

Hohlprofil-Tragwerke
in der Architektur
und
im Maschinenbau
auf Basis der
Hydroform-Technologie

Vom
Fachbereich Architektur
der
Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

Doktor der
Ingenieurwissenschaften

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing., Dipl.-Ing.

Karl Jockel Miranda

geboren am 15.9.1970
in Concepción / Chile

Hannover, 2005

Referent	Professor Alexander Furche Universität Hannover
Korreferent	Professor Horst Nowack Universität Duisburg
Korreferent	Professor Eberhard Eckerle Universität Hannover
Tag der Promotion	22.12.2004
Stichworte	Hohlprofil Tragwerk Hydroform System
key words	tubular structure hydroforming system
Kontakt	karljockel@web.de

Abstracts

Innerhalb des Fachbereichs Maschinenbau der Universität Duisburg wurden unter der Leitung von Herrn Prof. Horst Nowack Lösungsansätze zum Aufbau von Leichtbau-Roboterarmen entwickelt und realisiert.

Als wichtigstes Ergebnis dieser Arbeiten entstand ein System zum Bau beliebiger Hohlprofil-Konstruktionen, das sich aufgrund seiner großen Flexibilität und Belastbarkeit besonders für den Einsatz in der Architektur eignet.

Herausragendes Merkmal dieses neuen Aufbausystems ist die Zurückführung komplexer Strukturen auf wenige unterschiedliche Verbindungselemente, die sehr rationell mit der Hydroform-Technologie gefertigt werden können.

Einerseits werden durch die klassische Zusammenführung mehrerer Stäbe an gemeinsamen Verbindungspunkten Biegemomente vermieden. Dabei entstehen jedoch komplexe, vielfach unterschiedliche Verbindungsstellen.

Beim der neuen Systematik für Stab-Tragwerke bestehen alle Verbindungen aus hintereinander positionierter möglichst einheitlicher Verbindungselemente mit vorzugsweise einem Abzweig. Diese werden auf durchgehenden Stangen geschoben, in die Richtung des jeweiligen Abzweigs ausgerichtet und in der endgültigen Position fixiert. Zur Behandlung des dabei entstehenden Versatzes der Achsen wird empfohlen, die international anerkannten Richtlinien der Vereinigung CIDECT heranzuziehen.

Spannungsmechanisch weisen die Hydroform Elemente die doppelte Tragfähigkeit, verglichen mit konventionellen Schweißverbindungen, besonders hinsichtlich Biegung.

Die rationelle Anwendung des neuen Systems setzt jedoch eine gewisse geometrische Regelmäßigkeit der zu realisierenden Strukturen voraus. Unregelmäßigkeiten bedeuten in diesem Zusammenhang Abweichungen von in einer Struktur wiederholt und konstant vorkommenden geometrischen Größen, wie zB. Radien oder Winkel.

Alle Systeme in Natur und Technik funktionieren jedoch innerhalb fallspezifischer Rahmenbedingungen. Um möglichst wenige unterschiedliche Elementtypen zu benötigen, gestaltet sich deshalb der Entwurf von Strukturen mit dem vorliegenden System innerhalb aufgeführter Richtlinien. Innerhalb dieser Rahmenbedingungen sind große Freiheiten bei der Stabanordnung möglich.

Die Flexibilität des Systems besteht in der fallbezogenen Festlegung der Elementform(en) und in der großen Freiheit bei der einfachen Positionierung, bzw. Verdrehung weiterer der Elemente auf den durchgehenden Stäben.

Fertigungstechnisch gesehen ersetzen die Verbindungselemente stets unterschiedliche und komplexe Schweißverbindungen durch immer gleiche glatte, runde und standardisierte Überlappungsschweißungen, dessen Festigkeitsverhalten konstant und bereits durchgehend untersucht worden sind.

Diese vereinfachte Schweißgeometrie bedeutet deshalb eine signifikante Rationalisierung der arbeitsintensiven manuellen Nahtvorbereitungs- und Schweißarbeiten an den Verbindungen durch den Einsatz automatisierter Schweißtechnologien wie z.B. das maschinelle Orbitalschweißen.

Insgesamt wird im vorgestellten neuen Tragwerk-System einen Beitrag zur systematischen und ökonomischen Realisierung konventioneller und auch innovativer Hohlprofil-Tragwerke in der Architektur gesehen.

Tubular Structures in Architecture and Mechanical Engineering based on Hydroforming Technology

At the Faculty of Mechanical Engineering at the University of Duisburg, under the guidance of Prof. Horst Nowack diverse methods of resolution were developed for the realization of lightweight roboterarms.

As the principal result of this R&D work a new method and system for the build up of almost any tubular structure was developed, realized and tested.

The particular characteristic of this structure system is the reduction of complex structures to a low number of different connections, whose connection elements can be rationally manufactured using the Hydroforming technology.

In conventional beam structures the classical beam connection in one single point is supposed to avoid bending moments. But one result of this approach are complex and different connecting points with several beams meeting in one position.

The new system for tubular structures is based on single equal connections with preferably one junction. These "standardized" connection elements are moved and fixed on uninterrupted longitudinal tubes. They are turned, positioned and fixed according to the required direction for the connected beam one after and beside the other on the longitudinal tubes.

For the evaluation of the resulting geometrical axes mismatches between the single tubes axes the recognized rules of the association CIDECT can be consulted.

Regarding the mechanical properties, the new structure system does not aim at bending flexible joints, but the opposite, particularly bending resistant connections between the tubes. The mechanical resistance and strength of the joints has been doubled in comparison to conventionally welded connections. This high strength enables the system to be used for bending resistant structures like frames also.

The application of this system demands a certain geometrical regularity of the structure connections. Generally speaking, the more different connections a structure has, the less adequate it is for the application of a structural system.

"Irregularities" means deviations from the repetitive same geometrical values of a certain structure like angles, radii, diameters, thickness, etc. However, all systems in nature and technology work within certain specific boundary conditions only.

In order to need preferably less different types of connection elements, the structural design for the present system is performed following particular suggestions.

The freedom within the present system consists of the specific definition of the connection elements including angles and radii and of the particular freedom to easily put additional elements on the tubes wherever wanted for further junctions that can individually be oriented (turned) in any direction.

Concerning manufacturing technology the connection elements of this system substitute different individual and complex welded connections with always the same straight and plane cuts and welding geometries, whose stress and fatigue behaviour is constant and well known.

These standardized connections can also be rationally welded applying automatic technologies like in orbital welding, which means a significant reduction of the time intensive previous manual steps for welding edge preparation and the conventional manual welding process itself following complex contours.

All in all, the presented system for hollow section structures attempts to make a contribution to a systematic and economical realization of conventional and innovative tubular structures in architecture.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1	
2	Entwicklung einer Tragwerk-Systematik für einen Roboterarm	5	Der Sonderforschungsbereich 291 und das Teilprojekt A7
		7	Fertigungstechnologien
		8	Entwicklung einer optimalen Struktur für den Roboterarm
		9	System mit Standard-Elementen
		11	Fertigung des Roboterarms
		12	Mechanische Prüfung der Struktur
3	Die Hydroform-Technologie	18	Innenhochdruck-Umformung IHU
		20	Das Hydroform-Verfahren
		23	Hochdruck-Blechumformung HBU
4	Entwicklung und Realisierung der Verbindungselemente	25	Optimierung der Verbindungselemente
		32	Simulation der Umformprozesse
		38	Fertigung der Elemente
		41	Mechanische Element-Untersuchung
		44	Vergleich mit konventionellen Schweißverbindungen
5	Tragwerke in der Architektur	49	Tragwerke in Natur und Technik
		50	Beziehung des Tragwerks zum Bauwerk
		51	Gliederung der Tragsysteme
		56	Vektoraktive Tragsysteme

6	Realisierung von Stab- Tragwerken mit Hydroform-Elementen	64	Allg. Aufbau, Koordinaten, Winkel
		67	Realisierung ebener Fachwerke
		75	Realisierung gekrümmter Fachwerke
		80	Realisierung gefalteter Fachwerke
		80	Realisierung von Raumfachwerken
		85	Montage der Tragwerke
		87	Realisierung bionischer Stab-Tragwerke
		94	Bionische Element-Optimierung
7	Charakteristika von Stab- Tragwerken mit Hydroform-Elementen	98	Versatz der Systemlinien
		100	Biege feste Verbindungen
		101	Spannungen an ebenen Fachwerken
		109	Optimierte Berechnungsmethodik
		110	Vergleich zwischen Versuch und Rechnung
		113	Verbindungstechnologien
		120	Ökonomische Aspekte
		123	Weitere Fachwerk-Systeme
8	Zusammenfassung	131	
9	Literaturverzeichnis	135	
10	Abbildungsverzeichnis	139	

1. Einleitung

Innerhalb des Sonderforschungsbereichs 291 „Elastische Handhabungssysteme für schwere Lasten in komplexen Systemen“ wurden im Fachbereich Maschinenbau, Fachgebiet Werkstofftechnik der Universität Duisburg unter der Leitung von Herrn Prof. Horst Nowack Lösungsansätze zum Aufbau von Leichtbau-Roboterarmen entwickelt und realisiert. Als wichtigstes Ergebnis dieser Arbeiten entstand ein System zum Bau beliebiger Stab-Tragwerke in der Art metallischer Hohlprofil-Konstruktionen.

Aufgrund der großen Flexibilität des Systems in Bezug auf den Tragwerksentwurf bei gleichzeitig erfüllten statischen und ökonomischen Anforderungen weist das System ein großes Potential für Anwendungen in der Architektur auf.

Die Architektur selbst zeigt sich zu Beginn des 21. Jahrhunderts ausgesprochen vielfältig und lässt sowohl klassische als auch futuristische Vorschläge zu, solange sie ästhetische und funktionale Lösungen der konkreten Aufgaben bedeuten [6]. Wie auch weitere schöpferische Bereiche (Literatur, Malerei, Mode, usw.) zeigt sich die Architektur „vielschichtig komplex“ mit einer großen Vielfalt an Stilen und Tendenzen [6].

So ist in den letzten zwanzig Jahren in der europäischen Architektur ein Trend zum Einsatz von metallischen Hohlprofil-Konstruktionen, oft in Verbindung mit moderner Glas-technologie zu erkennen [9], [62].

Besonders im gewerblichen und öffentlichen Bereich findet man als offene oder Hohlprofil-Konstruktion ausgeführte sichtbare Stahltragwerke mit gläsernen Dächern oder Fassaden [7].



Messe Hannover, Hallen 8/9 [47]

Fertigstellung: 1998

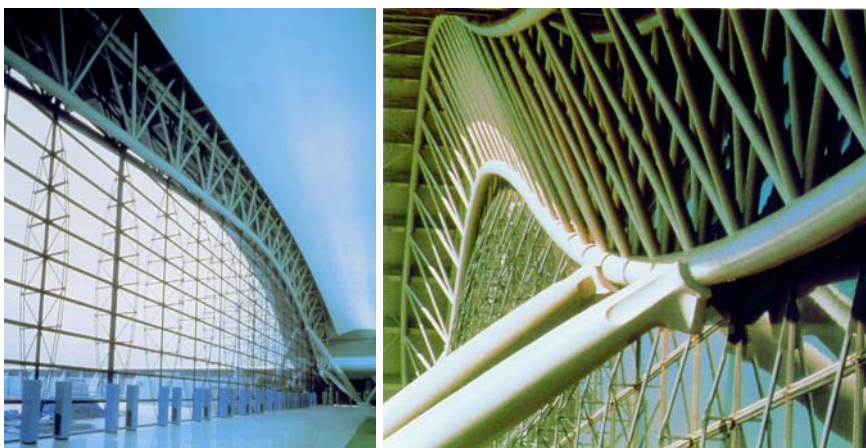
*Arch.: gmp von Gerkan, Marg
+ Partner*

*Tragwerk: Schlaich Bergermann
und Partner*

Abb. 1.1: Sichtbare Stahlstruktur mit Glasfassaden [47]

„Der heutige Zeitgeist ist nach Meinung der High-Tech-Architekten in der hochentwickelten Technologie zu suchen“ [Davis [14], S.6].

Dies drückt sich unter anderem im Einsatz weit entwickelter Werkstoffe und vorgefertigter Komponenten sowie in der Veräußerlichung des technologischen Teils des Bauwerkes, der Tragkonstruktion und/oder der Haustechnik aus [7], [8]. Damit wird Technik vereinzelt zum Gestaltungsmerkmal [8].



Flughafen Kansai, Osaka [6], [8]

Fertigstellung: 1994

Arch.: Renzo Piano

*Tragwerk: Nippon Engineering
Consultants Co. Ltd., Tokyo*

Abb. 1.2: Das Tragwerk als Gestaltungsmerkmal [6], [8]

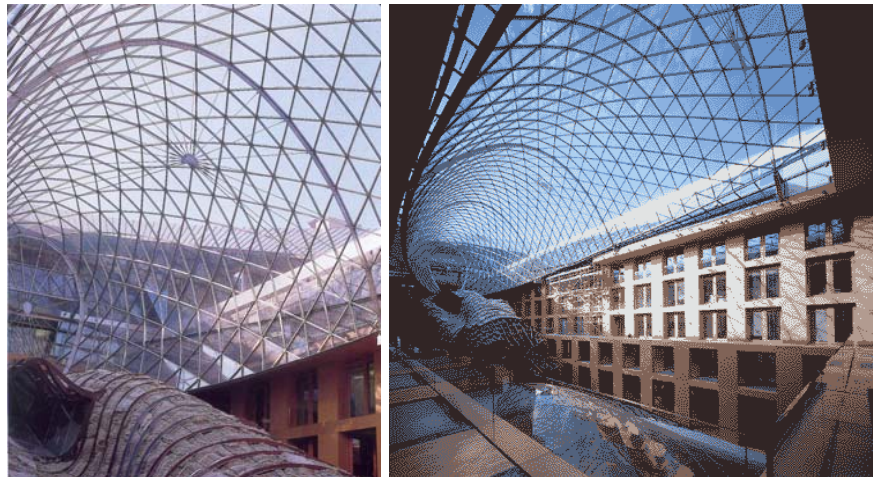
„In unserer Generation ist, vor allem im Westen, der Fortschritt der Technologie so beherrschend, dass die

Entwicklung der Architektur ganz von ihm bestimmt wird“ [Tadao Ando [63], S. 29].

Im Zusammenhang mit modernen Komponenten und Strukturen ist auch Leichtbau ein weiteres Kennzeichen unseres technologischen Zeitalters [8].

Die vielfältigen Tendenzen der gegenwärtigen Architektur betreffen neben der Bauweise auch die Formen der Bauwerke [11]. Neben ebenen und räumlich-eckigen Strukturformen findet man zunehmend auch gekrümmte und vereinzelt sogar vollständig unregelmässige, skulpturähnliche Freiformen, sogenanntes „blop-design“ [10], [11].

*DZ-Bank, Berlin [46]
Fertigstellung: 1998
Arch.: Frank O. Gehry &
Associates
Tragwerk: Schlaich
Bergemann und Partner*



*BMW-Messepavillon [46]
Fertigstellung: 1999
Arch.: abb Architekten
Tragwerk: Bollinger +
Grohmann*



Abb. 1.3: Freiform-Strukturen [46]

Die meisten Tragwerke aus Hohlprofilen sind für den Einzelfall gefertigte Schweisskonstruktionen (Prototypen). Vorhandene Tragwerksysteme weisen neben hohem Eigengewicht und hohen Kosten oft nicht die für die Realisierung der gestalterischen Wünsche nötige Flexibilität auf. Es besteht deshalb ein Bedarf an flexiblen, leichten und ökonomischen Tragwerksystemen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine neuartige, über die klassische Fachwerktheorie zugunsten einer erhöhten Flexibilität hinausgehende Systematik für Stab-Tragwerke vorgeschlagen. Sie basiert auf dem Einsatz besonders tragfähiger einheitlicher Verbindungselemente. Im Hinblick auf die Realisierung dieser Systemkomponenten bietet die Hydroform-Technologie große Vorteile an, insbesondere hinsichtlich Rationalität und Ökonomie.

In den Kapiteln 2 bis 4 sind die einzelnen Entwicklungsschritte und technische Details des neuen Tragwerksystems aufgeführt, die zur Anmeldung eines internationalen Patentes geführt haben (PCT: WO 01/51741 A1).

In den Kapiteln 5 und 6 werden die Möglichkeiten des neuen Systems für Anwendungen in der Architektur erarbeitet. Es wird aufgezeigt, wie einzelne aus der Architektur bekannte Tragwerktypen mit dem vorgestellten System realisiert werden können. In einem nächsten Schritt werden dann neuartige, mit bionischen Methoden entwickelte Stab-Tragwerke behandelt.

Schließlich werden in Kapitel 7 besondere Charakteristika des vorgestellten Systems hinsichtlich Kräfteverlauf, Tragfähigkeit und Ökonomie im Vergleich zu konventionell geschweissten Konstruktionen dargestellt.

2. Entwicklung einer Tragwerk-Systematik für einen Roboterarm

Der SFB 291 und das Teilprojekt A7

Seit 1996 besteht an der Universität Duisburg der Sonderforschungsbereich SFB 291 „Elastische Handhabungssysteme für schwere Lasten in komplexen Systemen“.

Innerhalb dieses Sonderforschungsbereichs arbeiten bis zu 13 Fachgebiete gemeinsam an der Entwicklung und dem Aufbau der Komponenten und der Steuerung moderner Schwerlastmanipulatoren. Als mögliche Anwendungen waren beispielsweise komplexe, mehrfach gelenkige Arbeitsroboter und Manipulatoren mit großen Reichweiten vorgesehen.



Abb. 2.1: Räumlich komplexer Roboter [48]

In der zweiten Antragsphase (Jahre 1998, 1999 und 2000) wurde vom Fachgebiet Werkstofftechnik das SFB-Teilprojekt A7 „Leichtbaufertigung von Manipulatorarmen“ beantragt und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft genehmigt.

Im Rahmen dieses Teilprojekts A7 sollten im Fachgebiet Werkstofftechnik Leichtbauweisen für Manipulatorarm-Segmente untersucht und realisiert werden.

Das genehmigte Forschungsvorhaben sah den Aufbau von Armsegmenten in Fachwerkbauweise unter Anwendung der Hydroform-Technologie vor.

Im Rahmen des SFB 291 wurde als Experimentalsystem ein Manipulatorarm mit drei Segmenten (ARM 1 bis ARM 3) und einer Gesamtlänge von 6.000 mm verfolgt.

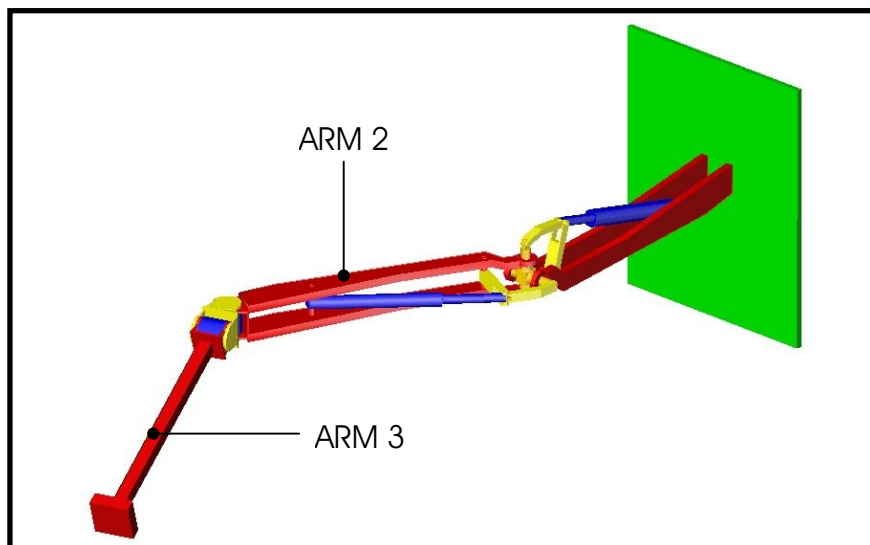


Abb. 2.2: Experimentalsystem (Entwurf) des SFB 291

Die Forschungsarbeiten im Teilprojekt A7 konzentrierten sich zunächst auf das letzte Armsegment des Experimentalsystems (ARM 3).

Dieser Armabschnitt sollte an beiden Enden zwei übersichtliche Anschlüsse in Form quadratischer Platten aufweisen. Er wird in erster Näherung durch reine Biegung beansprucht. Die Randbedingungen für die zu entwerfende Armstruktur lauteten:

- Armlänge: 1.300 mm
- Armquerschnitt: 230X230 mm
- Belastung: 2 kN am Armende

Fertigungstechnologien Es sollte eine Stab-Knoten-Bauweise realisiert werden und als Herstellungstechnologie der Verbindungselemente (Knoten) die Hydroform-Technologie zum Einsatz kommen. Die Leichtbau-Potentiale dieser Technologie waren aus früheren Untersuchungen im Fachgebiet bekannt [18]. Die Stab-Knoten-Bauweise bietet die größte Gestaltungsfreiheit.

Parallel zu dieser Fertigungsvariante wurde als interessante Alternative ein Roboterarm in Kastenbauweise (rohrartiger Querschnitt) mit Faserverbundwerkstoff CFK in Wickeltechnologie in Betracht gezogen. Bei dieser Fertigungsmethode werden lange Fasern in Harz eingetaucht und in verschiedenen Richtungen maschinell um einen Kern (Hohlkörper) gewickelt. Dieser Kern wird, wenn das Bauteil fertig gewickelt ist, wieder entfernt.

Dieses Fertigungsprinzip stellt ultimativen Leichtbau mit gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit, Belastbarkeit und Steifigkeit des gewickelten Bauteils dar.

Nachteilig bei der CFK-Wickeltechnik ist jedoch die Notwendigkeit, für den Entwurf, die Dimensionierung und die Fertigung des Roboterarms Experten für diese komplexe Technologie einbeziehen zu müssen. Damit sind auch sehr hohe Kosten verbunden.

Bei der im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten und letztendlich realisierten Stab-Knoten-Bauweise für den Roboterarm wurden metallische Stäbe, die durch leichte, metallische Hydroform-Knoten miteinander verbunden werden, gewählt. Die Verbindungen zwischen den Stäben sollten besonders tragfähig sein. Insbesondere sollte ein flexibles System zum Aufbau weiterer, unterschiedlicher Armtypen entstehen.

Die ersten Arbeiten bestanden in der Entwicklung einer optimalen Stab-Knoten-Anordnung für die gegebenen Randbedingungen. Hierzu wurden verstärkt die Methoden des Computer Aided Design (CAD) und der Finiten Elemente (FEM) eingesetzt. Dabei wurden vielfältige Strukturentwürfe zunächst in der Form fest miteinander verbundener Stabelemente überschlägig berechnet und miteinander verglichen. Es wurden Aufbauten mit vier-, sechs- und achteckigem Querschnitt sowie mit einfachen oder gekreuzten Seitendiagonalen modelliert und hinsichtlich Gewicht, Steifigkeit, Spannungen und Strukturkomplexität bewertet.

Es wurde unter anderem der Zusammenhang zwischen der Strukturkomplexität, der Steifigkeit, den Spannungen und dem Eigengewicht deutlich.

Die besten Ergebnisse hinsichtlich dieser Strukturmerkmale lieferte schließlich eine im Querschnitt viereckige Struktur mit sich kreuzenden Diagonalen an allen vier Armseiten.

Weiterhin zeigte sich deutlich, dass die Verbindungsstellen und diese besonders im Bereich der Einspannung die am höchsten beanspruchten Strukturbereiche sind.

Entwicklung einer optimierten Struktur für den Roboterarm

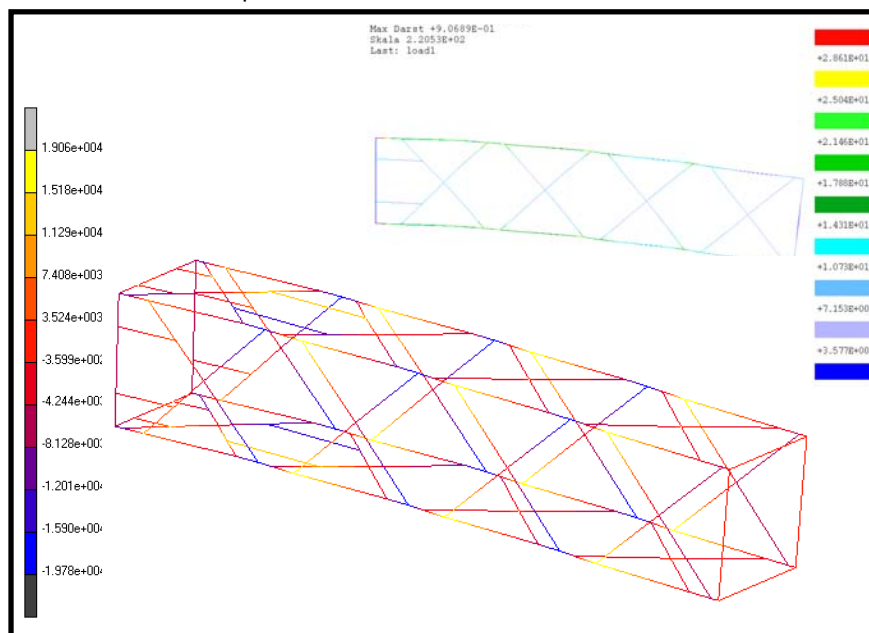
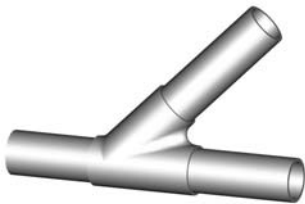


Abb. 2.3: Gewählte Struktur für ARM 3

System mit Standard-Elementen

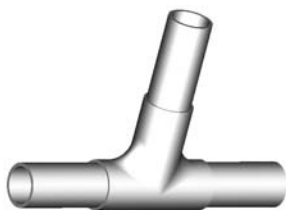
Konventionelle Rohrverbindung unter 45°



Rohrverbindung mit Hydroform-Element unter 45°



Konventionelle Rohrverbindung unter 90°



Rohrverbindung mit Hydroform-Element unter 90°

Als die Anforderung einer Aufbausystematik für weitere Leichtbau-Strukturen behandelt wurde, zeigte sich, dass man für den Aufbau anderer Strukturen stets unterschiedliche Verbindungselemente für die Stäbe benötigte, d.h., dass die Anzahl, Winkel und Ebenen der an einer Stelle zu verbindenden Stäbe stark variieren.

Die Notwendigkeit der Verwendung vieler unterschiedlicher Verbindungselemente entspricht nicht dem Wunsch nach einer Systematik zur ökonomischen Realisierung beliebiger Tragwerke. Zudem steht dies im Widerspruch zur Hydroform-Technologie, die erst bei hohen Stückzahlen eines gleichen Bauteils wirtschaftlich eingesetzt werden kann.

Es war deshalb notwendig, möglichst alle Verbindungsstellen mit gleichen „Standard-Elementen“ zu realisieren. Dies kann durch die Hintereinander-Positionierung von Elementen mit vorwiegend einem Abgang anstelle von komplexen Elementen mit mehreren Abgängen erreicht werden, wie im folgenden dargestellt wird.

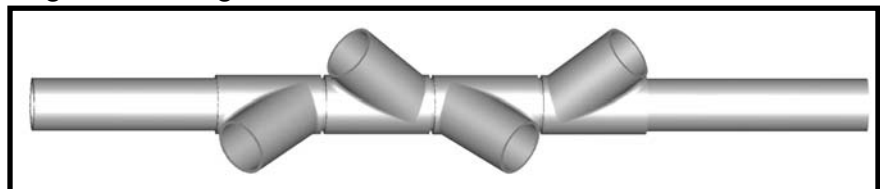


Abb. 2.4: Auf durchgehender Stange positionierte und fixierte standardisierte Verbindungselemente

Weiterhin sollte eine Schwächung der hauptlasttragenden Stäbe durch Unterbrechungen in ihren Gesamtlängen vermieden werden. Konventionelle Stab-Knoten-Tragwerke weisen dagegen systembegründet zahlreiche Schweiß- und/oder Schraubverbindungen in den Hauptlastpfaden auf. Dies wird bei der neuen Aufbaumethode dadurch vermieden, dass die einzelnen Knotenelemente hintereinander auf durchgehenden Stangen aufgeschoben und fixiert werden.

Nach umfangreichen Studien wurde schließlich das Aufbauprinzip für ARM 3 gefunden, bei dem nur zwei unterschiedliche Knotentypen erforderlich sind: Ein 45°-Knoten und ein 90°-Kreuzknoten.

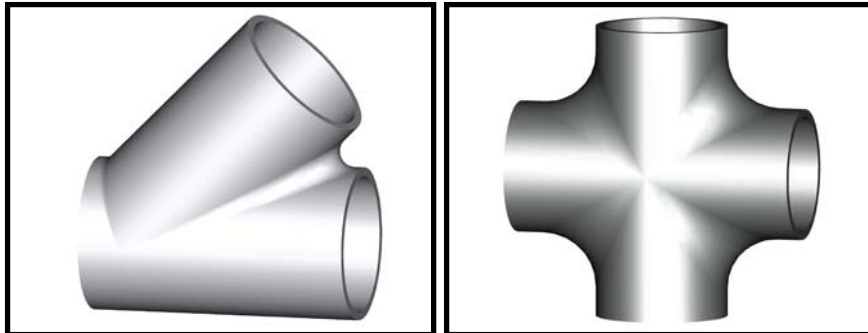


Abb. 2.5: Erforderliche Knotenelemente für ARM 3

Als nächste Integrationsstufe wurden für die Anwendung bei ARM 3 die Abgänge der Kreuzknoten um die Längen der daran anzuschließenden Verbindungsstangen verlängert und so das Verbindungselement zum vollständigen Kreuz ausgebaut. Damit nahm ARM 3 die in Abb. 2.6 dargestellte Gestalt an.

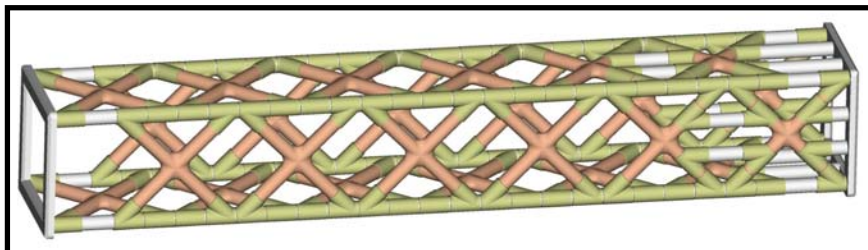


Abb. 2.6: CAD-Darstellung der ARM 3 - Struktur

Im höchst belasteten Bereich der Struktur, der Einspannung, wurde zusätzlich eine Verstärkung durch Hinzunahme weiterer unterstützender paralleler Lastpfade vorgenommen. Die Geometrie der Verbindungselemente wurde mittels Finite Elemente Methode (FEM) hinsichtlich geringerer Spannungen optimiert. Diese Berechnungsarbeiten sowie die Fertigung der Verbindungselemente sind detailliert im Kapitel 4 „Entwicklung und Realisierung der Verbindungselemente“ beschrieben.

Fertigung des Roboterarms Mit den gefertigten Knotenelementen und Standard-Rohren, die in den benötigten Längen abgesägt wurden, baute man die Struktur von ARM 3 auf. In einem ersten Schritt wurden die Rohrstücke in die Knotenelemente gesteckt.

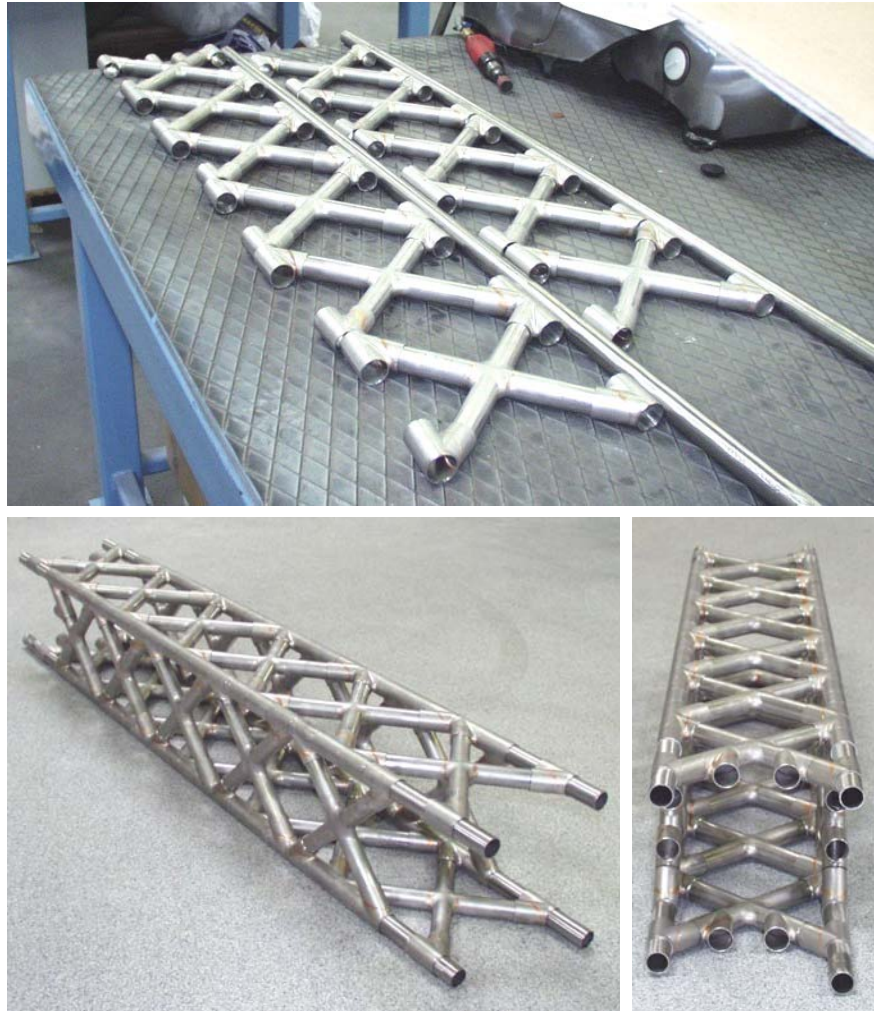


Abb. 2.7: Zusammenbau der ARM 3 - Struktur

Anschließend wurden in einem Durchgang im Ofen die Knotenelemente mit den Rohrstücken durch Löten verbunden.

Beim Löten fließt das Lot unter der erhöhten Temperatur von allein in die Spalte zwischen Stangen und Knoten und verbindet diese über die benetzten Flächen stofflich miteinander bei der anschließenden Abkühlung.

Bevor tragende Strukturen für den Einsatz, beispielsweise als Roboterarm, freigegeben werden können, ist eine möglichst realitätsnahe mechanische Prüfung im Betriebsfestigkeitslabor erforderlich.

In Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein komplexer Bauteilprüfstand speziell für die Prüfung und Qualifizierung von Roboterarmen, Stab-Strukturen und Verbindungselementen realisiert.

Das Lastenheft für diese Prüfanlage sah die Einleitung von Zug/Druck-, Biege-, und Torsionsbelastungen, einzeln und in Kombinationen in die Strukturen oder Einzelelemente vor.

Gleichzeitig sollte die Größe des Prüfraums variabel sein, um sowohl Verbindungselemente mit 50 cm Länge als auch Strukturen mit bis zu 3 m Länge aufnehmen zu können.

Mechanische Prüfung der Struktur

Realisierung einer geeigneten Prüfanlage

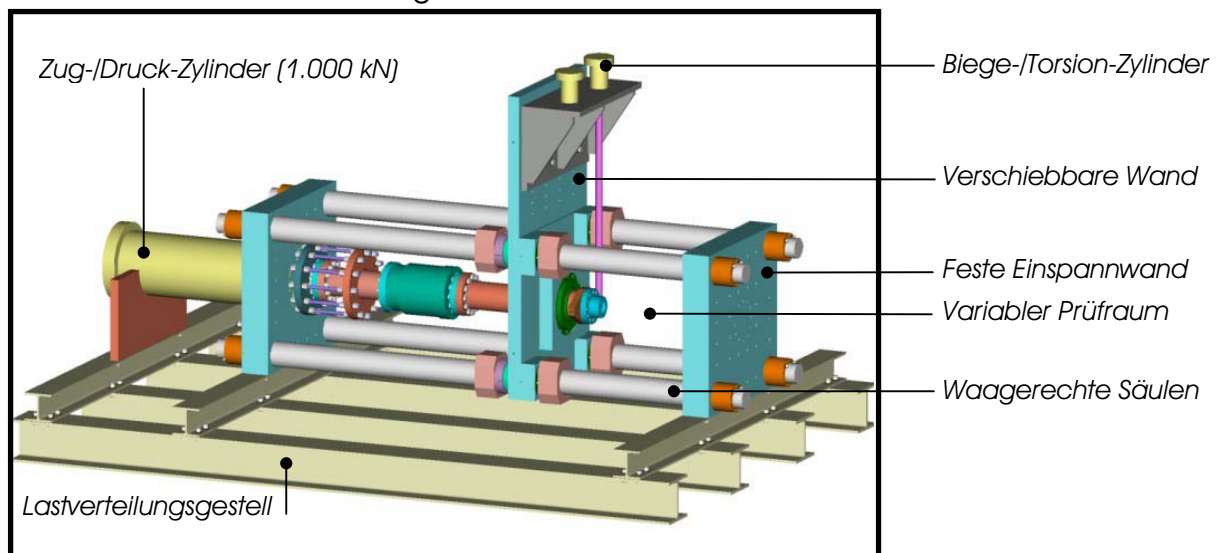


Abb. 2.8: CAD-Abbildung des Anlagenkonzeptes

Das Anlagenkonzept sieht vier waagerechte Stahlsäulen von 4 m Länge vor, die zwischen zwei feststehenden Stahlwänden fest eingespannt sind. Dies ist die Hauptbelastungsachse der Anlage mit einer Kapazität von bis zu 1.000 kN Zug oder Druck. Eine dritte Stahlwand ist über die Säulen verschiebbar und weist wahlweise einen oder zwei weitere Hydraulik-Zylinder auf. Diese zweite Achse, die senkrecht zur Hauptachse verläuft, ist die Biege- und/oder

Torsionsachse, je nachdem, ob nur ein mittiger Zylinder eingesetzt wird (reine Biegung), oder zwei synchron nebeneinander arbeitende Zylinder das Bauteil biegen und/oder gleichzeitig tordieren. Diese Vielfalt an Belastungsmöglichkeiten wurde deshalb als notwendig angesehen, weil einerseits die Einzelemente im Roboterarm mehrachsig belastet werden und weil weiterhin die spätere Realisierung von ARM 2 in Aussicht stand. Anders als ARM 3 wird ARM 2 im Betrieb, je nach Position von ARM 3, gleichzeitig mit Biegung und Torsion belastet.

