TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG Institut für Baukonstruktion und Holzbau Prof. Dr.-Ing. Martin H. Kessel



Abschlußbericht zum Vorhaben

Imperfektionsmessungen an Nagelplattenbindern (AiF 11631 N)

Die Arbeiten wurden gefördert durch die Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V. mit Mitteln der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen.

Braunschweig, im Januar 2001

Prof. Dr.-Ing. Martin H. Kessel

Dipl.-Ing. André Mertinaschk

0 Inhaltsverzeichnis

0 Inhaltsverzeichnis	3
1 Einleitung	3
2 Grundlagen	6
2.1 Untersuchungsmerkmale	6
2.1.1 Perfekter Binder	<u>7</u>
2.1.2 Impertekter Binder	
2.2 Zufallsgrößen	
2.3 Stichprobe	
2.3.1 Parameter der Stichprobe	
2.3.2 Stichprobenentnahme	
2.3.3 Ubersicht über die Elemente der Stichprobe	
2.3.4 Geometrie der Stichprobe	
3 Messungen	
3.1 Meisverfahren	
3.1.1 Beschreibung der Meßvorrichtung und des Meßablautes	
3.2 Meßgenauigkeit	
3.2.1 Geratetenler	
3.2.2 Fenier bei der Handnabung	26
3.2.3 Fenier am Meßobjekt	
3.2.4 Stenachsentenier	
3.2.5 Beurteilung der Meßgenauigkeit	
4 Auswertungen	
4.1 Datenaulbereitung	
4.1.1 Obernanne und Onnechnung der Meßwerte	دی
4.1.2 Derucksichligung der Mebienler	
4.1.3 Zum Emiliub der elastischen Venomungen	/ ن۵۲
4.1.4 Zuoranung der Mebergebrisse zu den imperiektionen	00
4.2 Verteilungsnypotnese	
4.2.1 Oberprulung der Onabhangigkeit der Ontersuchungsmerkmale	
4.3 Globale Impertection I_{ϕ}	43
4.3.1 Darstellung der globalen Imperfektion über der Binderhöhe	43
4.3.2 Häufigkeitsverteilungen und Dichtefunktionen der Winkel der globalen Imperfektionen der Winkel der globalen der Winkel der globalen Imperfektionen der Winkel der globalen der Winkel der globalen der Winkel der globalen der Winkel der globalen Imperfektionen der Winkel der globalen der Winkel der glo	on45
4.4 Lokale Imperfektion I_e	47
4.4.1 Darstellung der lokalen Imperfektionen über der Obergurtlänge	47
4.4.2 Häufigkeitsverteilungen und Dichtefunktionen der lokalen Imperfektionen	49
4.4.3 Kombination der lokalen Imperfektionen	51
5 Empfehlungen für die normative Festlegung der Imperfektionen	53
5.1 Globale Imperfektion I	53
5.2 Lokale Imperfektion I	
5.2 Approxima	
0.0 AIIIIEIKUIIY	
 Zusannieniassuny I itoratury.orzaiehnie 	סכ קש
1 Επεταιοι νετζειστητιο	
о ліпану	

1 Einleitung

In der heutigen Zeit stellt der Entwurf eines Tragwerks einen Optimierungsprozeß dar, der abgesehen von der Erfüllung ästhetischer Anforderungen nicht nur eine sichere und wirtschaftliche Lösung liefert, sondern eine Lösung, die zusätzlich auch ökologisch vertretbar sein muß. Zu solchen in diesem Sinne optimierten Lösungen zählen Dachtragwerke in Nagelplattenbauart, die, wie in Bild 1-1 und Bild 1-2 zu erkennen ist, in der Regel extrem filigrane volumenoptimierte Strukturen sind. Ihre Primärsysteme sind Fachwerkbinder (Nagelplattenbinder), deren Fachwerkstäbe in den Knoten durch beidseitig von außen eingepreßte Nagelplatten verbunden werden. Da Dächer, wenn irgend möglich, als Satteldächer entworfen werden, werden Nagelplattenbinder in der weit überwiegenden Anzahl als Dreiecksbinder hergestellt. Im Jahr 1999 betrug das geschätzte Produktionsvolumen in der Bundesrepublik Deutschland 320.000 Nagelplattenbinder mit Spannweiten von 5 m bis über 30 m, entsprechend einem Nettoumsatz von 190 Mio. DM. Der Nagelplattenverbrauch betrug dabei geschätzt 4.200 t.



Bild 1-1: Perspektive der Holzlagerhalle

Die einzelnen filigranen Nagelplattenbinder als Primärsysteme besitzen für Einwirkungen in ihrer Ebene große Festigkeit und Steifigkeit, solange sie als perfekt ebene Systeme betrachtet werden. Durch äußere horizontale Einwirkungen, wie z. B. Wind, und in Folge von Imperfektionen, wie material-, herstellungs- und montagebedingte Abweichungen von dem in der Planung angenommenen Idealzustand, werden die Binder jedoch immer auch senkrecht zur Binderebene belastet, für die sie allein keine ausreichende Festigkeit und Steifigkeit besitzen. Erst durch das Zusammenwirken der Binder mit Latten, Pfetten, Rispenbändern und Verbänden entsteht ein räumliches Tragsystem, ein Sekundärsystem, das auch diese Lasten sicher in die Unterkonstruktion weiterleiten kann.



Bild 1-2: Holzlagerhalle

Die im Grenzzustand der Tragfähigkeit zu berücksichtigenden Größen der Imperfektionen, werden ebenso wie die Größen der äußeren horizontalen Einwirkungen durch die Technischen Baubestimmungen vorgeschrieben, da von Imperfektionen ebenso wie z. B. von Wind eine Gefährdung der öffentlichen Sicherheit ausgehen kann. Während die Wahrscheinlichkeit für das Einwirken einer bestimmten Größe der Windlast wegen der in der Region, in der die Baubestimmungen gültig sind, herrschenden klimatischen Bedingungen mit zunehmender Größe der Windlast abnimmt, wird die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten großer Imperfektionen dadurch gering gehalten, daß wiederum durch Technische Baubestimmungen Baustoff-, Produktund Ausführungstoleranzen definiert und Grenzen hierfür gefordert werden.

Der Einfluß der Imperfektionen auf die Grenzzustände der Tragfähigkeit kann nur durch die Berechnung der Beanspruchungen am räumlichen Sekundärsystem ermittelt werden, das aus einem Teil der Primärsysteme und den aussteifenden Bauteilen besteht. Die Berechnung kann entweder geometrisch nichtlinear unter Berücksichtigung der Imperfektionen ∆a in der Systemgeometrie oder linear unter Berücksichtigung von Ersatzlastgruppen bei perfekter Systemgeometrie durchgeführt werden. Größe und Form der Ersatzlastgruppen müssen so gewählt sein, daß sie im Tragwerk Beanspruchungen verursachen, die den durch die Imperfektionen direkt verursachten Beanspruchungen vergleichbar sind.

Da in der für Holzkonstruktionen maßgebenden Norm DIN 1052 keine speziellen Größen der Imperfektionen für Nagelplattenbinder angegeben werden, gab es Zweifel, ob für sie die größeren Werte für Konstruktionen aus Vollholz (Schnittholz) oder die kleineren Werte für Konstruktionen aus Brettschichtholz zu berücksichtigen sind. Obwohl die einzelnen Teile eines Binders aus Vollholz bestehen, spricht für die Verwendung der kleineren Werte, daß die Nagelplattenbinder industriell gefertigt werden und die Wahrscheinlichkeit größerer seitlicher Schiefstellungen bei der Montage der Binder durch den Einbau der ebenfalls industriell gefertigten Aussteifungsbinder eher gering ist.

Bislang liegen über die nach Abschluß der Montage tatsächlich vorhandenen Imperfektionen (Schiefstellungen und Vorkrümmungen) in bestehenden Bauwerken aus Nagelplattenbindern keine statistisch gesicherten Kenntnisse vor. Es existieren einige Ergebnisse über Untersuchungen des räumlichen Tragverhaltens von Binderkonstruktionen in Nagelplattenbauart. Wenn es sich dabei um Ergebnisse von Belastungsversuchen handelt, so wurden diese an Versuchstragwerken mit perfekter Systemgeometrie bei Einwirkung der ständigen Lasten und einer horizontalen Ersatzlast ermittelt. Hierzu zählen die Untersuchungen von *Leicester* (1976), *Möhler* (1982), *Natterer und Kessel* (1985) und *Bainbridge et al* (1997). Wenn es sich um Ergebnisse von Modellrechnungen handelt, so wurden die dabei berücksichtigten Imperfektionen den Normen entnommen. Hierzu zählen Untersuchungen von *Pienaar* (1984), *Natterer und Kessel* (1985), *Biger* (1991), *Kessel* (1996) und *Gerold* (1998). Statistisch gesicherte Meßergebnisse von Imperfektionen liegen bislang nur für Stützen von *Ehlbeck und Blaß* (1987) vor.

