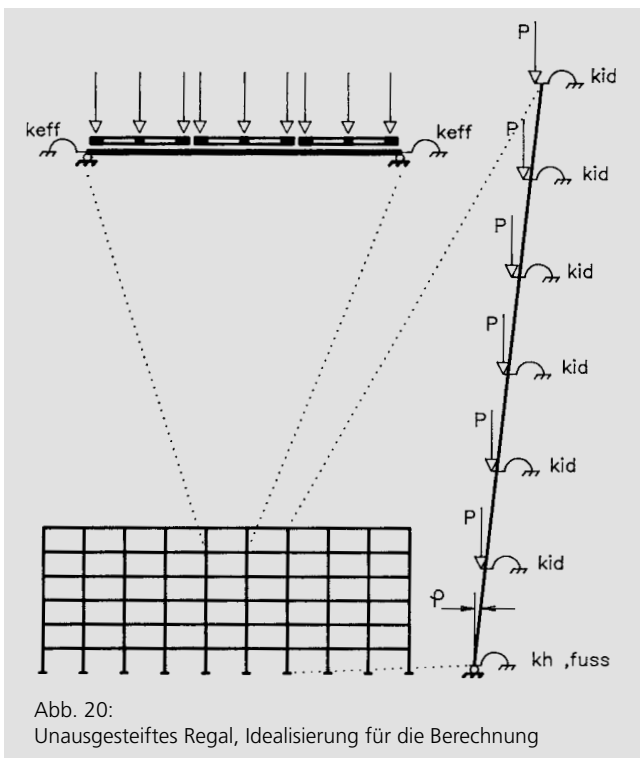


Abb. 20: Unausgesteiftes Regal, Idealisierung für die Berechnung

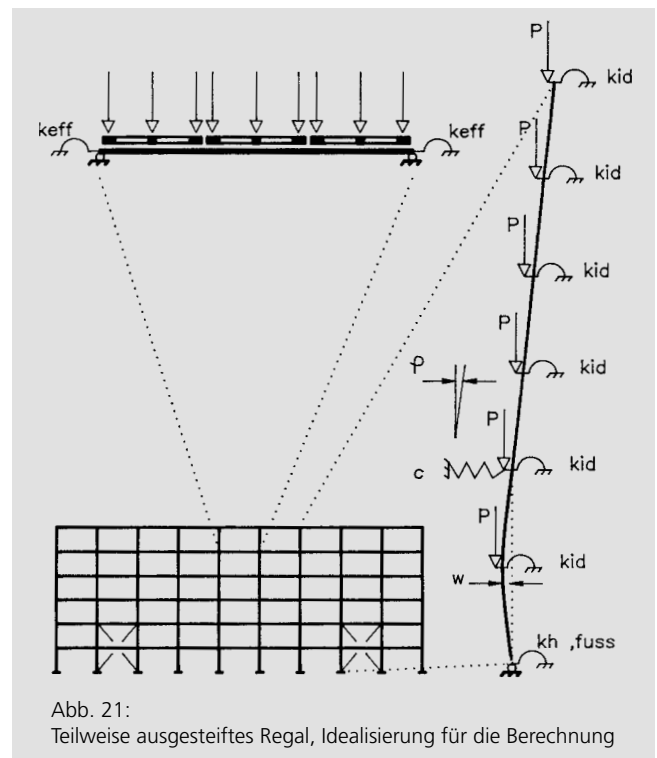


Abb. 21: Teilweise ausgesteiftes Regal, Idealisierung für die Berechnung

den. Bei Anwendung von 2 sind diese Reserven geringer und sie sind nahezu Null beim 3. Verfahren. Für die Ermittlung von zulässigen Gebrauchslasten sind daher bei gleichen Sicherheitsfaktoren die höchsten Werte zu erwarten, wenn nach dem 3. Verfahren gerechnet wird. Allerdings sind die Traglastgewinne wegen der „Weichheit“ der Konstruktion in der Regel nur gering und es sind genauere und im allgemeinen aufwendigere Rechenmethoden erforderlich. Das Verfahren 3 ist für Palettenregale mit Einhängeverbindungen nicht zu empfehlen.