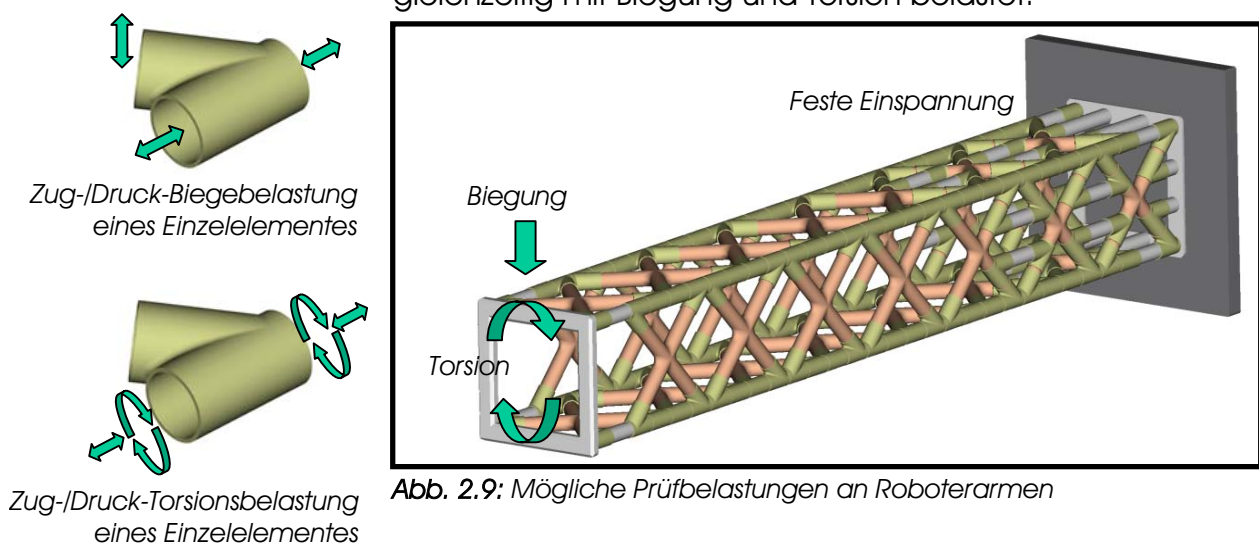


Abb. 2.9: Mögliche Prüfbelastungen an Roboterarmen

Um genaue und zuverlässige Prüfergebnisse zu erhalten, darf sich die Prüfanlage unter der Belastung des Prüflings selbst äußerst wenig verformen, in unserem Fall auch nicht unter der maximalen Zug- oder Druckbelastung von 1.000 kN. Dafür müssen die Komponenten der Prüfanlage bewusst sehr deutlich überdimensioniert werden. Aus Gewichtsgründen steht der deshalb 170 kN schwere Prüfstand auf einem Lastverteilungsgestell.

Als dieses Anlagenkonzept feststand, wurden alle einzelnen Komponenten mittels CAD konstruiert. Wichtige Bauteile wurden mittels der FEM berechnet. Die Fertigung aller Bauteile wurde anschließend bei einem metallverarbeitenden Betrieb in Auftrag gegeben.

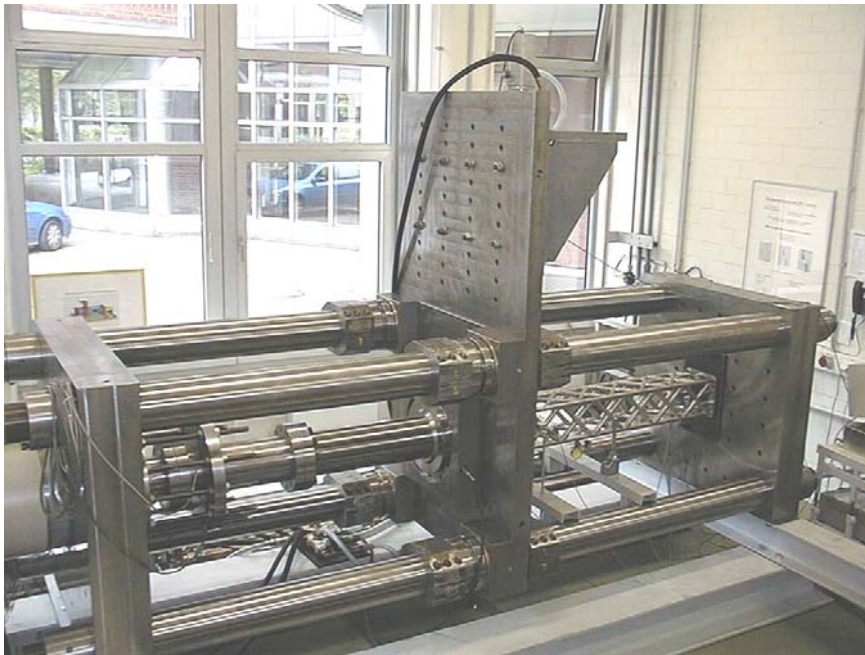


Abb. 2.10: Realisierte Prüfanlage

Der aufwändige Aufbau der Anlage im Betriebsfestigkeitslabor des Fachgebietes mit bis 25 kN schweren Bauteilen wurde durch intensive Teamarbeit mehrerer Fachgebietsangehöriger bewerkstelligt.

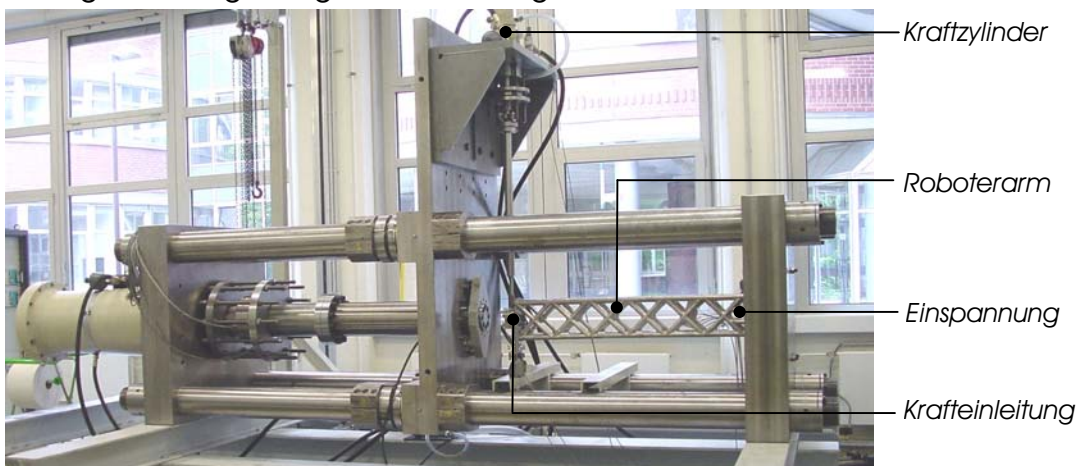


Abb. 2.11: Prüfanlage mit eingespanntem Roboterarm

Für die Prüfung des Roboterarms wurde die zugrundeliegende Betriebsbelastung „reine Biegung“ simuliert, indem die Einspannseite des Arms an der Einspannwand des Prüfstandes angebracht wurde, während am anderen Ende

des Arms die Biegelast mit einem Hydraulik-Zylinder und gelenkigen Anschlusselementen eingeleitet wurde.

Die Ergebnisse der mechanischen Prüfung der realisierten Stab-Knoten-Struktur erwiesen sich als sehr zufriedenstellend. Die Struktur, die ein Eigengewicht von lediglich 166,8 N aufweist, wurde mit einer Last von 6,2 kN belastet und zeigte dabei nur 17 mm Durchbiegung am Armende.

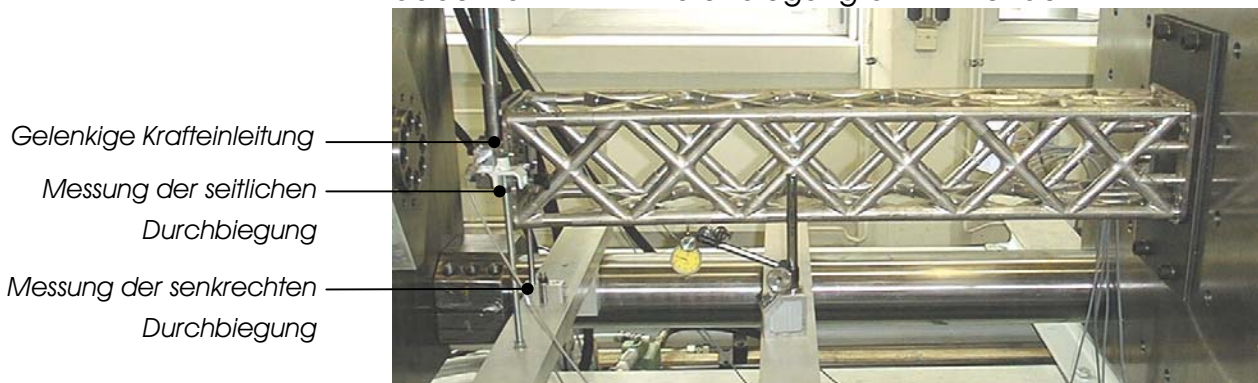


Abb. 2.12: Roboterarm unter Biegeprüfung

Die geforderte Tragfähigkeit in Höhe von 2 kN wurde somit mit großen Sicherheitsreserven erfüllt. Die Kraft-Durchbiegungs-Kennlinie des Arms verlief dabei nahezu linear (Abb. 2.15 blaue Linie).

Die Durchbiegung des Arms unter wachsender Belastung erfolgte vollkommen senkrecht, ohne seitliches Weichen oder Verdrehen aus der Biegeebene.

Zur Messung der Spannungen wurden an fünf strategischen und potentiell kritischen Stellen der Struktur Dehnungsmeßstreifen (DMS) angebracht (Abb. 2.13).

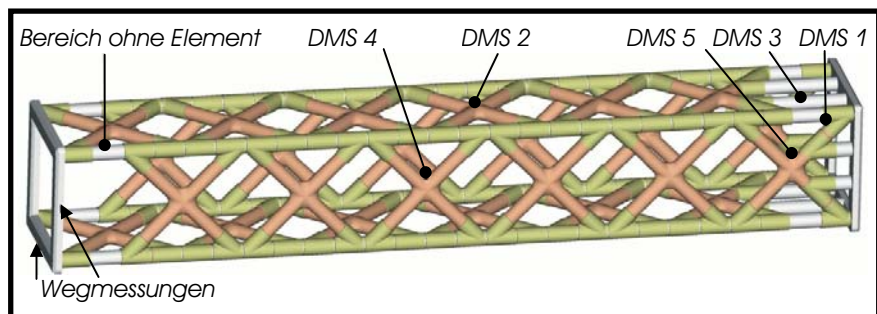
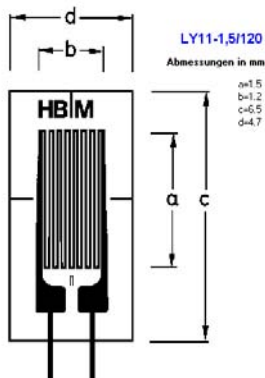


Abb. 2.13: Positionen der DMS am Roboterarm

Ein DMS besteht aus einer sehr kleinen Trägerfolie und einem darauf angebrachten metallischen Gitter mit einem sehr genau definierten elektrischen Widerstand. Die DMS werden auf der Bauteiloberfläche appliziert, an den Enden des metallischen Gitters (Pole) wird eine elektrische Spannung angelegt (Abb. 2.14).

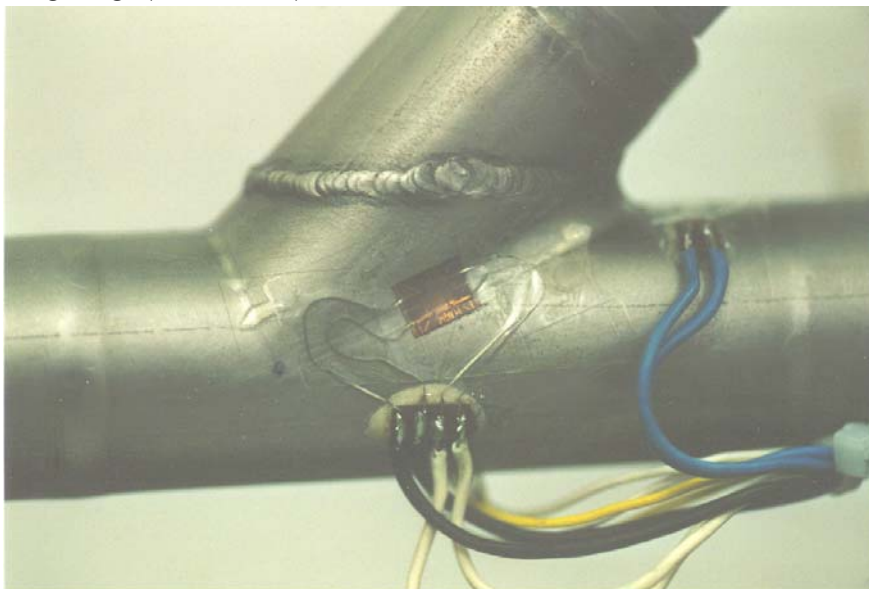


Abb. 2.14: An einem 45°-Knoten applizierter DMS

Wenn sich das Bauteil durch äussere mechanische Einwirkung (z.B. Zug oder Biegung) verformt, wird auch der DMS und damit das metallische Gitter verformt. Diese Längenänderung bzw. Dehnung des Gitters führt zu einer dazu proportionalen Änderung seines elektrischen Widerstandes.

Mittels Messelektronik wird somit die Widerstandsänderung des Gitters als Mass für die Dehnung des Bauteils gemessen. Diese Dehnungen werden im Materialgesetzes $\sigma = E * \epsilon$ (σ =Spannung, E =Materialkonstante und ϵ =Dehnung) eingesetzt, um die dazugehörigen örtlichen Spannungen σ am Bauteil zu bestimmen.

In Abb. 2.15 sind die Ergebnisse der fünf DMS und des Messgerätes für die senkrechte Durchbiegung (Weg) des Roboterarms unter Belastung dargestellt.

Alle gemessenen Spannungen liegen deutlich unterhalb des kritischen Bereichs.

Die Messwerte, die in den durchgeführten Versuchen mittels der Software DASY-Lab ausgewertet wurden, zeigten eine maximale Spannung von ca. 60 N/mm^2 an. Dieser Wert stimmt zu 88,5% mit demjenigen der Finite-Elemente-Rechnung (FEM) überein.

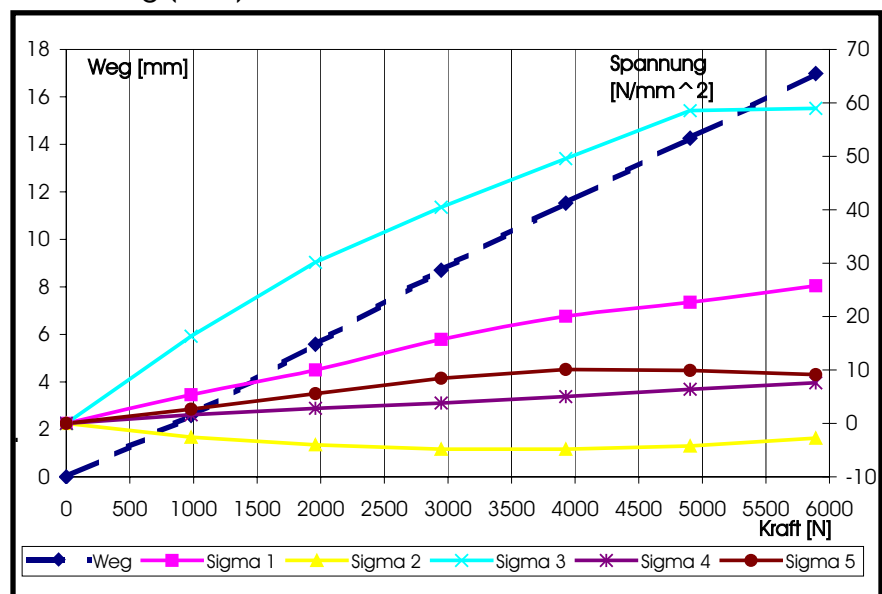


Abb. 2.15: Signalverläufe der Dehnungen und des Weges während der mechanischen Prüfung des Roboterarms

3. Die Hydroform-Technologie

Mit Hydroform-Technologie bezeichnet man das Umformen eines Halbzeugs in Form eines Hohlprofils oder Blechs mittels eines unter hohem Druck von 1.000 bis 3.000 bar zugeführten flüssigen Mediums. Dabei verformt sich das Halbzeug und nimmt die Kontur des Werkzeugs an.

Von Innenhochdruck-Umformung IHU spricht man, wenn rohrartige Halbzeuge unter Innendruck umgeformt werden. Die Umformung von Blech-Halbzeugen wird als Hochdruck-Blechumformung HBU bezeichnet.

In der DIN 8582, in der alle Umformverfahren eingeteilt sind, werden beide Verfahren unter der Bezeichnung „Umformverfahren mit flüssigen Wirkmedien“ zusammengefasst.

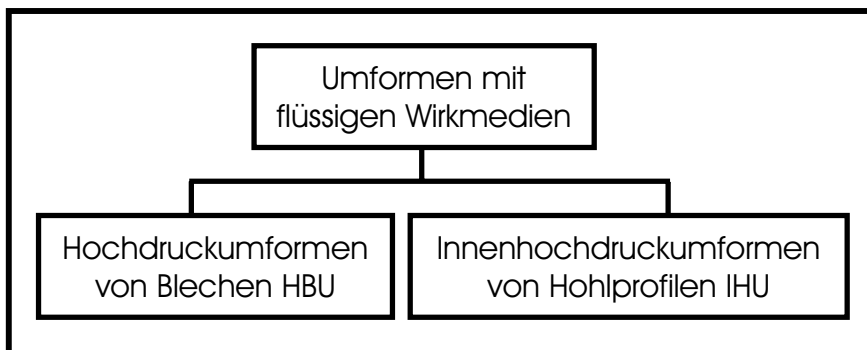


Abb. 3.1: Einteilung der Umformverfahren gemäß DIN 8582 [64]

Das Innenhochdruck-Umformen ist prinzipiell kein neues Verfahren. Bereits um 1850 wurde ein Patent für ein Verfahren zum Innenhochdruck-Umformen erteilt. Damals war das Verfahren zum Herstellen von Blechinstrumenten vorgesehen. Die ersten technischen Anwendungen erfolgten in den 60er Jahren. Es wurden beispielsweise nahtlose T-Stücke aus Kupferrohren hergestellt. Anfang der 70er Jahre traten dann Teile für die Sanitärtechnik in den Vordergrund.

Aufgrund der schwierigen Regelung der Prozessparameter mit den damaligen Mitteln konnte sich das Verfahren nicht durchsetzen und trat in den Hintergrund. Erst Fortschritte in

*Innenhochdruck-
Umformen IHU*

der technischen Entwicklung, insbesondere der Steuerungs- und Regelungstechnik, der Hochdrucktechnik und der Werkzeugfertigung, ermöglichten den Durchbruch im Hinblick auf die industrielle Anwendung. Seit ca. 10 Jahren wächst die Bedeutung dieses Verfahrens progressiv.

Aufgrund der besonderen Vorteile der Hydroform-Technologie hinsichtlich einer rationellen und kostengünstigen Fertigung bei großen Stückzahlen wurde die Automobilindustrie zur wichtigsten treibenden Kraft dieser Technologie.

Die Vorteile dieses modernen Fertigungsverfahrens sind vielfältig. Da von dünnwandigen Halbzeugen ausgegangen wird, stellt es eine Leichtbau-Technologie per se dar.

Weitere Vorteile der Hydroform-Technologie sind die größere Bauteilsicherheit wegen der geringeren Anzahl notwendiger Fügungen, eine Verringerung von erforderlichen Umform- und Fertigungsschritten, die Realisierbarkeit komplexer Körper, eine hohe Masshaltigkeit der Bauteile sowie die Ressourcen- und Betriebsmittelschonung.



Abb. 3.2: Verbesserungen an einem Abgassystem [19]

Untersuchungen im Fachgebiet Werkstofftechnik der Universität Duisburg haben bestätigt, dass bis zu Umformgraden von ca. 30 % aufgrund der beim Hydroformen auftretenden Kaltverfestigung und wegen des nicht

unterbrochenen mikrostrukturellen Faserverlaufs eine größere Härte, Festigkeit und Schwingfestigkeit der Bauteile erzielt werden können [18].

Das Potential des Verfahrens ist bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Fachleute schätzen, dass sich der derzeitige Anwendungsumfang auf das 250-fache erweitern kann.

Eine Hydroform-Anlage besteht hauptsächlich aus einer Presse, einem waagrecht geteilten Werkzeug, einem Maximator zur Erzeugung des hohen hydrostatischen Druckes sowie diversen Leitungen und Einrichtungen. Das zweigeteilte Werkzeug weist die Negativform des zu fertigenden Bauteils auf.

Das Hydroform-Verfahren

Beim Öffnen der Presse fährt die obere Werkzeughälfte zusammen mit der oberen Pressenhälfte hoch, während die untere Werkzeughälfte mit der unteren Pressenhälfte in ihrer Lage verbleibt.



Abb. 3.3: Geöffnete Presse und Werkzeug bei der Firma HOTdoc GmbH

In die untere Werkzeughälfte wird das Halbzeug (z.B. Rohrstück) eingelegt.

Bei der Hydroform-Technologie sind der Anlagebedarf und die Werkzeugkosten recht hoch. Die Werkzeuge für hohe

Stückzahlen werden aus höherwertigen und verschleissfesten Stählen gefertigt. Werkzeuge für Prototypen oder Kleinserien können auch aus Aluminium oder aus einer preisgünstigeren Stahlsorte hergestellt sein. Anlagentechnisch besteht der Bedarf an einer Presse zur Erzeugung einer hohen Zuhaltkraft.

Diese ergibt sich aus dem Produkt von Bauteilgröße und dem für die Umformung benötigten Innendruck.

$$F_{\text{Presse}} = A_{\text{Bauteil}} \cdot p$$

Dieser Ansatz macht deutlich, dass zur Herstellung eines Bauteils der Größe 300X300 mm mit einem Innendruck von 3.000 bar von der Presse bereits eine Zuhaltkraft von $F_{\text{Presse}} = 300 \text{ mm} \cdot 300 \text{ mm} \cdot 300 \text{ N/mm}^2 = 27.000 \text{ kN}$ aufgebracht werden muss.

Je nach gefordertem Umformgrad zur Herstellung der gewünschten Bauteile kann bei Rohrumformungen mittels Innenhochdruck-Umformung (IHU) zwischen Verfahren mit und ohne Nachschiebe-Technik unterschieden werden.

Das Nachschieben, bei dem das Rohrhalbzeug mittels Hydraulik-Stempeln während des hohen Innendrucks gestaucht wird, bewirkt einen massiven Materialtransport in Bauteilbereiche mit großer Umformung und wirkt auf diese Weise einer sonst deutlichen Wandstärkenreduzierung entgegen [20].

Bei der Herstellung eines T-Knotens stellt der neue Abzweig solch einen Bereich mit extrem hoher Umformung dar, der ohne Stauchen des Rohres während der Umformung sehr dünn und damit geschwächt wäre.

Bei der Produktionsanlage kommen deshalb zusätzlich zu den bereits beschriebenen Komponenten zwei axiale Stempel am Werkzeug bzw. an den Rohrhalbzeugenden und ein

Gegenhalter an der Stelle des geplanten neuen Rohr-abzweigs hinzu.

Das Innenhochdruck-Umformen mit Nachschieben erfordert folgende vier Prozeßstufen:

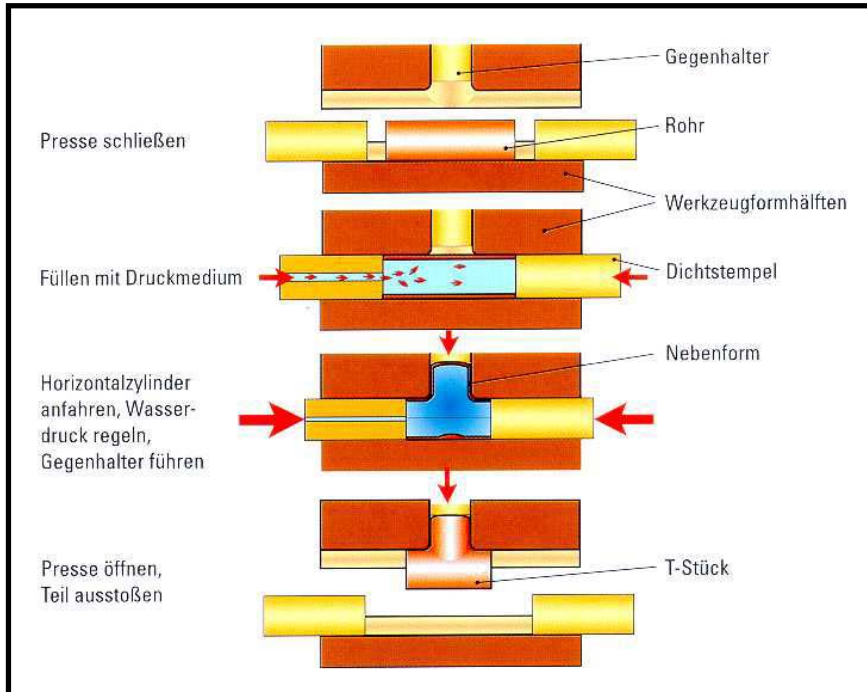


Abb. 3.4: Herstellung eines T-Stückes mittels IHU [19]

Zunächst wird das Halbzeug in die untere Werkzeughälfte eingelegt. Dann werden beide Werkzeughälften geschlossen. Mit den axialen Stempeln werden die Rohrenden abgedichtet. Das Werkstück wird dann mit dem Wirkmedium befüllt. Das Medium wird unter Druck gesetzt und weitet das Rohrteil auf. Gleichzeitig wird das Rohrhalbzeug durch die axialen Stempel gestaucht. Der Gegenhalter regelt den Materialfluss am neu zu bildenden Abgang. An dieser Stelle findet die höchste Umformung statt. Anschließend wird das Wirkmedium auf Kalibrierdruck gebracht. Das Halbzeug nimmt nun exakt die Kontur des Werkzeuges an. Abschließend wird das Werkzeug geöffnet, und das fertige Teil kann entnommen werden.

Die hohen Innendrücker und die entstehenden hohen Spannungen sind erforderlich, um die gewünschten plastischen Verformungen beim Hydroformen zu realisieren. Dabei gilt für die Umfangsspannung

$$\sigma_U = \frac{p_i \cdot d_i}{2 \cdot \frac{d_a - d_i}{2}}$$

mit d_a und d_i als jeweils dem Aussen- und Innendurchmesser des Rohres und p_i dem Innendruck.

Bei der Anwendung der Nachschiebe-Technik steigt jedoch die Anzahl der Prozessparameter und damit die Komplexität des Hydroform-Prozesses deutlich an. Die höheren erforderlichen Kräfte und die gestiegene Prozesskomplexität stellen deutlich größere Anforderungen an die gesamte IHU-Anlage. Dies betrifft die Dimensionierung der Anlage und der Anschlüsse, erfordert verschleißfestere Werkzeuge aus hochwertigerem Stahl und setzt zusätzliche Komponenten wie Hydraulik-Zylinder sowie eine leistungsfähigere Steuer- und Regelungstechnik voraus.

Wegen des hohen Aufwands ist die Hydroform-Technologie in Verbindung mit der Nachschiebe-Technik erst ab größeren Stückzahlen wirtschaftlich.

Hochdruck- Blechumformung

Bei der Hochdruck-Blechumformung (HBU) werden Bleche durch einseitigen hydrostatischen Druck in eine Werkzeugkontur gedrückt (Abb. 3.5).

Wiederum verformt sich das Blech plastisch und nimmt die Kontur des Werkzeugs an.

Die HBU ermöglicht auf diese Weise die Verwirklichung komplexer Oberflächenstrukturen, z.B. die Einbringung von Blechversteifungen oder optischen Besonderheiten.

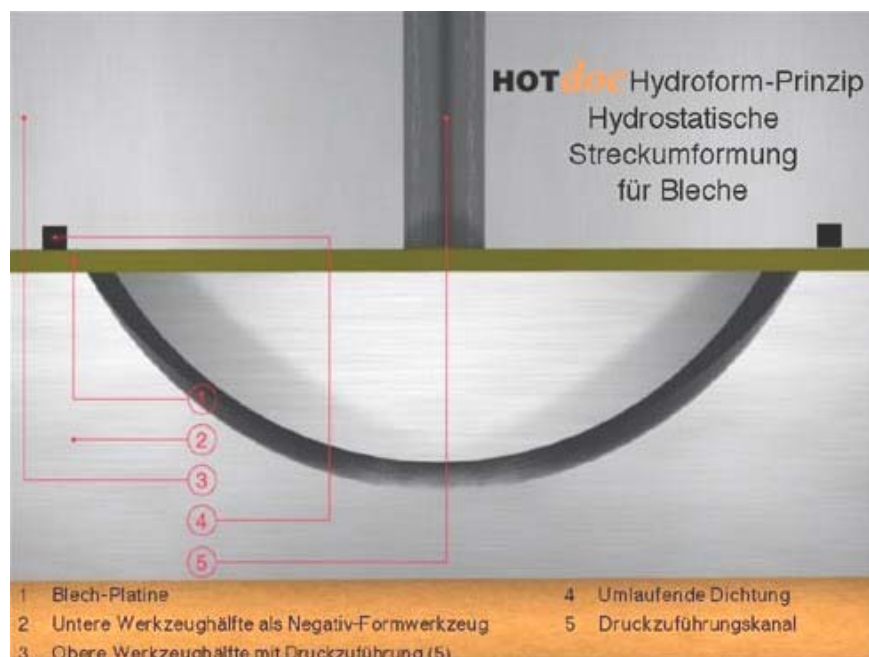


Abb. 3.5: Hochdruck-Blechumformung HBU (schematisch) [61]

Die HBU stellt eine interessante Alternative zu konventionellen Verfahren wie beispielsweise dem Tiefziehen dar.

Im Unterschied zum Tiefziehen wird jedoch eine örtlich höhere und über das gesamte Bauteil nahe zu konstante Umformung erzielt. Die erreichbare Gesamtumformung des Bauteils ist damit deutlich größer.



Abb. 3.6: Beispiele metallischer Flächen mittels HBU [61]

4. Entwicklung und Realisierung der Verbindungselemente

Optimierung der Verbindungselemente

Wie durch die bereits dargestellten FEM-Untersuchungen an Strukturen bestätigt wurde, sind Stab-Knoten-Tragwerke an den Verbindungsstellen der Stäbe (Knoten) am höchsten beansprucht. Da auch hier als erstes ein Versagen zu erwarten ist, bedeutet eine Verbesserung der Verbindungen aus mehrfacher Sicht eine höhere Belastbarkeit und Sicherheit der gesamten Struktur.

Bei Fachwerken wird im Idealfall die Biegemomentfreiheit der Stäbe und Stabverbindungen angestrebt. Das erstmalig beim Roboterarm angewandte Tragwerk-System weist jedoch steife, nicht gelenkige Verbindungen zwischen den Stäben auf. Aus diesem Grund sind an den Verbindungen neben Zug- und Druck- auch Biegemomentanteile zu erwarten. Um diese zusammengesetzte Belastung sicher aufnehmen zu können, müssen die Verbindungselemente möglichst biegefest ausgebildet sein. Biegefestigkeit bedeutet in diesem Zusammenhang, dass sich das Element unter Biegebelastung möglichst wenig verformt. Eine geringere Verformung, bzw. örtliche Dehnung führt über das Hooke'sche Materialgesetz $\sigma = E \times \varepsilon$ (Spannung $\sigma =$ Materialkonstante $E \times$ Dehnung ε) zu einer geringeren örtlichen Spannung, d.h. zu einer geringeren örtlichen Beanspruchung des Werkstoffs.

Eine höhere Trag- und Biegefestigkeit kann einerseits durch Vergrößerung des tragenden Querschnitts erreicht werden. Dies kann bei rohrartigen Bauteilen, wie die Verbindungselemente, durch Vergrößerung des Durchmessers oder der Wanddicke erreicht werden. Beides führt jedoch zu einem höheren Bauteilgewicht.

Eine zweite Alternative und oftmals effektivere Methode, um örtliche die Spannungen in belasteten Bauteilen zu

reduzieren, ist eine örtliche geometrische Anpassung, bzw. eine Formoptimierung des Bauteils. Dabei wird die Kerbwirkung, die an Kanten, Querschnittsverjüngungen oder Radiusübergängen entsteht, genau betrachtet und durch geeignete Formgebung an diesen Stellen des Bauteils verringert. Im allgemeinen gilt, je betonter oder scharfkantiger ein Bauteilübergang ausgebildet ist, desto ungünstiger ist die örtliche Kerbwirkung und desto ausgeprägter ist die örtliche Spannungsüberhöhung.

Deshalb wurde in der vorliegenden Arbeit anhand systematischer Untersuchungen mittels der FEM die Gestalt der beiden Knotenelemente im Hinblick auf ihr spannungsmechanisches Verhalten optimiert. Zur FEM-Modellierung der Verbindungsknoten wurden Schalen- und Volumenelemente verwendet.

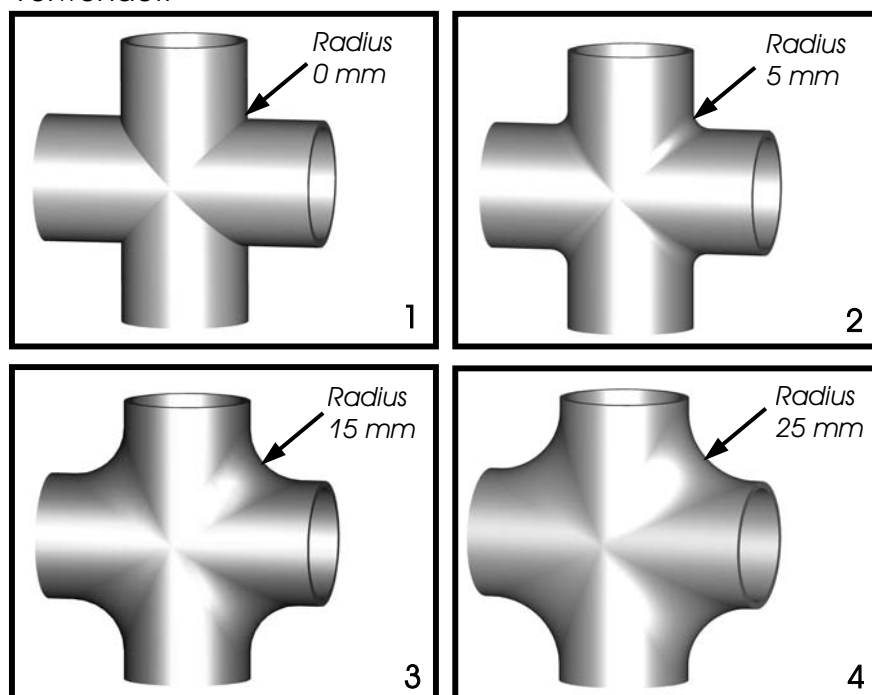


Abb. 4.1: Veränderungen an der Geometrie des Kreuzknotens

Ausgehend vom Modell der Durchdringung zweier Rohrstücke unter 45° und 90° wurde die so entstandene scharfkantige Verbindungskontur im Laufe der Optimierung

schrittweise zu einer harmonisch gerundeten Fläche modelliert (Abb. 4.1), bei der Kerbwirkungen verringert und die Spannungen deutlich gesenkt wurden. Nach jedem Optimierungsschritt wurden die Radien neu modelliert und die Höhen der entstehenden Spannungen mit erneuten FEM-Berechnungen analysiert (Abb. 4.2, 4.3).

Am Beispiel des 45°-Knotens in Abb. 4.2 sind die Folgen eines Optimierungsschrittes deutlich zu sehen. Erstens hat die Verformung des Elementes unter Belastung durch die Optimierung stark abgenommen.

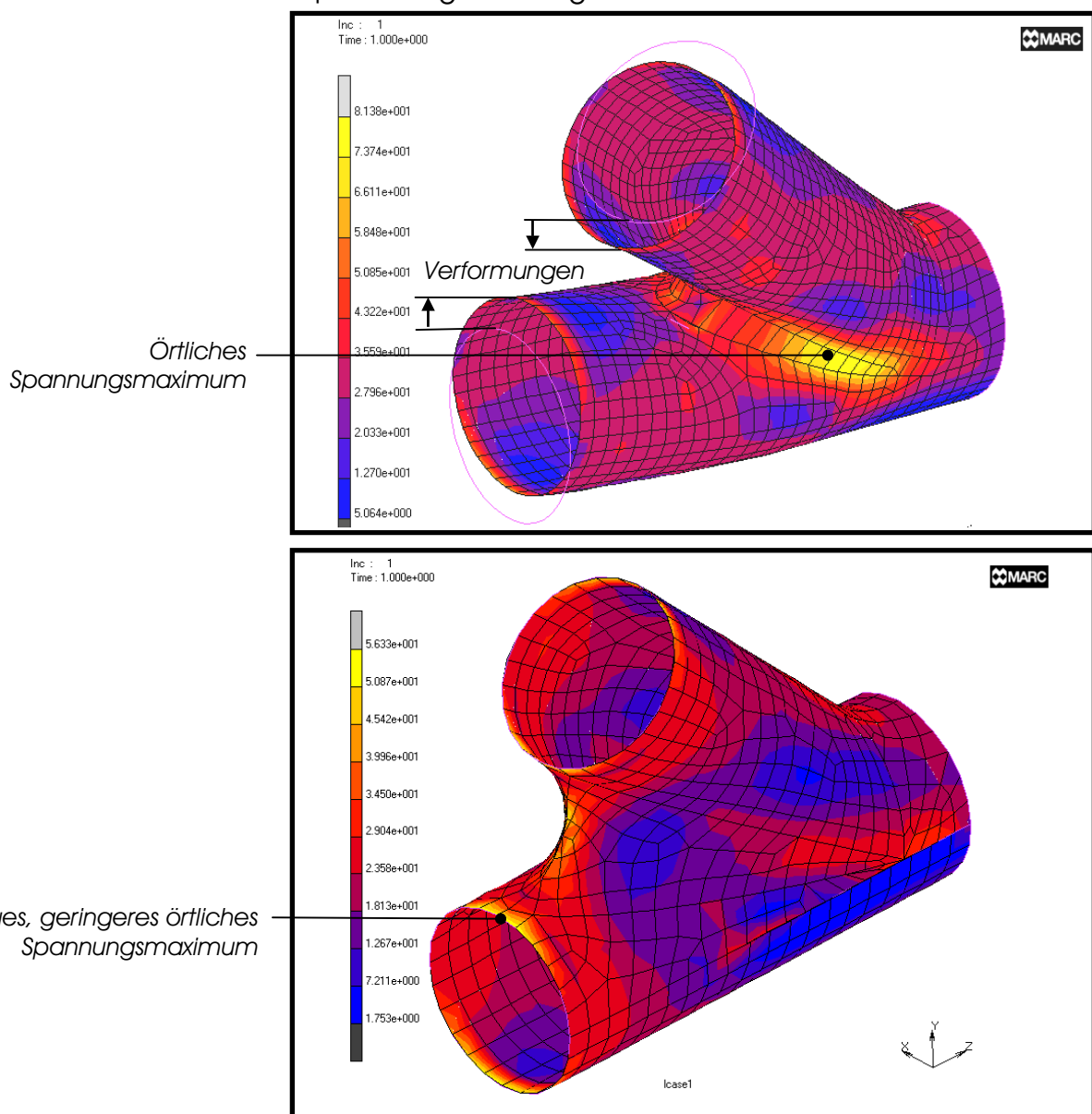


Abb. 4.2: Vergleich zweier Optimierungsschritte am 45°-Knoten

Die Höhe des neuen Spannungsmaximums ist im dargestellten Fall von 81,3 auf 56,3 N/mm², also um 30 % gefallen.