Daher wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die Größe und Form der Imperfektionen von 45 Satteldachbindern gemessen, statistisch ausgewertet und daraus Empfehlungen für normative Festlegungen abgeleitet.

2 Grundlagen

2.1 Untersuchungsmerkmale

Untersuchungsmerkmale sind die Imperfektionen der in der Bundesrepublik Deutschland montierten Satteldachbinder. Dazu gehören alle symmetrischen und unsymmetrischen Dreiecksbinder auch mit einseitiger oder beidseitiger Anfangshöhe.

Beispielhaft ist in Bild 2-1 ein Teil einer symmetrischen Satteldachkonstruktion in Nagelplattenbauart dargestellt. Sie besteht aus 10 einzelnen Primärsystemen, den Dreiecksbindern, die durch zwei in Obergurtebene zwischen den ersten beiden Dreiecksbindern angeordneten parallelgurtigen Fachwerkbinder, durch ein diagonal vom First zur Traufe befestigtes Windrispenpaar und durch die zugehörigen Pfettenstränge zum Sekundärsystem ergänzt sind.



Bild 2-1: Perspektivische Darstellung einer typischen Nagelplattenbinderkonstruktion

Zur einfacheren und übersichtlicheren Darstellung der Imperfektionen wird im weiteren nur noch ein Binder betrachtet. Da in der Tragwerksplanung die Beanspruchungen des Sekundärsystems an einem aus seinen Systemachsen gebildeten idealisierten statischen Modell berechnet werden, werden auch hier der einzelne Binder auf seine Stabachsen reduziert und alle Imperfektionen in Bezug auf dieses Modell angegeben. Abweichungen des Dreiecksbinders und seiner Teile in seiner Ebene von den im Entwurf angenommenen und in den Bauunterlagen dokumentierten geometrischen Daten werden hier ebensowenig behandelt, wie die im Modellentwurf eigentlich zu berücksichtigenden Exzentrizitäten der Stabachsen in den Knotenpunkten.

2.1.1 Perfekter Binder

Das in Bild 2-2 dargestellte Modell eines Dreiecksbinders ist in dem Sinne perfekt, daß alle Stabachsen in der x-z-Ebene liegen. Das Modell ist also perfekt eben und steht perfekt lotrecht. Es stellt genau die angestrebte Zielkonfiguration eines Binders dar.



Bild 2-2: Modell eines Dreiecksbinders der W – Form

2.1.2 Imperfekter Binder

Ein Binder ist dann imperfekt, wenn sein zugehöriges Modell von der in 2.1 beschriebenen Zielkonfiguration geometrisch abweicht. Die geometrischen Imperfektionen werden durch die in y-Richtung meßbaren Abweichungen vom perfekten Binder beschrieben.

Abweichungen der Punkte A und B von der perfekten Position auf der Unterkonstruktion werden hier nicht behandelt.

Im Folgenden wird angenommen, daß sich die Geometrie des Modells jedes beliebig geometrisch imperfekten Binders durch die Addition der Imperfektion

$$I = \left\{ i_G \in IR \mid i_G(x, z) = \sum_{j=1}^{n_G} \left(e_{G,j} \sin j \frac{2\pi}{L} x \right) - z_G \varphi \right\}$$

Gl. 2.1-1

zum geometrisch perfekten Modell erzeugen läßt. Der Index G steht für den Bereich, in dem die Imperfektion i_G beschrieben wird.

Als Beispiel ist in Bild 2-3 das Modell eines imperfekten Binders für $\phi < 0$ und bereichsweise unterschiedlichen n_G, e_{Gi} dargestellt.

 $\begin{array}{l} \mbox{Bereich Obergurt links: } e_{_{Ol,2}} < 0 \ \ \mbox{sonst } e_{_{Ol,j}} = 0 \ \mbox{für alle j} \\ \mbox{Bereich Obergurt rechts: } e_{_{Or,j}} = 0 \ \mbox{für alle j} \\ \mbox{Bereich Untergurt: } e_{_{U,1}} > 0 \ \ \mbox{sonst } e_{_{U,j}} = 0 \ \mbox{für alle j} \end{array}$



Bild 2-3: Modell eines imperfekten Binders

Wie Gl. 2.1-1 und Bild 2-3 zeigen, setzt sich die Imperfektion I aus zwei Anteilen zusammen, die im folgenden als globale und lokale Imperfektionen unterschieden werden.

Globale Imperfektion

Die globale Imperfektion I_{ϕ} beschreibt die Abweichung des Binders von der lotrechten Position durch den Winkel ϕ . Für kleine Winkel ϕ gilt

$$I_{\phi} = \left\{ \! i_{\phi,G} \in I\!R \hspace{0.1cm}, \hspace{0.1cm} i_{\phi,G} \! \left(x,z \right) \! = \! - \! z_{G} \phi \! \right\}$$

Gl. 2.1-2

und für die Abweichungen der Stabachsen der Obergurte von der Zielkonfiguration kann geschrieben werden

$$I_{\varphi} = \left\{ i_{\varphi,O} \in IR \; \left| \begin{array}{l} i_{\varphi,OI}(x,z) = \frac{2h}{L} x\varphi, 0 \le x \le \frac{L}{2} \; \text{ mit } z_{OI} = -\frac{2h}{L} x \\ i_{\varphi,OI}(x,z) = 2h \left(1 - \frac{x}{L}\right) \varphi, \frac{L}{2} < x \le L \; \text{ mit } z_{OI} = 2h \left(\frac{x}{L} - 1\right) \right\}. \right\}$$

Gl. 2.1-3

Die Imperfektion im Firstpunkt C hat dann die Größe $\,i_{\phi,C}=\phi\cdot h\,.$



Bild 2-4: Globale Imperfektion

Lokale Imperfektion

Die lokale Imperfektion beschreibt die Form der Gurtstäbe und wird im folgenden auch als Vorkrümmung

$$I_{e} = \begin{cases} i_{e,O} \in IR \\ i_{e,OI}(x,z) = \sum_{j=1}^{n_{OI}} e_{OI,j} \sin j \cdot \frac{2\pi}{L} x, 0 \le x \le \frac{L}{2} \text{ mit } z_{OI} = -\frac{2h}{L} x \\ i_{e,OI}(x,z) = \sum_{j=1}^{n_{OI}} e_{OI,j} \sin j \cdot 2\pi \left(1 - \frac{x}{L}\right), \frac{L}{2} < x \le L \text{ mit } z_{OI} = 2h \left(\frac{x}{L} - 1\right) \\ i_{e,U} \in IR \ | i_{e,U}(x,z) = \sum_{j=1}^{n_{U}} e_{U,j} \sin j \cdot \frac{\pi}{L} x \text{ mit } z_{U} = 0 \end{cases}$$

Gl. 2.1-4

bezeichnet.

In Bild 2-5 ist eine mögliche lokale Imperfektion für den Bereich Obergurt links dargestellt: $e_{ol,1} > 0$, sonst $e_{ol,j} = 0$ für alle j.



Bild 2-5: Lokale Imperfektion des Binderobergurtes

2.2 Zufallsgrößen

Die Untersuchungsmerkmale sollen dadurch quantifiziert werden, daß die Imperfektionen einer begrenzten Anzahl von Bindern, deren Auswahl durch das Ergebnis ω eines Zufallsexperimentes bestimmt wird, als Zufallsgrößen

I: $\omega \to I(\omega) \in \mathsf{IR}$

bestimmt werden. Jedem zufällig ausgewählten Binder ω werden seine Imperfektionen I(ω) zugeordnet. Die Imperfektionen sind quantitativ und rational skalierbar und im Sinne der DIN 53804-1 kontinuierliche und meßbare Merkmale. Sie können innerhalb eines endlichen Bereiches jeden beliebigen Wert annehmen, ein unendlich genaues Meßverfahren vorausgesetzt.

2.3 Stichprobe

2.3.1 Parameter der Stichprobe

Eine repräsentative Stichprobe muß einen ausreichenden Umfang besitzen und ihre Entnahme muß zufällig sein. Der Umfang einer Stichprobe wird mit n bezeichnet und beschreibt die Anzahl der zufällig ausgewählten Binder.

Zur Beschreibung des Untersuchungsmerkmals der Stichprobe werden der empirische Mittelwert

$$\bar{i} = \frac{1}{n} (i_1 + i_2 + ... + i_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i_i$$
,

Gl. 2.3-1

der Median \tilde{i} , das ist der Mittelwert bezogen auf die Anzahl der Meßwerte, der Modalwert \hat{i} , der den Merkmalswert mit der größten Häufigkeit beschreibt, die empirische Varianz

$$s^{2} = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^{n} i_{i}^{2} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^{n} i_{i} \right)^{2} \right]$$

Gl. 2.3-2

und der Maximum-Likelihood Schätzwert für die Standardabweichung

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\sum_{i=l}^n \left(\frac{x_i^2}{n}\right)}$$

nach Cohen und Whitten (1988) benutzt.