Querschnittswerte:

Bei der Ermittlung der Querschnittswerte hat sich erwiesen, daß häufig nur die Nettowerte multipliziert mit den Fließspannungen aus Zugversuchen mit den Traglasten aus Druck- und Biegeversuchen übereinstimmen (abhängig vom Lochbild). Vorausgesetzt ist, es gibt kein Beulen von Querschnittsteilen vor Erreichen der Streckgrenze. (Siehe auch Abb. 1). Auch die mit Nettowerten ermittelten Trägheitsmomente sind nahezu identisch mit den experimentell abgeleiteten Werten, wenn man die am Testkörper vorhandenen und gemessenen Elastizitätsmodule in der Ableitung verwendet. Bei Kaltprofilen kann dieser von dem für Stahl üblichen Wert von 210000 N/mm² erheblich abweichen. In Zugversuchen mit Feindehnungsmessung wurden Elastizitätsmoduli von 180000 N/mm² gefunden, aber auch Werte kleiner als 160000 N/mm² wurden schon festgestellt.

Bei gelochten Stützenprofilen, deren Traglast durch Beulen bestimmt wird, sind sowohl die Querschnittswerte zur rechnerischen Ermittlung der Verformungen als auch die für den Trag sicherheitsnachweis erforderlichen Traglastspannungen oder Traglasten experimentell abzuleiten. Dies gilt ebenso für dünnwandige beulgefährdete Palettenträgerprofile und Palettenträger aus ineinandergeschachtelten C-Profilen, die im Druckbereich durch Aufspringen (entspricht Beulen) versagen.

Das Regal in Längsrichtung:

Palettenregale, die ohne Verbände ausgeführt werden, erhalten ihre

Stabilität durch die biegesteifen Einhängerverbindungen der Palettenträger in den Stützen. Sie sind Rahmentragwerke mit elastischen Eckeinspannungen. Da die horizontalen Verformungen zusammen mit den vertikalen Lasten nicht unerheblichen Einfluß auf das Gleichgewicht der Konstruktion haben und Beanspruchungen am Gesamtsystem hervorrufen, sind diese in den Schnittgrößenermittlungen und Nachweisen zu berücksichtigen. Die Berechnungen müssen nach Theorie II. Ordnung durchgeführt werden, für die der Ansatz von Vorverformungen der Stützen oder des Gesamtsystems erforderlich ist. Alle Vorschriften [10], [11] und [16] enthaltenen Angaben über Imperfektionsansätze für Rahmentragwerke, Einzelstäbe und Fachwerkscheiben. (Für Regale sind diese jedoch unpassend.)

In Abb. 20 und Abb. 21 ist qualitativ dargestellt, wie Vorverformungen bei verschiedenen Regalausführungen angesetzt werden können. Eine Reduzierung der Imperfektionen nach [16] ist für die Regalberechnungen wenig sinnvoll, da bereits für einfeldrige Regale (zwei Stiele) der Reduktionsfaktor $r < 1$ ist. Vernünftiger und einsichtiger ist eine Reduzierung erst ab 3 Regalfelder nach der in [9] vorgeschlagenen Formel $r_1 = \sqrt{8 / (3n - 1)}$ mit n als Anzahl der Regalfelder und der Einschränkung, Vorverformungen nicht kleiner als 1/500 anzusetzen. Wegen des regelmäßigen Aufbaues der Regale kann das Rahmentragwerk zur Reduzierung des Rechenaufwandes auf durchlaufende Stützen mit elastischen Feldern und auf elastisch eingespannte Einfeldträger reduziert werden (Abb. 20 und Abb. 21). Dabei simulieren die elastischen Federn an den Stützen (Steifigkeit k_{id}) die Palettenträger mit ihren Einhängerverbindungen und die Federn an den Palettenträgern (Steifigkeit k_{eff}) die elastisch angeschlossenen Stützen. Die Federsteifigkeiten sind nach [2]:

$$k_{id} = 2 \frac{6EI_R}{L} \frac{1}{1 + \frac{6EI_R}{L k_H}}$$

$$k_{eff} = \frac{k_H}{1 + n \frac{h k_H}{4EI_{St}}}$$

$$\text{und } n = \frac{1 + \frac{L k_H}{2EI_R}}{1 + \frac{L k_H}{2EI_R} + \frac{h k_H}{4EI_{St}}}$$

mit

I_R = Trägheitsmoment des Palettenträgers

L = Palettenträgerlänge

I_{St} = Trägheitsmoment der Stütze

h = Fachabstand

k_H = Anschlußsteifigkeit des Palettenträgers aus Versuchen

Bei der Berechnung der Palettenträger ist in den Spannungs- und Durchbiegungsnachweisen in Feldmitte der mit statistischen Mitteln errechnete untere Wert k_H , min und im Nachweis der Anschluss tragfähigkeit bei Anwendung des Verfahrens 1, (elastisch-elastisch) der obere Wert k_H , max zu verwenden. Das Verfahren 3 (plastisch-plastisch) kann nur bei ausreichender plastischer Rotationskapazität des Anschlusses angewandt werden (Abb. 11 Kurve b + c).