Weiterhin verlagert sich der Ort der maximalen Spannungen (gelbe Bereiche) vom kritischen Übergangsbereich hin zum Knotenrand. Diese Stellen am Knotenrand sind jedoch unproblematisch, da hier das anzuschließende Rohr hineingesteckt und verschweisst wird. Dadurch wird diese Stelle durch die entstehende doppelte Wanddicke aus Rohr und Element signifikant gestützt und es ist zu erwarten, dass dieses Spannungsmaximum ganz verschwindet.

Auch an den entsprechenden Optimierungsschritten am 90°-Kreuzknoten konnten die gleichen Folgeerscheinungen bezüglich der Verformungen und Spannungen beobachtet werden.

Um mögliche Modellierungs- oder Berechnungsfehler entdecken zu können, wurde jeder Elementtyp mit zwei unterschiedlichen FEM-Softwarepaketen analysiert.

Bei dieser Software handelt es sich um die Programmpakete MARC/MENTAT (Abb. 4.2) und Pro/Engineer – Pro/Mechanica.

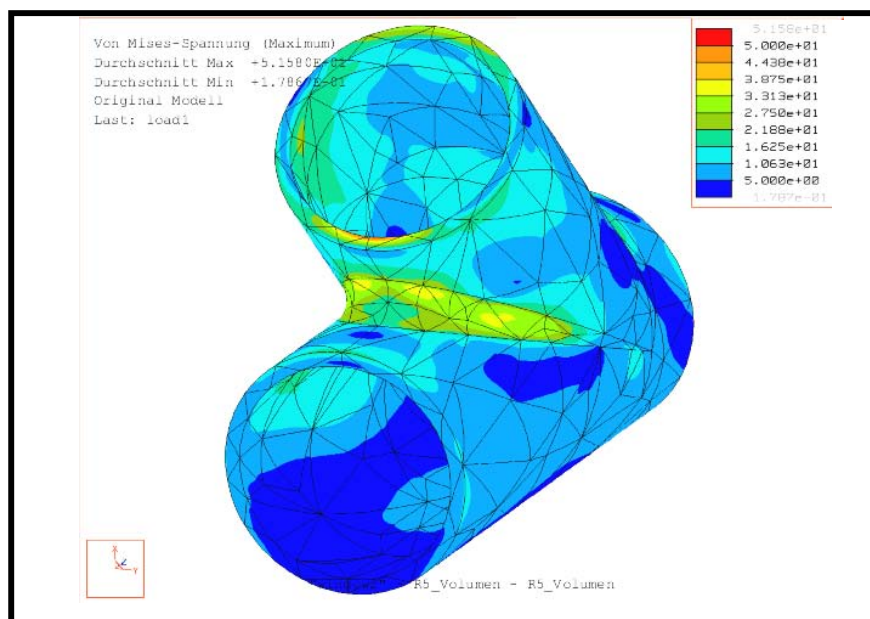


Abb. 4.3: FEM-Analyse und Optimierung eines 45°-Knotens mit dem Programmpaket Pro/Engineer- Pro/Mechanica

Gegenüber der ursprünglichen scharfkantigen Verbindungskontur der Knoten wurde eine Reduktion der maximalen Spannungen im Rundungsbereich bei den 45°-Knoten um 48 % und bei den Kreuzknoten um 65 % erreicht.

Einer Vergrößerung der Verbindungsradien sind jedoch geometrisch Grenzen gesetzt. Eine Vergrößerung des Radius führt nämlich zu einer größeren Elementlänge.

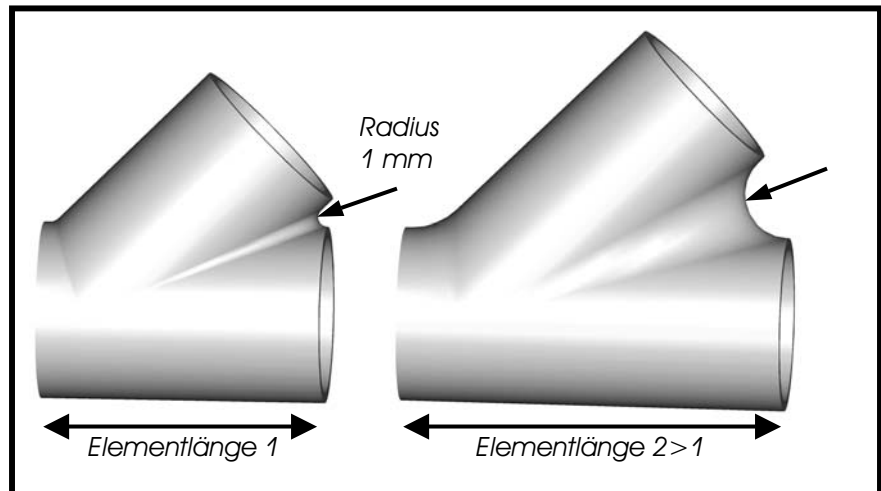


Abb. 4.4: Größere Elementlängen für größeren Radien

Dabei muss darauf geachtet werden, dass wegen der Positionierung der Elemente hintereinander auf durchgehenden Stangen der Platz, den ein Element einnimmt, nicht mehr für weitere Verbindungen zur Verfügung steht. Dies ist besonders bei dicht besetzten Strukturen, wie beispielsweise dem Roboterarm zu beachten, wo jeder freie Raum auf den Längsstangen gebraucht wird. Weiterhin führt eine größere Elementlänge zu mehr Versatz zwischen den einzelnen Systemlinien und zu einem höheren Elementgewicht. Die Elemente sollten deshalb möglichst kompakt sein.

Mit der entwickelten Geometrie der einzelnen Elemente wurde dann eine detaillierte Modellierung und Berechnung der gesamten Struktur von ARM 3 vorgenommen. Damit sollten Hinweise auf das Gesamtverhalten des Arms und auf

die aus der Armbelastung resultierenden Beanspruchungen der einzelnen Elemente erhalten werden.

Die Ergebnisse solcher möglichst genauen Untersuchungen sind nur dann zuverlässig, wenn alle relevanten Einzelheiten der Struktur realitätsgetreu modelliert werden. Sowohl die Einzelemente selbst als auch ihre Verbindungen untereinander mussten bis ins Detail nachgebildet werden.

Sogar alle Schweißnähte zwischen den Rohren und den Knotenelementen wurden einzeln modelliert.

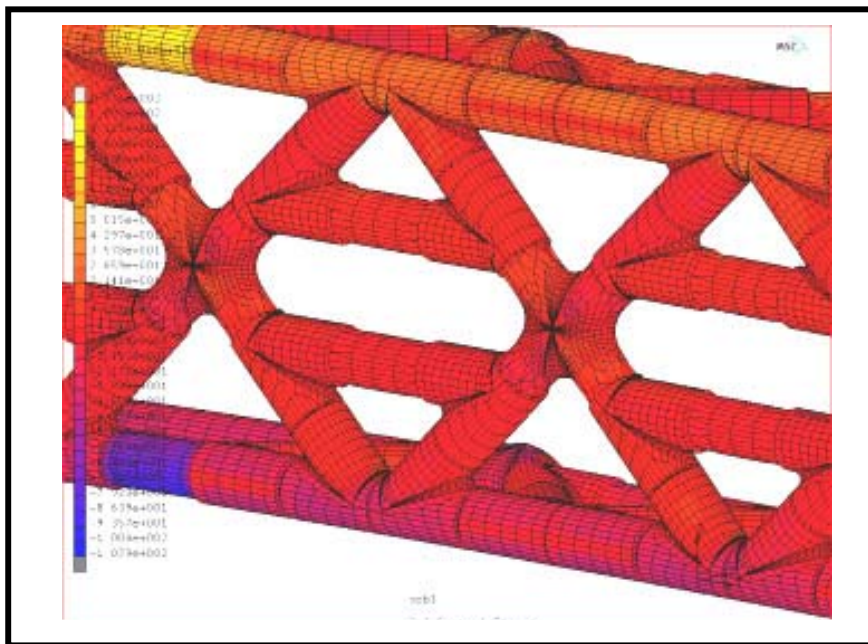


Abb. 4.5: Detaillierte Modellierung der Roboterarm-Struktur

Schon bald stellte sich heraus, dass die benötigte hohe Rechnerkapazität für die detailgetreue Strukturmodellierung kritisch werden könnte.

Aus diesem Grund wurde die Struktur schrittweise in Abschnitten modelliert und berechnet. Nach einer erfolgreichen Berechnung wurde die Struktur um einen nächsten Abschnitt erweitert und erneut berechnet (Abb. 4.6).

Dies wurde soweit fortgeführt bis die Rechnerkapazitäten im Fachgebiet Werkstofftechnik nicht mehr ausreichten. Daraufhin wurde damit begonnen, die Berechnungsarbeiten im Fachgebiet vorzubereiten und an das

Rechenzentrum der Universität Duisburg zu verschicken. Bereits definierte Berechnungsaufgaben werden dort aufgenommen und von den Großrechnern durchgeführt.

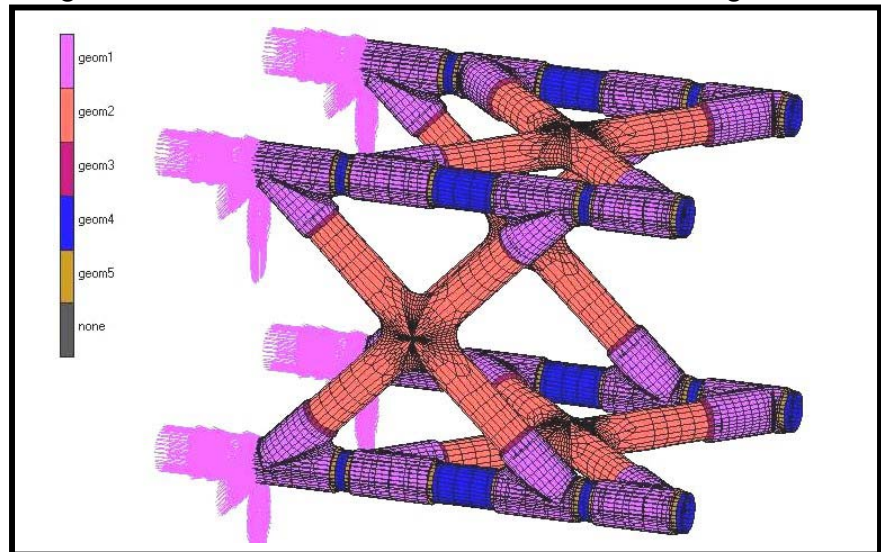


Abb. 4.6: Abschnittsweise Modellierung und Berechnung von ARM 3

Als ein Ergebnis dieser Analyse wurden die höchstbelasteten Stellen der Struktur eindeutig identifiziert und die Höhe der Spannungen an diesen Stellen ermittelt. Gleichzeitig wurden sekundäre Stäbe bestimmt, die keine besondere tragende Funktion ausübten und somit entfernt werden konnten.

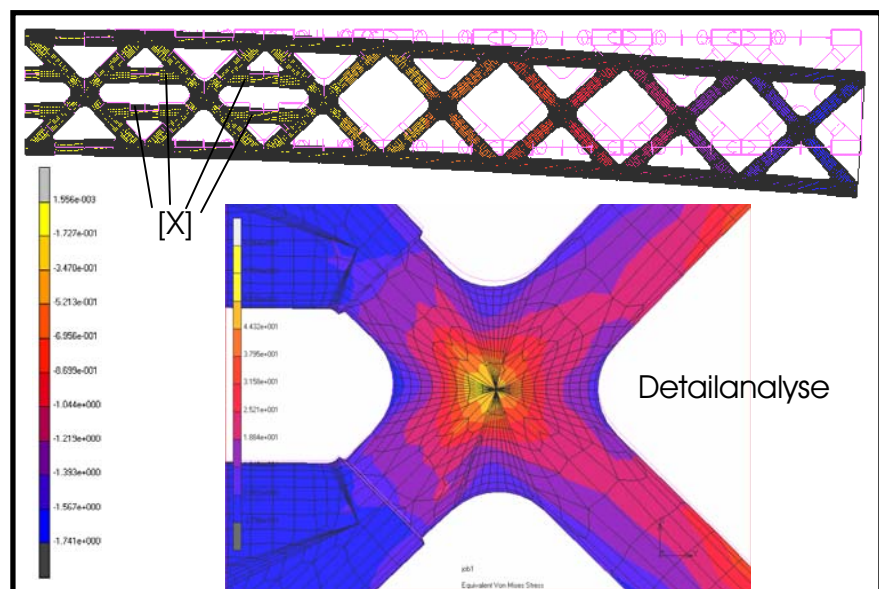


Abb. 4.7: FEM-Untersuchungen der gesamten Struktur und Analyse der Beanspruchungen der Elemente im Detail

Solche sekundären Bereiche waren unter anderem die seitlich verstärkenden Stäbe (Abb. 4.7, Stelle [X]).

Sie sind im realen Roboterarm nicht mehr vorhanden. Hierdurch wurden 8 Verbindungsstangen und 16 45°-Knoten eingespart, für beide realisierte Roboterarm-Prototypen entsprechend das Doppelte.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen stimmen zu 88,5% mit denjenigen der Messungen während der mechanischen Prüfung der Struktur überein.

Das wichtigste Ergebnis dieser aufwändigen Untersuchung war jedoch die Sicherheit, dass die entwickelte Stab-Knoten-Anordnung in Verbindung mit der gewählten Dimensionierung der Verbindungselemente und Stangen die Erfordernisse des Roboterarms bezüglich Tragfähigkeit, Steifigkeit und Gewicht erfüllen würde. Ist einmal die Fertigung der Einzelemente in Auftrag gegeben, sind Änderungen nicht mehr möglich. Die für die Realisierung der zwei Prototypen des Roboterarms zur Verfügung stehenden finanziellen Mittel erlaubten auch keinen zweiten Versuch.

Diese Gedanken spielten auch bei der nächsten Entwicklungsstufe des Roboterarms, der Simulation der Hydroform-Prozesse, eine wichtige Rolle.

Simulation der Hydroform-Prozesse

Die Hydroform-Technologie repräsentiert eine Fertigungsmethode für dünnwandige Bauteile in der Regel in sehr großen Stückzahlen. Dies ist hauptsächlich darin begründet, dass die für die Umformung benötigten Werkzeuge kostenintensiv sind.

Sowohl der Entwurf und die Konstruktion der Werkzeuge mit Computern als auch der Fertigungsprozess mit Fräsen, Schleifen und Polieren sind bei solch komplexen dreidimensionalen Geometrien sehr aufwändig. Um so wichtiger ist es, schon während des Entwurfs des Werkzeugs zu

kontrollieren, ob die geplante Umformung mit dem dafür entwickelten Werkzeug auch erzielt werden kann.

Wird ein Werkzeug gefertigt, mit dem sich die geplante Umformung nicht verwirklichen lässt, so bedeutet dies große Verluste an finanziellen Mitteln und Projektzeit.

Diese wertvollen Erkenntnisse der zukünftigen Umformung können vorab durch Simulation des Hydroform-Prozesses gewonnen werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde auch dieser wichtige Punkt aufgegriffen, und es wurden Untersuchungen durchgeführt, um den Herstellungsprozess der Knotenelemente durch Hydroformen vorab zu simulieren.

Auch hier wurde die Methode der Finiten Elemente (FEM) eingesetzt. Die FEM berechnet auch hier ein Gleichgewicht zwischen den in das Bauteil eingeleiteten Kräften und den dadurch entstehenden Verformungen.

Solange Verformungen im elastischen Bereich des Werkstoffs geschehen, müssen durch die Software lineare Gleichungssysteme gelöst werden.

Beim Hydroform-Prozess treten jedoch elastisch-plastische Verformungen des Werkstoffs auf. Erst diese massiven Verformungen ermöglichen die Entstehung neuer Formen beim Hydroform-Prozess.

Diese komplexen Fließ-Prozesse im Werkstoff führen jedoch zu nicht-linearen mathematischen Zusammenhängen zwischen den behandelten physikalischen Größen, was die Komplexität der Berechnungen wiederum deutlich erhöht. Weitere Nicht-Linearitäten entstehen durch

- den Kontakt des Halbzeugs mit der Werkzeugwand
- Reibung zwischen Halbzeug und Werkzeugwand,
- transiente Prozesse (z.B. Abhängigkeiten von der Geschwindigkeit (Dynamik) der Umformung)

Diese Einflüsse auf die Berechnungen führen dazu, dass deutlich mehr Parameter berücksichtigt werden müssen. Off

sind spezielle plastische Werkstoffdaten nicht vorhanden, andere Daten, wie beispielsweise Reibung, hängen zusätzlich vom noch zu bestimmenden Innendruck ab und müssen in einem ersten Schritt oftmals abgeschätzt werden. Wie das reale Hydroformen selbst ist auch eine Umform-Simulation ein schnell ablaufender Prozess von nur einigen Sekunden Dauer.

Insgesamt muss deshalb in sehr kleinen (Umform)Schritten und mit viel „Fingerspitzengefühl“ vorgegangen werden, um nach jedem Berechnungsschritt einen Gleichgewichtszustand (Ergebnis) zu erreichen.

Damit eine solche Berechnung zu einem Ergebnis führt, sind deshalb zwischen 300 und 800 einzelne Berechnungsschritte (sehr kleine Umformungen) für jeden Hydroform-Prozess notwendig.

Zur Verringerung des Rechenaufwands für den Computer kann bei spiegelsymmetrischen Bauteilen eine Hälfte modelliert und berechnet werden, dessen Ergebnis natürlich auch für die zweite Hälfte gilt. Besondere Aufmerksamkeit muss dabei den Randbedingungen zwischen beiden Modellhälften geschenkt werden. Mit viel ingenieurmässigem Verstand muss das Modell gedanklich während der Belastung aufgeschnitten und die entstehenden Randbedingungen an den Schnittkanten richtig erfasst werden.

Modellierung

Diese Randbedingungen werden daraufhin im Computer am Halbmodell des Bauteils durch Sperren oder Freigeben von Verformungen in bestimmte Koordinatenrichtungen, oder durch Hinzufügung zusätzlicher Kräfte modelliert.

Da in unserem Fall für jede gelungene Umformung über 300 Berechnungen durchgeführt werden müssen, die selbst wegen Nicht-Linearitäten komplex sind und viel Rechenzeit benötigen, wurden nicht nur Halb-, sondern teilweise auch Viertelmodelle der Elemente erstellt und berechnet. Bei Viertelmodellen werden die Elemente nicht einmal, sondern

zweimal entsprechend ihrer Symmetrieebenen gedanklich geschnitten (Abb. 4.8).

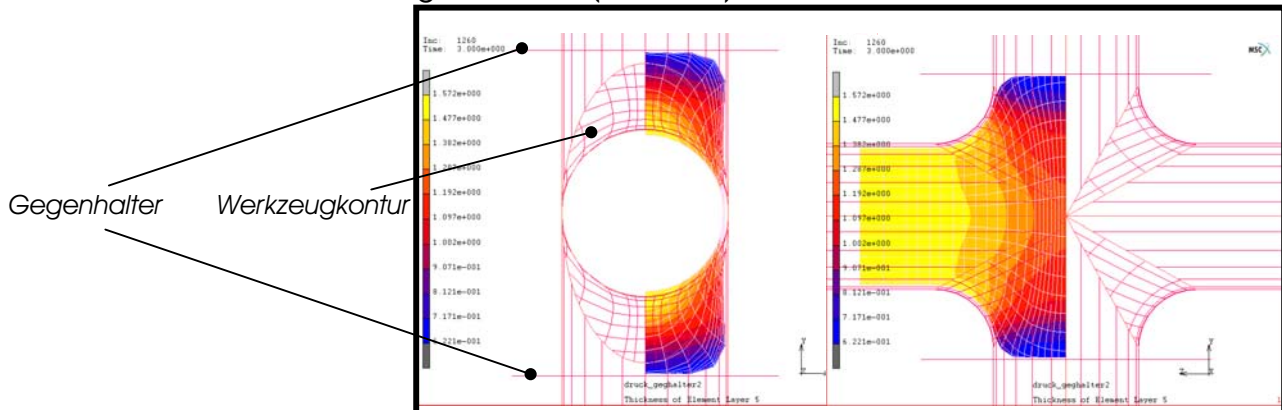


Abb. 4.8: Umformsimulation eines Viertelmodells des Kreuzknotens

Die roten Linien zeigen die Form (Kontur) des Werkzeugs und die Position der Gegenhalter, die sich mit fortschreitender Umformung nach oben und unten verschieben.

Bei gegebenen Körpergeometrien sind die bei der Umform-Simulation wichtigsten einstellbaren Prozess-Parameter die zeitlichen Verläufe von Innendruck, Gegenhalter und Achsialstempel, dieser letzte für eine eventuell benötigte Stauchung des Rohres während der Umformung (Nachschieben).

Wegen der hohen Geschwindigkeit der Umformung müssen diese einzelnen zeitlichen Verläufe bis auf teilweise wenige Millisekunden aufeinander abgestimmt werden.

Der grobe Ablauf des Prozesses lautet: Erst nachdem sich ein genügend großer Innendruck aufgebaut hat und sich darauf hin das Ausgangrohrstück verformt und gegen den Gegenhalter drückt, weicht dieser sehr genau kontrolliert und gibt den Raum für den neuen Abzweig frei. Wenn nicht genügend Material in diesen Raum fließt, muss kontrolliert nachgeschoben werden.

In Abb. 4.9 ist jeder 150ste Umformschritt der Umform-simulation eines 90°-T-Knotens dargestellt.

Bei dieser Simulation sollte berechnet werden, welche Höhe bei der Ausformung beim neuen Abzweig erreicht werden kann, bzw. wie weit die Wanddicke des Bauteils an dieser Stelle zurückgeht. Die Farben auf den Abbildungen geben deshalb die Wanddicken an. Gelb steht für die größte Wanddicke im jeweiligen Bild (ca. 2-3 mm), blau bedeutet kleinste Wanddicke (ca. 0,2-0,7 mm). Der Ausgangskörper, ein konventionelles Rohrstück, hat 2 mm Wanddicke.

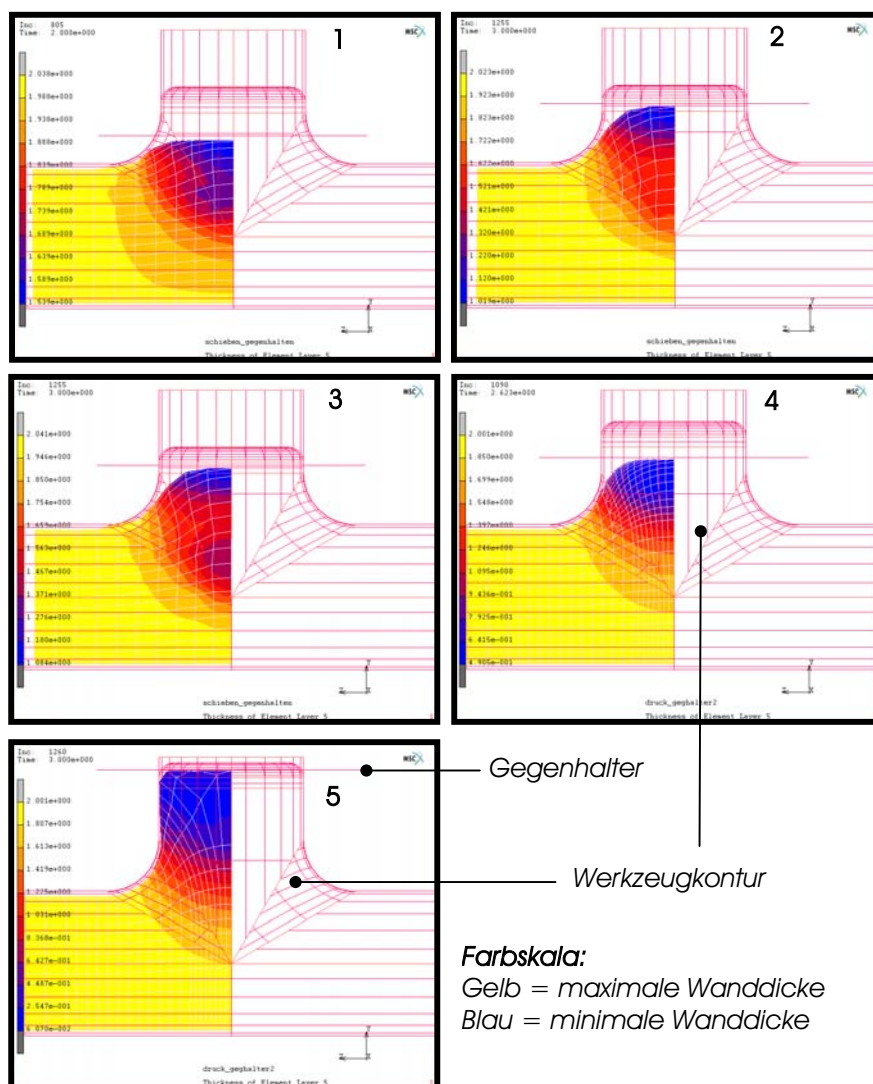


Abb. 4.9: Simulation der Umformung eines 90°-T-Stückes

Da der dargestellte Umformprozess zu einem zu großen Rückgang der Wanddicke beim neuen Abzweig (bis auf 0,6 mm) führt und damit das Bauteil an dieser Stelle deutlich

geschwächt wird, wurde als nächstes die Prozessvariante mit Nachschieben simuliert.

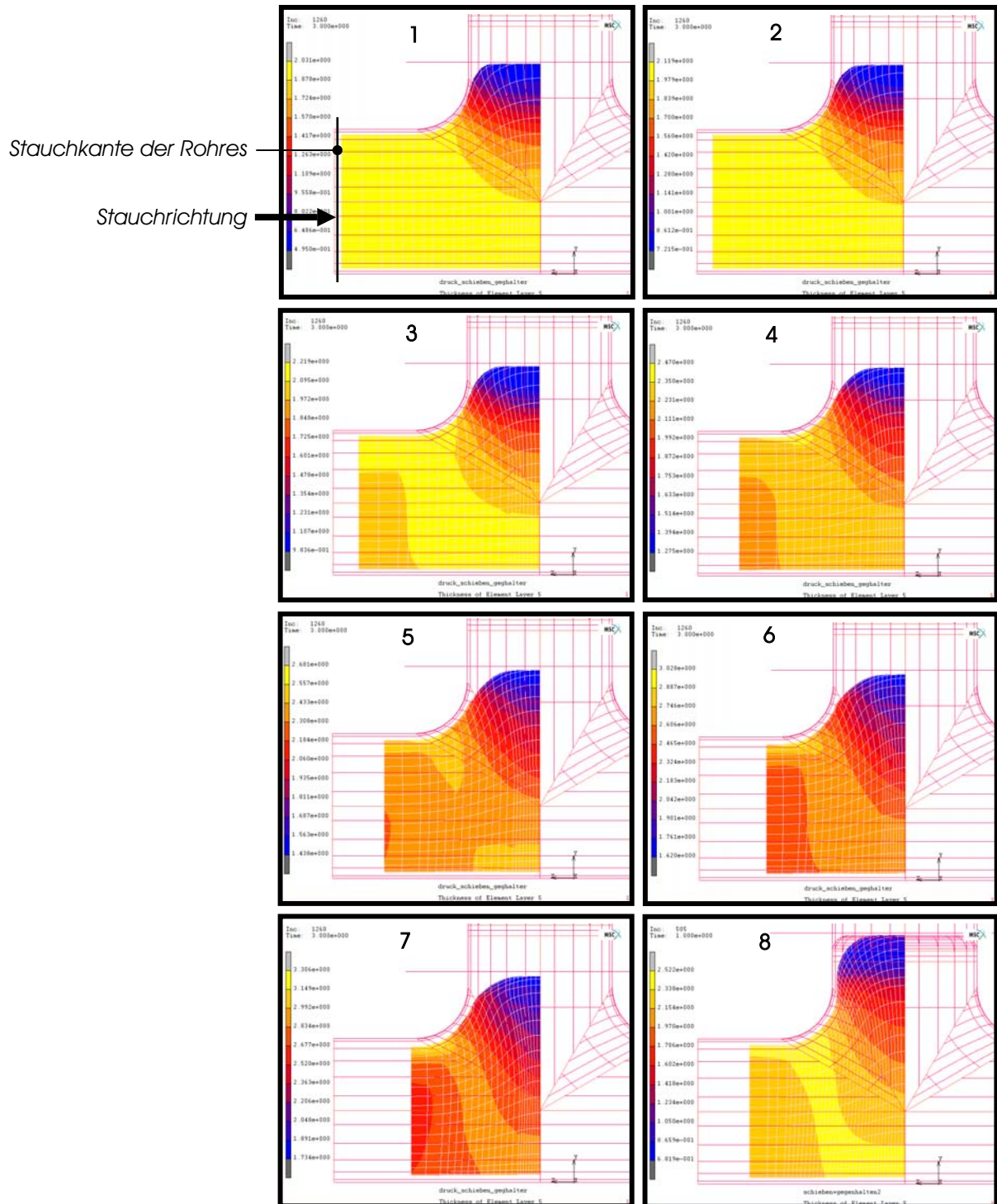


Abb. 4.10: Simulation des Nachschiebens bei fortgeschrittener Umformung eines 90°-T-Stückes

Es handelt sich hier um das Stauchen des Rohrstückes meistens während der zweiten Hälfte einer Umformung, um mehr Material in den Bereich des neuen Abzweig zu transportieren. (Abb. 4.10)

Die kontrollierte Stauchung des Ausgangsrohres ist deutlich zu erkennen. Das Element ist am Ende der Umformung insgesamt deutlich kürzer geworden und weist überall größere Wanddicken im Vergleich zu der Variante ohne Nachschieben auf.

Als Simulation der in der Realität eingesetzten zwei Hydraulik-Zylinder wird im Computer an beiden Enden des Ausgangsrohres eine Kraft angebracht, deren optimale Größe und zeitlicher Verlauf durch Simulation ermittelt werden muss. Wenn zu stark gestaucht wird, bilden sich Falten am Halbzeug und es kollabiert schlagartig nach innen wie eine zerdrückte Metalldose.

Diese Berechnung in Abb. 4.10 zeigt, dass die Wanddicke am neuen Abzweig des Knotens nach der Umformung 1,8 mm beträgt. Dieser Wert entspricht 90 % der Ausgangswanddicke des Rohres und kann als Ergebnis akzeptiert werden.

Nun sind auch die zeitlichen Verläufe der Prozessgrößen einschließlich derjenigen von Gegenhalter und Stauchzylinder in Abhängigkeit des zeitlichen Verlaufs des Innendrucks bekannt.

Nachdem sowohl die Knotenelemente selbst als auch die Hydroform-Prozesse analysiert und optimiert worden waren, fand die Fertigung der 45°- und Kreuzknoten-Elemente bei der Firma HOTdoc in Solingen statt.

Es hat sich dabei jedoch herausgestellt, dass die geringe Anzahl benötigter Kontenelemente für zwei Roboterarme und weitere Versuchsreihen nicht den großen Aufwand für einen Hydroform-Prozess mit Nachschieben rechtfertigte.

*Fertigung der
Verbindungselemente*

Die Erfordernisse an die Hydroform-Anlage mit deutlich stabileren Werkzeugen und zusätzlichen sehr genauen hydraulischen Komponenten einschließlich Steuerung waren für die geringe Elementstückzahl nicht wirtschaftlich sinnvoll. Aus diesem Grund entschied man sich für die einfachere Prozessvariante ohne Nachschieben und sah vor, den nicht ganz ausgebildeten neuen Abgang durch ein daran gelötetes Rohrstück zu vervollständigen (Abb. 4.12). Die Werkzeuge wurden dann entsprechend der Geometrie der Knotenelemente gefertigt.

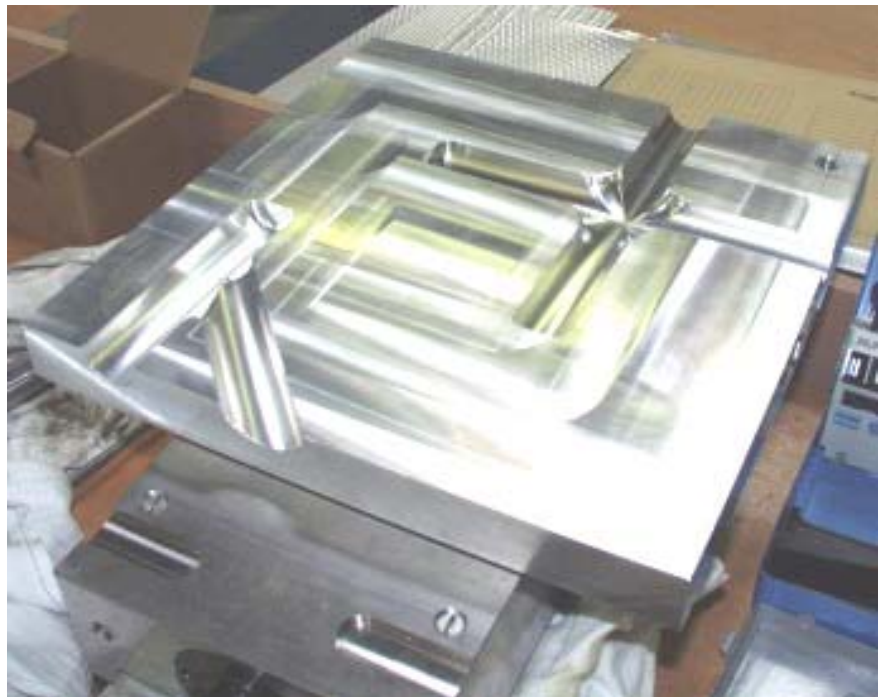


Abb. 4.11: *Werkzeughälfte mit gefrästen Knotengeometrien*

Dazu wurden die Knotenelemente als Negativformen aus einer massiven Stahlplatte computergesteuert herausgefräst. Dies erfolgte getrennt für die untere und für obere Werkzeughälfte. Um die Reibung zwischen Element und Knotenwand während der Umformung möglichst gering zu halten, müssen die Werkzeugoberflächen qualitativ sehr hochwertig sein.

Mittels der Hydroform-Technologie wurden darauf hin die Knotenelemente entsprechend der vorgegebenen

Geometrie gefertigt. Aufgrund der positiven Erfahrungen des Fachgebietes und der Firma HOTdoc mit dem Hydroformen des rostfreien Stahls 1.4301 (V2A) wurde dieser eingesetzt. Die Elemente wurden mit mehreren Umformschritten gefertigt. Um die Duktilität („Verformbarkeit“) des Werkstoffs zu gewährleisten, wurden die Bauteile vor jedem weiteren Umformschritt geglüht. Auf diese Weise verringerten sich die Verfestigungen im Werkstoff nach der vorherigen Umformung und das Bauteil riss nicht bei der anschließenden weiteren Umformung.

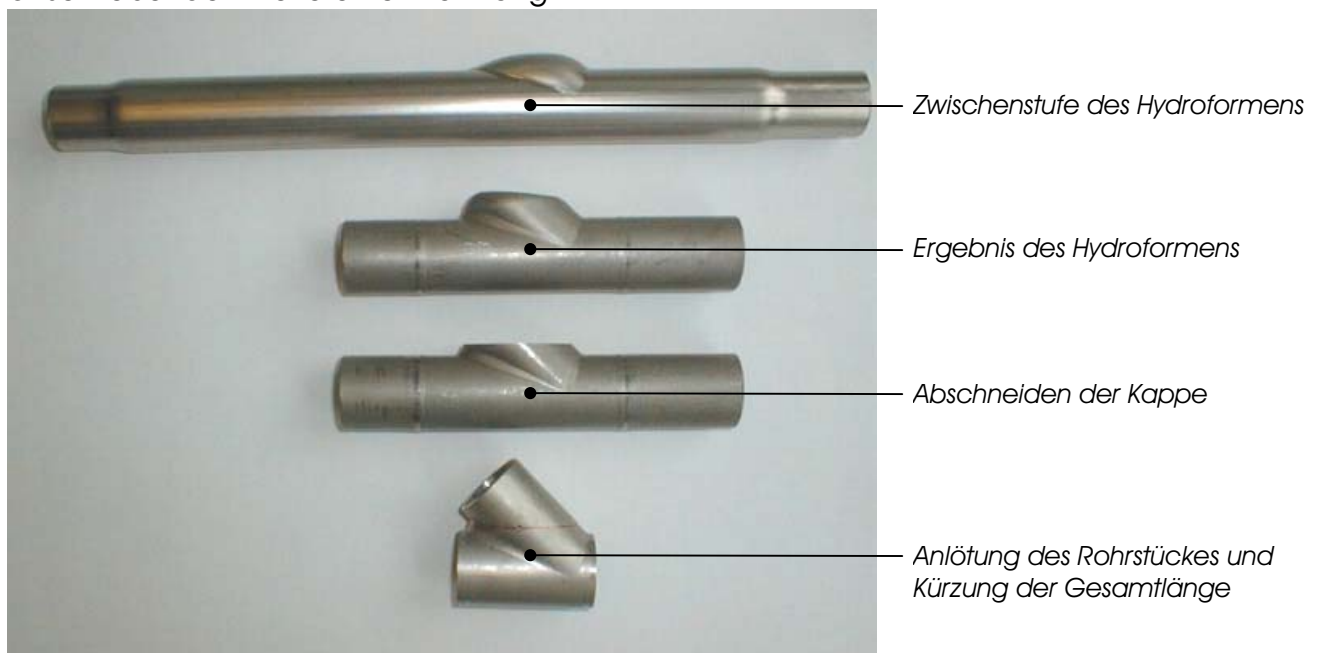


Abb. 4.12: Umformschritte beim 45°-Knotenelement

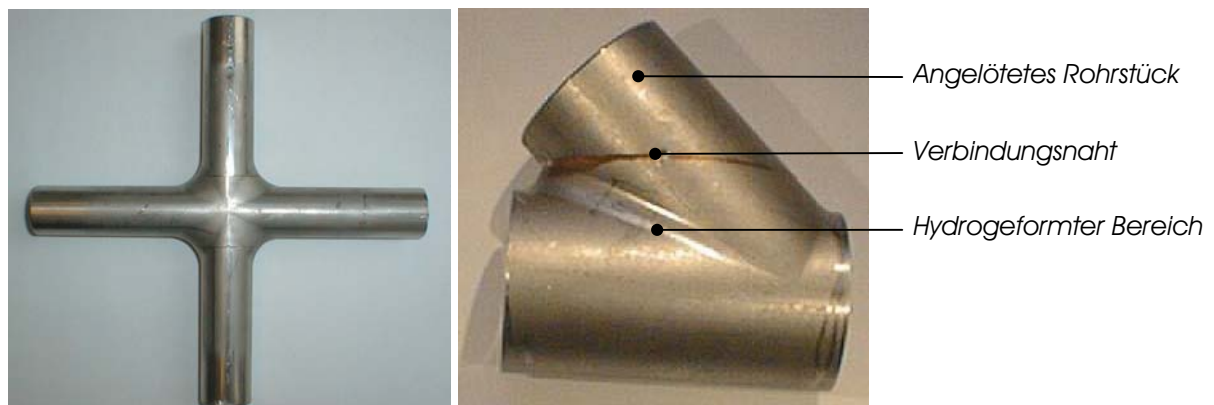


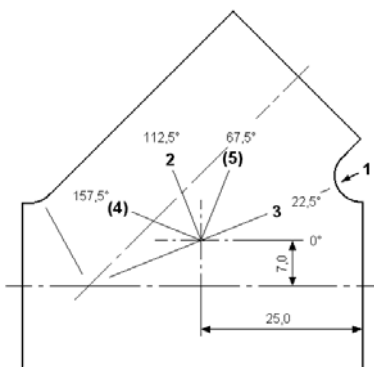
Abb. 4.13: Fertige 45°- und Kreuzknoten

Insgesamt wurden für zwei Prototypen des Roboterarms, für weitere Strukturen sowie für Tests an den Elementen selbst 300 45°-Knoten und 100 Kreuzknoten gefertigt.