Gl. 2.3-3

2.3.2 Stichprobenentnahme

Die Stichprobenentnahme erfolgte durch eine mehrstufige geschichtete Zufallsauswahl. In der ersten Stufe wurden aus der Menge aller Firmen mit dem RAL-Gütezeichen sechs zufällig ausgewählt. Dann erfolgte eine Schichtung durch Zufallsauswahl von Bauvorhaben je gewähltem Hersteller. Hierbei mußte berücksichtigt werden, daß nur Bauvorhaben in Frage kommen, die eine Messung der Imperfektionen zulassen. Dazu zählen alle Bauvorhaben im Montagezustand oder Bauvorhaben deren Binderkonstruktionen offen oder zumindest begehbar waren.



Bild 2-6: Entnahme der Stichprobe als mehrstufige geschichtete Zufallsauswahl

Aus jedem ausgewählten Bauwerk wurden in der zweiten Stufe ein bis drei Satteldachbinder vermessen. Die Messung aller Binder zur Untersuchnung des Einflusses der Kopplung der einzelnen Binder im Gesamttragwerk war wegen des erheblich größeren Aufwands nicht möglich.

Bei Entnahme der Stichprobe der ersten Stufe weigerten sich zwei Unternehmen, an den Untersuchungen teilzunehmen. Daher mußten zwei Unternehmen nachgezogen werden. Über den Einfluß der Fertigungs- und Montagequalität der ausgeschiedenen Unternehmen auf das Untersuchungsergebnis kann nichts ausgesagt werden. Trotzdem wurde davon ausgegangen, daß es sich bei den schließlich ausgewählten Unternehmen um eine repräsentative Stichprobe handelt.

2.3.3 Übersicht über die Elemente der Stichprobe

Die in der Schichtung ausgewählten und gemessenen Bauvorhaben werden durch die folgenden Kurzinformationen und Darstellungen im Maßstab 1:180 beschrieben.

Bauvorhaben A: Sortierhalle

- allseitig geschlossene Halle
- Messung eines Binders zwischen zwei Verbänden und eines Binders am Verband



- Binderlänge L=19,25m
- Dachneigung α=15,0°

Bauvorhaben B: Holzlagerhalle 1

- einseitig komplett offene Lager- und Werkhalle
- Messung eines Binders zwischen zwei Verbänden



- Binderlänge L=18,00m
- Dachneigung α=15,0°

Bauvorhaben C: Sporthalle

- neugebaute Walmdachkonstruktion
- Messung eines Scherenbinders im Mittelbereich

- Binderlänge L=14,49m
- Dachneigung α =22,0°

Bauvorhaben D: Anbau Bürogebäude

- Neubau eines zweigeschossigen Anbaus an ein bestehendes Bürogebäude
- Messung eines Binders zwischen zwei Verbänden



- Binderlänge L=14,65m
- Dachneigung α=16,0°

Bauvorhaben E: Carport 1

- Neubau eines Carports mit kleinen Bindern
- Messung von zwei Bindern zwischen den Verbänden



- Binderlänge L=7,50m
- Dachneigung α=20,0°

Bauvorhaben F: Carport 2

- Neubau eines Carports mit kleinen Bindern
- Messung eines Binders zwischen zwei Verbänden



- Binderlänge L=7,26m
- Dachneigung α=22,0°

Bauvorhaben G: Fertighalle 1

- landwirtschaftliche Lagerhalle
- Messung von zwei Scherenbindern im Mittelbereich

- Binderlänge L=13,00m
- Dachneigung α=28,0°

Bauvorhaben H: Einkaufsmarkt 1

- geschlossene Dachkonstruktion
- Messung von zwei Bindern im Mittelbereich



- Binderlänge L=21,21m
- Dachneigung α=20,0°

Bauvorhaben I: Einkaufsmarkt 2

- geschlossene Dachkonstruktion
- Messung eines Binders im Mittelbereich und eines Binders am Verband



- Binderlänge L=21,01m
- Dachneigung α=20,0°

Bauvorhaben J: Fertighalle 2

- einseitig bis zu 50% zu öffnende landwirtschaftliche Lagerhalle
- Messung eines Scherenbinders im Mittelbereich und eines Scherenbinders am Verband



- Binderlänge L=16,00m
- Dachneigung α=24,0°

Bauvorhaben K: Fertighalle 3

- einseitig bis zu 50% zu öffnende landwirtschaftliche Lagerhalle
- Messung eines Scherenbinders im Mittelbereich und eines Scherenbinders am Verband

- Binderlänge L=16,00m
- Dachneigung α=24,0°

Bauvorhaben L: Fertighalle 4

- einseitig bis zu 50% zu öffnende landwirtschaftliche Lagerhalle
- Messung von drei Scherenbindern im Mittelbereich



- Binderlänge L=13,00m
- Dachneigung α=28,0°

Bauvorhaben M: Einkaufsmarkt 3

- neugebaute Pultdachkonstruktion
- Messung eines Pultbinders im Mittelbereich und eines Pultbinders am Verband



- Binderlänge L=17,51m
- Dachneigung α=14,0°

Bauvorhaben N: Einkaufsmarkt 4

- geschlossene Dachkonstruktion
- Messung eines Binders im Mittelbereich und eines Binders am Verband



- Binderlänge L=25,62m
- Dachneigung α=22,0°

Bauvorhaben O: Einkaufsmarkt 5

- neugebaute Satteldachkonstruktion
- Messung von zwei Bindern im Mittelbereich und eines Binders am Verband



- Binderlänge L=25,47m
- Dachneigung α=20,0°

Bauvorhaben P: Einkaufsmarkt 6

- neugebaute Walmdachkonstruktion
- Messung eines Binders im Mittelbereich und eines Binders am Verband



- Binderlänge L=30,59m
- Dachneigung α=21,0°

Bauvorhaben Q: Holzlagerhalle 2

- komplett offene Lagerhalle mit seitlichen Überständen
- Messung von zwei Bindern zwischen zwei Verbänden



- Binderlänge L=27,12m
- Dachneigung α=15,0°

Bauvorhaben R: Leimhalle

- Werkhalle aus Greimbindern mit Anfangshöhe beidseitig
- Messung von zwei Bindern zwischen zwei Verbänden



- Binderlänge L=11,69m
- Dachneigung α=3,4°

Bauvorhaben S: Fertigungshalle

- Werkhalle aus Greimbindern mit Anfangshöhe beidseitig
- Messung eines Binders zwischen zwei Verbänden



- Binderlänge L=16,51m
- Dachneigung α =3,5°

Bauvorhaben T: Finishinghalle

- Werkhalle aus Greimbindern mit Anfangshöhe beidseitig
- Messung eines Binders zwischen zwei Verbänden



- Binderlänge L=17,50m
- Dachneigung α=3,3°

Bauvorhaben U: Abbundhalle

- Werkhalle aus Greimbindern mit Anfangshöhe beidseitig
- Messung eines Binders zwischen zwei Verbänden



- Binderlänge L=17,50m
- Dachneigung α =3,3°

Bauvorhaben V: Holzlagerhalle 3

- komplett offene Lagerhalle mit seitlichen Überständen
- Messung von zwei Bindern zwischen zwei Verbänden



- Binderlänge L=27,12m
- Dachneigung α=15,0°

Bauvorhaben W: EFH

- neugebaute kleine Walmdachkonstruktion
- Messung eines Binders im Mittelbereich und eines Binders am Verband

- Binderlänge L=10,37m
- Dachneigung α=30,0°

Bauvorhaben X: Hochregallager

- allseitig geschlossene Lagerhalle mit zwei 6m Toren in den Längsseiten
- Messung eines Binders zwischen zwei Verbänden



- Binderlänge L=27,12m
- Dachneigung α=15,0°

Bauvorhaben Y: Holzlagerhalle 4

- allseitig offene Lagerhalle mit seitlichen Überständen
- Messung von drei Bindern zwischen den Verbänden



- Binderlänge L=18,00m
- Dachneigung α=15,0°

2.3.4 Geometrie der Stichprobe

In Bild 2-7 sind die Häufigkeitsverteilungen der Binderlängen und der Dachneigungen der gemessenen Konstruktionen dargestellt.



Bild 2-7: a Häufigkeitsverteilung Binderlänge

b Häufigkeitsverteilung Dachneigungen

Das arithmetische Mittel der Binderlängen in Bild 2-7a beträgt 18,45 m und liegt damit sehr nahe bei dem Mittelwert der Marktstudie der GIN, die bereits in der Einleitung erwähnt wurde. Der Mittelwert der Dachneigungswinkel in Bild 2-7b beträgt 18,5°. Die Binder in der Klasse um den Klassenmittelwert 2° sind Greimbinder.