Durch den vermehrten Einsatz leistungsfähiger Tischcomputer können die Näherungsmethoden bei der Ermittlung der Schnittgrößen in den Stützen und bei den Spannungs- und Stabilitätsnachweisen durch die exakteren Methoden nach der Spannungstheorie II. Ordnung [3], [4], [17], [18] und [19] ersetzt werden. Ein Programm, das nach den genannten theoretischen Grundlagen rechnet, ist UPARS. [21]

Bei der getrennten Berechnung der Palettenträger und Stützen muß beachtet werden, daß die Schnittgrößen und Verformungen im Anschluss, der ja in beiden Systemen (Palettenträger und Stützen) gleichwohl vorhanden ist, aus der Berechnung des einen mit denen des anderen Systems überlagert werden müssen. Im allgemeinen sind folgende Nachweise zu führen: für die Stützen:

$$N/N_u + M/M_u \leq 1 \quad (a)$$

$$N/N_{uBdk} + M/M_{ukz} \leq 1 \quad (b)$$

für Palettenträger:

$$M_y/M_{uy} + M_z/M_{uz} \leq 1 \quad (c)$$

$$v_{\max} \leq v_{\text{grenz}} \quad (d)$$

für den Anschluss:

$$M_y/2 + M_{eO} \leq M_{Br} \quad (e)$$

Dabei sind:

N = Normalkraft

M = Biegemoment
 N und M sind jeweils der um den Sicherheitsbeiwert vergrößerten maximalen Gebrauchslast ermittelt.

N_u = Traglast aus Druckversuchen

M_u = elastisches Grenzmoment aus Biegeversuchen

$N_{uBdk} = \kappa_z N_u$ = Biegedrillknicklast

κ_z = Faktor nach [16], Gleichung (320)

M_s = Anschlussmoment (Federschnittgröße) aus der Stützenberechnung

M_{eO} = Anschlussmoment aus der Palettenträgerberechnung, M_s und M_{eO} sind jeweils mit den um den Sicherheitsbeiwert vergrößerten maximalen Gebrauchslasten ermittelt.

(a) = Allgemeiner Tragsicherheitsnachweis. Ein Knicknachweis entfällt, wenn bei der Berechnung nach Theorie II. Ordnung die Stabkennzahl

$$\varepsilon = \sqrt{(N \cdot L^2 / EI) \leq 1,0}$$

ist.

(b) = Biegedrillknicknachweis nach [16]. Die ideelle Biegedrillknicklast (Verzweigungslast) kann mit dem Programm Drill [20] durchgeführt werden. Dabei ist es möglich, die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen in den beiden Hauptachsen und für Torsion exakt einzusetzen

und ist nicht auf die mehr spekulative Wahl von Knicklängenbeiwerten angewiesen, wie es die Formel für das Biegedrillknicken nach DIN 4114 erfordert.

(c) = Allgemeiner Tragsicherheitsnachweis für den Palettenträger. Kippen oder Verdrehen kann bei Belastung von doppelt-symmetrischen Palettenträgern mit den üblichen Holzpaletten ausgeschlossen werden, so dass ein gesonderter Nachweis entfällt (siehe auch [2]).

(d) = Gebrauchstauglichkeitsnachweis mit den maximalen Gebrauchslasten ohne Sicherheitsbeiwert. Wegen eines möglicherweise verringerten Elastizitätsmoduls können die wirklichen (messbaren) Verformungen an der ausgeführten Konstruktion größer sein als berechnet. Daher empfiehlt es sich, entweder mit einem reduzierten E-Modul zu rechnen, oder auch bei dem Verformungsnachweis einen Sicherheitsbeiwert einzuführen.

Das Regal in Tiefenrichtung:

Die bei Palettenregalen aus den Stützen und der Vergitterung bestehenden Regalscheiben können näherungsweise idealisiert als ein in der Bodenplatte eingespannter Knickstab (Abb. 15) betrachtet werden, der mit einer von oben nach unten zunehmenden Normalkraft beansprucht wird. Die Berechnung nach Theorie II. Ordnung kann abgekürzt werden, indem man die aus horizontalen Störlasten und den anzusetzenden Imperfektionen resultierenden Schnittgrößen M und Q nach Theorie I. Ordnung mit einem Faktor $k = 1/(1 - N/N_{ki})$ vergrößert [2].