Mechanische Element- Untersuchung

Mechanische Untersuchungen der Verbindungselemente sollten aufzeigen, welche Stellen im Knoten am höchsten belastet werden und in welche Richtung die entstehenden Hauptspannungen verlaufen.

Mit diesen Erkenntnissen könnten daraufhin gezielte örtliche, gegebenenfalls richtungsabhängige Verstärkungen an den Elementen verfolgt werden.



Lage und Ausrichtungen
der Messgitter 1 bis 5

Am 45°-Knoten wurden drei Dehnungsmeßstreifen (DMS) mit insgesamt fünf metallischen Messgittern in unterschiedlichen Richtungen appliziert.

Es wurden zwei besonders beanspruchende Belastungsfälle untersucht (Abb. 4.14 a und b):

- reine Biegung unter einem Winkel von 0°
- die kombinierte Biege-Torsionsbelastung unter 90°

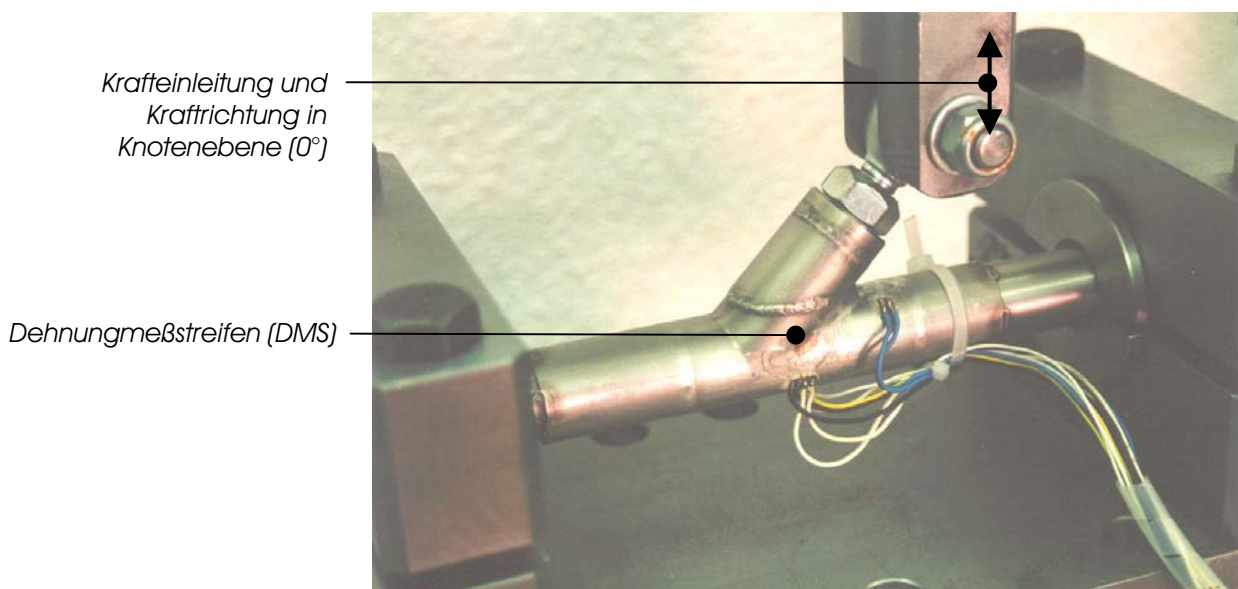
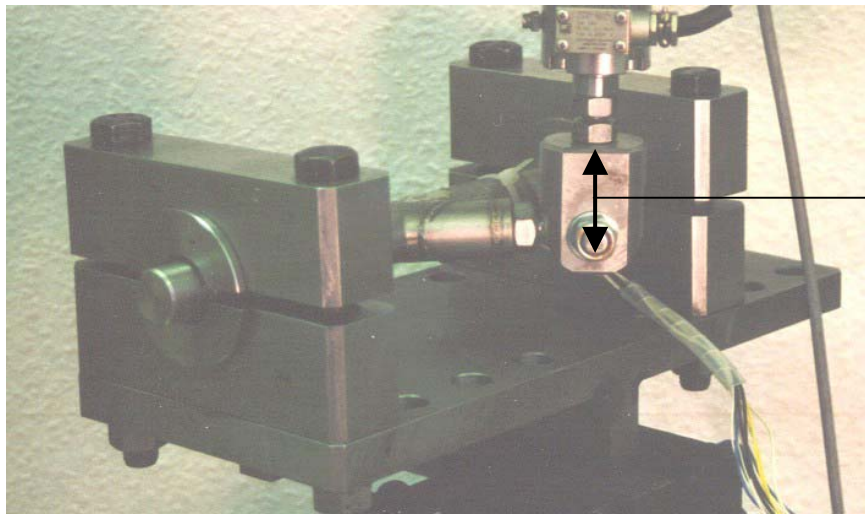


Abb. 4.14 a: Element unter reiner Biegung bei einem Winkel von 0°



Krafteinleitung und
Kraftrichtung senkrecht
zur Knotenebene (90°)

Abb. 4.14 b: Element unter Biege-Torsionsbelastung (90°)

In Abb. 4.15 sind die Ergebnisse (Werte der Dehnungen) für die Prüfung unter 0° und mit Kräften bis 2.750 N dargestellt. Bei diesem Belastungsfall sind beispielsweise die Stellen 1, 3 und 5 am Knotenelement am höchsten beansprucht.

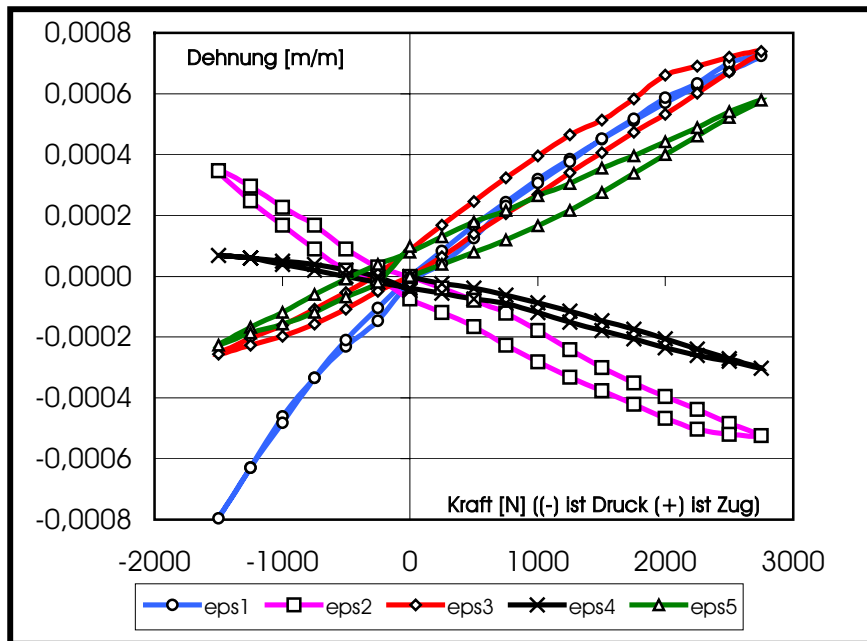
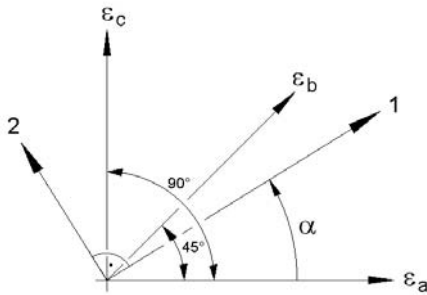


Abb. 4.15: Ergebnisse der Dehnungsmessungen unter 0°

Durch Einsetzen der einzelnen Dehnungswerte in die Formel des Mohr'schen Spannungskreises können die Richtungen der Hauptspannungen im Knoten bestimmt werden.



$$\alpha = \frac{1}{2} \cdot \arctan\left(\frac{2 \cdot \varepsilon_b - \varepsilon_a - \varepsilon_c}{\varepsilon_a - \varepsilon_c}\right)$$

Diese Formel benötigt drei Dehnungswerte (hier ε_a , ε_b und ε_c) in unterschiedlichen Richtungen.

Der Winkel α gibt die Richtung der Hauptspannung 1 an, die Hauptspannung 2 steht senkrecht dazu.

Da in diesem Fall die Dehnungswerte von vier DMS für den Einsatz in der Formel zur Verfügung stehen, können durch Kombinationen der Messgitter 3-5-2, 5-2-4, 2-4-3 und 4-3-5 vier getrennte Rechnungen für das gleiche Ergebnis durchgeführt werden. Dies schafft Sicherheit gegen mögliche Rechenfehler bei den einzelnen Rechnungen.

Der Winkel α_1 beträgt in dieser Versuchsreihe bei der Maximallast von 2.750 N $\alpha_1 = 39,75^\circ$. (Abb. 4.16)

Weiterhin lassen sich unter Berücksichtigung der Querkontraktion ν die zu den Hauptdehnungen gehörenden Beträge der Hauptspannungen bestimmen.

Die Mittelwertbildung der vier einzelnen Kombinationen bei den Messgittern ergeben maximale Spannungswerte von $\sigma_1 = 162 \text{ N/mm}^2$ und $\sigma_2 = -89 \text{ N/mm}^2$.

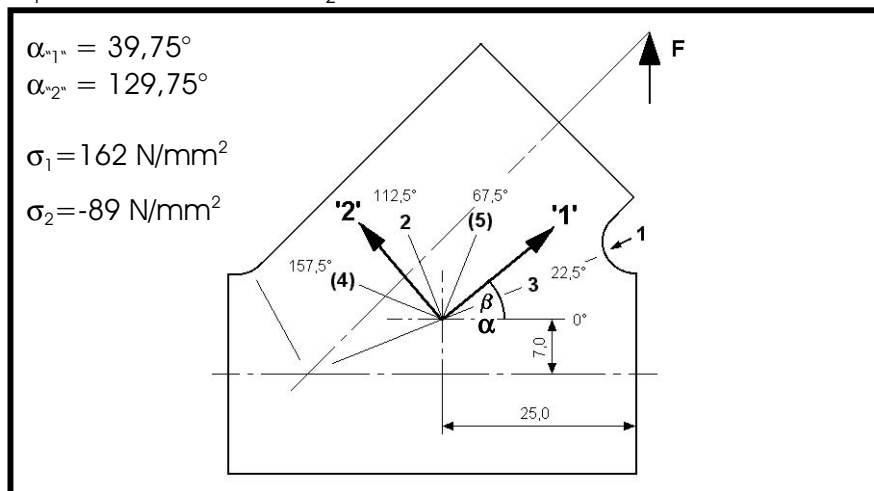


Abb. 4.16: Richtungen der Hauptspannungen '1' und '2' im Element

Die entsprechende Berechnung wurde auch für die Biege-Torsionsbelastung unter 90° durchgeführt.

Die Entwicklung möglichst tragfähiger Verbindungen zwischen Hohlprofilen (auch Rohren) ist ein eigenes Forschungsgebiet an mehreren Universitäten und Forschungseinrichtungen in USA, Europa und Asien [23].

Es gibt inzwischen eine Vielzahl wissenschaftlicher Untersuchungen, die sich mit der Charakterisierung und Erhöhung der Tragfähigkeit geschweisster Verbindungen befassen [23], [32], [33], [45], wobei sogenannte „full strength joints“ angestrebt werden [9, S.4].

„If hollow sections had standardised stiffeners or a stiffened part everywhere where loads have to be transferred, from a structural point of view there would be no problem with the joint strength“ [Wardenier, [9], S.4].

Die beim neuen System verwendeten, gestaltoptimierten Verbindungsknoten können als solche standardisierte „full strength joints“ gelten.

Dies wird durch die im folgenden dargestellte Studie über die Tragfähigkeit konventioneller Rohrverbindungen im Vergleich zu Verbindungen mittels optimierter Hydroform-Elemente für verschiedene Belastungsfälle bestätigt.

Bei den mittels FEM modellierten und berechneten konventionellen Rohrverbindungen werden zwei Rohre in einem bestimmten Winkel zueinander durch Schweißen direkt (ohne Zwischenelement) miteinander verbunden. Die Schweissnaht selbst wird durch eine Abrundung der scharfkantigen Verbindungskontur in Höhe der Wanddicke der Rohre, hier 1,5 mm, modelliert. In einem weiteren Schritt wird mittels FEM die gleiche Verbindung (gleiche Rohre, gleicher Winkel) unter Einsatz eines Hydroform-Elementes modelliert. Beide Verbindungstypen werden in gleicher Weise gelagert und belastet.

Um vorzubeugen, dass die Verbindung mittels Hydroform-Element womöglich nur für einen bestimmten Belastungsfall tragfähiger ist als die direkt geschweisste Verbindung, werden verschiedene Kombinationen von Zug/Druck und

*Vergleich mit
konventionellen
Schweisssverbindungen*

Tragfähigkeitsstudie

Ergebnisse der Studie

Biegebelastungen simuliert. Die Studie umfasst die zwei am häufigsten eingesetzten Verbindungswinkel 45° und 90°. Die Höhen der entstehenden Spannungen an beiden Verbindungsarten sind derart unterschiedlich, dass die dargestellten Spannungsbilder unterschiedliche Farbskalen benötigen. Bei gleichen Farbskalen würden die Spannungsverläufe jeweils eines der beiden Verbindungstypen nicht sichtbar sein, weil die Skalenwerte entweder zu groß oder zu klein gewählt wären. Nicht die Farbverläufe, sondern die Beträge der Spannungen (Werte hinter den Farben) müssen deshalb miteinander verglichen werden. Die Spannungsmaxima σ_{\max} (rote Bereiche) sind jeweils angegeben, alle Verformungen sind mit dem Vergrößerungsfaktor 500:1 dargestellt. Auf der linken Spalte befinden sich die Spannungsbilder der konventionellen Verbindungen, rechts diejenigen der Verbindungen mittels Knotenelemente. Seitlich ist jeweils der zutreffende Belastungsfall mit Angabe der eingeleiteten Kräfte dargestellt.

45°-Verbindungen

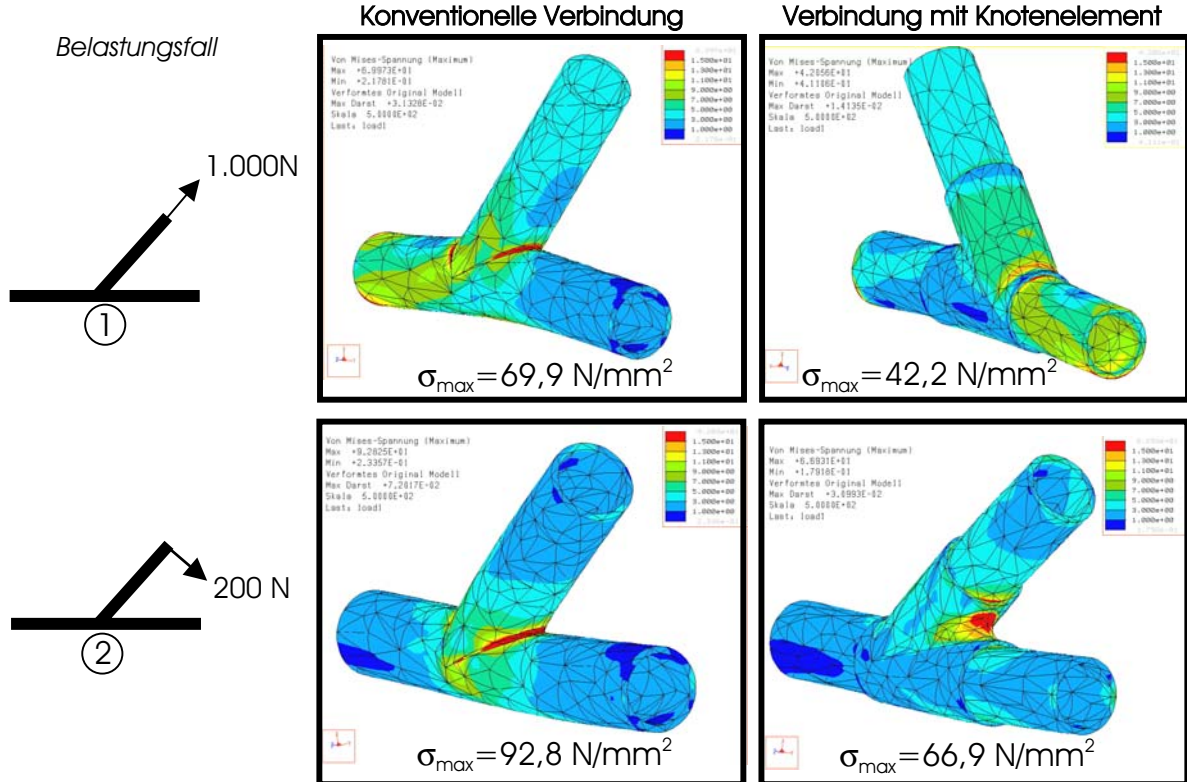


Abb. 4.17 a: Spannungsbilder von 45°-Verbindungen

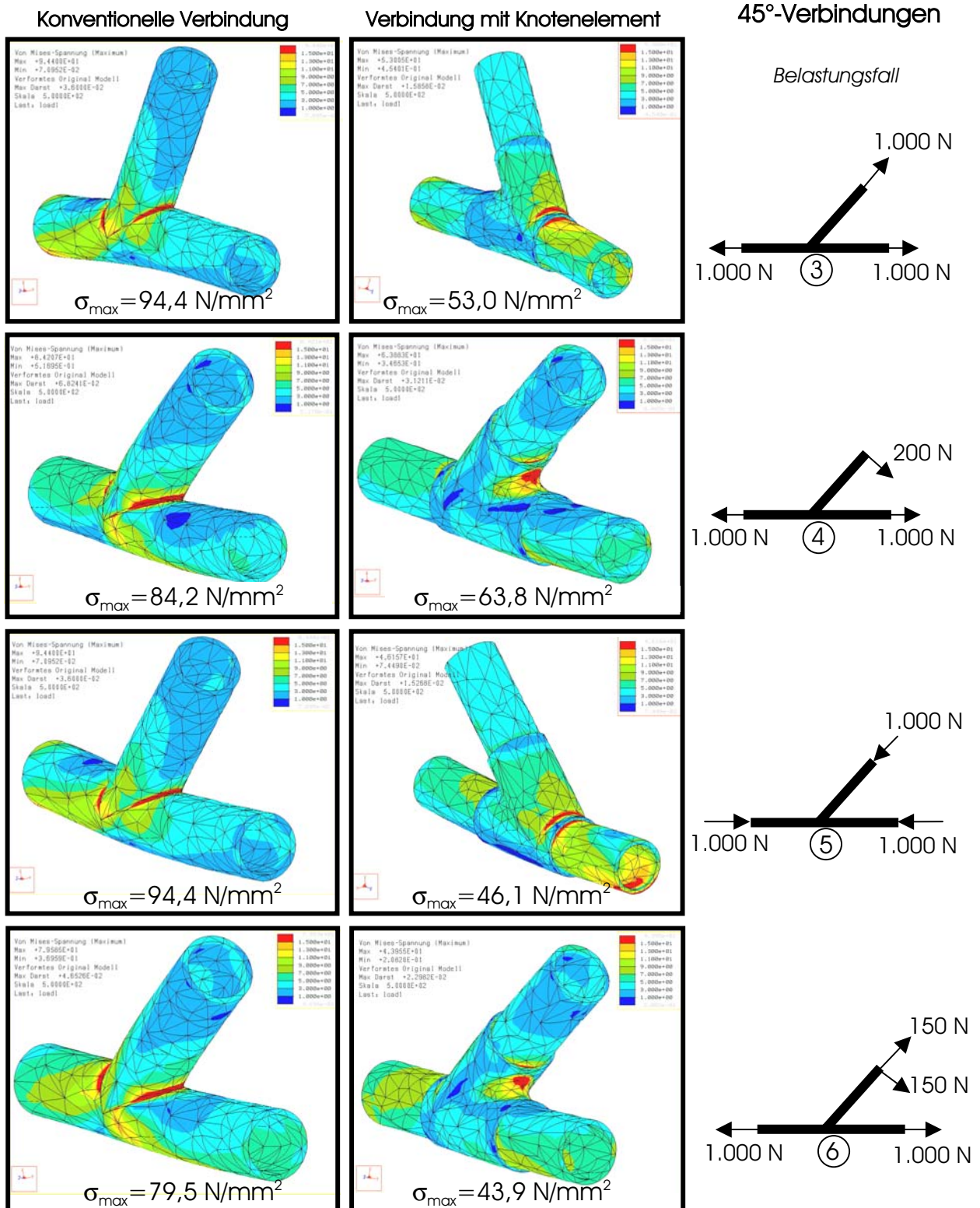


Abb. 4.17 b: Spannungsbilder von 45°-Verbindungen

90°-Verbindungen

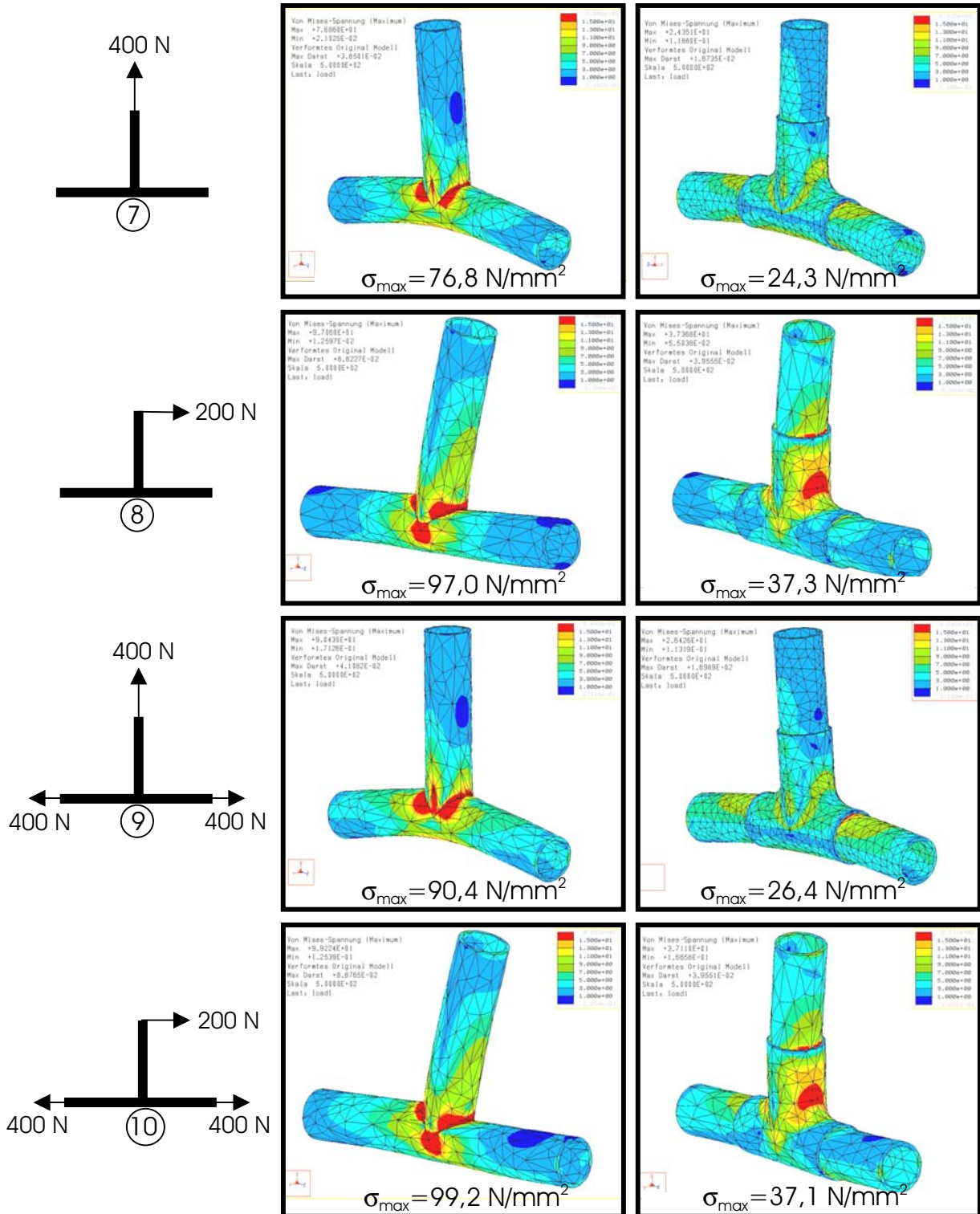


Abb. 4.18 a: Spannungsbilder von 90°-Verbindungen

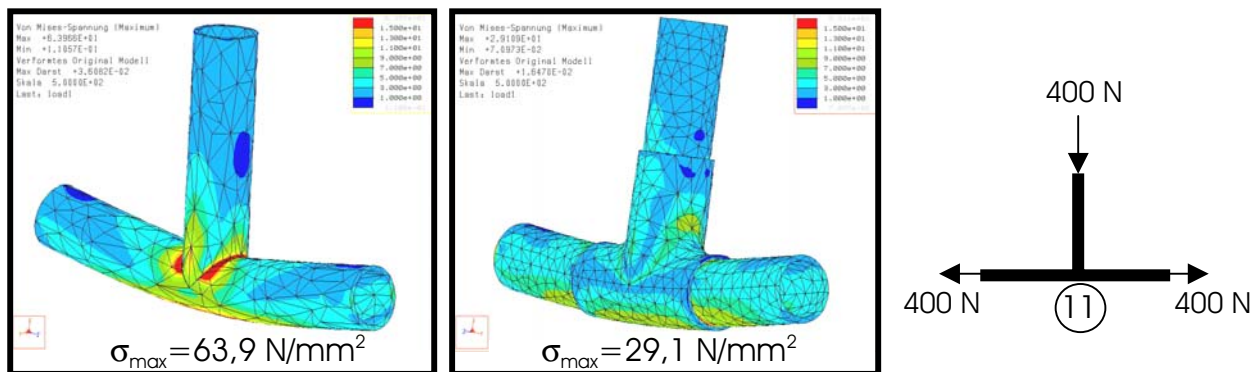


Abb. 4.18 b: Spannungsbilder von 90°-Verbindungen

	Konventionell [N/mm ²]	Mit Element [N/mm ²]	Differenz [%]
1	69,9	42,2	-39,6
2	92,8	66,9	-27,9
3	94,4	53,0	-43,8
4	84,2	63,8	-24,2
5	94,4	46,1	-51,1
6	79,5	43,9	-44,7
7	76,8	24,3	-68,3
8	97,0	37,3	-61,5
9	90,4	26,4	-73,0
10	99,2	37,1	-62,6
11	63,9	29,1	-54,4

Zusammenfassung
der Ergebnisse

45°-Knoten

90°-Knoten

Insgesamt wurden die maximalen Spannungen an den Verbindungen im Schnitt um mehr als die Hälfte (50,05 %) reduziert. Bei den 45°-Knoten betrug diese Reduktion im Schnitt 38,55 %, bei den 90°-Knoten sogar 63,9 %.

Diese Ergebnisse bedeuten eine erhebliche Erhöhung der Tragfähigkeit der Verbindungen und sind damit eine realistische Lösung für die angestrebten „standardised full strength joints“.

Diese Verbindungstechnologie mittels optimierter Hydroform-Elemente und die hier aufgeführte Studie sollten deshalb den auf diesem Gebiet forschenden Kollegen übermittelt werden.

5. Tragwerke in der Architektur

Tragwerke in Natur und Technik

Objekte erfüllen Funktionen in Natur und Technik. Die Funktionen bestehen in der Erfüllung von Aufgabenstellungen unterschiedlichster Art. Zu diesem Zweck werden von Natur und Technik spezifische Objekte mit spezifischen Formen hervorgebracht.

„Die spezifische Funktion (eines Objektes) ist an die spezifische Form gebunden“ [Engel, [4], S. 23].

Die Erhaltung von Form ist somit eine Voraussetzung dafür, dass Objekte ihre Funktionen erfüllen können.

Andererseits unterliegen Objekte verschiedensten Einflüssen, die ihre Form gefährden. Besonders mechanische Einwirkungen wie Eigengewicht oder Nutzlasten belasten das Objekt und gefährden das Bestehen seiner Form. Ein Objekt kann somit nur existieren, wenn es diesen Kräften und Einflüssen standhalten kann.

Das Tragwerk verleiht dem Objekt die Fähigkeit, diese Aufgabe zu erfüllen.

Tragwerke sorgen dafür, dass Objekte in Natur und Technik ihre Formen bewahren können. Ohne Tragwerk hielten Objekte ihrem Eigengewicht nicht stand und wären nicht in der Lage, Nutzlasten aufzunehmen.

Die Funktionsweise eines Tragwerks beruht auf dem Mechanismus des Kräfteflusses. Dieser besteht aus:

1. Lastaufnahme
2. Lastweiterleitung
3. Lastabgabe.

Jeder Körper in Natur und Technik muss, um seine Form zu erhalten, fähig sein, Kräfte aufzunehmen, weiterzuleiten und abzugeben. [4]

Die meisten Körper leiten die Kräfte in den Grund (Boden, Baugrund) weiter.

Beziehung des Tragwerks zum Bauwerk

Die Architektur hat die Aufgabe, in der physischen Umwelt technischen Raum für menschliches Dasein und Wirken zu schaffen und zu deuten [4]. Technischer Raum bedeutet „nicht natürlich“ entstanden, sondern „vom Menschen erschaffen“ und in Form von Bauwerken verwirklicht.

So wie alle materiellen Objekte unterliegt auch das „sozio-technische“ System Bauwerk den bekannten, seine Form gefährdenden Kräften.

Das dem Bauwerk zugrundeliegende Tragwerk, die Gesamtheit aller Teile des Bauwerks, die eine tragende Funktion ausführen [4], sorgt für die Bewahrung der Bauwerkform und des erschaffenen technischen Raumes.

Damit ist beim Bauwerk das Tragwerk „die Summe aller für die Sicherheit des Bauwerks notwendigen tragenden Bauteile“ [5, S. 63].

„Tragwerke sind somit Träger der Architektur“ [12, S.7].

Der technische Raum benötigt zur Erfüllung seiner Funktionen Ausbreitung in vorwiegend horizontaler Richtung, da sich der Großteil der menschlichen Aktivitäten auf horizontaler Ebene abspielt. Mit der horizontalen Ausbreitung des Raumes vergrößert sich jedoch der Konflikt des Bauwerks mit den angreifenden Kräften, besonders mit denjenigen in vertikaler Richtung. Diese erzeugen z.B. Biegemomente, die mit größer werdenden freien Raumabmessungen stark zunehmen.

Mit der Ausdehnung eines Bauwerks in vertikaler Richtung kann der technische Raum mehrmals aufeinander vervielfacht werden. Eine solche Erweiterung, bei der die dritte Dimension zur Verwirklichung von technischem Raum genutzt wird, bildet die Grundlage der urbanen Raumerschließung. Sie vergrößert jedoch wiederum den Konflikt mit horizontal, seitlich angreifenden Kräften, die beispielsweise die Stabilität hoher Bauwerke gefährden. [4]

Zur Beherrschung dieser beiden Konflikte müssen in der Architektur geeignete und fallbezogen optimierte, bauwerkstabilisierende Tragwerke eingesetzt werden.

Der Schritt vom Tragsystem zum Tragwerk besteht in der konkreten Anwendung. Ein Tragwerk ist demnach ein konkretisiertes Tragsystem für einen bestimmten Fall (Bauwerk) unter Berücksichtigung eines Werkstoffs, Entwurfs, Grundrisses.

Gliederung der Tragsysteme Bei Objekten in der materiellen Natur sind 4 eigenständige Mechanismen bekannt, um angreifende Kräfte zu behandeln (Abb. 5.1). Bei technischen Tragwerken kommt zu diesen vier ein fünfter hinzu, der sich auf Höhenkräfte bezieht.

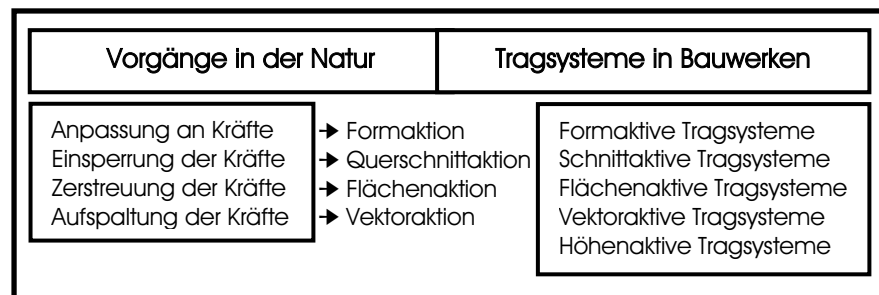


Abb. 5.1: Behandlung von Kräften in der Natur und Analogie zu Tragsystemen in Bauwerken [4, S. 39]

Ein Tragsystem wird durch die zwei Systemvariablen „Kraft“ und „Geometrie“ bestimmt.

Beim Tragwerk selbst kommt die Systemkomponente „Material“ hinzu. [4, S. 34]

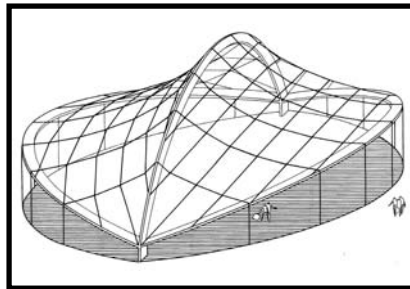
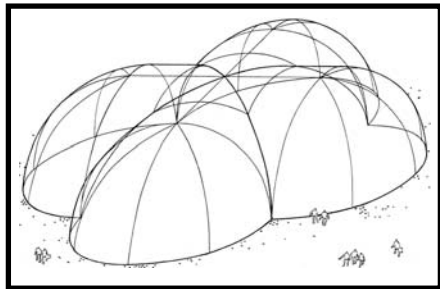
Tragsysteme können nach dem geometrischen Aufbau (linienförmig, flächenförmig) sowie nach Art der Beanspruchung (1. Biegung, Querkraft 2. Normalkraft, Zug, Druck und 3. Biegung + Normalkraft) unterteilt werden [12, S. 18, 29].

Im folgenden sind Beispiele der verschiedenen Tragsysteme dargestellt, die aus [4] Engel, Heino: *Tragsysteme*, 1999 entnommen sind.

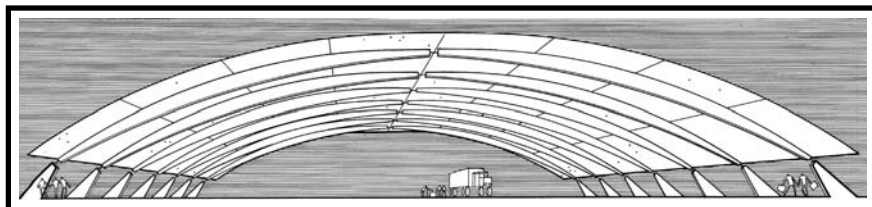
Formaktive Tragsysteme können ihre Form an die äusseren Randbedingungen und angreifenden Kräfte anpassen. Hierzu zählen Zelt-, Seil-, Pneu- und Bogentragwerke.

Die Tragwerks- und die Raumform wird von der Tragmechanik in Abhängigkeit von den äusseren Randbedingungen bestimmt. Im Idealfall entspricht die Strukturform dem „natürlichen“ Kräfteverlauf.

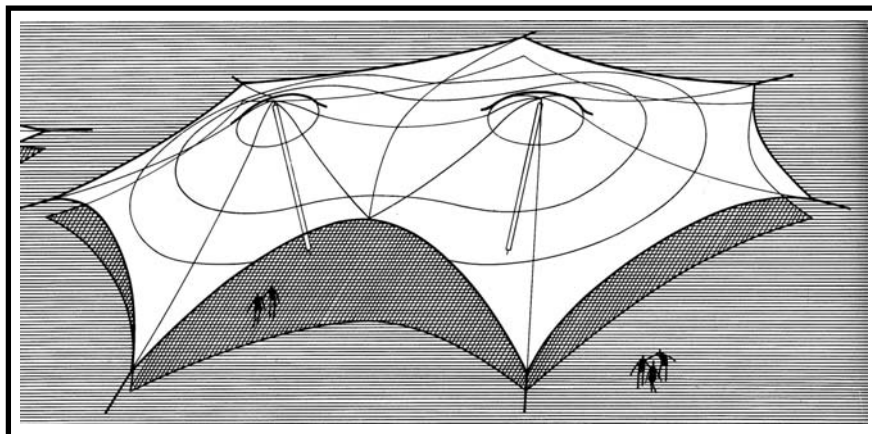
Formaktive Tragsysteme



L: Pnueutragwerk
R: Seiltragwerk



Bogentragwerk



Zelttragwerk

Abb. 5.2: Formaktive Tragwerktypen [4]

Kennzeichen schnittaktiver Tragsysteme ist die Begegnung der äusseren Kräfte mit Masse bzw. mit Querschnittswiderstand.

Die Tragfähigkeit dieser Systeme wird durch Mobilisierung der im Querschnitt vorhandenen Widerstandskräfte realisiert.

Schnittaktive Tragsysteme

Es erfolgt die Aktivierung eines inneren Drehmoments im tragenden Querschnitt, das ein Gleichgewicht zu dem von den äusseren Kräften erzeugten äusseren Drehmomentes bildet. Schnittaktive Tragwerktypen sind Platten-, Balken-, Rahmen-, und Balkenrosttragwerke.