Bild 2-8: Dachneigungswinkel vs. Binderlängen

In Bild 2-8 sind die Dachneigungswinkel über den Binderlängen für die beiden Verbindungstechniken aufgetragen. Die Greimbinder stellen den Übergang vom Satteldachbinder mit Anfangshöhe zum parallelgurtigen Fachwerkbinder dar. Zum Vergleich sind in Bild 2-9 nur die Nagelplattenbinder dargestellt. Hier zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von Binderlänge und Dachneigungswinkel.



Bild 2-9: Dachneigungswinkel vs. Binderlängen der Nagelplattenbinder

3 Messungen

3.1 Meßverfahren

Das Meßverfahren wurde so entwickelt, daß es auch unter sehr schwierigen Bedingungen, wie extrem hohe oder schlecht zugängliche Konstruktionen oder schlechte Sichtverhältnisse, Meßergebnisse ausreichender Genauigkeit lieferte.

3.1.1 Beschreibung der Meßvorrichtung und des Meßablaufes

Die Messungen wurden mit einem Theodolit Th 2 (Bild 3-1) der Firma Carl Zeiss durchgeführt. Für die zu messenden Größen war dieses Meßgerät mehr als ausreichend genau.





Bild 3-1: Meßgerät

Der Theodolit wurde auf einem Stativ S2R aufgebaut, das auf einer Stativspinne stand. Auf den Stativteller, der waagerecht über dem Zentrierpunkt eingestellt wurde, konnte das Meßgerät montiert werden. Die Horizontierung erfolgte über zwei verschiedenartige Einmeßvorrichtungen. Zuerst wurde mit Hilfe der Alhidaden-Dosenlibelle (Genauigkeit 10⁻/2 mm) der Theodolit grob justiert. Im Anschluß daran erfolgte eine Feinjustierung mit zwei Alhidaden-Querlibellen bis die Instrumentenachse genau senkrecht stand (Genauigkeit 20⁻/2 mm).

Der Theodolit wurde unterhalb des zu messenden Binders im Abstand von ca. 5-20 cm neben diesem aufgebaut. Auf Bild 3-2 ist die durch den Theodoliten erzeugte vertikale Ebene und die Lage des zu messenden Binders in Relation dazu dargestellt. Diese vertikale Ebene wurde in folgenden Arbeitsschritten erzeugt. Nach dem Aufbau und der Justierung des Meßgerätes unter Einhaltung des seitlichen Abstandes zum Binder wurde die Verdrehung des Theodoliten um die vertikale Achse (z-Achse) durch die Seitenklemme verhindert.



Bild 3-2: Schematisierte Darstellung der Meßvorrichtung

Ausgehend von dieser Ebene konnten nun die y-Ordinaten der Binderknotenpunkte ermittelt werden. Die Abstände, wie z. B. C,C' in Bild 3-2, wurden mit Hilfe eines Zollstocks gemessen. Hierzu wurde das erste 20 cm Stück des Zollstocks am Ende eines Teleskopstabes mit Hilfe eines rechten Winkels befestigt, wie in Bild 3-5 dargestellt. Der Teleskopstab konnte bis zu einer Länge von 4 m ausgezogen werden. Der Zollstock wurde senkrecht an den zu messenden Binder gehalten und die Distanz mit Hilfe des Theodoliten abgelesen. Gemessen wurden die

Knotenpunkte der jeweiligen Binder, da bei der Auswertung nur diese Geometriedaten aus den Bauunterlagen entnommen werden konnten. In dem in Bild 3-3 dargestellten Meßprotokoll wurden die ermittelten Werte protokolliert. Weiterhin wurden Besonderheiten des Aussteifungskonzeptes, der Gesamtkonstruktion und der vorhandenen Lasten und Einwirkungen vermerkt.



Bild 3-3: Meßprotokoll

3.2 Meßgenauigkeit

Eine Beurteilung der Meßergebnisse ist nur bei bekannten und gewerteten Meßfehlern sinnvoll und möglich. Die Auswertung mußte daher auch immer den Einfluß der Fehler, die bei den einzelnen Messungen auftreten, auf die Meßergebnisse beinhalten (siehe auch *Lindner und Gietzelt* 1983 bzw. *Ehlbeck und Blaß* 1987). Für die hier durchgeführten Messungen waren die

- Gerätefehler
- Fehler bei der Handhabung
- Fehler am Meßobjekt
- Stehachsenfehler

zu berücksichtigen.

3.2.1 Gerätefehler

Der Zielachsenfehler, der bei der Horizontalwinkelmessung auftreten kann, wird vom Hersteller des Theodoliten mit

± 0,25 mgon

angegeben. Der Einfluß dieses Fehlers auf die Messungen ist linear vom horizontalen Abstand des Meßgerätes zum Meßpunkt abhängig. Der aus dem Zielachsenfehler resultierende Meßfehler ist in Bild 3-4 dargestellt.



Bild 3-4: Meßfehler Δv_1 infolge Gerätefehler

3.2.2 Fehler bei der Handhabung

Als Fehler bei der Handhabung werden alle Einflüsse bezeichnet, deren Ursache nicht im Gerät sondern in Unzulänglichkeiten des Vermessers bzw. der Umgebungsverhältnisse zu finden sind. Dazu gehören variierende Lichtverhältnisse, Ungenauigkeiten beim Ablesen und vor allem das Runden der Werte auf ganze Millimeter.

In den folgenden Bildern sind die möglichen Fehler dargestellt, die bei dieser Meßmethode auftreten können. Bild 3-5 zeigt eine fehlerfreie Messung. Die vom Theodoliten erzeugte Ebene ist vertikal und auch der Zollstock und der Querschnitt haben keine Neigung. Die Querschnittsabmessungen entsprechen den Sollmaßen. Der vertikale Strich des Fadenkreuzes deckt genau den Millimeterstrich des Zollstockes ab. Es wird kein Handhabungsfehler gemacht.



Bild 3-5: Darstellung einer fehlerfreien Messung

In Bild 3-6 ist ein Fehler beschrieben, der durch die Neigung des Zollstockes entsteht. Dieser Fehler wird dadurch beschränkt, daß eine Ablesung nur durchgeführt wird, wenn die Vertikale des Fadenkreuzes innerhalb von 2 Millimeterstrichen des Zollstockes liegt. Unter Berücksichtigung der Aufkantung des Zollstockes, wie in Bild 3-6 zu sehen ist, läßt sich dieser Handhabungsfehler einschließlich des aus dem Runden auf ganze Millimeter resultierenden Fehlers für den Zollstockbereich 0-20 cm auf maximal 1 mm beschränken.



Bild 3-6: Messung mit geneigtem Zollstock

Mit dem Runden auf ganze Millimeter werden die Fehler, die aus Ableseungenauigkeiten in Abhängigkeit der Meßpunktentfernung entstehen, weitgehend eliminiert. Damit sind die Handhabungsfehler unabhängig von der Entfernung mit maximal

 $\Delta v_2 = \pm -1 \text{ mm}$

anzusetzen.

3.2.3 Fehler am Meßobjekt

Zu den Fehlern am Meßobjekt gehören alle Abweichungen der Bauteile und Querschnitte von den im Entwurf angenommenen Abmessungen. Es ist beispielsweise unmöglich, bei jeder Messung die rechnerische Schwerachse der Gurtquerschnitte zu treffen. Daher wurden nach Möglichkeit an jedem Knotenpunkt zwei Messungen durchgeführt, wobei die Ober- und die Unterkante aufgenommen wurden. Der Mittelwert dieser Messungen geht dann in die weitere Auswertung ein.



Bild 3-7: Messung bei abweichenden Querschnitten

Hinzu kommt noch, daß die Oberflächen der Binder sägerauh sind und damit allein dort Unebenheiten in der Größenordnung von

 $\Delta v_3 = \pm -1 \text{ mm}$

auftreten können. In Bild 3-7 ist ein Fehler dargestellt, der durch Abweichungen der Querschnittsmaße entsteht. Für die Auswertung wird jedoch davon ausgegeangen, daß diese

Änderungen der Querschnittsmaße, die im wesentlichen mit dem Schwindverhalten des Holzes erklärt werden können, über den gesamten Binder in gleicher Größe auftreten und damit bei der Fehlersummation unberücksichtigt bleiben können.



Bild 3-8: Messung bei verdrehtem Querschnitt

Weitere Meßobjektfehler sind Verdrehungen und Querkrümmungen des Querschnitts, die auch zu Fehlern bei den Meßwerten führen. Die Vorgaben zur Herstellung sind in DIN EN 1059 geregelt. Diese Norm läßt folgende Fehler bei der Verarbeitung, bezogen auf 20% Holzfeuchte, zu:

- Längskrümmung der Schmalseite: höchstens 4mm je 2m Länge
- Längskrümmung der Breitseite: höchstens 10mm je 2m Länge
- Verdrehung: 1mm je 25mm Breite je 2m Länge
- Querkrümmung: höchstens 2mm je 100mm der Breitseite

Die Längskrümmungen der Schmalseite sind das Untersuchungsziel und wurden auch dann erfaßt, wenn sie größer als die Herstellungstoleranz waren. Die Längskrümmungen der Breitseite spielten bei der Messung der Imperfektionen keine Rolle. In Bild 3-8 ist zu erkennen, daß zumindest die Verdrehungen durch die Messungen an Ober- und Unterkante des Querschnitts zuverlässig eliminiert werden. Der Einfluß der Querkrümmungen konnte nicht erfaßt werden.