Dabei ist

N = Bemessungslast der Regalscheibe (einschließlich Sicherheitsbeiwert), abgeleitet z.B. aus der Knick-

oder Biegedrillknicklast der Stützen oder aus der Schubtragfähigkeit der Ausfachung.

$$N_{ki} = \frac{\pi^2 EI}{s_k^2 (1 + \pi^2 EI / (s_k^2 S_{id}))}$$

= Verzweigungslast der Regalscheibe

mit

$$s_k = 2 H / \sqrt{3,18}$$

$$I = e^2 A_{St} / 2$$

A_{St} = Stützenquerschnittsfläche

S_{id} = Schubsteifigkeit der Regalscheibe nach den oben angegebenen Formeln mit AD,red ermittelt oder direkt aus den Schubversuchen abgeleitet.

Der Nachweis für die Stützen lautet dann:

$$P_{zul} = \frac{0,5 N / 1,7}{1 + k H \phi_{\sigma} / e} \quad \text{für Lastfall H}$$

$$P_{zul} = \frac{0,5 N / 1,5 - k H_{st} H / e}{1 + k H \phi_{\sigma} / e}$$

für Lastfall Hz

Der kleinere der beiden Werte ist die maßgebende zulässige Stützenlast. Wenn statt dieser Näherung eine genauere Bezeichnung nach Theorie II. Ordnung mit einem Stabwerksprogramm (oder Finite-Elementprogramm) durchgeführt wird, so muss die Anschlusssteifigkeit der Diagonalen oder Horizontalen und insbesondere bei geschraubten Regalscheiben deren Schraubenschlupf durch geeignete Idealisierungen (z.B. reduzierte Querschnittsflächen der Diagonalen oder durch nichtlineare Elemente) berücksichtigt werden.

Werden die Regalscheiben über die Regalgassen hinweg am oberen Ende verbunden, lassen sich die Imperfektionen mit dem Faktor $r_2 = \sqrt{2/(n+1)}$ reduzieren. Hier bedeutet n die Anzahl der verbundenen Regalscheiben. Der Grenzwert dieser Vorverformungen sollte nicht kleiner als $1/500$ sein [9].

Zusammenfassung und Schluss

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen bei vorgegebener Belastung einen gangbaren Weg über Versuche an Regalkomponenten und anschließender statischer Berechnung unter Einbeziehung der experimentellen Ergebnisse zu den erforderlichen Trag sicherheitsnachweisen für Regalanlagen oder bei Umkehrung der Zielrichtung zu ihren zulässigen Gebrauchslasten zu gelangen. Ein anderer Weg ist, die Traglast in Großversuchen am Gesamtsystem zu ermitteln und daraus die zulässige Gebrauchslast direkt abzuleiten. Der Vorteil liegt dabei in der Aktivierung aller Tragreserven und damit in der größtmöglichen Ausnutzung der Konstruktion. Die Nachteile dieses Weges sind aber:

- Großer Aufwand bei der Versuchsdurchführung.
- Große Anzahl von Versuchen, um viele Varianten (verschiedene Stützen-Palettenträger Kombinationen, verschiedene Abmessungen etc.) zu erfassen.
- Schlechte Reproduzierbarkeit (insbesondere bei Verwendung verschiedener Materialien in Wiederholungsversuchen etc.).

So werden Großversuche lediglich als Ergänzungen zu den rechnerisch ermittelten Traglasten durchgeführt und damit die Rechenansätze überprüft und gegebenenfalls korrigiert. Beispiele von Großversuchen an Fachbodenregalen sind z.B. in [3] beschrieben.

Literatur:

[1] Lager- und Betriebseinrichtungen, Gütesicherung RAL-RG 614, 4. Auflage, Ausgabe Nov. 1990, Beuth-Verlag GmbH.

[2] Möll, R.: Palettenregale mit Hakenlaschenverbindungen ohne Längsverbände als Baukastensystem, Teil I: Regaltechnik und Gütesicherung, Der Stahlbau 44 (1975) und Teil II -Berechnungsverfahren, Der Stahlbau 45 (1976), H7 S. 201-211.