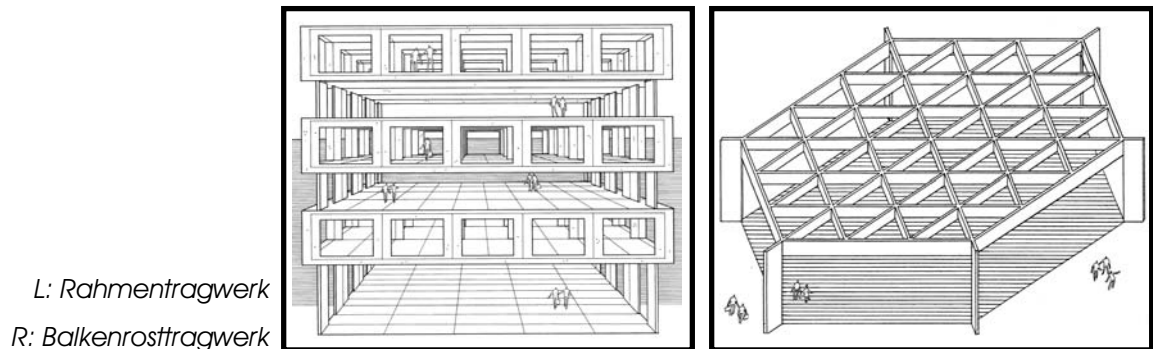
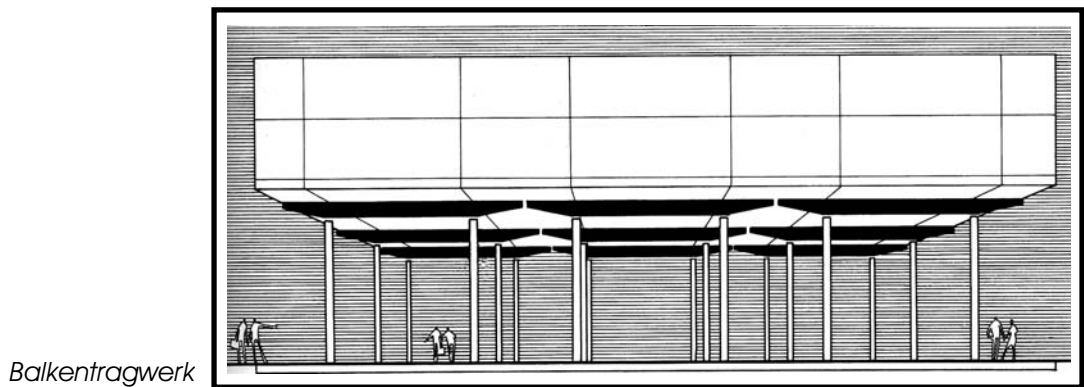
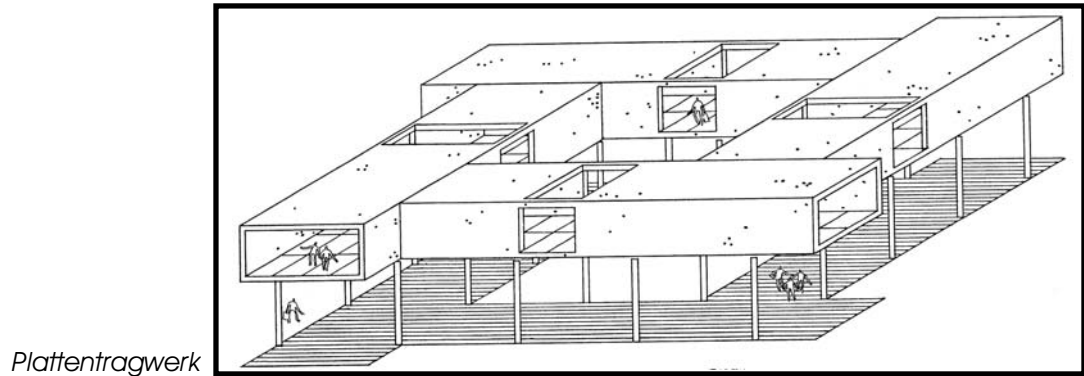
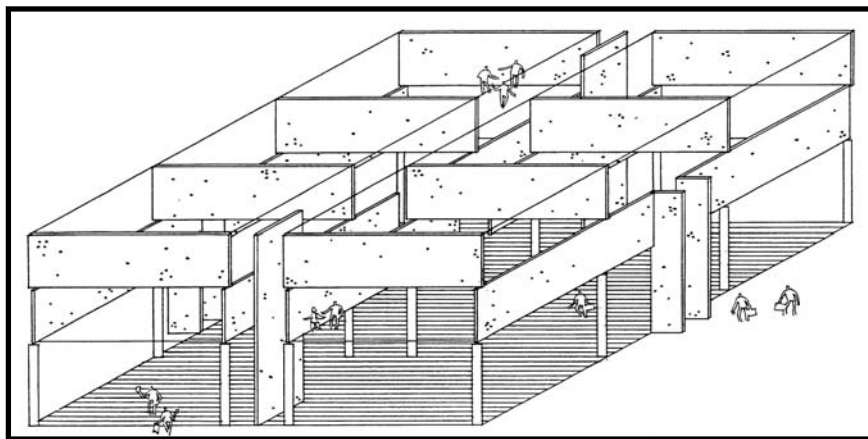


Abb. 5.3: Schnittaktive Tragwerktypen [4]

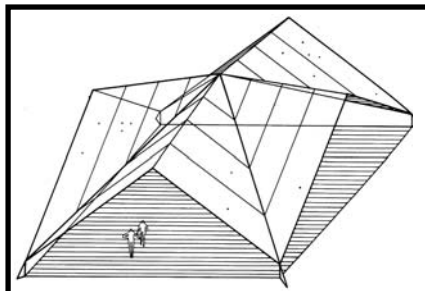
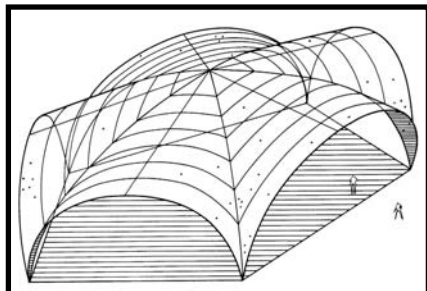
Flächenaktive Tragsysteme Bei flächenaktiven Tragsystemen erfolgt die Kraftumlenkung durch Zerstreung der äusseren Belastungen innerhalb einer kontinuierlichen Flächenausdehnung. Dabei wird der Flächenwiderstand zug-, druck- und scherfester Flächen in

der Flächenebene genutzt. Um die Flächenwiderstandskräfte zu aktivieren, sind eine geeignete Formgebung und Flächenkontinuität erforderlich. Bei entsprechender Formgebung können zudem die formaktiven Tragmechanismen Hängewirkung des Seils und Stützwirkung des Bogens sinnvoll in die Fläche integriert werden.

Flächenaktive Tragwerktypen sind Scheiben-, Falt-, und Schalenträgerwerke.



Scheibentragwerk



L: Schalenträgerwerk

R: Faltwerk

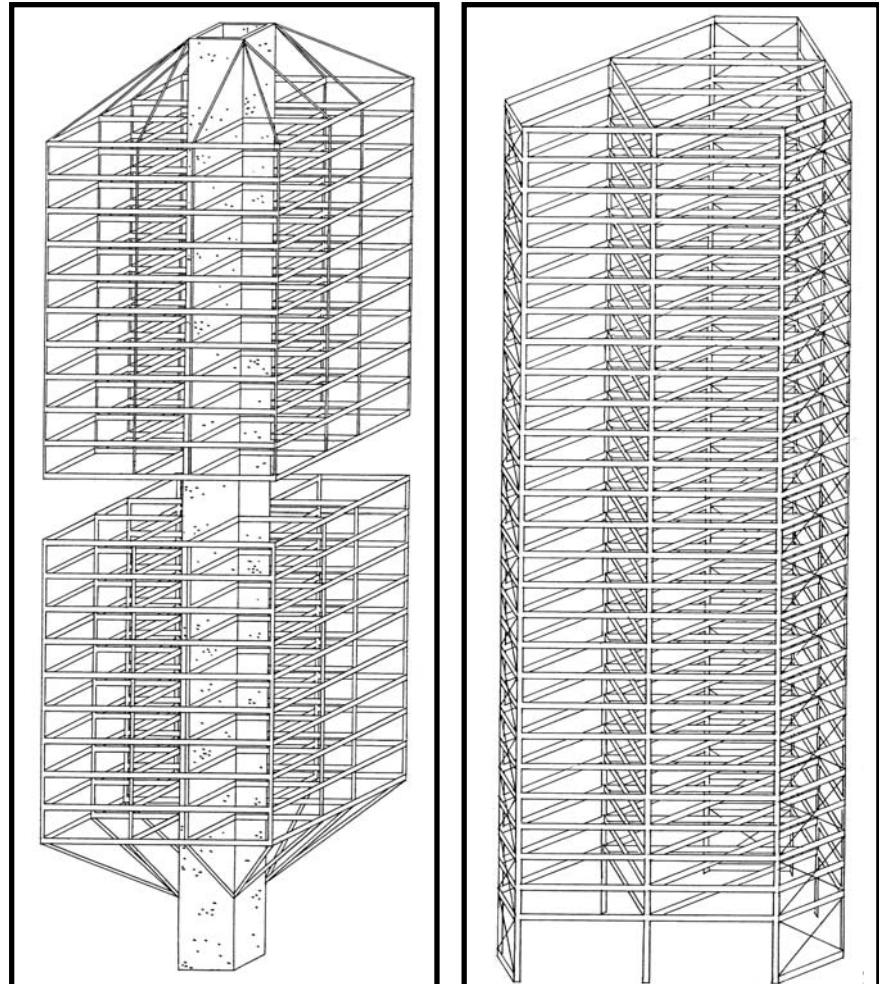
Abb. 5.4: Flächenaktive Tragwerktypen [4]

Höhenaktive Tragsysteme besitzen keinen eigenständigen Mechanismus der Kraftumlenkung und -abtragung. Sie bedienen sich der Mechanismen der vektor-, schnitt-, flächen- und formaktiven Tragsysteme.

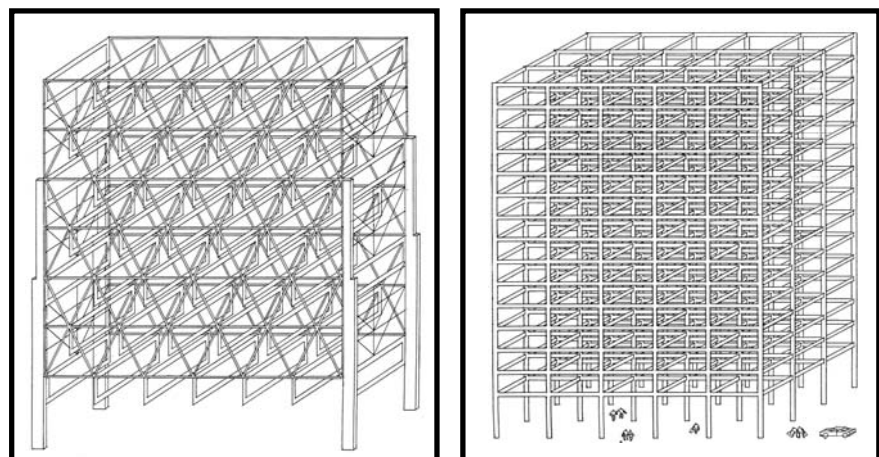
Ihre Sonderstellung beruht auf ihrer besonderen Aufgabe, Lasten, die über die ausgeprägte Höhe des Bauwerks entstehen, sicher zu sammeln und in den Baugrund abzutragen.

Höhenaktive
Tragsysteme

Je nach System der geschossweisen Lastenbündelung und senkrechter Weiterleitung in dem Boden werden vier höhenaktive Tragwerktypen unterschieden: Kern-, Mantel-, Raster-, und Brückenhochwerke.



L: Kernhochwerk
R: Mantelhochwerk



L: Brückenhochwerk
R: Rasterhochwerk

Abb. 5.5: Höhenaktive Tragwerktypen [4]

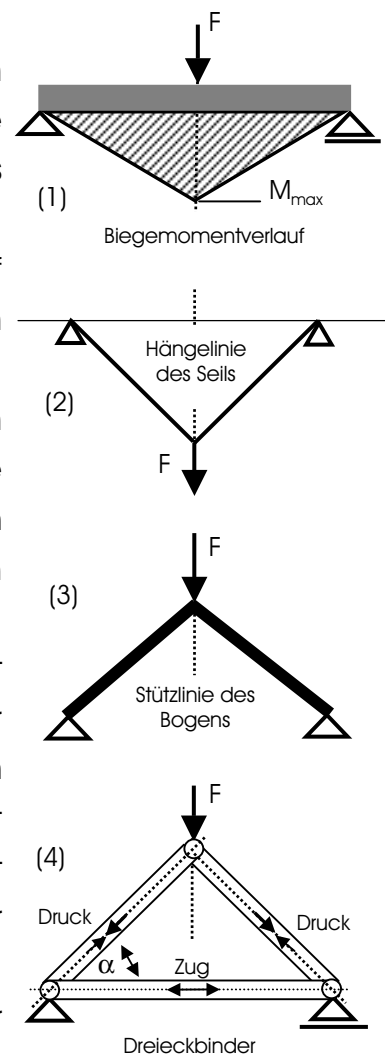
Vektoraktive Tragsysteme bestehen aus meist kurzen Stäben, die in bestimmter Anordnung und idealisiert gelenkig miteinander verbunden, Kräfte aufnehmen und weiterleiten. Durch die jeweilige bestimmte Stabanordnung findet eine Aufspaltung angreifender Kräfte, meist Flächenlasten, in Zug- und Druckkräfte in den Stäben statt. Durch entgegengesetzte Kraftvektoren benachbarter Stäbe oder Auflager werden diese Kräfte im Gleichgewicht gehalten.

Vektoraktive Tragsysteme

Basis dieser Kräftezerlegung ist der Dreiecksverband von Stäben und Knotenverbindungen. Weiterhin besteht die Forderung, dass die Stäbe geradlinig verlaufen und die äusseren Kräfte an den Knotenpunkten angreifen.

Herleitung der Vektorwirkung

Der große Vorteil vektoraktiver Tragsysteme besteht darin, äussere (Biege)Kräfte mittels weniger leichter Elemente in spannungsmechanisch günstigere Zug- und Druckkräfte zerlegen zu können. Dies ist am vektoraktiven Prototyp des Dreieckbinders (4) gut zu erkennen.



Betrachtet man einen Biegebalken, so entspricht der Verlauf des Biegemomentes (1) der Linie eines unter gleichen Bedingungen belasteten Seils (2).

Als formaktives Tragelement passt sich das Seil den herrschenden Belastungen optimal an und bewirkt reine Zugkräfte im Seilquerschnitt. Für den Fall einer einzelnen mittig angreifenden Kraft nimmt das Seil eine Dreiecksform an (2).

Als Umkehrung des Seils nimmt das formaktive Tragelement Stützbogen die ideale Form zur Aufnahme der entsprechenden umgekehrten Kräfte an (3). Hat der Bogen die Form der Stützlinie, so herrschen im Bogenquerschnitt reine Druckkräfte. Bei einer einzelnen Kraft entsteht somit erneut die Form eines Dreiecks, jedoch diesmal mit der Spitze nach oben.

Sowohl das Tragseil als auch der Stützbogen benötigen zur Entfaltung ihrer Formaktivität feste Lager in horizontaler

Richtung. Der Dreiecksbinder löst diese Lagerbedingung durch einen dritten horizontal gelagerten Stab (4).

Ein kennzeichnender Unterschied zum Bogen besteht beim Dreiecksbinder in der gelenkigen Verbindung der drei Stäbe miteinander. Dadurch und durch die Anordnung der beiden oberen Stäbe wie beim Bogen (für diesen Belastungsfall) besteht in den Stäben Biegemomentfreiheit. Die vektorielle Kräftezerlegung erzeugt unter Einbeziehung der wichtigsten Auslegungskriterien die geringsten Stabkräfte bei Winkeln von $\alpha=45^\circ$ bis $\alpha=60^\circ$ zur Krafrichtung.

Ebene Fachwerke Durch Hinzunahme weiterer gelenkig gelagerter Stäbe, die in der Form des Dreieckbinders angeordnet sind, entsteht ein ebener Fachwerkträger.

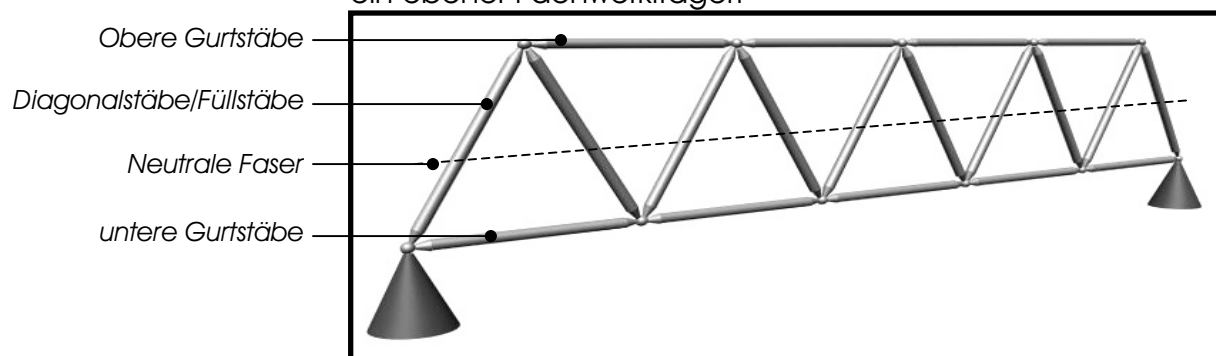


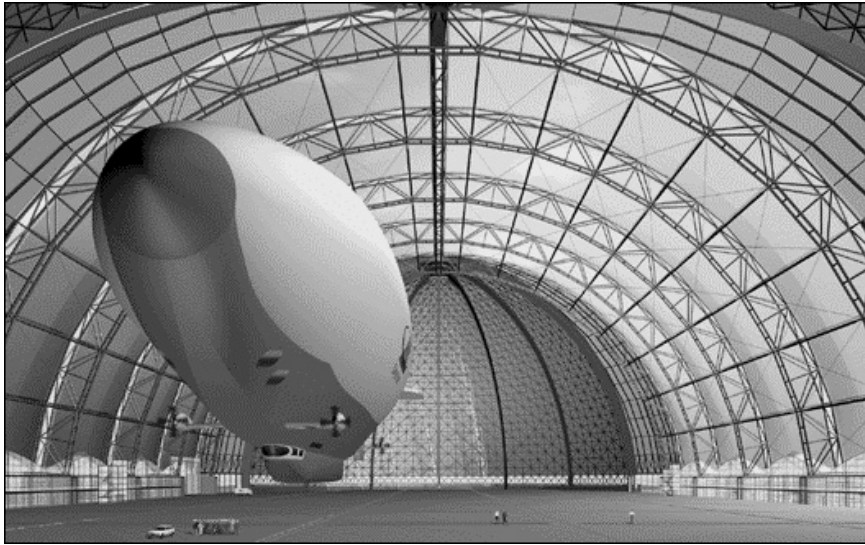
Abb. 5.6: Ebener Fachwerkträger

Fachwerkträger werden zwischen den Lagern vorrangig auf Biegung belastet.

Im Vergleich zu konventionellen Trägern bzw. Balken weisen Fachwerkträger für diese Belastung sehr günstige Eigenschaften auf. Es handelt sich um die strategisch günstige Positionierung und effektive Orientierung (Zug, Druck) von tragendem Querschnitt im Ober- und Untergurt in einem großen Abstand zur neutralen Faser. Auf diese Weise kann mit vergleichsweise geringem Materialeinsatz eine hohe Steifigkeit im Träger realisiert werden. [1]

Fachwerkträger eignen sich deshalb aus Gewichtsgründen besonders zur Überbrückung größerer Spannweiten. Hier

würden schwerere Bauvarianten womöglich zu Eigen-
gewichtsproblemen führen [1].

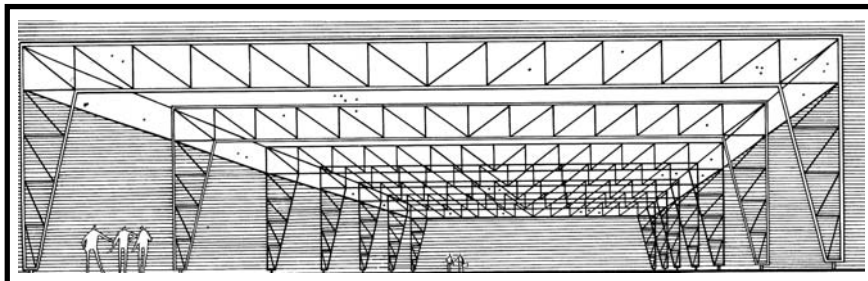


*Luftschiffhalle der Firma
CargoLifter bei Berlin [49]
Fertigstellung: 2000
Arch.: SIAT Architektur + Technik
Tragwerk: Ove Arup and Partners,
London*

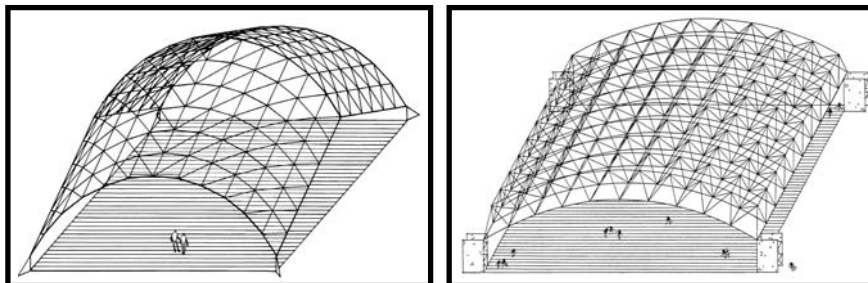
Abb. 5.7: Bogen in Fachwerkbauweise für große Abmessungen [49]

Je nach Aufbau werden vektoraktive Tragsysteme in drei
Gruppen unterteilt:

- Ebene Fachwerke
- Gekrümmte Fachwerke
- Raumfachwerke



Ebenes Fachwerk



*L: Gekrümmtes Fachwerk
R: Raumfachwerk*

Abb. 5.8: Vektoraktive Tragwerktypen [4]

Gekrümmte Fachwerke entstehen durch die Ausbreitung von Stab-Knoten-Anordnungen innerhalb gekrümmter Flächen.

Auch solche Fachwerke benötigen eine Dreiecksanordnung der einzelnen Stäbe zur Erzeugung der Vektorwirkung in der Ebene und in einigen Fällen auch zur eigenen Formstabilisierung (Abb. 5.9).

Die Vektorwirkung besteht hier in der Zerlegung vorwiegend senkrechter Belastungen - z.B. aus dem Eigengewicht oder durch eine Dachlast - in Zug- und Druckkomponenten innerhalb der gekrümmten Fachwerkebene und deren Weiterleitung zu den Lagerpunkten.

Während ebene Fachwerke vorwiegend als Fachwerkträger, -rahmen oder -bögen ausgebildet sind, werden gekrümmte Fachwerke vorzugsweise als flächige (Wand-) oder (Dach)Konstruktionen eingesetzt. Bei beiden Konstruktions-typen sind jedoch oft entscheidend unterschiedliche Lagerungen erforderlich.

Gekrümmte Fachwerke ruhen oft nicht auf einzelnen „punktuellen“ Lagern wie Rahmen oder Bögen, sondern sie sind oft auf mehreren oder sogar allen Randknoten gelagert.

So kann die Hauptbelastung auch entlang durchgehend verlaufender Lastpfade ohne vektorielle Zerlegung (z.B. in sogenannten viereckigen Netzen) direkt in die angeschlossenen Lager abgetragen werden.

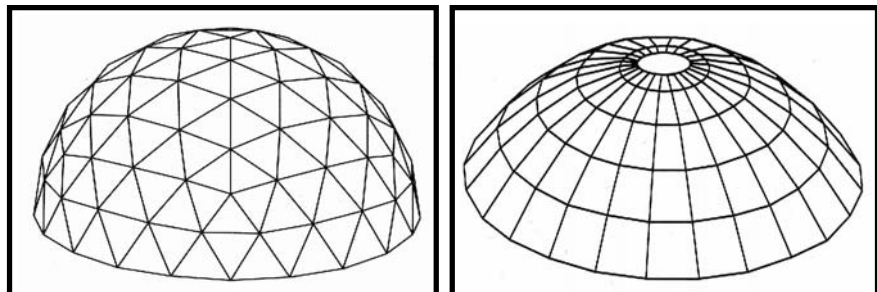


Abb. 5.9: Gekrümmtes Fachwerk und Stab-Knoten-Tragwerk [37]

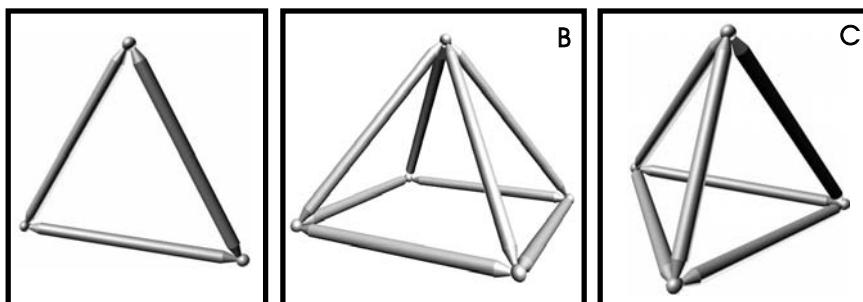
Quer dazu verlaufende Stäbe, die selbst keinen Anschluss zu den Lagern aufweisen, stabilisieren die lastabtragenden Stäbe und halten sie in der gewünschten Position.

Kennzeichen vektoraktiver Fachwerke ist jedoch die Vektorwirkung als Folge der Dreieckanordnung der Stäbe. Aus diesem Grund handelt es sich beim rechten Tragwerk in Abb. 5.9, bei dem dieses Merkmal nicht vorliegt, nicht um ein vektoraktives gekrümmtes Fachwerk, sondern um ein flächenaktives Stab-Knoten-Tragwerk.

Mit einer geeigneten Krümmung können andere Tragmechanismen formaktiver und flächenaktiver Tragwerke, wie z.B. die Membranwirkung oder die Stützwirkung des Bogens, in gekrümmten Fachwerken kombiniert werden. Dies kann zu einer Verringerung der Kräfte in der Fachwerkebene führen.

Raumfachwerke entstehen durch Erweiterung ebener Fachwerke und damit ebener Dreieck-Anordnungen von Stäben in mehrere, meistens zwei Richtungen, bzw. Ebenen. Raumfachwerke sind somit keine ebenen, sondern, wie der Name schon sagt, räumliche Konstruktionen. Die Umlenkung der Belastungen findet nicht innerhalb einer Ebene, sondern innerhalb einer Raumstruktur in zwei oder mehreren Richtungen statt. Dafür muss die benötigte Dreieck-Anordnung der Stäbe auch in mehreren und sich kreuzenden Richtungen vorhanden sein. Diese Bedingung unterscheidet am deutlichsten ebene und räumliche Fachwerke voneinander.

Raumfachwerke



5.10: Ebenes und räumliche Fachwerkelemente (B und C)

Neben Halboktaeder (Abb. 5.10 B) oder Tetraeder (Abb. 5.10 C) gibt es eine Reihe weiterer räumlicher Fachwerkelemente.

Wie bei ebenen Fachwerken können auch bei Raumfachwerken durch Vervielfältigung der Fachwerkelemente, in diesem Fall sind es räumliche Fachwerkelemente, in eine Richtung linienförmige Träger gebildet werden.

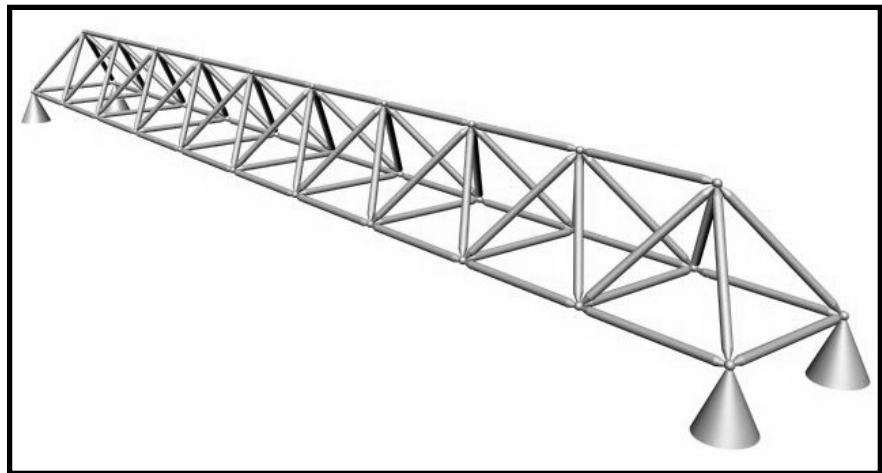


Abb. 5.11: Linienförmiger Raumfachwerkträger



Flughafen Hamburg [47], [68]
 Fertigstellung: 1993
 Arch. gmp von Gerkan, Marg
 + Partner
 Tragwerk: Kockjoy, Schwarz +
 Dr. Weber

Abb. 5.12 a: Kontinuierlich gekrümmter Raumfachwerkträger [47]



*British Airways London Eye [60], [59]
Fertigstellung: 2000
Arch.: Julia Barfield, David Marks
Tragwerk: BPP Technical Services
Ltd, London*



*Waterloo International Terminal
Roof, London [60]
Fertigstellung: 1993
Arch.: Nicholas Grimshaw &
Partners
Tragwerk: Anthony Hunt &
Associates, London*

Abb. 5.12 b: *Kontinuierlich gekrümmte Raumfachwerkträger [60], [59]*

Durch eine Erweiterung der räumlichen Fachwerkelemente in zwei Richtungen entsteht die gewünschte flächige Raumstruktur (Abb. 5.13 und Abb. 5.14).

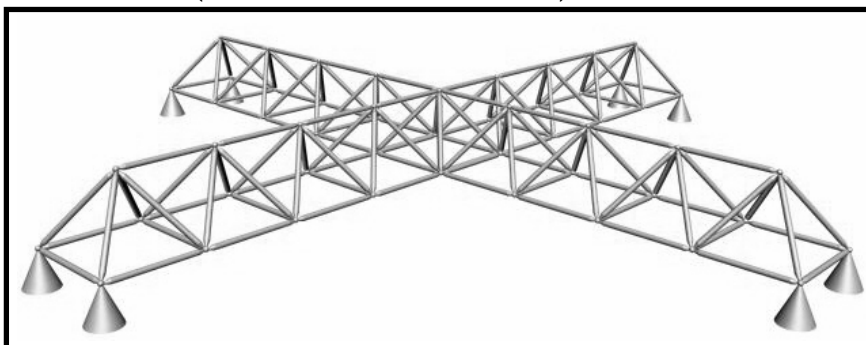


Abb. 5.13: *Erweiterung eines räumlichen Fachwerkelementes in zwei Richtungen*

Die waagerechten Stäbe bilden jeweils die obere und untere Lage des Raumfachwerkes. Dies entspricht der oberen und unteren Gurtung ebener Fachwerke (Abb. 5.13). Bei Raumfachwerken sind mehrere Lagen möglich.

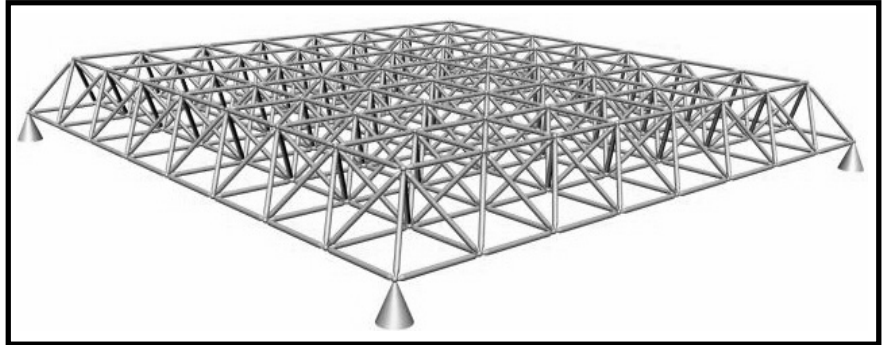


Abb. 5.14: Ebenes zweilagiges Raumfachwerk

Gekrümmte Raumfachwerke entstehen durch gekrümmten Verlauf der oberen und unteren Lagen mit entsprechend angepasster Anordnung der Diagonalstäbe. Die Krümmung kann einfach oder doppelt sein (Abb. 5.8, 7.23).

6. Realisierung von Stab-Tragwerken mit Hydroform-Elementen

Das im folgenden detailliert beschriebene System für die Konstruktion von Stab-Tragwerken mit Hydroform-Elementen basiert auf der für den Roboterarm entwickelte Tragwerksvariante. Es handelt sich hierbei um die Positionierung von Verbindungselementen mit vorzugsweise nur einem Abgang hintereinander auf durchgehenden Längsstäben, wodurch komplexe Elemente mit mehreren Abgängen ersetzt werden können.

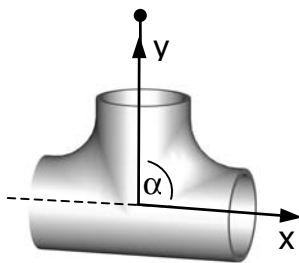
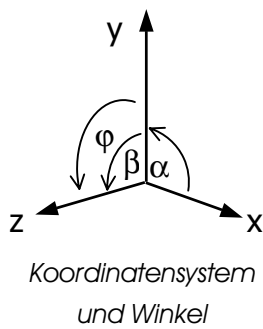
Jeder benötigte neue Elementtyp bedeutet neben einem gesonderten Entwurf und einer besonderen Gestaltoptimierung auch die Fertigung eines eigenen Werkzeugs sowie die Aufstellung eines gesonderten Produktionsprozesses mit den erforderlichen Produktionsstufen.

Mit einer weitgehenden Reduzierung der Anzahl unterschiedlicher Elementtypen durch in großen Mengen herstellbaren „Einheitselementen“ mit (meist) einem Abgang wird ökonomischen Aspekten Rechnung getragen. Bei großen Stückzahlen ist zudem die Fertigung der Elemente mittels Hydroform-Technologie sehr wirtschaftlich.

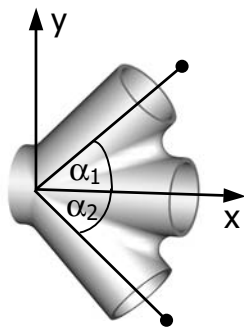
Die Komponenten des hier behandelten Systems sind Stäbe in der Form standardisierter Hohlprofile und Verbindungselemente. Es handelt sich deshalb um ein Stab-Knoten-Tragwerk-System mit dem, je nach Anordnung der Stäbe, auch vektoraktive Tragwerke realisiert werden können.

Stab-Tragwerke stellen räumliche Gebilde mit einer Vielzahl kennzeichnender geometrischer Größen dar. Zur vollständigen und strukturierten Beschreibung des Systems mit eindeutigen Angaben müssen relevante Koordinaten, Winkel und weitere kennzeichnende Größen des Systems, bzw. der Elemente, eingeführt werden.

Allgemeiner Aufbau
Koordinaten
Winkel
Richtungen



T-Element: $\alpha=90^\circ$, $\beta=0$



Doppeltes 45°-Element:
 $\alpha_1=45^\circ$ $\alpha_2=-45^\circ$
 $\beta_1=0^\circ$ $\beta_2=180^\circ$

Das hier betrachtete System ist durch ununterbrochen verlaufende (Haupt)-Lasttragende Stäbe gekennzeichnet. Für alle Verbindungselemente des Systems wird einheitlich die x-Achse als die durchgehende Richtung definiert.

Mit α wird der Winkel zwischen der x-Achse und dem Knotenabgang in der x-y-Ebene und mit β der Winkel zwischen der y-Achse und dem Knotenabgang in der y-z-Ebene bezeichnet. Aus Gründen der Einfachheit wird bei Elementen mit einem Abgang $\beta=0$ gesetzt. Der vorhandene Abgang verläuft dann stets in der x-y-Ebene. Bei einem weiteren Abgang kann β einen Wert von $\neq 0$ annehmen.

Bei allen Stäben wird die Längskoordinate mit x bezeichnet. Die Achsen y und z stehen senkrecht dazu. Damit stimmen die x-Koordinaten der Knotenelemente und diejenige der durchgehenden Stangen überein.

Wegen der Verdrehmöglichkeit der Knotenelemente auf den Stangen sind am System grundsätzlich zwei Arten von Winkeln vorhanden:

- fixe Winkel
- variable Winkel.

Die fixen Winkel treten an den Knotenelementen selbst auf. Es handelt sich um die Winkel α und β der Knotenabgänge. Mit der Fertigung der Knotenelemente liegen deshalb die Winkel α bzw. β fest, sind somit nicht mehr veränderlich.

Der variable Winkel φ bezeichnet die Verdrehung eines Elementes auf einer Stange, also um die x-Achse, d.h. in der y-z-Ebene. Bevor ein Element auf einer Stange fixiert wird, kann man ihm durch einfache Verdrehung auf der runden Stange jeden beliebigen Winkel φ zuweisen. Hierin liegt eine besondere Flexibilität des Systems, die dem entwerfenden Architekten große Freiheiten bei der Gestaltung der Stabanordnung bietet.

Dabei können die immer wieder vorkommenden „Standard-Elemente“ selbst vielfältiger Gestalt sein.

Neben den vorzugsweise verwendeten 45°- und 90°-Knoten sind nahezu beliebige Knotentypen z.B. auch mit unterschiedlichen Querschnitten denkbar. Dies ist anhand eines Katalogs möglicher Verbindungselemente in Abb. 6.1 anschaulich dargestellt.

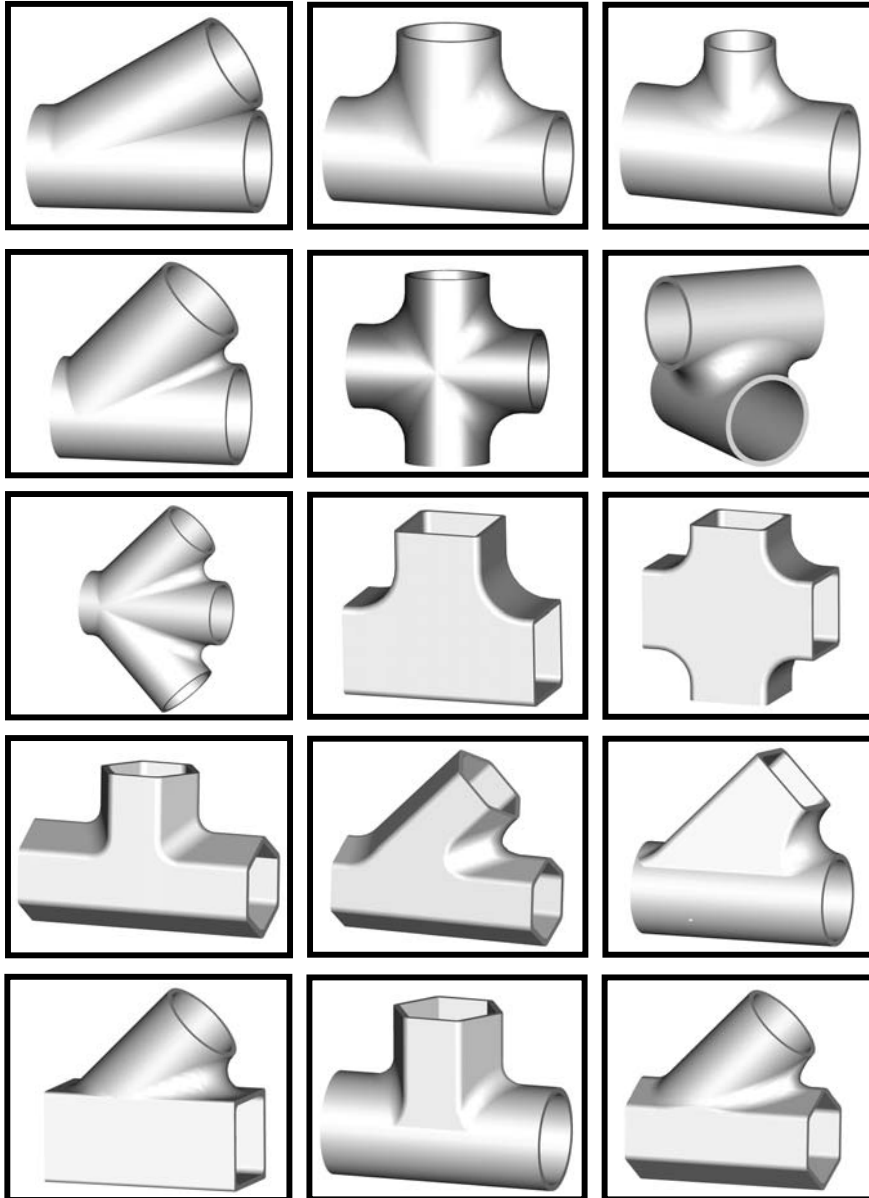


Abb. 6.1: Verbindungselemente-Katalog

Besonders anzumerken ist, dass Elemente mit vier- oder sechseckigen Querschnitten geometrisch begründet eine besondere Sicherheit gegenüber einem Verdrehen aufweisen. Andererseits ergibt sich hieraus aber auch eine

deutliche Einschränkung der Gestaltungsfreiheiten. Eine solche Einschränkung läge auch bei Elementen mit mehreren Abgängen vor. Bei Elementen mit viereckigem Querschnitt auf entsprechend viereckigen Stangen sind nur Winkel φ von 0° , 90° , 180° und 270° möglich. Bei sechseckigen Querschnitten lassen sich dementsprechend nur Winkel von $\varphi=0^\circ$, 60° , 120° , 180° , 240° und 300° realisieren.