3.2.4 Stehachsenfehler



Bild 3-9: Messung bei geneigter Theodolitenebene

Der Stehachsenfehler, der durch imperfekte Horizontierung des Theodoliten entsteht (Bild 3-9) und durch den Winkel ψ_3 definiert ist, unterscheidet sich von den anderen Meßfehlern dadurch, daß er für jede Meßreihe eine feste Größe annimmt. Der aus einer Neigung der Stehachse resultierende Fehler wird mit zunehmender vertikaler Entfernung des Meßpunktes vom Theodoliten größer. Der mittlere Justierungsfehler, hier angenommen zu +/- 1 Teilstrich (20"/2mm) bei der Horizontierung durch die Alhidadenquerlibelle, ergibt einen Fehler von

 $\Delta v_4 = +/- 1 mm$

bei einer Meßpunkthöhe von 10m.



Bild 3-10: Einfluß des Stehachsenfehlers auf die Messung in Abhängigkeit von der Höhe

Der Einfluß dieses Fehlers ist aber nur bei der globalen Imperfektion zu berücksichtigen, da die lokalen Imperfektionen bezüglich der Ausgangsebene berechnet wurden und somit von diesem Fehler unbeeinflußt blieben. Für die globale Imperfektion, die als Verdrehung des starren Binders um die Traufpunkte A, B definiert ist, war daher nicht der Abstand des Meßpunktes vom Theodoliten entscheidend, sondern die Binderhöhe h. In Bild 3-10 sind die aus dem Stehachsenfehler resultierenden zusätzlichen horizontalen Abweichungen der Punkte A, B und C dargestellt. Die Differenz $\Delta v_{c} - \Delta v_{B}$ gibt damit den zu berücksichtigenden Fehler für die globale Imperfektion an. In Bild 3-11 ist die Abhängigkeit des Stehachsenfehlers von der Binderhöhe dargestellt.





3.2.5 Beurteilung der Meßgenauigkeit

Die Beschreibung der möglichen Fehlerquellen und deren Größenordnung läßt eine Aussage über den Gesamtfehler zu, der bei der weiteren Auswertung zu berücksichtigen war. Der Stehachsenfehler ist bezogen auf eine Meßreihe als systematischer Fehler einzustufen, da das Meßgerät je Meßreihe nur einmal aufgebaut und justiert wurde. Der von der Höhe des Meßpunktes abhängige Fehler mußte in der weiteren Berechnung separat berücksichtigt werden, da er nur Einfluß auf die globale Imperfektion des Binders hat. Die lokalen Imperfektionen sind von diesem Fehler unbeeinflußt.

Problematischer ist hingegen die Einschätzung der Handhabungsfehler und der Fehler am Meßobjekt. Die sägerauhen Oberflächen und die Neigungen der Stäbe und des Zollstockes ermöglichen einen Fehler bei der Messung, der das Runden auf 1 mm bei der Ablesung mehr als rechtfertigt. Der Summation dieser Fehler wurde dadurch vorgebeugt, daß an jedem Knotenpunkt sowohl die Ober- als auch die Unterkante gemessen wurden. Die Mittelwerte dieser Messungen sind mit kleineren Fehlern behaftet. Die Wahrscheinlichkeit, daß alle Fehler mit ihrer maximalen Größe gleichzeitig auftreten und damit ungünstig summiert werden müssen, wird als sehr gering angenommen. Daher wird zur Ermittlung des Gesamtfehlers die Wurzel der Summe der Fehlerquadrate

$$\pm \Delta v = \sqrt{(\Delta v_1^2 + \Delta v_2^2 + \Delta v_3^2 + \Delta v_4^2)}$$

Gl. 3.2-1

gebildet. Der Einfluß der Binderhöhe auf den Gesamtfehler ist in Bild 3-12 zu erkennen.



Bild 3-12: Binderhöhenabhängiger Gesamtfehler

4 Auswertungen

4.1 Datenaufbereitung

4.1.1 Übernahme und Umrechnung der Meßwerte

Die Meßdaten werden aus den Meßprotokollen in eine Tabellenkalkulation übertragen. Um eine einheitliche Datenbasis zu erhalten, müssen die Meßergebnisse in allgemeine, vergleichbare und auswertbare Daten überführt werden. In Bild 4-1 sind die gemessenen Abstände a_i' der Knotenpunkte, die auf die vom Theodoliten erzeugte Ebene bezogen sind, dargestellt.



Bild 4-1: Binder A, B, C und Theodolitenebene A', B', C'

Diese Daten werden im Folgenden in 3 Schritten auf die vom Firstpunkt C und den Traufpunkten A und B vorgegebene Ebene des Binders umgerechnet.

Im ersten Schritt werden die Knotenpunkte so um das Maß a_A '= a_1 ' verschoben, daß a_A "= a_1 "=0 wird.





Daraus ergeben sich die y-Koordinaten a," der Knotenpunkte zu

$$a_{i}'' = a_{i}' - a_{1}'$$
; $i = 1,...,n$,

Gl. 4.1-1

wie in Bild 4-2 dargestellt.

Im zweiten Schritt werden die Knotenpunkte um die z-Achse des Punktes A um den Winkel a_B "/L so gedreht, daß a_B "=0 wird. Daraus ergeben sich in Bild 4-3 die y-Koordinaten a_i " der Knotenpunkte zu

$$a_{i}^{""} = a_{i}^{"} - \frac{a_{B}^{"}}{L}L_{i}$$
; $i = 1,...,n$.



Bild 4-3: Binder A, B, C und Projektionsebene A", B", C"

Im dritten Schritt werden die Knotenpunkte um die Achse A,B um den Winkel a_c ^('')/h so gedreht, daß a_c ^(''')=0 wird. Daraus ergeben sich in Bild 4-4 die y-Koordinaten a_i ^(''') der Knotenpunkte zu

$$a_{i}^{m'} = a_{i}^{m} - \frac{a_{C}^{m}}{h} h_{i}$$
; $i = 1,...,n$.

Gl. 4.1-3

Die x- und z-Koordinaten der Knoten i wurden den Bauunterlagen entnommen, die für jedes Bauvorhaben vorlagen.



Bild 4-4: Binder A, B, C und Projektionsebene A"", B"", C""

Um aus den Abweichungen a_i"" in diskreten Knotenpunkten auf die Abweichungen aller nicht gemessenen Zwischenpunkte schließen zu können, wurden für eine Sinusreihe

$$\mathbf{y}(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{n} \left(\mathbf{V}_{j} \cdot \sin(j \cdot \boldsymbol{\pi} \cdot \frac{\mathbf{x}}{L}) \right)$$

Gl. 4.1-4

als Interpolationsfunktion die Funktionsparameter V_j über die übliche Minimierung der Abstandsquadrate

$$\sum_{i=1}^{n} (y_i - V_1 \cdot \sin(\pi \cdot \frac{x_i}{L}) - V_2 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot \frac{x_i}{L}) - V_3 \cdot \sin(3 \cdot \pi \cdot \frac{x_i}{L}) - V_4 \cdot \sin(4 \cdot \pi \cdot \frac{x_i}{L}))^2 = Min.$$

bestimmt. Dabei zeigte sich, daß eine Beschränkung auf 4 Reihenglieder eine ausreichende Qualität der Beschreibung ermöglicht. Mit Hilfe dieser Interpolationsfunktion war es möglich, die Abweichungen a_i"" in symmetrische und antisymmetrische Anteile aufzuspalten. Das war insbesondere für die Kontrolle der Meßergebnisse durch eine anschauliche Darstellung der Abweichungen a_i"" wie in Bild 4-5 sehr vorteilhaft.



Bild 4-5: Darstellung der Abweichungen a_i ^{""} als Summe aus symmetrischen und antisymmetrischen Anteilen

4.1.2 Berücksichtigung der Meßfehler

Der Einfluß des Meßfehlers auf die Abweichung a_{C} " wurde durch Addition einer Zufallszahl x mit

$$-\Delta v \le x \le +\Delta v$$

Gl. 4.1-5

und $\pm \Delta v$ nach Gl. 3.2-1 berücksichtigt. Entsprechend wurde der Meßfehler in den Abweichungen a_i ^{""} durch eine eben solche Zufallszahl x, um die ausschließlich der Amplitude des ersten Sinusreihengliedes V₁ vergrößert wurde, berücksichtigt.