[3] Möll, R.: Ein Beitrag zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Fachbodenregalen und Kragarmregalen mit Fachböden, Der Stahlbau 50 (1981), S. 193-238.

[4] Forschungsarbeit Projekt 46 der Studiengesellschaft für Anwendungstechnik von Eisen und Stahl e.V., durchgeführt von Ingenieurbüro Dr. Ing. Möll, Darmstadt: Untersuchung des Tragverhaltens von Regalkonstruktionen unter vorgegebener Lastkonstellation.

[5] Möll, R.: Stahlbau in der Lagertechnik, Regalanlagen in Stahlbauweise, Stahlbau Handbuch, Band 2, Stahlbau Verlagsgesellschaft mbH, Köln 1985, S. 491-518.

[6] RICHTLIJNEN VOOR DE BEREKENING VAN STALEN INDUSTRIELE, MAGAZIJN-STELLINGEN-RSM 1977/79, Opgesteld in opdracht van de „Groep Stelling Fakrikanten-GSF“.

[7] CODE OF PRACTICE FOR THE DESIGN OF STATIC RACKING, STORAGE EQUIPMENT MANUFACTURERS' ASSOCIATION, Revised 1980, Peat. Marwick, Mitchell & Co., 7, Ludgate Broadway, London, EC4V 6DX.

[8] RECOMMANDATIONS POUR LE CALCUL DES RAYONNAGES, Dezember 1984, Syndicat des Industries de Matériels de Manutention - SIMMA, 10. Avenue Hoche, 75382 Paris cedex 08.

[9] Möll, R.: Forschung auf dem Gebiet der Lagertechnik, Neueste Erkenntnisse, aufgezeigt am Beispiel des Palettenregals, Fachhandbuch Lagertechnik und Betriebseinrichtung, Herausgeber: Verband für Lagertechnik und Betriebseinrichtungen, Hochstraße 113, 58095 Hagen, 1. Auflage April 1985.

[10] EUROCODE Nr. 3 Gemeinsame einheitliche Regeln für Stahlbauten (nur bedingter Einsatz für Regale) Brüssel-Luxemburg-Köln 1984 EUROCODE Nr. 3: Design of Steel Structures, Part 1, Entwurfsfassung Aug. 1988 und Annex A: Cold formed thin gauge members and sheeting, Entwurfsfassung Mai 1989.

[11] DAST Richtlinie 016: Bemessung und Konstruktive Gestaltung von Tragwerken aus dünnwandigen kaltgeformten Bauteilen, Entwurfsfassung Oktober 1986, Richtlinie 1988 (nur bedingter Einsatz für Regale).

[12] Federation Europeenne de la Manutention, Section X, FEM 10.2.02: Recommendations for the design of steel staticpallet racking. Entwurfsfassung Sept. 1985. Arbeitspapier der FEM zum Entwurf einer europ. Richtlinie.

[13] DIN 1319, Teil 4: Grundlagen der Messtechnik, Behandlung von Unsicherheiten bei der Auswertung von Messungen, Dez. 1985.

[14] Bleymüller/Gehlert: Statistische Formeln, Tabellen und Programme, Juni 1988, 4. Auflage.

[15] Sachs, Lothar: Statistische Methoden, 6. Aufl. 1987.

[16] DIN 18800: Teile 1 und 2, Stahlbauten, Entwurf Nov. 1990 (nur bedingter Einsatz für Regale).

[17] Klöppel, K. und Ebel, H.: Beitrag zur Berechnung von Stockwerksrahmen auf Stabilität und nach der Spannungstheorie II. Ordnung, Der Stahlbau 31 (1962).

[18] Klöppel, K. und Möll, R.: Berechnung von ebenen Tragwerken nach der Stabilitätsvorschrift DIN 4114 mit Hilfe elektronischer Rechenanlagen, Der Stahlbau 33 (1964).

[19] Klöppel, K. und Friemann, H.: Übersicht über Berechnungsverfahren für Theorie II. Ordnung und von Knickproblemen, Der Stahlbau 33 (1964).

[20] Friemann, H.: Drill, Ein Programm zur Berechnung der ideellen Biegedrillknicklasten gerader Ein- oder Mehrfeldträger, Technische Hochschule, Darmstadt, Januar 1989.

[21] Roßbach, R.: UPARS, Ein universelles Programm für die Analyse von Regalstützen nach Theorie II. Ordnung, Ingenieurbüro Dr. Möll GmbH, Darmstadt (1987, 1988, 1989).