Grundsätzlich sind mit diesem System alle vektoraktiven Tragwerktypen realisierbar. Theoretisch könnte man für unterschiedliche Verbindungsstellen auch gesonderte Verbindungselemente realisieren. Dies ist jedoch äusserst unökonomisch und nutzt kaum die Potentiale des Systems. Es gibt deshalb auch bestimmte Tragwerktypen, bei denen der Einsatz des Systems in dieser Form nicht sinnvoll ist. Im Folgenden wird deshalb besonders die Machbarkeit der vier vektoraktiven Tragwerktypen näher betrachtet. Die dabei betrachteten Strukturen sind nicht für konkrete Anwendungsfälle entworfene Tragwerke, sondern lediglich allgemeine Beispiele zur Visualisierung der behandelten Sachverhalte.

Realisierung ebener Fachwerke Bei ebenen Fachwerken sind der Ober- und Untergurt sowie der Aussen- und Innengurt jeweils durch Knotenelemente und Verbindungsstäbe miteinander verbunden (Abb. 6.2).

Die angestrebte stützende Vektorwirkung wird zwischen den jeweiligen Gurten mit zwei im Winkel daran angebrachten Verbindungsstäben (sogenannte Füllstäbe) erreicht.

Für einen rationellen Fachwerksaufbau sollten die Winkel zwischen den Gurten und den Verbindungsstangen möglichst konstant sein. Dies wird jedoch hauptsächlich vom Verlauf der Gurten bestimmt. Unterschiede in ihrem Verlauf haben unterschiedliche Winkel zur Folge und erfordern damit unterschiedliche Verbindungselemente.

Es kann grundsätzlich zwischen drei Typen/Arten im Verlauf von Gurtungen unterschieden werden.

Fall A: Ober- und Untergurt, bzw. Innen- und Aussengurt des ebenen Fachwerkes, weisen einen parallelen Verlauf auf.

Ebene Fachwerke
Fall A

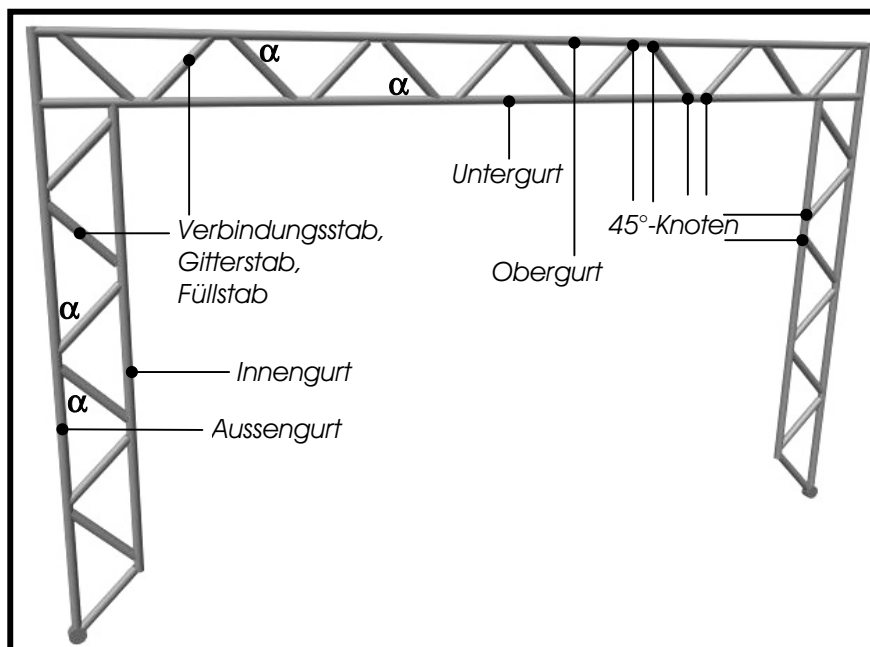


Abb. 6.2: Ebener Fachwerkrahmen mit parallelem Ober- und Untergurt sowie Innen- und Aussengurt.

Sind die Gurtungen parallel, entstehen an den Knotenpunkten mit den Verbindungsstäben gleiche Winkel. Aufgrund dieser günstigen Situation verlaufen die durchgehenden Stangen (x-Koordinaten) in der Ebene des ebenen Fachwerkes, d.h. sie bilden selbst den Ober- und Untergurt bzw. den Aussen- und Innengurt. Damit verlaufen die Knotenelemente, bzw. deren x-Koordinaten, auch in der Fachwerkebene. Zwischen dem Gurt und den Verbindungsstäben liegt nur der Winkel α der Verbindungselemente vor. Der spannungsmechanische Vorteil durchgehender Stangen kann in dieser hauptbelasteten Ebene voll genutzt werden.

Wird ein paralleler, aber gekrümmter Verlauf der Gurtungen angestrebt, so muss im Hinblick auf gleiche Verbindungswinkel die Krümmung der Gurtungen konstant bleiben.

Auch für diesen Fall gilt der bereits beschriebene Aufbau in der Fachwerkebene, jedoch nur bei konstant gekrümmten Gurtungen.

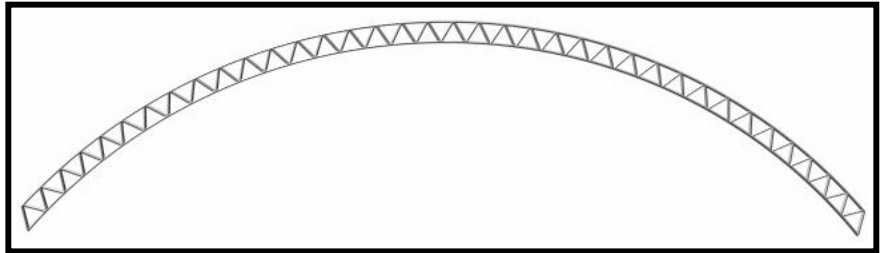


Abb. 6.3: Ebenes Fachwerk (Bogensegment)

Da bei dieser Tragwerksvariante die Verbindungselemente dem gekrümmten Verlauf der durchgehenden Stangen folgen, müssen sie selbst auch gekrümmte x -Achsen aufweisen (Abb. 6.4).

Es werden insgesamt zwei unterschiedliche Elementtypen gebraucht. Bei einem der Elemente zeigt der Abgang in Richtung des Krümmungsmittelpunktes der x -Achse, beim zweiten Elementtyp zeigt der Abgang nach aussen.

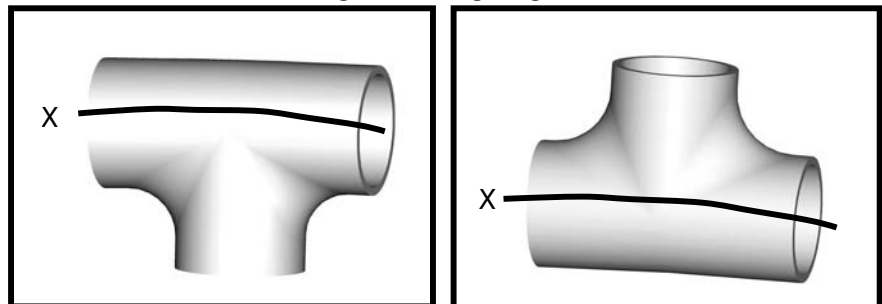


Abb. 6.4: Elemente mit gekrümmten x -Achsen

Ebene Fachwerke Fall B: Ober- und Untergurt, bzw. Innen- und Aussengurt des ebenen Fachwerkes, weisen einen geraden, aber nicht-parallelen Verlauf auf.

Bei geraden aber nicht-parallelen Verläufen der Gurtungen weisen alle Verbindungsstäbe nur zwei unterschiedliche Verbindungswinkel zwischen ihnen auf (Abb. 6.5).

Werden zwei im Winkel ξ stehende Geraden durch zwei weitere Geraden jeweils rechtwinklig verbunden (Abb. 6.5,

Zustände A und B), weisen beide Verbindungsgeraden die gleichen Winkel an den Verbindungen auf.

Auch nach einer Abweichung vom jeweiligen rechten Winkel der Verbindungsgeraden um δ entstehen an den vier Kreuzungspunkten weiterhin nur zwei unterschiedliche Winkel.

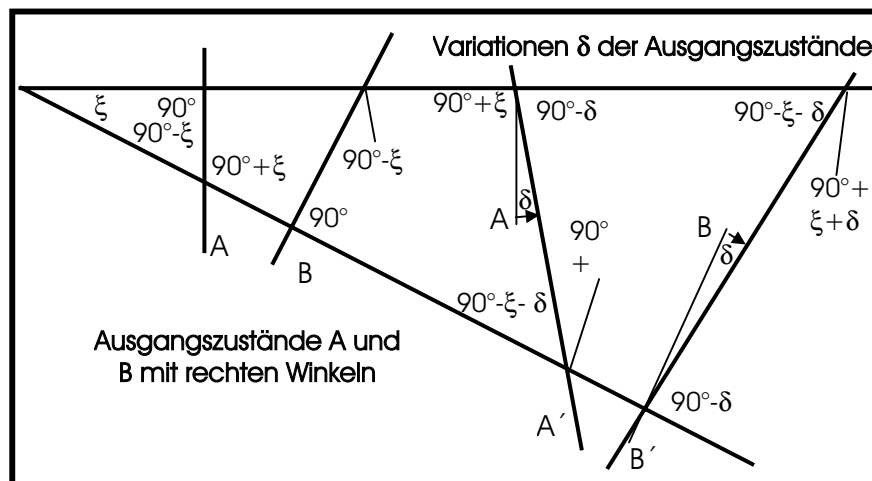


Abb. 6.5: Winkelzustände an sich kreuzenden Geraden

In Abb. 6.5 sind dies die Winkel $90^\circ - \delta$ und $90^\circ - \xi - \delta$, die für die benötigten Verbindungselemente wichtig sind.

Aufgrund dieser günstigen Situation mit wenigen, bzw. nur zwei unterschiedlichen Winkeln, können auch bei dieser Tragwerkvariante die durchgehenden Stäbe in der Ebene verlaufen und selbst die Gurtungen bilden.

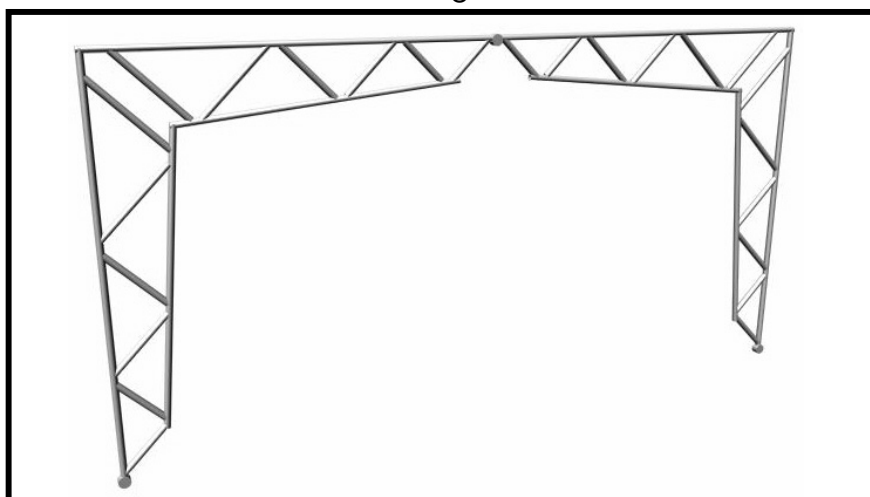


Abb. 6.6: Ebener Fachwerkrahmen (3-Gelenk-Rahmen) mit geraden, jedoch nicht-parallelen Gurtungen

Ebene Fachwerke Fall C: Ober- und Untergurt, bzw. Innen- und Aussengurt des ebenen Fachwerkes, verlaufen beliebig.

Fall C

Wird ein beliebiger Verlauf der Gurtungen selbst und relativ zueinander angestrebt, entsteht eine Vielzahl unterschiedlicher Winkel an den Knotenpunkten in der Fachwerkebene. Mit der in den Punkten 1 und 2 beschriebene Aufbaumethode benötigte man eine Vielzahl Knotenelemente mit unterschiedlichen Winkeln α .

Da allerdings runde Elemente auf runden durchgehenden Stäben drehbar sind und jeden beliebigen Verdrehwinkel β annehmen können, empfiehlt es sich, hier diese Flexibilität zu nutzen.

Bei dieser zweiten Aufbauvariante für ebene Fachwerke erfolgt deshalb die Gestaltung der Gurtungen mit Hilfe von Verbindungsstäben. Die durchgehenden Stäbe werden senkrecht dazu angebracht.

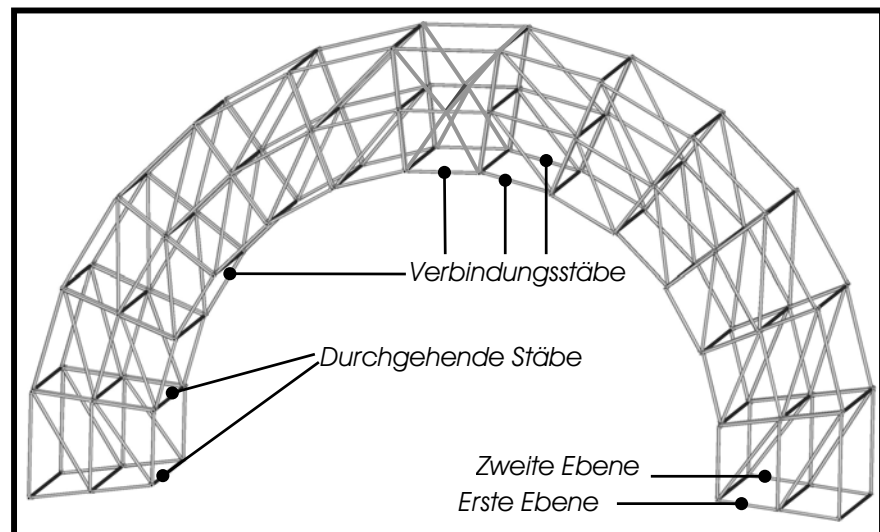
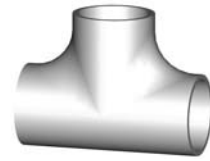


Abb. 6.7: Bogenförmiges ebenes Fachwerk mit 2 Ebenen

Die Knotenelemente, bzw. deren x-Koordinaten, verlaufen nun nicht mehr in der Fachwerkebene, sondern zusammen mit den durchgehenden Stäben senkrecht dazu.

Aus Stabilitätsgründen sind bei dieser Aufbauvariante mindestens zwei Fachwerkebenen notwendig. Diese werden durch die durchgehenden Stäbe miteinander verbunden.

Zur Bildung der einzelnen Ebenen kommen hier als Knotenelemente vorwiegend T-Stücke mit $\alpha=90^\circ$ zum Einsatz. Da der Verdrehwinkel β der Knotenelemente und die Stablängen der Verbindungsstäbe frei wählbar sind, sind nahezu beliebige Stabanordnungen realisierbar. Neben parallelen Verläufen der Gurtungen sind auf diese Weise auch nicht-parallele sowie variabel gekrümmte Verläufe möglich.



T-Stück mit
 $\alpha = 90^\circ$

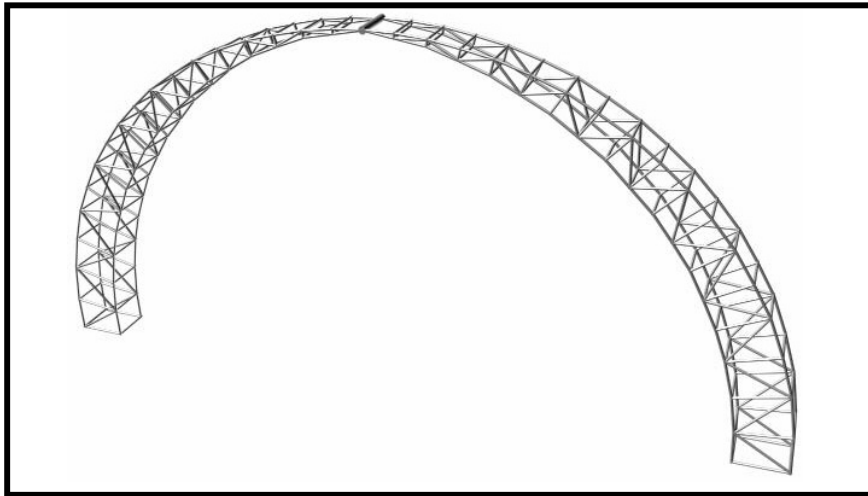


Abb. 6.8: Bogen mit variabel gekrümmtem und nicht-parallelem Verlauf der Gurtungen

Die Länge der durchgehenden Stäbe und die Anzahl der einzelnen Fachwerkebenen sind beliebig und richten sich nach der Größe der angestrebten Gesamtstruktur.

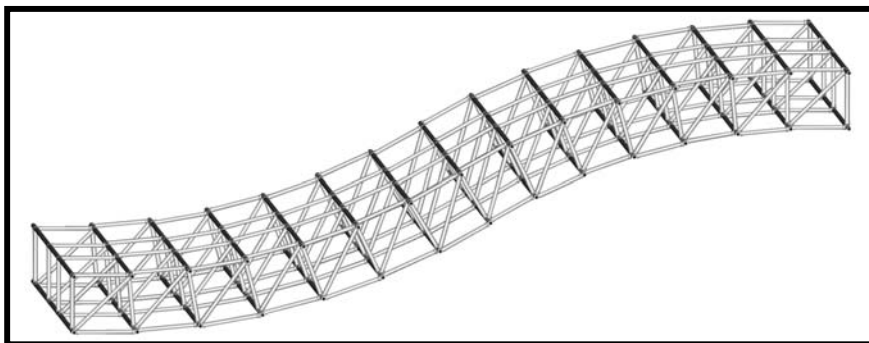


Abb. 6.9: Wellenförmiges Fachwerk mit vier Ebenen hintereinander

Mit einem nicht-parallelen Verlauf der Ober- und Untergute ist beispielsweise eine örtliche Anpassung der Konstruktionshöhe des Fachwerkes an den Biegemomentverlauf über die Spannweite hinweg möglich.

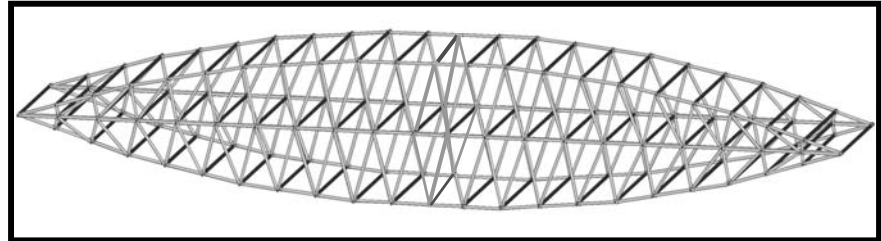


Abb. 6.10: Linsenförmiges Fachwerk mit der größten Fachwerkhöhe in der Strukturmitte

**Modell Messe Hannover,
Halle 4** [47], [66]
Fertigstellung: 1995
Arch.: gmp, von Gerkan,
Marg & Partner
Tragwerk: Schlaich
Bergermann und Partner

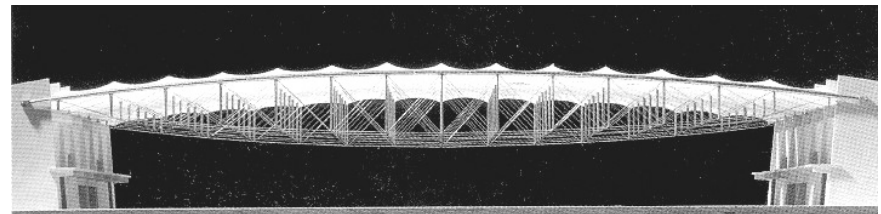


Abb. 6.11: Beispiel eines linsenförmigen Fachwerkes [47]

Die Realisierung flächiger (Dach)Strukturen mit einzelnen Fachwerkebenen kann mit dieser Aufbauvariante auf zwei Weisen erfolgen.

Bei der ersten Möglichkeit werden doppelte Fachwerkebenen mehrmals im Abstand parallel hintereinander angeordnet.

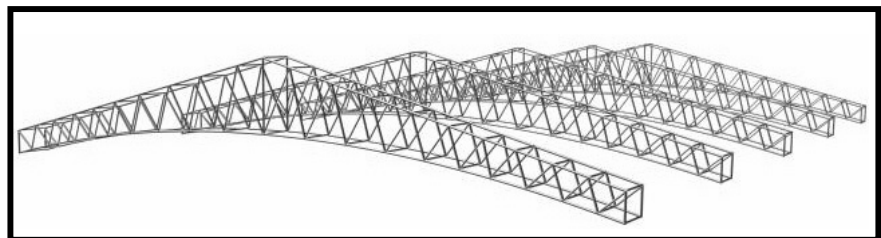


Abb. 6.12: Flächige Dachstruktur bestehend aus paarweise verbundenen Fachwerkebenen

Die zweite Aufbauvariante besteht in der gleichmässigen Aufeinanderfolge der einzelnen Fachwerkebenen entlang der Gesamtlänge des Dachtragwerks in einem konstanten

Abstand zueinander und ihrer Verbindung mittels durchgehender Stangen.

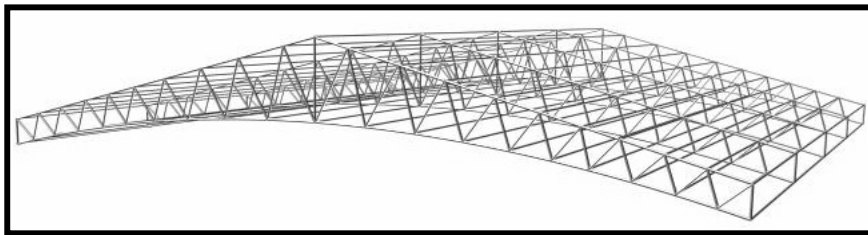
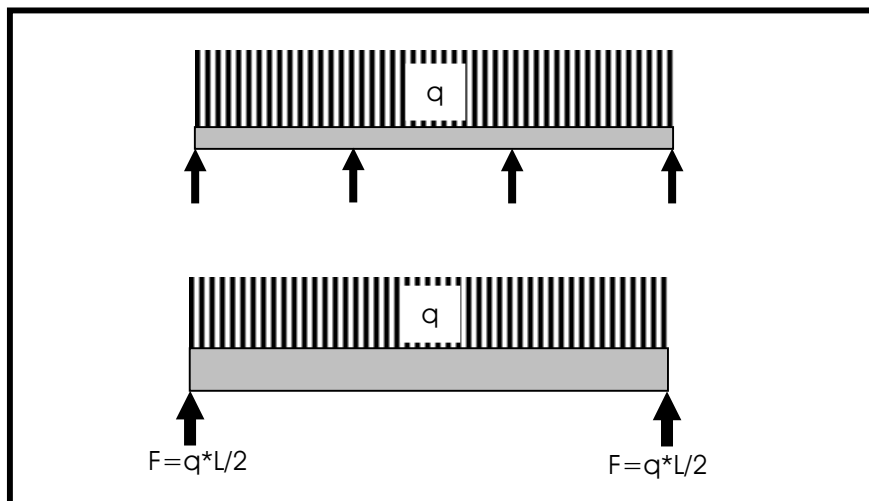


Abb. 6.13: Dachstruktur mit gleichem Abstand zwischen den einzelnen Fachwerkebenen

Im Vergleich zu der ersten kann die zweite Variante allerdings zu einem höheren Strukturgewicht führen. Die langen durchgehenden Stangen haben jedoch nur eine stabilisierende Funktion und werden selbst wenig belastet, wodurch eine geringere Dimensionierung möglich ist.

Der Abstand zwischen den einzelnen Fachwerkebenen ist jedoch für die Dimensionierung des diesen Abstand überspannenden sekundären Tragwerks (das Biegemoment M_b ist proportional L^2) von Bedeutung.

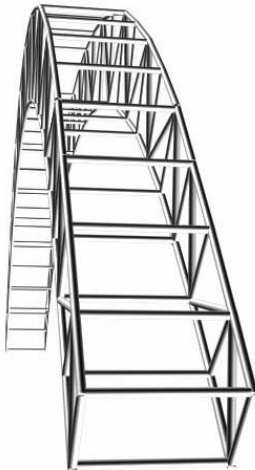


**Realisierung
gekrümmter
Fachwerke**

Wie bereits in Kapitel 5 bei der Unterscheidung vektoraktiver Tragwerktypen dargestellt werden mit der Bezeichnung „gekrümmte Fachwerke“ keine ebenen Fachwerken mit gekrümmt verlaufenden Gurtungen bezeichnet, sondern Fachwerke bestehend aus gekrümmten Flächen.

In ebenen Fachwerken sind die Ebenen, in denen die Last aufgenommen und an den Baugrund abgegeben wird, immer gerade (eben) und oft senkrecht. Zwischen ihnen befinden sich keine weiteren Diagonalstäbe (Abb. 6.14).

Die einzelnen mit Diagonalstäben besetzten tragenden Ebenen werden lediglich miteinander verbunden.



Seitenansicht von Abb. 6.14:
Zwei senkrechte Ebenen zur
Lastübertragung

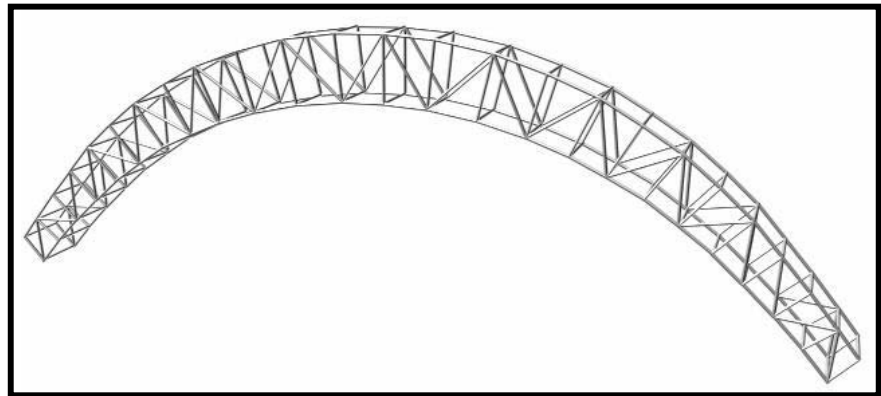


Abb. 6.14: Ebenes Fachwerk mit gekrümmten Gurtungen

In gekrümmten „flächigen“ Tragwerken findet die Lastweitergabe an die Lager innerhalb gekrümmter, nicht ebener Flächen.



Freizeitbad Neckarsulm [66]
Fertigstellung: 1989
Arch.: Kohlmeier Bechler
Architekten
Tragwerk: Schlaich
Bergermann und Partner

Abb. 6.15: Gekrümmtes Tragwerk mit Vierecknetz [66]

Diese gekrümmten Flächen können mit dreieckigen oder viereckigen Netzen gebildet werden.

Lediglich bei Dreiecknetzen können die Verbindungen der Stäbe gelenkig sein und der klassischen Fachwerklehre entsprechen, bei allen anderen Netzen müssen die Verbindungen biegefest sein.

Da beim hier vorgestellten Tragwerk-System biege feste Verbindungen vorhanden sind, können in Bezug auf ihre Realisierbarkeit beide Netztypen zusammen behandelt werden.

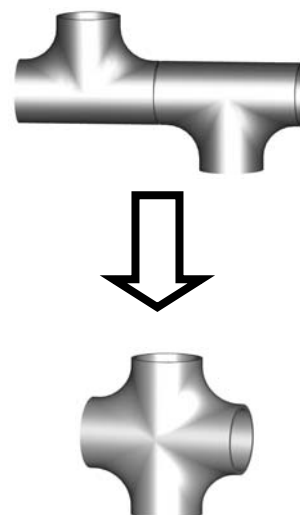
Die grundlegende Aufbauphilosophie beim hier behandelten System ist es, vielfältige Stab-Tragwerke mit wenigen unterschiedlichen „einfachen“ Einzelementen zu realisieren.

Sollten jedoch die Verbindungsstellen eines Tragwerks weitestgehend die gleiche Geometrie aufweisen (z.B. Stabanzahl und -winkel), können eventuell von vorn herein entsprechend spezielle Verbindungselemente gefertigt werden.

Ein einzelnes Element mit mehreren Abgängen kann so möglicherweise mehrere hintereinander folgende Elemente mit jeweils einem Abgang ersetzen. Ein solches Element wäre beispielsweise ein Kreuz anstatt von zwei 90°-T-Stücken, wie es bereits im Roboterarm erfolgreich eingesetzt wurde.

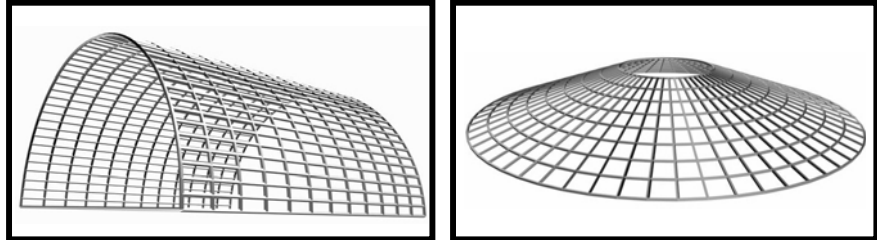
Bei viereckigen Netzen mit stets gleichen Verbindungspunkten würden demnach Kreuzelemente benötigt, bei dreieckigen Netzen kämen sternförmige Elemente mit drei Anschlüssen in Betracht.

Entscheidend für die Substitution einfacher Elemente durch zusammengesetzte Elemente ist jedoch eindeutig die Anzahl der benötigten unterschiedlichen Elementtypen. Hierfür ist wiederum die Krümmung der zu realisierenden Fläche massgeblich.



Gekrümmte Flächen können eingeteilt werden in einfach oder doppelt gekrümmt, in konstant oder variabel gekrümmt sowie in einsinnig oder gegensinnig gekrümmt.

L: Zylinderabschnitt, einfach, einsinnig, konstant gekrümmt
R: Kegel, einfach, einsinnig, veränderlich gekrümmt



L: Halbkugel, doppelt, einsinnig, konstant gekrümmt
R: Doppelt, veränderlich gegensinnig gekrümmt [4]

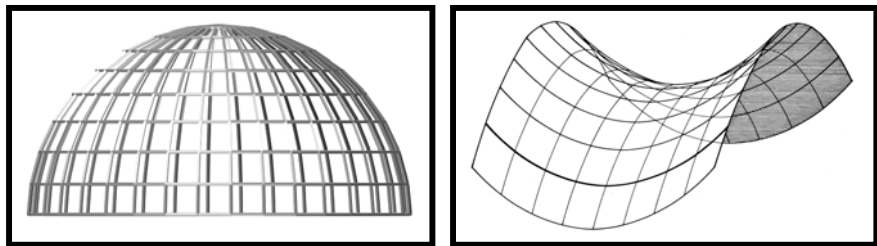


Abb. 6.16: Unterschiede bei gekrümmten Flächen

Krümmungen können bei Hohlprofil-Strukturen mit gebogenen Stangen oder näherungsweise mit aufeinander folgenden geraden Abschnitten (Sekanten) und winkligen Verbindungselementen verwirklicht werden.

EDEN-Projekt (Gewächshaus) In Cornwall, England [36], [58], [67]
Fertigstellung: 2001
Arch.: Nicholas Grimshaw & Partners
Tragwerk: Anthony Hunt & Associates, London

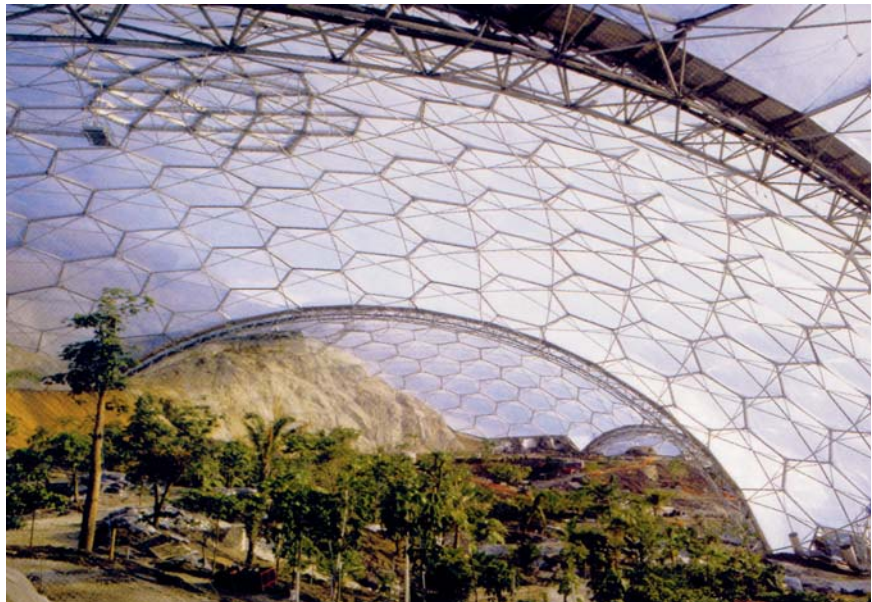


Abb. 6.17: Gekrümmtes Tragwerk mit sechsseitigen Elementen [36]

Damit gekrümmte Fachwerke möglichst gleiche Verbindungsstellen aufweisen, müssen diese möglichst konstant gekrümmt sein.

Bei einfachen Krümmungen (Zylinder, Kegel) können sogar alle Verbindungen gleich sein.

Auch doppelt gekrümmte Strukturen, wie Kugeln oder Kugelabschnitte, können mit dem System realisiert werden, wenn sie möglichst gleiche Verbindungspunkte aufweisen, wie im Fall des Gewächshauses in Abbildung 6.17.



*Great Court im British Museum, London [55], [56]
Fertigstellung: 2000
Arch.: Foster and Partners
Tragwerk: Buro Happold Consulting Engineers, Großbritannien*

Abb. 6.18: Unregelmäßig gekrümmtes Dachtragwerk mit 4878 unterschiedlichen Stäben und 1566 unterschiedlichen Knoten [55], [56]

Bei flachen, ebenen Netzen mit gleichen Verbindungen können auch bei konstanten, leichten Krümmungen in zwei Richtungen weiterhin gleiche Verbindungen vorliegen (Abb. 6.19).

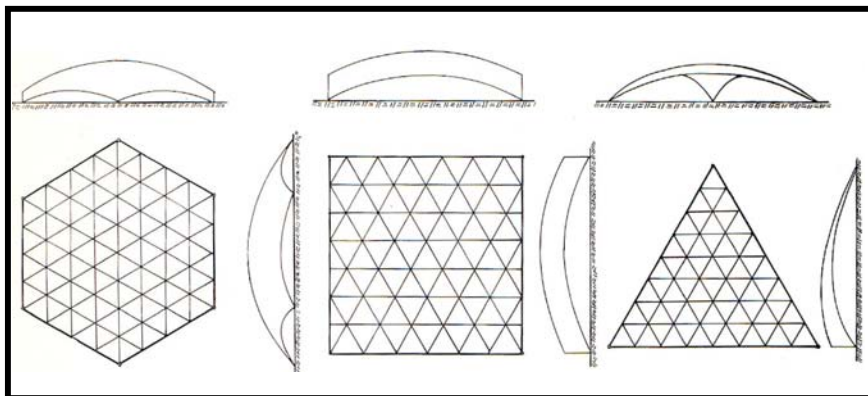


Abb. 6.19 a: Konstant gekrümmte Netze [22]

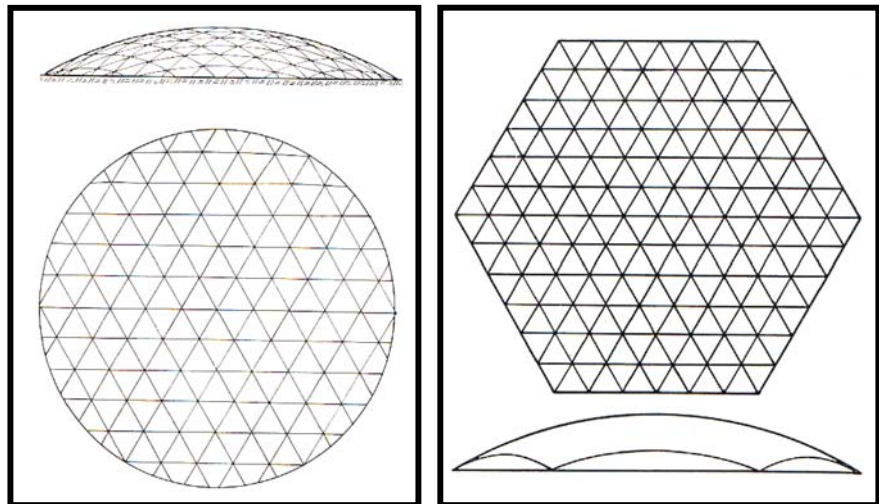


Abb. 6.19 b: Konstant gekrümmte Netze [22]

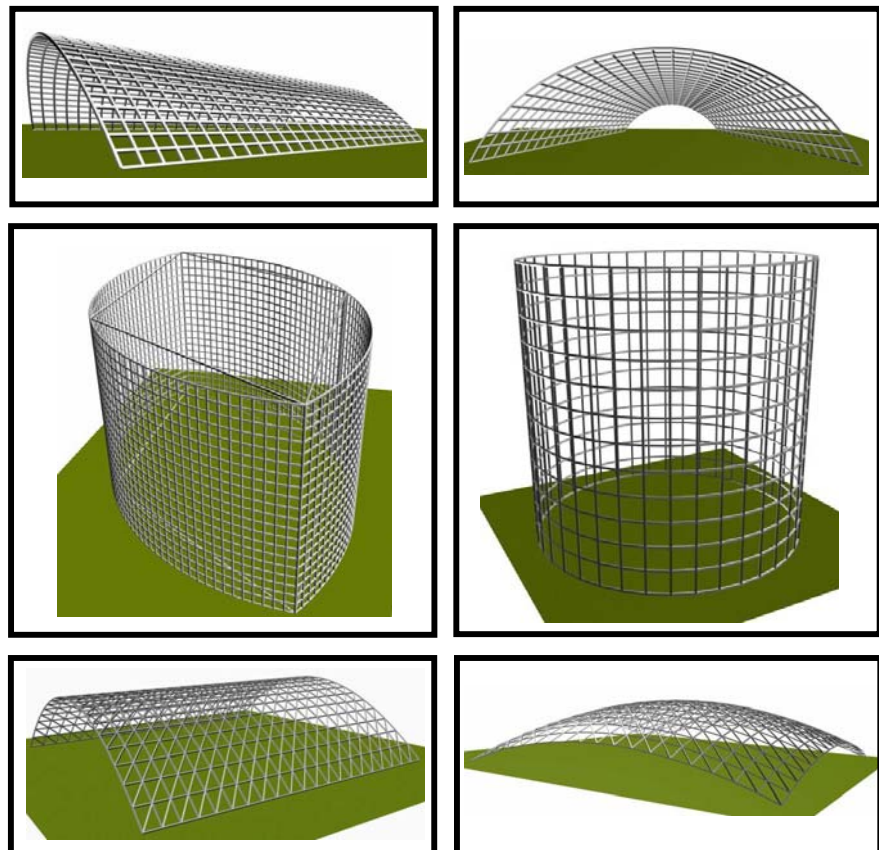


Abb. 6.20: Beispiele mit dem vorgestellten System realisierbarer gekrümmter Tragwerke mit drei- und viereckigen Netzen

Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte System eignet sich auch vorzüglich zum Aufbau von faltwerken. Eine Faltung wird mit einer winkligen Verbindung einzelner Fachwerkebenen verwirklicht.