4.1.3 Zum Einfluß der elastischen Verformungen

Die gemessenen Abweichungen enthielten auch Verformungen aus den zum Zeitpunkt der Messung wirkenden Lasten. Zu diesen Lasten gehörte das Eigengewicht der Binder und eventueller Dachaufbauten, sowie die mit Hilfe der Beaufortskala (Beaufort 1774-1857) bestimmten Windeinwirkungen. Die maximal ermittelten Windgeschwindigkeiten lagen bei 17 m/s. Dies entspricht einem Staudruck von q=0,18 kN/m². Es lag zu keinem Meßzeitpunkt Schnee.

Zur Ermittlung der Größe der durch diese Lasten verursachten Verformungen wurde ein imperfektes räumliches Modell von Bindern geometrisch nichtlinear berechnet. Dabei wurden auf der sicheren Seite liegend eher untere Grenzen der Gewichtslasten und mittlere Steifigkeiten der Bauteile und ihrer Anschlüsse berücksichtigt. Die Ergebnisse zeigten, daß der Anteil der Verformungen in y-Richtung gegenüber den gemessenen Abweichungen vernachlässigbar klein war, da die Verformungen im Bereich der Meßgenauigkeit lagen.

4.1.4 Zuordnung der Meßergebnisse zu den Imperfektionen

Globale Imperfektion - Schiefstellung

Der aus den Meßwerten berechnete Abstand a_{C} "liefert entsprechend der Festlegung in Gl. 2.1-2 den Winkel der Schiefstellung

$$\varphi = \frac{a_C^{'''}}{h}.$$

Gl. 4.1-6

Lokale Imperfektion - Vorkrümmung

Zur kontinuierlichen Beschreibung der Vorkrümmungen der Bauteile über ihre Länge wird die in Gl. 2.1-4 festgelegte Sinusreihe verwendet, in dem den Koeffizienten $e_{G,j}$ die Parameter V_j der Interpolationsfunktion in Gl. 4.1-1

$$e_{G,j} = V_j$$

Gl. 4.1-7

zugeordnet werden.

4.2 Verteilungshypothese

Merkmale von Baustoffen, Bauteilen und Konstruktionen, wie Gewicht, Steifigkeit oder Festigkeit, deren Meßwerte immer positiv sind, werden in der Regel als normalverteilt angenommen. Im Unterschied hierzu sind Merkmale von Konstruktionen, wie Geradheit, Ebenheit oder Neigung, gerichtete Größen, deren Meßwerte positiv oder negativ sein können. Da jedoch die hier tatsächlich gemessenen Vorzeichen vom Standort des Betrachters abhingen, der für jedes Bauvorhaben neu und willkürlich gewählt werden mußte, ist die erforderliche Zufälligkeit der Beobachtung der Richtung nicht gegeben. Daher wird hier zwar weiterhin von einer normalverteilten Grundgesamtheit ausgegangen; der negative Teil der Meßwerte wird jedoch gefaltet, in dem er dem positiven Teil hinzugefügt wird. Sind die wahren Werte normalverteilt, kann es die so entstandene Wertemenge nicht sein. Deren Verteilung wird als gefaltete oder Betragsverteilung bezeichnet. Mit dieser speziellen Verteilung haben sich Leone et. al. (1961), Elandt (1961) und Johnson (1962) ausführlich beschäftigt. Geiger (1976) weist auf die Vorteile der doppelten Werteanzahl der Betragsverteilung hin.

Bei diesen Untersuchungen ergibt sich der Faltungspunkt per Definition zu Null, da die Zielgröße der perfekte Binder ist. Die zugehörige Dichtefunktion

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{2}{\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \text{ für } x \ge 0$$

Gl. 4.2-1

Seite 39

wird bei Cohen und Whitten (1988) als eindimensionale Rayleigh-Verteilung bezeichnet. Auftretende systematische Abweichungen können nach Dietrich und Schulze (1998) durch einen Verschiebefaktor a berücksichtigt werden (Bild 4-6).



Bild 4-6: Gefaltete Normalverteilung mit Verschiebefaktor a

Durch diesen Verschiebefaktor a können systematisch bedingte Abweichungen von der perfekten Lage bzw. Geometrie der Binder, die z.B. in der Montageart dieser Konstruktionen begründet sein können, berücksichtigt werden.

Eine verteilungsfreie Voruntersuchung der Stichprobe am Beispiel der globalen Imperfektion lieferte die in Bild 4-7 dargestellte Entwicklung des Modalwertes \hat{i} in Abhängigkeit von den Klassenbreiten. Eine Klassenbreite kleiner als 1 \exists , dies entspricht einer Firstverschiebung von 0,3 – 0,6 mm, erschien unter Berücksichtigung der Meßgenauigkeit nicht sinnvoll. Mit abnehmender Klassenbreite hat immer die Klasse mit dem kleinsten Mittelwert die größte Häufigkeit. Der Verschiebfaktor a wurde daher zu Null gewählt.



Bild 4-7: Entwicklung des Modalwertes der globalen Imperfektion bei abnehmender Klassenbreite

Bisher wurden bei Untersuchungen von Abweichungen im Bereich des Bauingenieurwesens, zu denen die Imperfektionen gehören, z.B. *Strauch* (1956), *Fleischer* (1979), *Paschen und Sack* (1980), *Lindner und Gietzelt* (1983) und *Blaß und Ehlbeck* (1987), die teilweise vorzeichenbehafteten Meßwerte durch Normalverteilungen approximiert.

4.2.1 Überprüfung der Unabhängigkeit der Untersuchungsmerkmale

Die beiden Untersuchungsmerkmale globale und lokale Imperfektion werden an der gleichen Stichprobe gemessen. Ein statistisch verwertbarer Rückschluß auf die Grundgesamtheit für jedes einzelne Merkmal ist nur möglich, wenn die beiden Merkmale unabhängig voneinander sind. Diese Unabhängigkeit wird durch Überprüfung der Korrelation des Winkels φ der globalen Imperfektion I_{φ} und der Amplitude $e_{0,1}$ der lokalen Imperfektion I_e nachgewiesen. Bild 4-8 zeigt die vernachlässigbar geringe Abhängigkeit der beiden Untersuchungsmerkmale.



Bild 4-8: Korrelation zwischen globalen und lokalen Imperfektionen

4.3 Globale Imperfektion I_{ϕ}

4.3.1 Darstellung der globalen Imperfektion über der Binderhöhe

In Bild 4-9 ist die Abhängigkeit der globalen Imperfektion von der Binderhöhe dargestellt.



Bild 4-9: Winkel der globalen Imperfektion über der Binderhöhe

Für den ausreißerverdächtigen Wert wurde festgestellt, daß ein grober Meßfehler nicht vorlag. Die Messung der Knotenpunkte jeweils an der Ober- und Unterkante der Gurte ließ diesen Schluß zu. Der Winkel $\varphi = 1/16$ muß durch grobe Fehler bei der Montage entstanden sein. Der Ausreißertest nach Grubbs (Stichprobenumfang n>30) lieferte für den größten Einzelwert einen Prüfwert

$$\frac{\dot{i}_{(45)}}{\hat{\sigma}} = 4,398$$
.

Verglichen mit den Werten der Tabelle 7 (DIN 53804 Teil1, 1981) konnte mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% der größte Einzelwert als Ausreißer angesehen werden. Die weitere Auswertung erfolgte für n = 44 Binder.

In Bild 4-10 ist anhand der mit a bis e bezeichneten Datenpunkte zu erkennen, daß mit zunehmender Binderhöhe der Winkel der globalen Imperfektion kleiner wird. Das bedeutet, daß die Abweichung a_C^('') mit zunehmender Binderhöhe nicht weiter anwächst. Da für die Montage offensichtlich zumindest zum Teil keine Meßeinrichtung verwendet wird, ergibt sich ihre Begrenzung nur aus dem Beurteilungsvermögen des menschlichen Auges. Dieses benötigt jedoch zur Wahrnehmung einer Schiefstellung immer eine vertikale Bezugskante, die häufig nicht wirklich

vorhanden ist. Daher wurde hier immerhin eine größte Abweichung von 8 cm (Ausreißer: 12 cm) gemessen.



Bild 4-10: Winkel der globalen Imperfektion über der Binderhöhe ohne Ausreißer

Nach EC5 7.9.2 (4) soll die größte Lotabweichung nicht mehr als 10+5(h-1) mm höchstens jedoch nicht mehr als 25 mm betragen. Dieser Grenzwert wurde hier um 55 mm überschritten. Die Forderung des EC5 läßt sich sicherlich ohne zusätzliche Meßeinrichtung nicht zuverlässig erfüllen.



Bild 4-11: Entwicklung der geschätzten Standardabweichung $\hat{\sigma}$

In Bild 4-11 sind die Maximum-Likelihood Schätzwerte der Standardabweichung & nach Gl. 2.3-3 dargestellt, die stufenweise ermittelt wurden. Jede neue Stufe entstand durch Reduktion der Stichprobe um die jeweils fünf, den kleinsten Binderhöhen zugehörigen Werte. Es ist deutlich zu erkennen, daß bei Betrachtung von Bindern mit größerer Höhe die geschätzte Standardabweichung kleiner wird.

4.3.2 Häufigkeitsverteilungen und Dichtefunktionen der Winkel der globalen Imperfektion

In Bild 4-12 ist die relative Häufigkeit der Winkel der globalen Imperfektionen dargestellt und die Dichtefunktion einer gefalteten Normalverteilung eingetragen. Die Parameter für diese gefaltete Normalverteilung, der Modalwert, der Median, der Mittelwert und der Maximum-Likelihood Schätzwert für die Standardabweichung, sind zusätzlich zu zwei Fraktilwerten in Tabelle 1 angegeben.





Merkmal	n _φ	ί _φ	\widetilde{i}_{φ}	\overline{i}_{φ}	$\hat{\sigma}_{\phi}$	$i_{\phi,95}$	$i_{\phi,90}$
Winkel der globalen Imperfektion mit Ausreißer	45	0	<u>1</u> 135	<u>1</u> 103	<u>1</u> 69	<u>1</u> 35	<u>1</u> 42
Winkel der globalen Imperfektion	44	0	<u>1</u> 140	<u>1</u> 118	<u>1</u> 91	<u>1</u> 46	<u>1</u> 55

Tabelle 1: Parameter und Fraktilwerte der in Bild 4-12 dargestellten Verteilungsfunktion

Tabelle 2: Parameter und Fraktilwerte der Verteilungsfunktion ohne Berücksichtigung der Binder, die an einen Verband angrenzen

Merkmal	η _φ	ί _φ	\tilde{i}_{φ}	\overline{i}_{ϕ}	$\hat{\sigma}_{\phi}$	$i_{\phi,95}$	$i_{\phi,90}$
Winkel der globalen Imperfektion	35	0	<u>1</u> 135	1 123	1 92	<u>1</u> 47	<u>1</u> 56

Mit den in Tabelle 2 angegebenen Werten wird gezeigt, daß es für die globale Imperfektion von untergeordneter Bedeutung ist, an welcher Stelle der Binder montiert wurde.

4.4 Lokale Imperfektion I_e

4.4.1 Darstellung der lokalen Imperfektionen über der Obergurtlänge

Die lokalen Imperfektionen sind als bezogene Größen $e_{O,j}/L_j$ über der Obergurtlänge L_O in Bild 4-13 bis Bild 4-16 ohne Ausreißer dargestellt.



Bild 4-13: Bezogene Ausmitte e_{0,1}/L₁ - Obergurtlänge



Bild 4-14: Bezogene Ausmitte e_{0,2}/L₂ - Obergurtlänge



Bild 4-15: Bezogene Ausmitte e_{0,3}/L₃ - Obergurtlänge



Bild 4-16: Bezogene Ausmitte $e_{O,4}/L_4$ – Obergurtlänge

Eine tendenzielle Abhängigkeit der bezogenen Ausmitten von der Obergurtlänge läßt sich aus Bild 4-13 bis Bild 4-16 nicht ableiten.

4.4.2 Häufigkeitsverteilungen und Dichtefunktionen der lokalen Imperfektionen

In Bild 4-17 ist exemplarisch die Häufigkeitsverteilung für die bezogene Ausmitte $e_{0,1}/L_1$ dargestellt. Die Parameter und Fraktilwerte der ersten drei untersuchten Reihenglieder sind in Tabelle 3 eingetragen. Es erfolgt keine Angabe der Ergebnisse für $e_{0,4}/L_4$, da eine statistische Wertung aufgrund der zu geringen Werteanzahl nicht möglich war.



Bild 4-17: Häufigkeitsverteilung und Dichtefunktion der bezogenen Ausmitte e_{0,1}/L₁

Merkmal	n _e	î _e	ĩe	īe	σ̂ _e	i _{e,95}	i _{e,90}
Vorkrümmungsamplitude e _{O,1} /L ₁	95	0	1 1362	1 1114	1 876	<u>1</u> 447	<u>1</u> 533
Vorkrümmungsamplitude e _{0,1} /L ₁ incl. Meßfehler	95	0	<u>1</u> 1452	1 1096	<u>1</u> 852	<u>1</u> 435	<u>1</u> 518
Vorkrümmungsamplitude e _{0,2} /L ₂	65	0	1 1707	1 1129	1 799	1 408	1 486
Vorkrümmungsamplitude e _{O,3} /L ₃	31	0	1 1976	1 1518	1 1076	1 549	<u>1</u> 654

Tabelle 3: Parameter und Fraktilwerte der Verteilungen der lokalen OG-Imperfektionen

Tabelle 4: Parameter und Fraktilwerte der Verteilungen der lokalen OG-Imperfektionen ohne Verbandsbinder

Merkmal ohne Verbandsbinder	n _e	î _e	~ie	īe	σ̂ _e	i _{e,95}	i _{e,90}
Vorkrümmungsamplitude e _{O,1} /L ₁	74	0	1 1088	1 965	1 808	<u>1</u> 412	1 491
Vorkrümmungsamplitude e _{0,2} /L ₂	50	0	1 1298	<u>1</u> 992	1 721	<u>1</u> 368	<u>1</u> 438

Die Auswertung für die gemessenen Untergurtverformungen lieferte die in Tabelle 5 angegebenen Werte.

Merkmal	n _e	î _e	ĩe	īe	$\hat{\sigma}_{e}$	i _{e,95}	i _{e,90}
Vorkrümmungsamplitude e _{U,1} /L ₁	46	0	1 1260	1 1053	1 834	1 425	1 507
Vorkrümmungsamplitude e _{U,2} /L ₂	45	0	1 1687	1 1415	1 1038	<u>1</u> 529	1 631
Vorkrümmungsamplitude e _{U,3} /L ₃	34	0	1 1776	1 1638	1 1280	<u>1</u> 653	1 778
Vorkrümmungsamplitude e _{U,4} /L ₄	34	0	1 2111	1 1837	1 1310	1 669	1 797

4.4.3 Kombination der lokalen Imperfektionen

Die lokalen Imperfektionen treten im Allgemeinen in Kombinationen der einzelnen Reihenglieder auf. Zur Beschreibung dieser Kombinationen der einzelnen Reihenglieder ist die Steigung der Tangente an die Formfunktion der Stabachse geeignet. Diese ergibt sich aus der Ableitung der Sinusreihenfunktion

$$\frac{d}{dx}y(x) = \frac{d}{dx}\sum_{j=1}^{n} \left(V_{j} \cdot \sin(j \cdot \pi \cdot \frac{x}{L})\right) = \sum_{j=1}^{n} \left(V_{j} \cdot j \cdot \frac{\pi}{L}\cos\left(j \cdot \pi \cdot \frac{x}{L}\right)\right).$$

Gl. 4.4-1

Die Größtwerte dieser Steigung treten definitionsbedingt am Anfang und Ende der Obergurte auf. In Bild 4-18 sind diese Beträge der Winkel und die Obergurtlängen gegenübergestellt.



Bild 4-18: Darstellung Tangentenwinkel β über Obergurtlänge L_O

Bild 4-19 und Tabelle 6 zeigen die Verteilungsfunktion und die zugehörigen Parameter des Tangentenwinkels β .



Bild 4-19: Häufigkeitsverteilung und Dichtefunktion des Tangentenwinkels β

Tabelle 6: Parameter	und Fraktilwerte der in	n Bild 4-19	dargestellten	Verteilung
			0	0

Merkmal	n _β	\hat{i}_{β}	ĩβ	\bar{i}_{β}	$\hat{\sigma}_{\beta}$	$i_{\beta,95}$	$i_{\beta,90}$
Tangentenwinkel β	95	0	<u>1</u> 245	<u>1</u> 189	<u>1</u> 150	1 77	<u>1</u> 91

5 Empfehlungen für die Praxis

5.1 Globale Imperfektion I_{o}

Die Winkel der globalen Imperfektion der Stichprobe sind in Bild 5-1 nochmals über der Binderhöhe dargestellt. In Anlehnung an die Vorverdrehungen in EDIN 1052 wird für alle Binder mit einer Höhe h < 3 m vorgeschlagen, den in Tabelle 1 angegebenen 95% Fraktilwert $i_{\phi,95}$ der gefalteten Normalverteilung

$$\varphi = \frac{1}{46} \quad \text{für} \quad h < 3m$$

Gl. 5.1-1

und für alle anderen Binder mit $h \ge 3$ m den höhenabhängigen Winkel

$$\phi = \frac{1}{46} \sqrt{\frac{3}{h}} \quad \text{für} \quad h \ge 3m$$

Gl. 5.1-2

zu verwenden. Der Graph dieses Vorschlags ist in Bild 5-1 als durchgezogene Linie dargestellt.