*Realisierung
gefalteter
Fachwerke*

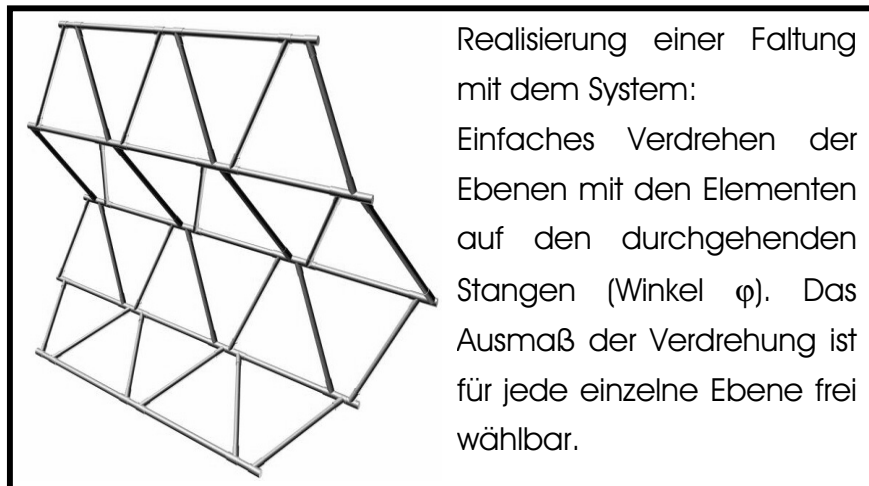


Abb. 6.21: Beliebige verdrehte Anordnung einzelner Fachwerkebenen

Da Raumfachwerke, anders als ebene Fachwerke, in mindestens zwei Richtungen die kraftaufspaltende Dreieckanordnungen der Stäbe aufweisen, können sie auch in zwei Richtungen frei tragende Spannweiten haben. Aufgrund dieser Tragfähigkeit in zwei Richtungen werden ebene Raumfachwerke gern bei flachen, weit gespannten Bauwerken, wie beispielsweise Lager- oder Messehallen eingesetzt (Abb. 6.22).

*Realisierung von
Raumfachwerken*

Im Hinblick auf die Machbarkeit von Raumfachwerken mit dem hier vorgestellten System muss zwischen gekrümmten und ebenen (d.h. nicht gekrümmten) Raumfachwerken unterschieden werden.

Ebene Raumfachwerke können mit diesem System mit 45°- und 90°-Knotenelementen (T-Stücken) aufgebaut werden.

Messe Hannover, Halle 13 [41]
 Fertigstellung: 1997
 Arch.: Ackermann + Partner
 Tragwerk: Schlaich Bergermann
 und Partner



Abb. 6.22: Weit gespanntes, ebenes Raumfachwerk [41]

Mit den 45°-Knotenlementen werden die Raumdiagonalen gebildet, indem sie auf den durchgehenden Stangen um z.B. $\beta = \pm 25^\circ$ verdreht und paarweise spiegelverkehrt hintereinander positioniert werden (Abb. 6.23). Die 90°-Knotenelemente (T-Stücke) bilden die obere und die untere Fachwerklage.

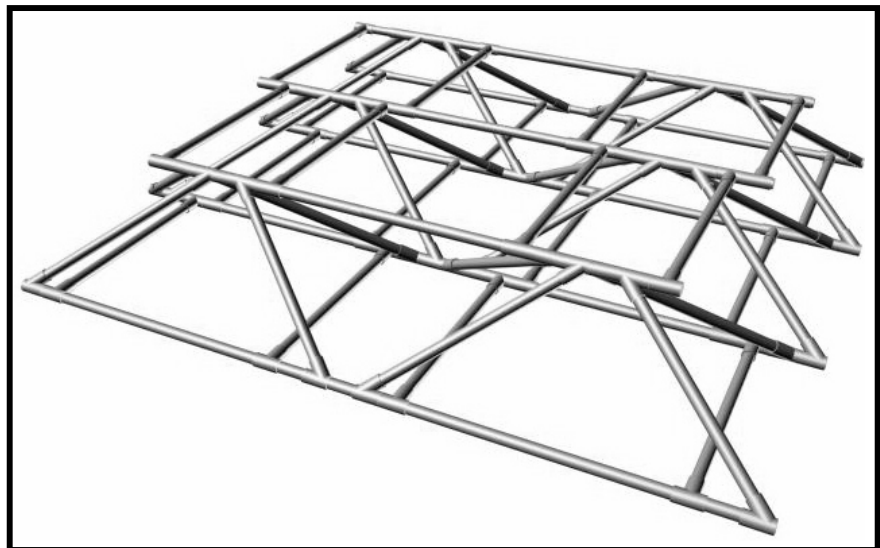


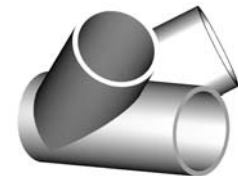
Abb. 6.23: Mit dem System aufgebautes ebenes Raumfachwerk

Aufgrund der größeren Anzahl Stäbe und der damit erforderlich werdenden größeren Anzahl hintereinander

positionierter Knotenelemente entsteht auch ein deutlich größerer Versatz zwischen den einzelnen Lastpfaden als es bei ebenen Fachwerken der Fall ist. Dieser Versatz führt zu Biegekräften an den Stäben und den Elementen. Versatz der Systemlinien ist zwar ein Kennzeichen des Systems. Dieser erstreckt sich bei ebenen Fachwerken jedoch meist nur über 2 bis 3 Elementlängen. Hier beträgt der Versatz jedoch bis zu 5 Elementlängen.

Auf der anderen Seite ist die Stabkonstellation (Anzahl und Winkel der Stäbe) im inneren eines ebenen Raumfachwerkes immer die gleiche. Eine große Flexibilität des Systems ist an dieser Stelle demnach nicht gefordert. Eine deutlicher Rationalisierungseffekt könnte deshalb durch den Einsatz von Elementen, in denen zwei Einzelelemente zusammengefasst sind, erreicht werden. Eines dieser Elemente bestünde dann aus zwei um $\beta=60^\circ$ verdrehte 45° -Abgänge. Ein zweites Element wäre der bereits bekannte 90° -Kreuzknoten.

Diese angegebenen Größen der Winkel α_1 α_2 β_2 sind lediglich Beispiele. Sie sind jedoch wichtig im Hinblick auf eine günstige vektorielle Aufspaltung der Lasten, wenn man die zulässigen Stabkräfte betrachtet (optimal sind Winkel zwischen 45° und 60°).



$$\alpha_1=45^\circ \quad \beta_1=0^\circ$$

$$\alpha_2=45^\circ \quad \beta_2=60^\circ$$



$$\alpha_1=90^\circ \quad \beta_1=0^\circ$$

$$\alpha_2=90^\circ \quad \beta_2=180^\circ$$

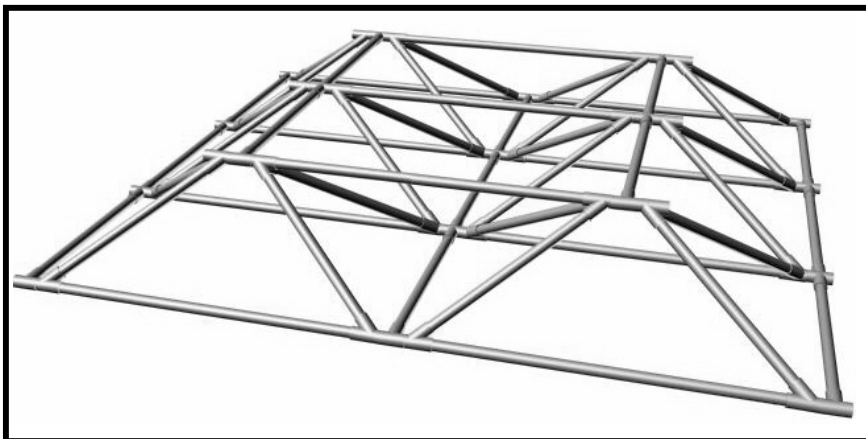


Abb. 6.24 a: Ebenes Raumfachwerk mit modifizierten Elementen

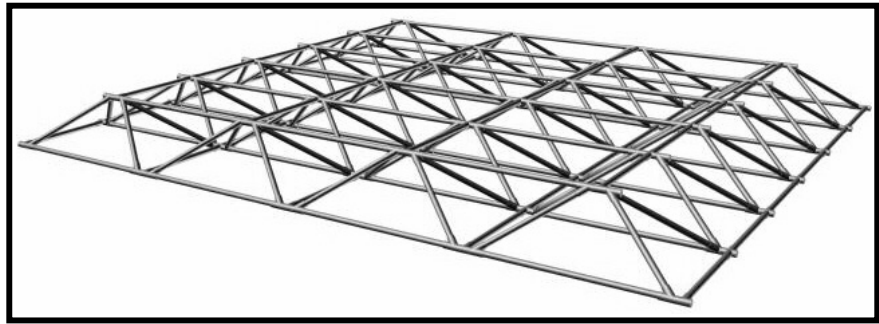


Abb. 6.24 b: Ebenes Raumfachwerk mit modifizierten Elementen

Mit dieser rationellen Zusammenführung von jeweils zwei einfachen Elementen zu einem kombinierten Element würde der Versatz der Lastpfade halbiert und die Struktur deutlich übersichtlicher (Abb. 6.24).

An den Rändern des Fachwerkes werden weiterhin einfache Elemente eingesetzt.

Insgesamt sind zum Aufbau ebener Raumfachwerke nur vier unterschiedliche Elementtypen notwendig.

Zur Realisierung einsinnig gekrümmter Raumfachwerke mit dem System und einfachen Einzelelementen genügt es, eine entsprechende Differenz in den Stablängen der oberen und der unteren Lage vorzusehen. Die einzelnen Knotenelemente passen sich von selbst durch Verdrehung auf den durchgehenden Stangen (Winkel φ) der entstehenden Krümmung an. Diese Krümmung braucht nicht über die gesamte Struktur hinweg konstant sein.



Bei einer Benutzung zusammengesetzter Elemente muss die Krümmung der Raumfachwerke jedoch konstant sein (Abb. 6.25). Diese Krümmung bestimmt die (festen) Öffnungswinkel (β) zwischen den beiden einzelnen 45°-Abgängen des ersten zusammengesetzten Elementes und am Kreuzknoten. Die zusammengesetzten 45°-Elemente der oberen und der unteren Lage weisen zusätzlich unterschiedliche Öffnungswinkel β auf.

Zusammen mit den einfachen Randelementen werden demnach insgesamt nur fünf unterschiedliche Knotentypen benötigt.

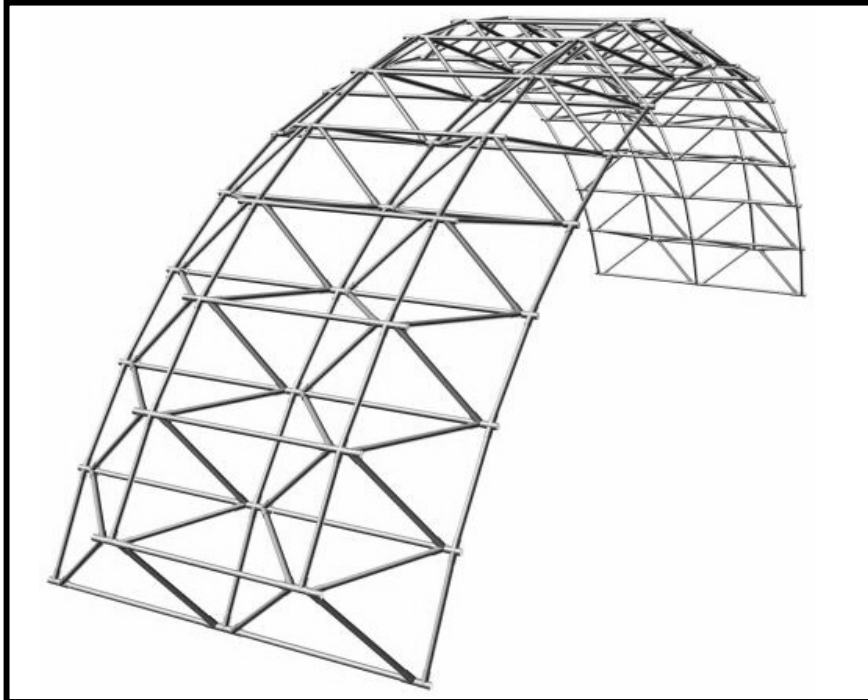


Abb. 6.25: Fortsetzbares Segment eines einsinnig und konstant gekrümmten Raumfachwerks



*Flughafen Düsseldorf [53]
Fertigstellung: 2002
Arch.: J.S.K. Architekten
Tragwerk: Schübler-Plan
Ingenieurgesellschaft für Bau-
und Verkehrswegeplanung mbH*

Abb. 6.26: Gekrümmter und räumlicher Fachwerkbinder [53]

Wird der Aufbau eines doppelt gekrümmten Raumfachwerkes angestrebt, so muss die zweite Krümmung an den

durchgehenden Stäben vorgesehen werden. Um der Krümmung der Stäbe folgen zu können, müssen auch die x-Achsen der Knotenelemente die gleiche Krümmung aufweisen. Dadurch entsteht, wie bereits im Zusammenhang mit ebenen gekrümmten Fachwerken beschrieben, ein geometrischer Unterschied zwischen den Elementen der oberen und denjenigen der unteren Fachwerklage. An der oberen Lage schauen die Knotenabgänge in den Krümmungsradius ihrer x-Achsen hinein, während dies bei den unten angebrachten Elementen umgekehrt ist.

Die Anzahl der benötigten Elementtypen zum Aufbau doppelt gekrümmter Raumfachwerke verdoppelt sich ebenfalls.

Die Fachwerk-Struktur wird demnach insgesamt sehr komplex und damit sehr aufwändig. Dies betrifft in erster Linie die benötigten höheren Genauigkeiten bei allen Komponenten und den deutlich größeren Montageaufwand.

Die zweite Krümmung des Raumfachwerkes in Richtung der durchgehenden Stäbe und der x-Achsen der Elemente muss in jedem Fall konstant sein.

Montage der Tragwerke In Bezug auf die Montage von Tragwerken mit diesem System treten als besonderes kennzeichnendes Systemmerkmal die durchgehenden Stangen in den Vordergrund. In diesem Zusammenhang muss besonders auf die Reihenfolge der Montage der Elemente geachtet werden. Geometrisch bedingt können Strukturen unter Umständen nur mit einer bestimmten Reihenfolge bei der Montage aufbaubar sein. In den meisten Fällen ist es von Vorteil, die Verbindungsglieder (Knoten und Verbindungsstangen) bereits vormontieren, bevor die langen Stäbe durch diese vormontierten Bereiche durchgesteckt werden. Weiterhin ist

empfehlenswert, dass die endgültige Verschweissung der Elemente miteinander möglichst erst nach dem kompletten Aufbau der Struktur stattfindet. Auf diese Weise können Fertigungs- und Montageungenauigkeiten sowie Verzug bereits aufgebauter Strukturbereiche noch rechtzeitig korrigiert werden.

Dies gilt besonders für ebene verbundene, für räumliche Fachwerke und je komplexer das Fachwerk sein soll.

Wird bei einer Struktur der Einsatz gekrümmter durchgehender Stangen angestrebt, so muss der Fertigungs- und Montagegenauigkeit bereits vormontierter Strukturbereiche besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden.

Gekrümmte Elemente sind auf gekrümmten Stangen nicht drehbar.

Beide Krümmungen müssen daher genau fluchten, damit die Stangen durch die Elemente der vormontierten Bereiche geschoben werden können.

Bei sehr komplexen Tragwerken, wie z.B. doppelt gekrümmten Raumfachwerken, kann das Durchschieben langer, gekrümmter, durchgehender Stäbe durch bereits aufgebaute komplexe Bereiche mit vielen gekrümmten Knoten und Verbindungsstäben möglicherweise Schwierigkeiten bereiten.

Daher sollten die durchgehenden Stäbe nicht länger als unbedingt nötig sein.

Unter Umständen sollte je nach Tragwerkkomplexität von diesem aufwändigen Vorhaben abgegangen werden.

**Realisierung
bionischer Stab-
Tragwerke**

Die Natur ist stets Quelle der Inspiration für Künstler, Architekten und Wissenschaftler gewesen. Sowohl die Ästhetik als auch die Funktionalität natürlicher materieller Objekte und Lebewesen ist stets bewundert, analysiert und als Vorbild für menschliche Werke und Objekte genommen worden.

Wenn nicht nur die Ästhetik, bzw. die Form materieller Objekte wichtig ist, wie in der Kunst, sondern darüber hinaus auch die damit verbundene Funktionalität bedeutend wird, wie es in der Architektur der Fall ist, bietet die Bionik eine Vielzahl interessanter Erkenntnisse und Lösungsansätze.

Gemeinsamkeiten zwischen Architektur und Bionik liegen möglicherweise darin begründet, dass Form, Funktion und Technik wichtige Inhalte beider Fachbereiche sind.

Das Wissensgebiet Bionik wurde im Jahr 1960 während einer Konferenz in den Vereinigten Staaten ins Leben gerufen [25]. Es befasst sich systematisch und wissenschaftlich mit der technischen Umsetzung und Anwendung von Konstruktionen, Verfahren und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme [27].

Die Bionik strebt nicht die Kopie natürlicher organischer Formen und Körper an, sondern verfolgt die Anwendung natürlicher Verfahren und Methoden zur Gestaltung technischer Objekte und Verfahren. Die entstehenden naturähnlichen Formen sind das Ergebnis der Anwendung bionischer Methoden.

Natürliche Strukturformen bieten unerschöpfliches Anschauungsmaterial für die vielfältigen Wirkungsweisen von Tragwerken und zeigen Wege für ihre Optimierung [4, S. 26].

Die Bionik wird in die Teilgebiete Konstruktions-, Verfahrens- und Informationsbionik unterteilt. Jedes Teilgebiet beinhaltet jeweils verschiedene Anwendungsfacetten (Abb. 6.27). [27]

Bionik		
Verfahrensbionik	Informationsbionik	Konstruktionsbionik
Klima- und Energetobionik	Neurobionik	Materialbionik
Baubionik	Evolutionsbionik	Werkstoffbionik
Sensorbionik	Prozessbionik	Bionische Prothetik
Bionische Kinematik und Dynamik	Organisationsbionik	Bionische Robotik

Abb. 6.27: Teilgebiete und Anwendungsfacetten der Bionik [27]

Die architektonische Nutzung biologischer Vorbilder hat bereits eine lange Geschichte.

Der erste bekannte Architekt, der nach bionischen Prinzipien arbeitete, war der Forscher und Künstler Leonardo da Vinci (1452-1519) [29].

Es gibt zahlreiche Beispiele für von der Natur inspirierte Architekten. In Abb. 6.28 ist eine kleine Auswahl bekannter Fälle aufgeführt [45].

<i>Bauwerk</i>	<i>Biologische Analogie</i>
Crystal Palace, London (1851)	Verrippung nach Riesenrose
Entwürfe für ein Kulturzentrum, Bagdad (1957)	Victoria Amazonica
Climatron, St. Louis (1959)	Radiolarien-Skelette
Fabrikhallen, Italien	Diatomeenschalen (Schalen aus Kieselsäure)
Baumtragwerke im Flughafen Dschidda, Saudi-Arabien	Spongiosa-Architektur des menschlichen Oberschenkels
Zeltdächer des Olympiastadions, München (1972)	Bäume
Pneu-Bauwerke	Spinnetze
Flughafen Stuttgart (1992)	Schaum
	Bäume

Abb. 6.28: Bauwerke und biologische Analogien

Bionik in der Architektur

Architekt

Sir Joseph Paxton

Frank Lloyd Wright

Buckminster Fuller

Pier Luigi Nervi

Frei Otto [30], [31]

Verschiedene

Von Gerkan und Marg

„Evolutionary architecture can be defined as an architecture that implements the evolutionary practices of nature as a synthesis of billions of years of evolution applied to immediate needs and circumstances of form, function and purpose“ [Eugene Tsui, [24], S. 12].

- Bionische Fachwerke** Mit dem Begriff „bionische Fachwerke“ wird die Bezeichnung von Fachwerken vorgeschlagen, die mit bionischen Methoden entworfen und/oder optimiert werden. Die Bionik verfügt über eine Reihe von Methoden und Berechnungsverfahren, wie beispielsweise die im folgenden näher beschriebenen CAO- und SKO-Methoden zur Formoptimierung von Bauteilen. Neben der optimalen Gestaltung der Verbindungen spielt besonders die optimale Stabanordnung bei Fachwerken eine zentrale Rolle. Diese kann durch Anwendung der bionischen Methode der „Evolutionstrategie“ sehr effektiv optimiert werden.
- Evolutionstrategie** „Evolutionstrategie“ bezeichnet eine Vorgehensweise, bei der eine zu optimierende Größe als Funktion der für sie wichtigsten Einflussfaktoren formuliert wird, die sogenannte „Zielfunktion der zu optimierenden Größe“. Anschließend werden anhand von aus der Natur bekannten Optimierungsmethoden die einzelnen Einflussfaktoren variiert, um dadurch die zu verbessernde Größe zum gesuchten Optimum zu bringen [27]. Bei den hier verwendeten natürlichen Optimierungsmethoden handelt es sich hauptsächlich um Mutation, Rekombination und Selektion [27]. Bezogen auf Fachwerke kann auf diese Weise die für einen bestimmten Anwendungsfall (Lagerung, Kräfte, Last) optimale Stabanordnung ermittelt werden. Ausgehend von einem konventionellen Tragwerk für eine bestimmte Anwendung (Abb. 6.29) kann für gleiche

Rahmenbedingungen die Anordnung der Stäbe optimiert werden. [27, S.11]

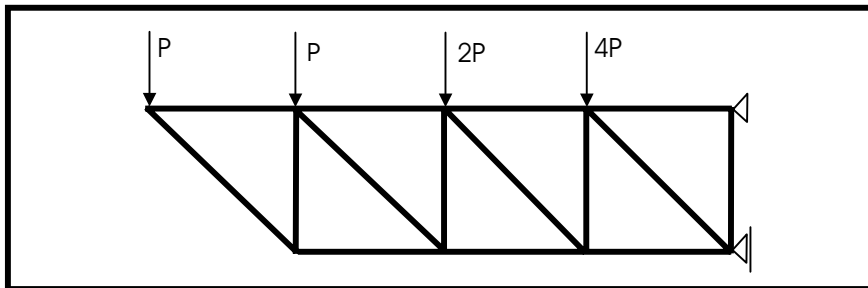


Abb. 6.29: Standard Fachwerkträger (Ausgangsform der Optimierung)

Die in Abb. 6.30 dargestellte Optimierung hat die Zielfunktion „minimales Gewicht“. Die entstandene neue Stabanordnung berücksichtigt die sich verändernden Belastungen in den Stäben einschließlich Knickung und passt die Stabdurchmesser jeweils an. Die meisten Stäbe sind infolge ihrer günstigeren Anordnung im Vergleich zur Ausgangsstruktur dünner geworden.

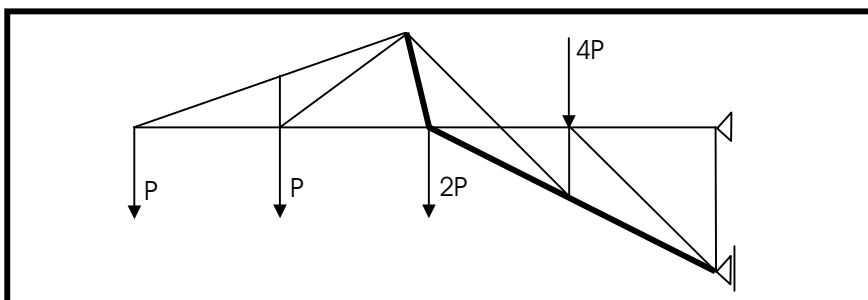


Abb. 6.30: Evolutionsstrategisch optimierter Fachwerkträger [27, S.11]

Die so entstandene Struktur ist für die angegebenen Randbedingungen die überhaupt beste im Hinblick auf die zu optimierende Größe (Gewicht) [27, S.11].

„Erst durch das Gewicht eines Bauwerks wird das Kunstvolle seines Designs deutlich“ [Buckminster Fuller [8], S. 84].

Die Strukturform lehnt sich zudem deutlich an naturähnliche, organische Formen an [21].

Auf dem Wege zum Erreichen eines Optimums entstehen als Zwischenstufen der Optimierung eine Reihe von

Strukturen mit unterschiedlichen Formen, die in den meisten Fällen eine Gewichtsreduktion im Bezug auf die Ausgangsform aufweisen. Hieraus ergeben sich zahlreiche sehr interessante und in der Regel sogar leichter realisierbare Designvorschläge für den entwerfenden Architekten.

Eine vorgeschlagene „tragende Struktur“ kann durchaus auch durch Hinzunahme weniger „sekundärer Elemente“ in ihrer äusseren Erscheinung in einem gewissen Umfang modifiziert werden. Auf diese Weise können auch Formvorstellungen des Entwerfers implementiert und ein Kompromiss mit der rationell optimierten tragenden Struktur getroffen werden, entsprechend dem Prinzip „form follows function“ [L. H. Sullivan [7], S.108].

Eine große Schwierigkeit bei der systematischen Realisierung von bionischen Fachwerken mit Tragwerk-Systemen besteht jedoch in den Tragwerk-Systemen selbst. Bionische Fachwerke sind unregelmässige Strukturen mit stets unterschiedlichen Stablängen und -winkeln. Dies erfordert eine ausgesprochene Flexibilität des anzuwendenden Tragwerk-Systems. Systeme mit festen Winkeln oder Stablängen sind für diese Aufgabe weniger geeignet.

Das hier vorgestellte System mit Hydroform-Elementen bietet die in diesen Fällen benötigten Freiheiten im Hinblick innovative Stab-Anordnungen für das Entwerfen und Optimieren von Strukturen an.

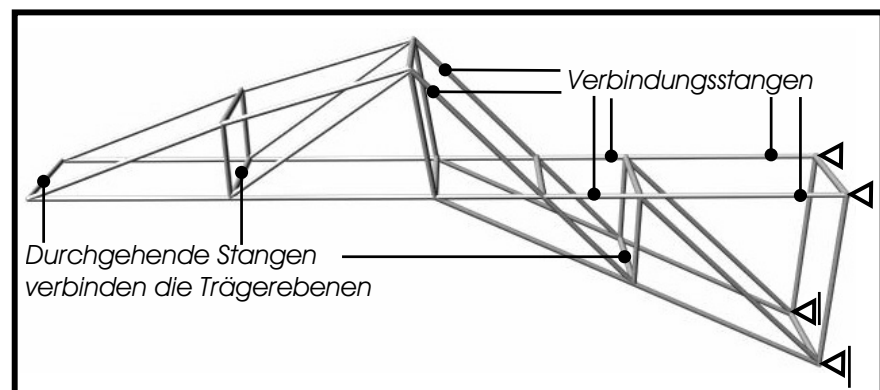


Abb. 6.31: Konstruktion eines bionischen Fachwerks

Die von der Evolutionsstrategie in Abb. 6.30 vorgeschlagene Struktur kann, wie in Abb. 6.31 dargestellt, als ebenes Fachwerk nach der im Fall C „beliebiger Verlauf von Ober- und Untergurt“ dargestellten Methode realisiert werden.

Zwei einzelne Fachwerkebenen, die mittels T-Stücken mit $\alpha=90^\circ$ und Verbindungsstangen gebildet werden, werden mit durchgehenden Stangen miteinander verbunden. Da die Verbindungselemente auf diesen Stangen drehbar sind, werden auf diese Weise die unterschiedlichen Richtungen der Verbindungsstangen eingestellt.

Mit einer gelenkigen Verbindung in der Mitte könnten zwei dieser einzelnen Träger zu einem raumüberspannenden Fachwerkträger kombiniert werden.

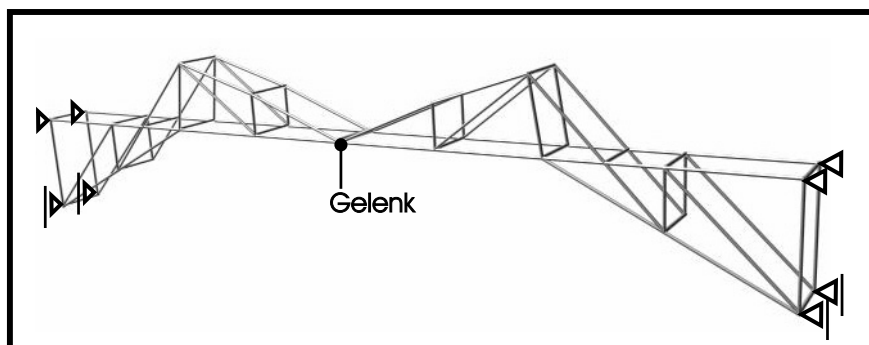


Abb. 6.32: Zwei Biegeträger mit gelenkiger Verbindung

Die Anzahl der Trägerebenen (mindestens 2) und der Abstand zwischen ihnen sind wählbar.

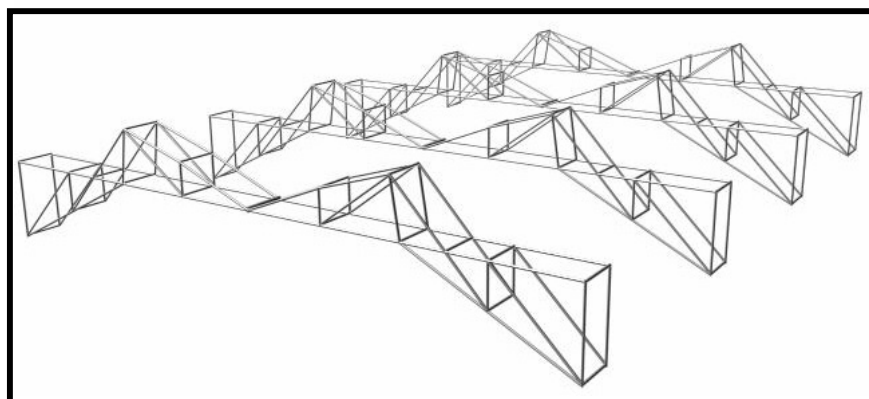


Abb. 6.33: Paarweise angeordnete ebene Fachwerkträger

Durch mehrfache Positionierung dieser Träger hintereinander entsteht ein Dachtragwerk (Abb. 6.33).

Die Dachstruktur kann auch mit einzelnen Fachwerkebenen im Abstand zueinander realisiert werden (Abb. 6.34).

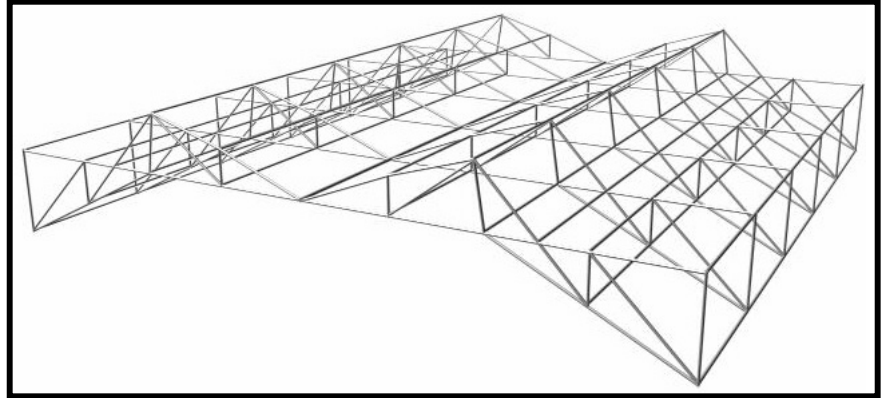


Abb. 6.34: Gleichmäßig verteilte Fachwerkebenen

Die durchgehenden Stäbe verbinden hier die einzelnen Fachwerkebenen miteinander und verlaufen entlang der gesamten Dachlänge.

Abschließend sei angemerkt, dass der Entwurf eines raumüberspannenden Dachtragwerkes nach den Prinzipien der Evolutionsstrategie sicherlich zu einer anderen Struktur führen würde. Mit diesem aufgeführten Beispiel sollte daher lediglich die praktische Machbarkeit komplexer bionischer Fachwerke mit Hydroform-Elementen und dem vorgestellten Tragwerk-System dargestellt werden.

Die vorliegende Arbeit ist auch in einem zweiten Zusammenhang mit dem Fachgebiet Bionik in Berührung gekommen, und zwar bei den Optimierungsarbeiten an den Knotenelementen.

*Bionische
Elementoptimierung*

Durch die in Kapitel 4 „Entwicklung und Realisierung der Verbindungselemente“ beschriebene „manuelle“ schrittweise Optimierung der Elementkonturen wurde beim 45°-Knotenelement und beim Kreuzelement eine deutliche Erhöhung der Tragfähigkeit erreicht.

Im Hinblick auf eine systematische Gestaltoptimierung verfügt die Bionik über zwei sehr effektive Methoden:

- Die CAO-Methode (Computer Aided Optimization)
- Die SKO-Methode (Soft-Kill-Option)

Der CAO-Ansatz basiert auf dem biomechanischen Grundprinzip, an allen Stellen eines natürlichen Körpers gleich hohe Spannungen zu erzielen.

Zu diesem Zweck geht die Natur so vor, dass sie durch gezieltes Wachstum in Bereichen mit Spannungsspitzen diese abbaut. Der tragende Querschnitt des Bauteils wird an den höchst beanspruchten Stellen gezielt verstärkt. Claus Mattheck beobachtete, dass Bäume an mechanisch höher belasteten Ästen sowie an von aussen angebrachten Schädigungen (künstliche Kerben) mit einem gezielten Wachstum als örtliche Verstärkung reagieren. Er entwickelte auf der Basis der Finite Elemente Methode FEM den Computeralgorithmus von CAO, um dieses Verhalten technisch nachzubilden. [17]

Bei der CAO-Methode werden mechanische Spannungen in Temperaturgrößen umdefiniert. Die Temperatur führt über die Wärmedehnung zu einer Geometrieänderung im betrachteten Körper (Abb. 6.35).

Der auf diesem Weg entstandene „neue“ Körper dient als Ausgangsgeometrie für einen eventuell erforderlichen

nächsten iterativen Berechnungsschritt. Dies wird solange fortgeführt bis Spannungsspitzen (Temperaturspitzen) abgebaut sind. [28]

Die an technischen Bauteilen durchgeführte CAO-Optimierung führt zu Formen, die natürlichen Körpern sehr ähneln (Abb. 6.35).

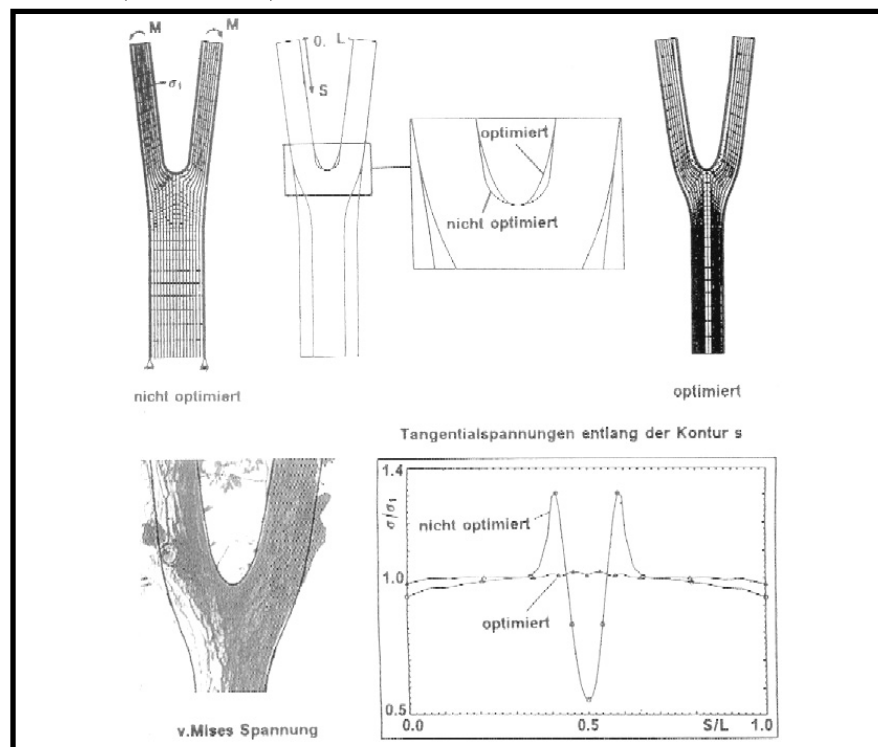


Abb. 6.35: Optimierung der Bauteilgeometrie, Verringerung von Spannungsspitzen, Entstehung natürlicher Formen [26]

Bei der zweiten bionischen Gestalt-Optimierungsmethode von Claus Mattheck, der SKO-Methode (Soft-Kill-Option), werden nicht oder nur geringfügig belastete Bereiche im betrachteten Körper entfernt.

Dieses Prinzip wurde bei der Zurückbildung von unbelasteten Knochenbereichen in menschlichen und tierischen Körpern erkannt [17].