Bild 5-1: Vorschlag für den Winkel ϕ der globalen Imperfektion I $_{\phi}$

5.2 Lokale Imperfektion I_e

Auf Grundlage der in Tabelle Fraktilwerte der 3 angegebenen 95% der i_{e.95} $e_{0,1} = \frac{L}{400}$ L Imperfektionen Vorkrümmungsamplituden werden als lokale und $e_{0,2} =$ 800 vorgeschlagen. Diese Imperfektionen sind, wie in

Bild 5-2 abgebildet, jede für sich und in ungünstigster Kombination zu untersuchen. Der größte Tangentenwinkel ergibt sich nach

Bild 5-2 zu
$$\beta = \frac{1}{64}$$
 und ist damit nur geringfügig größer als der 95% Fraktilwert i_{β,95} nach Tabelle 6.



a Vorkrümmungsamplitude ±e_{0,1}



b Vorkrümmungsamplitude ±e_{0.2}



c Vorkrümmungsamplitude $\pm(e_{O,1} \pm e_{O,2})$

Bild 5-2: Lokale Imperfektionen und Kombinationen

5.3 Anmerkung

Da der Praxis bislang Angaben zur Schiefstellung von Dreiecksbindern fehlen, wird ihre Größe aus den Angaben zur Vorkrümmung von Bauteilen abgeleitet, in dem die Vorkrümmung des Binders aus seiner Ebene heraus in Feldmitte berechnet und dieses Maß als Abweichung a_c" im First angesetzt wird. Der aus dieser Vorgehensweise resultierende Winkel der Schiefstellung ist in Bild 5-3 gemeinsam mit dem Vorschlag nach Gl. 5.1-1 und Gl. 5.1-2 dargestellt.



Bild 5-3: Winkel der Schiefstellung über der Binderhöhe

Die Gegenüberstellung in Bild 5-3 zeigt, daß die Berechnung der Schiefstellung aus der Vorkrümmung zwar Werte oberhalb des Medians in Bild 5-1 liefert. Die erforderliche statistische Sicherheit von 95% wird dadurch aber nicht erreicht.

Zusammenfassung

Da über Imperfektionen (Schiefstellungen und Vorkrümmungen) in bestehenden Bauwerken aus Nagelplattenbindern bislang so gut wie keine Kenntnisse vorlagen, wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Untersuchungen zu ihrer Größe und Form durchgeführt.

Das Untersuchungsziel bestand in der Ermittlung der auftretenden Imperfektionen an fertig montierten Satteldachbindern durch Messung am Bauobjekt und anschließender statistischer Auswertung.

Die Untersuchungsmerkmale wurden durch einen Vergleich der Geometrie perfekter und imperfekter Binder festgelegt. Der Vergleich zeigte, daß die Imperfektion eines Binders in einen globalen Anteil, die Schiefstellung, und lokale Anteile, die bereichsweisen Vorkrümmungen, zerlegt werden kann. Die Bestimmung dieser Merkmale erfolgte auf der Grundlage von Meßdaten, die durch das Vermessen von (imperfekten) Bindern auf der Baustelle gewonnen wurden. Dabei kam der Entwicklung eines geeigneten Meßverfahrens eine erhebliche Bedeutung zu. Für die Messungen wurde aus der definierten Grundgesamtheit eine Stichprobe von 45 Bindern aus 25 Bauvorhaben ausgewählt.

Die Auswertung der Meßwerte ließ auf eine Normalverteilung der Merkmale der Grundgesamtheit schließen. Der negative Teil der Meßwerte wurde gefaltet, da die erforderliche Zufälligkeit der Beobachtung der Richtung nicht gegeben war. Der Verschiebefaktor der Verteilung konnte zu Null gewählt werden. Die Merkmale Schiefstellung und Vorkrümmung zeigten die erwartete Unabhängigkeit.

Die Auswertung ergab weiter, daß der Winkel der Schiefstellung mit zunehmender Binderhöhe abnimmt, während das Verhältnis e/L der Vorkrümmung von der Gurtlänge unabhängig ist. Die Anpassung der gemessenen Vorkrümmungen an die Funktion einer Sinusreihe ergab, daß neben dem ersten Reihenglied (einfache Sinuswelle) das zweite Reihenglied (doppelte Sinuswelle) nicht vernachlässigt werden kann.

Als Schlußfolgerung aus den Untersuchungen werden Vorschläge für die Praxis zu Form und Größe von Imperfektionen von Fachwerkbindern gemacht.

6 Literaturverzeichnis

Bainbridge, R.J., Mettem, C.J., Reffold, A.,	Studer, T. The Stability Behaviour of Timber Trussed Rafter Roofs. International Council for Building Research Studies and Documentation. Working Commission W18-Timber Structures, Vancouver 1997
Biger, J. P.	Side buckling of trussed rafters. Proceedings of the international timber engineering conference, London 1991
Blaß, H. J.	Tragfähigkeit von Druckstäben aus Brettschichtholz unter Berücksichtigung streuender Einflußgrößen, Bericht 4.16, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericiana Karlsruhe, 1987
Cohen, A. C., Whitten, B. J.	Parameter Estimation in Reliability and Life Span Models, Marcel Dekker, Inc. 1988
Dietrich, E., Schulze, A.	Statistische Verfahren zur Qualifikation von Meßmitteln, Maschinen und Prozessen, 3. Aufl. Carl Hanser Verlag München Wien, 1998
DIN 53804-1	Statistische Auswertungen, 1981
DIN 53804-1 Beiblatt 1	Statistische Auswertungen, 1990
EDIN 1052	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken, 2000
Ehlbeck, J., Blaß, H. J.	Imperfektionsannahmen für Holzdruckstäbe, Holz als Roh- und Werkstoff 45, S. 231-235, 1987
Ehlbeck, J., Blaß, H. J.	Zuverlässigkeit von Holzdruckstäben, Universität Karlsruhe, 1987
Elandt, R. C.	The Folded Normal Distribution: Two Methods of Estimating Parameters from Moments, Technometrics, 3, 1961, S. 551-562
Fleischer, E.	Beitrag zur Ermittlung der Maßgenauigkeit im Stahlbetonskelettbau, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1979
Geiger, W.	Gefaltete und Betragsverteilungen, QZ 21, 1976, S. 156-160
Gerold, W.	Wind- und Stabilisierungsverbände, Bauen mit Holz 3, 1998, S. 41-49
Goretzki, W.	Relative Baukontrollmessungen zur Bestimmung der Genauigkeit von Montagebauten unter besonderer Berücksichtigung der Großplattenbauweise, Dissertation, Technische Universität Dresden 1973
Johnson, N. L., Leone, F. C.	Statistics and Experimental Design in Engineering and the Physical Sciences, John Wiley & Sons, Inc., 1977
Johnson, N. L.	The Folded Normal Distribution: Accuracy of Estimation by Maximum Likelihood, Technometrics, 4, 1962, S. 249-256
Kessel, M.H.	Lateral Bracing of Wide Span Trusses with Punched Metal Fasteners. IWEC 1996, Proceedings of the International Wood Engineering Conference New Orleans, Volume 1, S. 107-114
Kessel, M.H., Mertinaschk, A.	Imperfection Measurements for Trusses using Nail Plates. WCTE 2000, Proceedings of the World Conference on Timber Engineering, Whistler Resort BC Canada 2000, Session 7.3.5
Leicester, R.H.	Load Tests on Trusses with Lateral Restraints. Laboratory Report Division of Building Research, CSIRO, Melbourne, 1976
Leone, F. C., Nelson, L. S., Nottingham, F	R. B. The Folded Normal Distribution, Technometrics, 3, 1961, S. 543-550
Lindner, J., Gietzelt, R.	Imperfektionen mehrgeschossiger Stahlstützen (Stützenschiefstellungen), Bericht Nr. 2038-A, Technische Universität Berlin, 1983
Lindner, J., Gietzelt, R.	Imperfektionsannahmen für Stützenschiefstellungen, Stahlbau 53, 1984, S. 97-101
Möhler, K.	Versuche mit lotrechter und waagerechter Belastung eines aus 6 GN-Dreiecksbindern bestehenden Gesperrefeldes mit einen in Obergurtebene liegenden Aussteifungsverband. Bericht Universität Karlsruhe, 1982
Natterer, J., Kessel, M.H.	Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur seitlichen Stabilisierung von Biegeträgern, Forschungsbericht KFWF Nr. 1075, EPFL / IBOIS 1985
Paschen, H., Sack, W-M.	Maßtoleranzen und Passungsberechnung im Stahlbetonskelett-Fertigteilbau, Wiesbaden, Berlin: Bauverlag 1980
Pienaar, F. R. P.	The bracing of timber roof trusses, CSIR Special Report HOUT 311, 1983, Pretoria
Pienaar, F. R. P.	The effective length of timber rafters in compression, CSIR Special Report HOUT 348, 1984, Pretoria
Sachs, L.	Angewandte Statistik, 7.Auflage, Springer-Verlag 1992

Strauch, H.

Statistische Methoden, 4. Auflage, Springer-Verlag 1979

Statistische Güteüberwachung, München, 1956

7 Anhang