Eine Bauteiloptimierung nach diesem Prinzip führt zu einer besonders deutlichen Gewichtsreduktion und zum Sichtbarwerden des Tragwerks im jeweiligen Körper (Abb. 6.36).

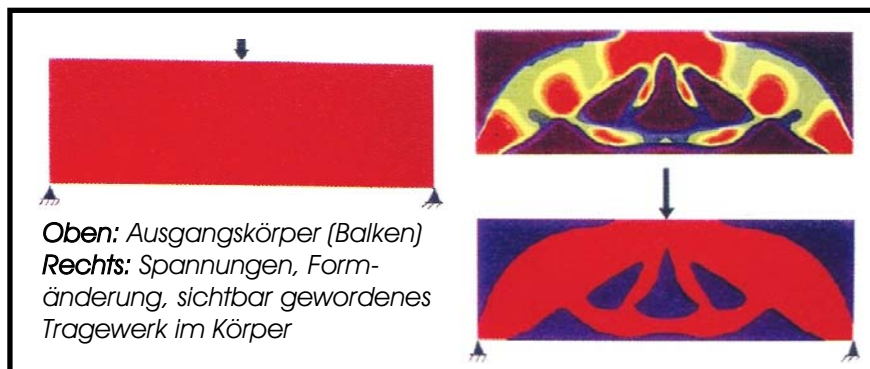


Abb. 6.36: Konventioneller Biegebalken und gewichtsoptimierte SKO-Alternative [17]

Die SKO-Methode wird als Vorstufe einer anschließenden CAO-Optimierung empfohlen [27].

Die Erfahrungen mit der Anwendung der beiden Methoden bei einer Vielzahl technischer Bauteile waren sehr positiv. Die Spannungsspitzen konnten in allen Fällen um 20-60 % reduziert werden. Die Bauteilgewichte wurden im Durchschnitt um 25 % reduziert [27].

Diese positiven Erfahrungen bei der Gestaltoptimierung von Bauteilen mit der SKO- und CAO-Methode konnten auch im Fachgebiet Werkstofftechnik durch frühere eigene Arbeiten bestätigt werden. Aus diesem Grund wurde innerhalb der Optimierungsschritte an den Knoten-Elementen auch über die Anwendung dieser effektiven Methoden nachgedacht. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass die den Knoten-Elementen zugrundeliegende Hydroform-Technologie Schwierigkeiten bei der unmittelbaren Anwendung der SKO- und CAO-Methode zur Optimierung der Knotenformen bereitet.

Mit der Hydroform-Technologie kann die Wanddicke der umzuformenden Blech- oder Rohbauteile nicht gezielt örtlich verändert werden.

Die bionischen Optimierungsmethoden ergeben jedoch, neben der Formänderung, auch eine örtliche Anpassung der Wanddicke der Bauteile an die örtliche Beanspruchung. Elemente mit örtlich variierten Wanddicken sind dann aber nicht mehr mit der Hydroform-Technologie herstellbar.

Deshalb ist eine Modifikation der bionischen Software-Programme für Dünnwandbauteile erforderlich, damit zwar die Aussengeometrien, aber nicht die Wanddicken der Bauteile (Knoten-Elemente) verändert werden.

Auf der anderen Seite bietet die Hydroform-Technologie in Bezug auf bionisch optimierte Blechbauteile mit konstanter Wanddicke einen besonderen Vorteil.

Die komplexen Aussengeometrien (Formen), wie sie bei bionischen Optimierungen entstehen, können bei konstanter Wandstärke aus standardisierten Rohrstücken oder Blechen ohne einen besonderen Mehraufwand im Vergleich zu konventionell entworfene Blechbauteilen realisiert werden.

Da Dünnwandbauteile im Zuge des Strebens nach Leichtbau immer öfter Anwendung finden, sind bionische Optimierungsmethoden für Blechbauteile von großem Nutzen.

7. Charakteristika von Stab-Tragwerken mit Hydroform-Elementen

Bei geschweissten Fachwerken aus offenen oder Hohlprofilen wird in erster Linie die Verbindung der einzelnen Profile mit einem gemeinsamen Schnittpunkt der Längsachsen angestrebt. Damit soll erreicht werden, dass im Fachwerk vorzugsweise nur Zug- und Druckkräfte vorliegen. Es soll kein Hebelarm erzeugt werden, der ein Biegemoment bewirken könnte.

Beim vorliegenden System entsteht durch die Positionierung der Verbindungselemente in Reihe hintereinander dagegen ein Versatz der Längsachsen der auftreffenden Stäbe.

Versatz der Systemlinien

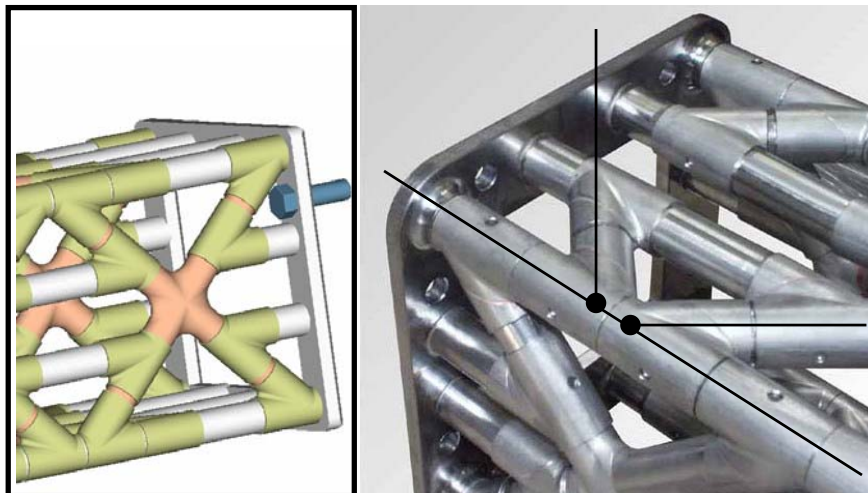


Abb. 7.1: *Versatz der Systemlinien der Stäbe*

Dieser Versatz bedeutet zwar ein Abweichen vom theoretisch idealen Fachwerkaufbau mit einer punktwisen Kräftebündelung. Solche Varianten sind allerdings oftmals auch im konventionellen Stahlbau, bzw. im Bereich der Hohlprofil-Strukturen, anzutreffen.

Die internationale Vereinigung CIDECT (Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire), die eng mit Architekten und Stahlbauern zusammenarbeitet, befasst sich ingenieur-wissenschaftlich

CIDECT

mit den konstruktiven und technischen Aspekten von Hohlprofil-Konstruktionen und gibt weltweit anerkannte Konstruktionsrichtlinien heraus.

Die Veröffentlichungsreihe „Konstruieren mit Stahlhohlprofilen“ behandelt die Dimensionierung von Hohlprofil-Konstruktionen mit kreisförmigen (KHP) und rechteckigen (RHP) Hohlprofilen einschließlich ihrer Schweissverbindungen. Hier liegen bereits wertvolle Erkenntnisse über die technischen Aspekte von Hohlprofil-Konstruktionen, die zum größten Teil auch für das hier behandelte Tragwerk-System von Bedeutung sind, vor.

Die Empfehlungen der CIDECT finden sich teilweise auch in Eurocode 3 und in DIN 18800 bis 18809 wieder [38].

Bei Stahlstrukturen aus Hohlprofilen, bei denen in den meisten Fällen auch eine vektorielle Kraftspaltung angestrebt wird, sind Füllstäbe sehr oft versetzt an Gurtstäben angebracht.

Bei „Knoten mit Spalt“ empfiehlt CIDECT die Einhaltung maximaler Grenzen in Bezug auf die Exzentrizität von Systemlinien [32].

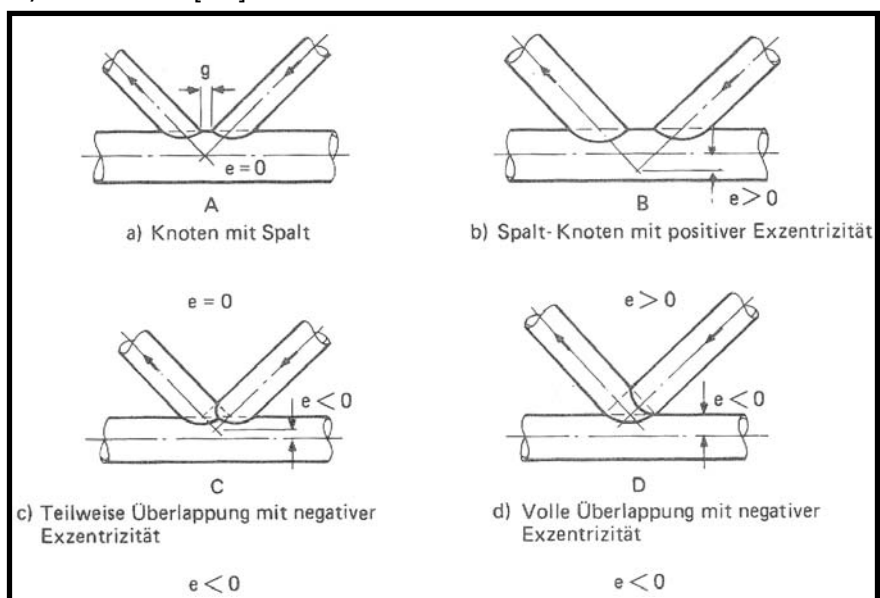


Abb. 7.2: Definition und Darstellung der Exzentrizität [32, S.10].

Um eine sichere Schweissung von Füllstäben zu erreichen, wird zusätzlich ein Mindestspalt empfohlen, der größer als die beiden Breiten der Schweissnähte sein sollte [32, S.11].

Sowohl bei konventionellen Konstruktionen als auch beim vorliegenden System kann die Exzentrizität durch eine Variation des Stabwinkels, des Spaltes (Knotenabstand) und der Rohrdurchmesser beeinflusst werden.

Die beim vorgestellten neuen System angestrebten möglichst steifen (auch biegesteife) Verbindungen zwischen den Stäben bedeuten einerseits eine deutliche Abweichung von der klassischen Fachwerktheorie.

Insbesondere wegen der stark eingeschränkten zur Verfügung stehenden Berechnungsmethoden versuchte man im 19. Jahrhundert überbestimmte Systeme, wie sie bei starren Verbindungen entstehen, möglichst zu vermeiden [30, S. 116].

„Die in vielen Fällen zu erwartenden Vorteile von Fachwerk-Konstruktionen mit biegesteifen Knoten müssten grundsätzlich nachgewiesen werden“ [30, S. 116].

Ob man an den Verbindungsstellen einer Struktur Biegemomente zulassen kann, hängt jedoch letztendlich davon ab, ob die Verbindungen diese Belastungen sicher und dauerhaft aufnehmen können.

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit vorgestellte Tragwerk-System verfolgt nicht die bewusste Erzeugung von Biegemomenten an den Verbindungen. Es ist jedoch bestrebt, auch diesen kritischen Belastungsfall in die Dimensionierung einzubeziehen. Sollte ein Tragwerk aus bestimmten Gründen Biegemomente an den Verbindungen aufweisen, sollen diese auch sicher aufgenommen werden können. Die Ergebnisse der Studie über die Tragfähigkeit von Verbindungen für verschiedene Belastungsfälle in Kapitel 4 dokumentieren, dass die Verbindungen mittels Knotenelemente im Schnitt doppelt so tragfähig sind wie

Biegesteife Verbindungen

konventionelle Verbindungen direkt angeschweisster Rohre. Diese Differenz bedeutet entweder doppelt soviel Sicherheit oder deutlich mehr Freiheiten bei der Gestaltung und Dimensionierung der Konstruktionen.

Spannungen an ebenen Fachwerken

Die Konstruktionshöhe eines Stab-Tragwerkes ist von großer Bedeutung für die Kräfte und Spannungen in den Stäben. Eine größere Konstruktionshöhe führt in der Regel zu geringeren Spannungen.

Mit dem Begriff „Spannung“ ist in den meisten Fällen die Vergleichspannung gemeint. Diese erfasst die einzelnen vorhandenen unterschiedlichen Spannungskomponenten (Spannungen in den einzelnen Ebenen) und setzt sie in bestimmtem Verhältnis zueinander zu einer einzigen Größe zusammen.

In bestimmten Fällen kann es jedoch von Interesse sein, die Spannungsbeiträge getrennt zu analysieren.

In der Regel sind beispielsweise Biegebelastungen kritischer als Zugbelastungen, weil dabei der tragende Querschnitt nicht vollständig ausgenutzt wird.

Eine Senkung der Vergleichspannung kann deshalb sehr effektiv durch eine Senkung vorhandener Biegespannungen erreicht werden.

Im folgenden wird deshalb systematisch untersucht, wie sich bei diesen neuartigen Tragwerken mit biegefesten Hydroform-Elementen die einzelnen Spannungskomponenten in Abhängigkeit der Tragwerkshöhe und des Schlankheitsgrades der Stäbe verhalten. Gleichzeitig werden die besonderen Charakteristika des Systems, der Versatz der Achsen und die biegefesten Verbindungen, berücksichtigt.

Ein ebenes Fachwerk (Abb. 7.3) wird auf zwei Stützen gelagert und an den oberen Verbindungsstellen gleichmässig belastet.

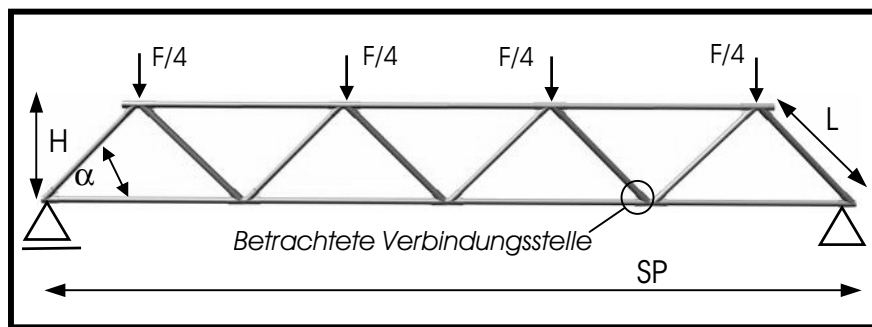


Abb. 7.3: Ausgangsmodell der Untersuchungsreihen

Es werden drei Untersuchungsreihen durchgeführt, bei denen schrittweise die Stäbe verlängert werden.

Als **Erstes** wird bei konstanter Spannweite SP die Höhe H schrittweise vergrößert. Damit ändern sich die Verbindungswinkel α und die Stablängen. Die Belastung F bleibt konstant, wodurch sich jeweils die maximale auftretende Vergleichsspannung σ_v nach Mises ändert. (Untersuchungsreihe 1)

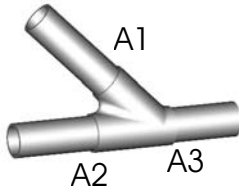
Als **Zweites** werden die gleichen Fälle wie in Untersuchungsreihe 1 betrachtet, diesmal jedoch wird gleichzeitig die Belastung F derart verändert, sodass sich eine konstante maximale Vergleichsspannung nach Mises von $\sigma_v = 80 \text{ N/mm}^2$ einstellt. (Untersuchungsreihe 2)

Als **Drittes** wird bei konstanten Verbindungswinkel α das Tragwerk breiter (SP) und höher (H) gemacht. Auch hier bleibt durch unterschiedliche Belastungen F die Vergleichsspannung σ_v konstant. (Untersuchungsreihe 3)

Bei allen drei Untersuchungsreihen wurden Rohre mit den Durchmessern $\phi_A = 25 \text{ mm}$ und $\phi_I = 21 \text{ mm}$ und Verbindungselemente mit $\phi_A = 28 \text{ mm}$ und $\phi_I = 25 \text{ mm}$ verwendet.

Der Betrag des Verhältnisses von Biege- zu Zugspannung $|\sigma_B/\sigma_Z|$ gibt Aufschluss über eine mögliche überproportionale Veränderung einer einzelnen Spannungskomponente.

Für die genaue Analyse der Spannungskomponenten wird ein repräsentatives Verbindungselement herangezogen. Dieses liegt in der Mitte des Fachwerkes, wo kein direkter Einfluss von Seiten der Lagerung oder der Kraffteinleitung zu erwarten ist (Abb. 7.3). Das ausgewählte Element weist drei Abgänge auf, an denen die Zerlegung der Vergleichsspannung stattfindet. Sie werden jeweils mit A1, A2 und A3 bezeichnet.



Zur Verdeutlichung der Verformungen an den belasteten Strukturen werden sie auf den Spannungsbildern mit dem Vergrößerungsfaktor 100:1 dargestellt.

Untersuchungsreihe 1 Konstante Spannweite $SP=2.900$ mm, variable Verbindungswinkel α und Konstruktionshöhe H . Konstante Belastung $F=6.000$ N

λ	Schlankheit $\lambda=\phi/L$
α	Verbindungswinkel
H	Konstruktionshöhe
L	Stablänge
σ_v	Max. Spannung
A	Abgang
σ_B	Biegespannung
σ_z	Zugspannung

λ	α	H	L	σ_v	A	σ_B	σ_z	$ \sigma_B/\sigma_z $
1/20	46,7	364	500	69,2	A1	8,4	-16,9	0,49
					A2	8,1	46,8	0,17
					A3	1,3	35,1	0,03
1/30	62,8	667	750	53,3	A1	6,8	-13,9	0,48
					A2	8,3	25,6	0,32
					A3	0,3	19,1	0,02
1/40	69,9	939	1000	47,3	A1	6,1	-13,2	0,46
					A2	9,5	18,2	0,52
					A3	0,1	13,6	0,007

$L=500$ mm

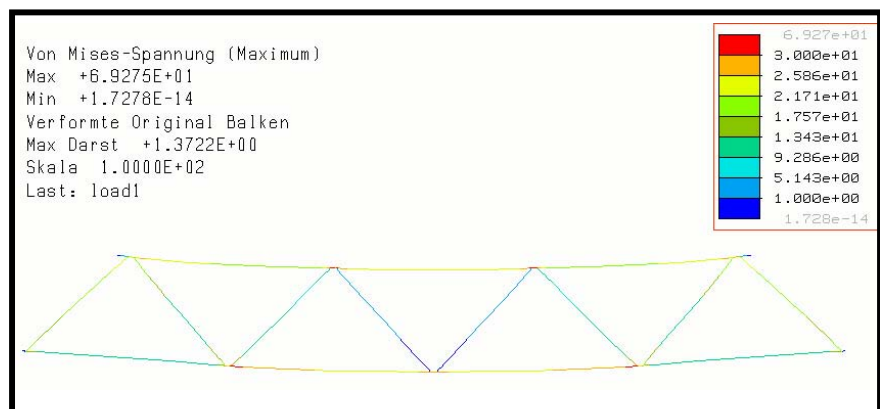


Abb. 7.4 a: Verlauf der Mises-Spannungen σ_v für Untersuchungsreihe 1

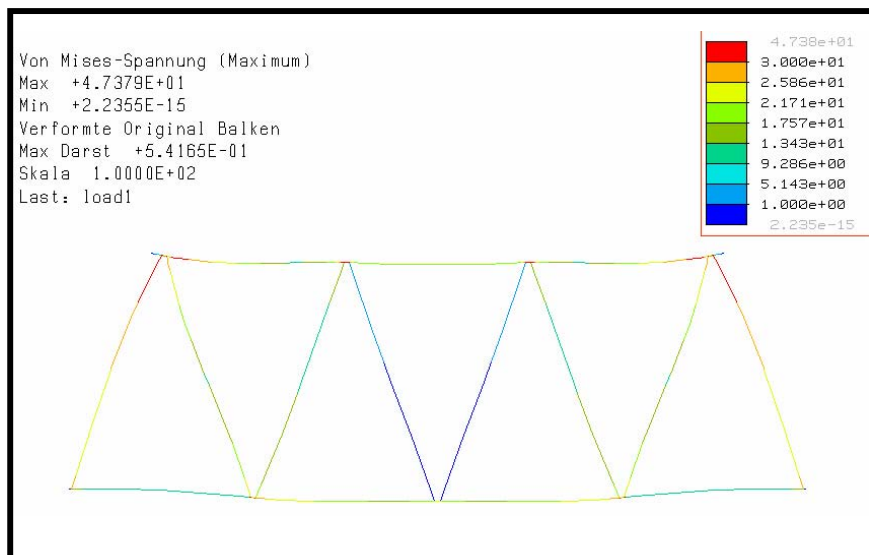
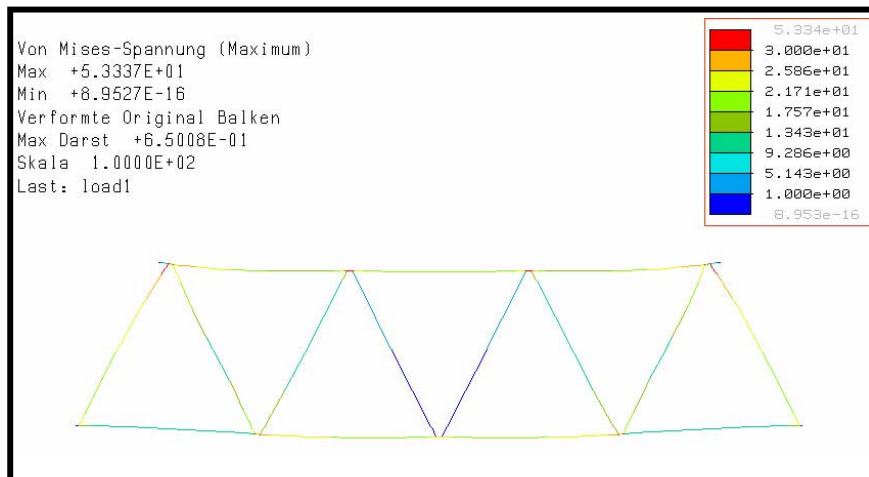


Abb. 7.4 b: Verlauf der Mises-Spannungen für Untersuchungsreihe 1

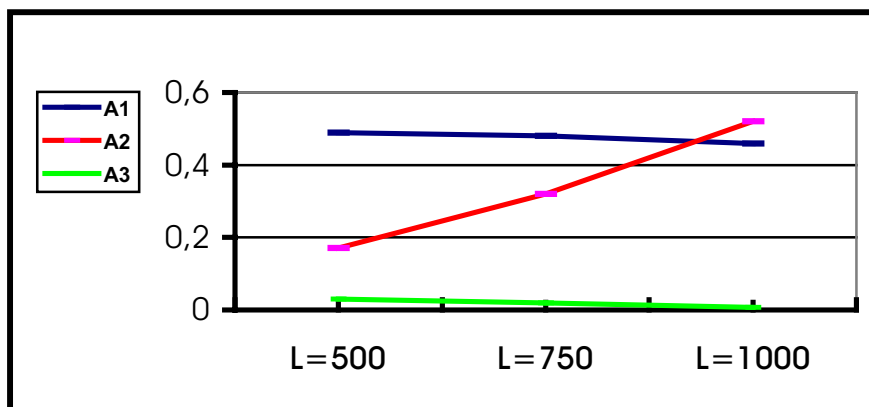
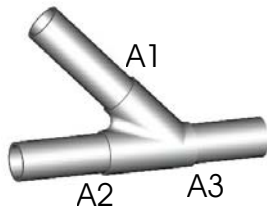


Abb. 7.5: Graphischer Verlauf von $|\sigma_B|/\sigma_z$

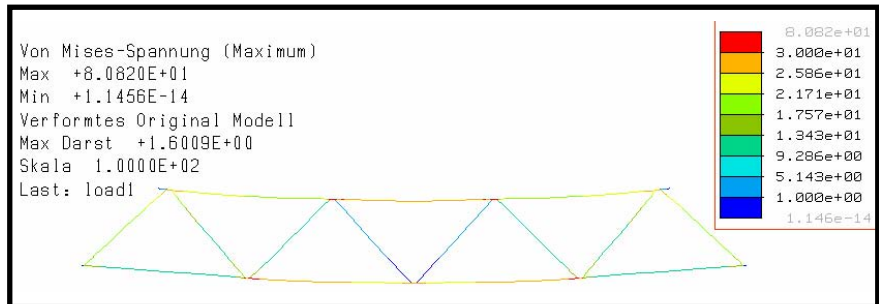
Untersuchungsreihe 2 Konstante Spannweite $SP=2.900$ mm, variable Verbindungswinkel α_i und Konstruktionshöhe H . Konstante maximale Spannung nach Mises $\sigma_v=80$ N/mm²

λ	Schlankheit $\lambda=\phi/L$
α	Verbindungswinkel
H	Konstruktionshöhe
L	Stablänge
F	Belastung
A	Abgang
σ_B	Biegespannung
σ_Z	Zugspannung

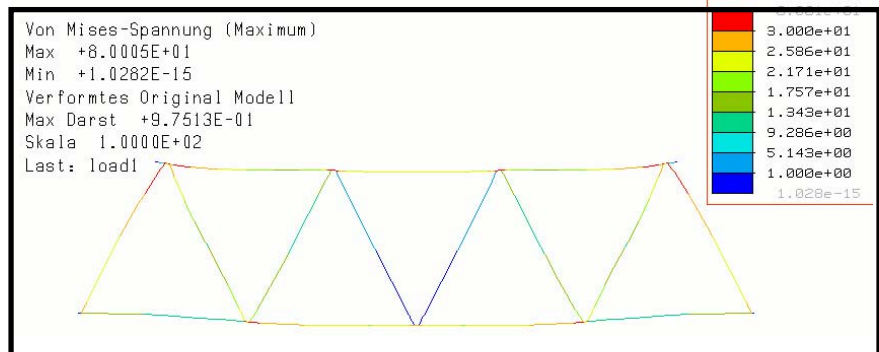
λ	α	H	L	F	A	σ_B	σ_Z	$ \sigma_B/\sigma_Z $
1/20	46,7	364	500	7000	A1	9,8	-19,8	0,49
					A2	9,4	54,6	0,17
					A3	1,5	40,9	0,03
1/30	62,8	667	750	9000	A1	10,1	-20,8	0,48
					A2	12,4	38,4	0,32
					A3	0,57	28,7	0,02
1/40	69,9	939	1000	10250	A1	10,4	-22,6	0,46
					A2	16,3	31,3	0,52
					A3	0,18	23,2	0,007



$L=500$ mm



$L=750$ mm



$L=1.000$ mm

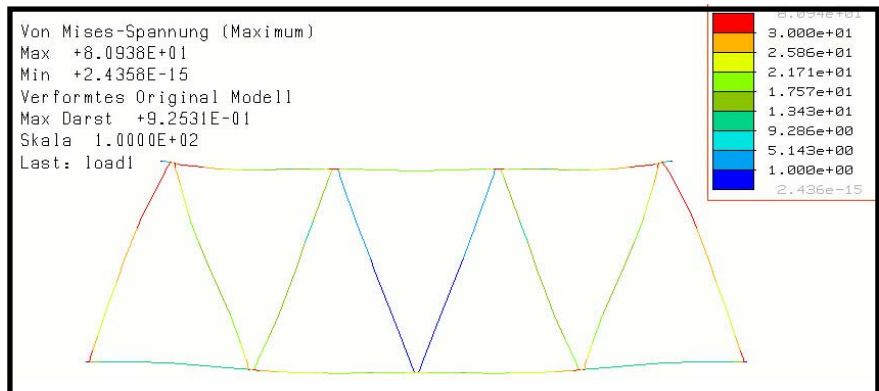


Abb. 7.6: Durchbiegung des Tragwerke bei der Untersuchungsreihe 2

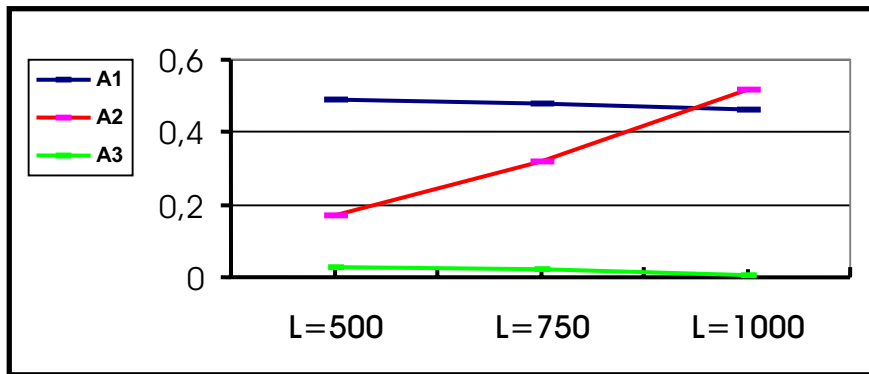
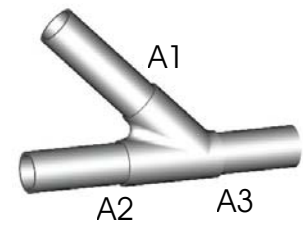


Abb. 7.7: Graphischer Verlauf von $|\sigma_B/\sigma_Z|$

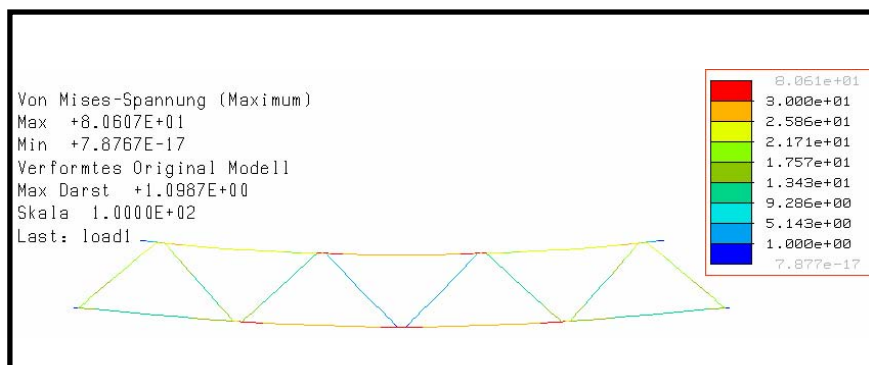
Variable Spannweite SP und Konstruktionshöhe H bei konstantem Verbindungswinkel α und konstanter maximaler Vergleichsspannung nach Mises mit $\sigma_v = 80 \text{ N/mm}^2$

Untersuchungsreihe 3

λ	SP	H	L	F	A	σ_B	σ_Z	$ \sigma_B/\sigma_Z $
1/10	1574	176	250	7500	A1	12,0	-22,2	0,54
					A2	13,3	63,7	0,21
					A3	8,6	47,7	0,18
1/20	2988	353	500	6700	A1	9,7	-19,5	0,50
					A2	9,1	55,5	0,16
					A3	1,8	41,6	0,043
1/30	4402	530	750	6300	A1	9,2	-18,8	0,50
					A2	8,1	53,3	0,15
					A3	0,04	39,9	0,001
1/40	5816	707	1000	6300	A1	8,7	-18,1	0,50
					A2	7,4	51,4	0,14
					A3	8,9	38,5	0,023



- λ Schlankheit $\lambda = \phi/L$
- SP Spannweite
- H Konstruktionshöhe
- L Stablänge
- F Belastung
- A Abgang
- σ_B Biegespannung
- σ_Z Zugspannung



L=250 mm

Abb. 7.8 a: Durchbiegung des Tragwerke bei der Untersuchungsreihe 3

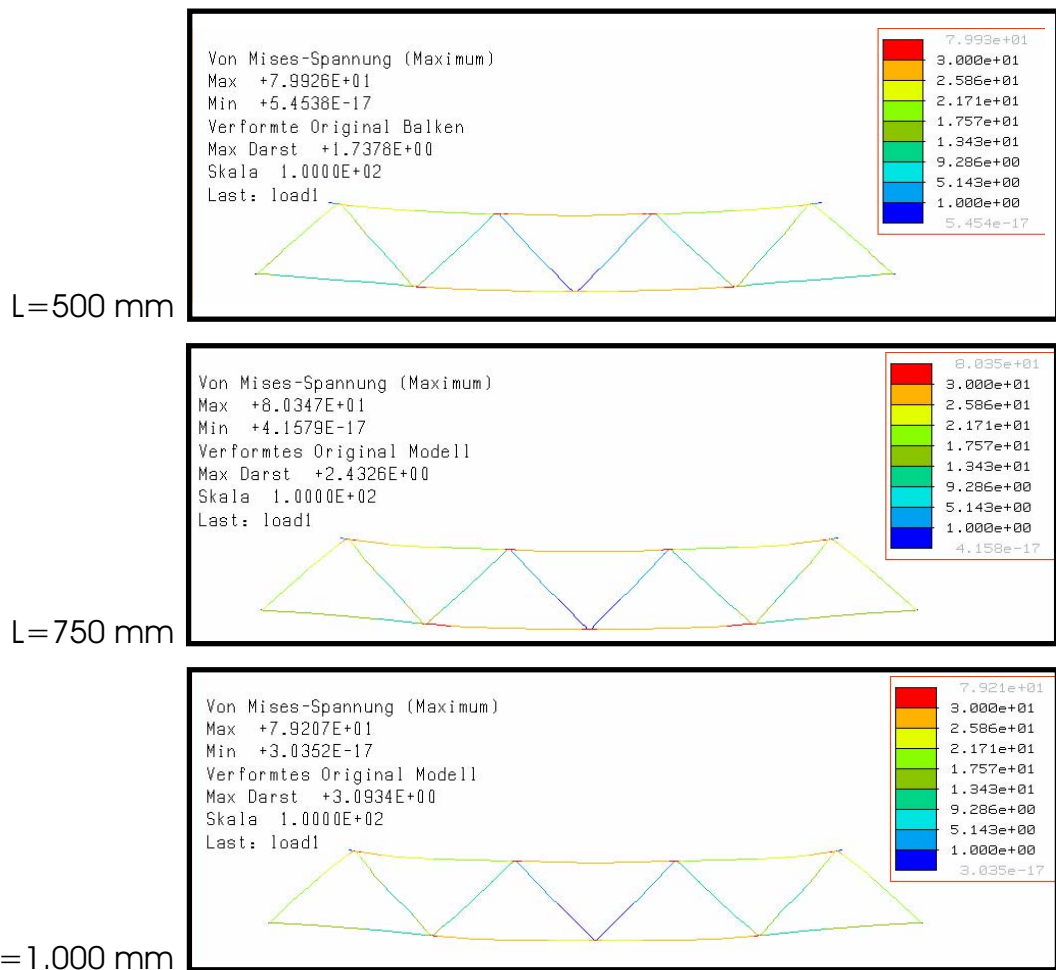


Abb. 7.8 b: Durchbiegung des Tragwerke bei der Untersuchungsreihe 3

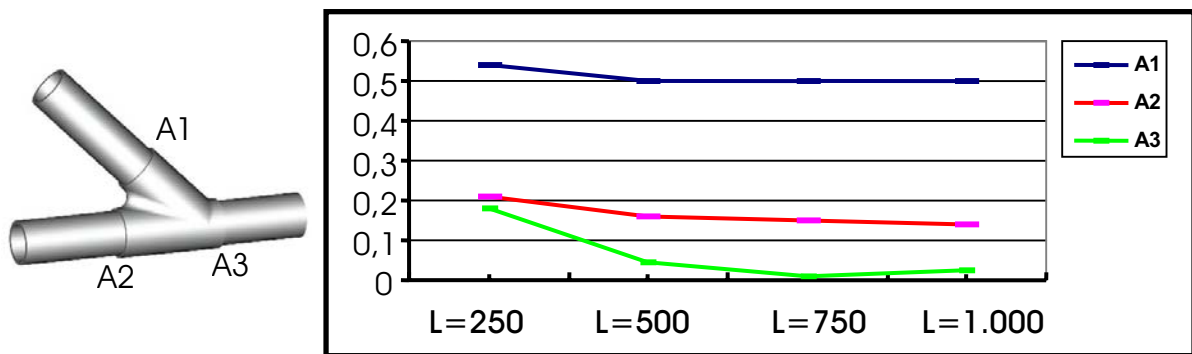


Abb. 7.9: Graphischer Verlauf von $|\sigma_1/\sigma_2|$

Ergebnisse der Untersuchungen

Durch diese Untersuchung wurde in Übereinstimmung mit der klassischen Fachwerktheorie deutlich, dass mit länger werdenden Stäben die Mises Vergleichspannungen im Fachwerk abnehmen.

Das Verhältnis von Biege- zu Zugspannung $|\sigma_b/\sigma_z|$ nimmt bei längeren Stäben jedoch nur geringfügig ab.

Mit wachsendem Verbindungswinkel (Untersuchungsreihen 1 und 2) nimmt dieser Wert am Abgang A2 deutlich zu. Dies liegt daran, dass sich der wachsende Verbindungswinkel dem rechten Winkel von 90° annähert, womit die kraftaufspaltende Vektorwirkung an den Verbindungsstellen abnimmt und der Belastung über den Biege­widerstand im tragenden Querschnitt standgehalten wird.

Die Berechnungen bei Untersuchungsreihe 1 und 2 liefern zwar wie erwartet unterschiedliche Spannungswerte, jedoch stimmen die Verhältnisse $|\sigma_b/\sigma_z|$ erstaunlich gut überein.

Dafür, dass die Knotenverbindungen steif sind und die Strukturen mit 80 N/mm^2 spürbar belastet werden, ist der Biegeanteil insgesamt vertretbar. Dieser ist bei Abgang A1 etwas höher. In einigen Fällen ist er sogar kaum vorhanden.

**Optimierte
Berechnungsmethodik**

Wie durch das Beispiel des Roboterarms deutlich wurde, sind detaillierte Finite-Elemente-Analysen von Strukturen mittels Volumenelementen zeitlich und computertechnisch sehr aufwändig. Nicht immer stehen mehrere Monate und einen Großrechner für die Untersuchung einer einzelnen Struktur zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nach einer praktikableren Methode gesucht, um eine Struktur in einem annehmbaren zeitlichen Rahmen und dennoch zuverlässig entwerfen und ihre Tragfähigkeit berechnen zu können.

Die Lösung dieser Aufgabe wurde in einer angepassten Finite-Elemente-Modellierung mittels starr (nicht gelenkig) miteinander verbundener Balkenelemente gefunden.

Ein Balkenelement ist ein steifes, linienförmiges, finites Einzelelement, das in der Lage ist, Zug-, Druck-, Biege- und Torsionskräfte anzuzeigen.

Dem Balkenelement wird ein Querschnitt zugewiesen. Anders als beim Volumenelement, ist beim Balkenelement nicht die tatsächlich behandelte Geometrie sichtbar, wie beispielsweise ein Rohr oder ein Vierkantprofil, sondern lediglich eine Linie. Dementsprechend einfach sind auch die entstehenden Spannungsverläufe, eben nur entlang der Linien (Vgl. Abb. 7.4 bis 7.8).

Bei der Modellierung der Rohre und Verbindungsknoten mittels Balkenelemente wird für jedes Stück mit unterschiedlichem Querschnitt ein gesondertes Balkenelement mit den entsprechenden Querschnittsgrößen definiert und eingesetzt. Es entstehen so hauptsächlich drei unterschiedliche Querschnittstypen, je nachdem, welche Bauteile an der entsprechenden Stelle vorliegen und eine tragende Funktion ausüben. An manchen Stellen ist es nur der Querschnitt eines Verbindungsknotens, an anderen Stellen trägt auch das innen geführte und verschweisste Rohr mit. Dies wird durch unterschiedliche Balkenelemente mit

entsprechenden Längen und Querschnitten berücksichtigt (Abb.7.10).

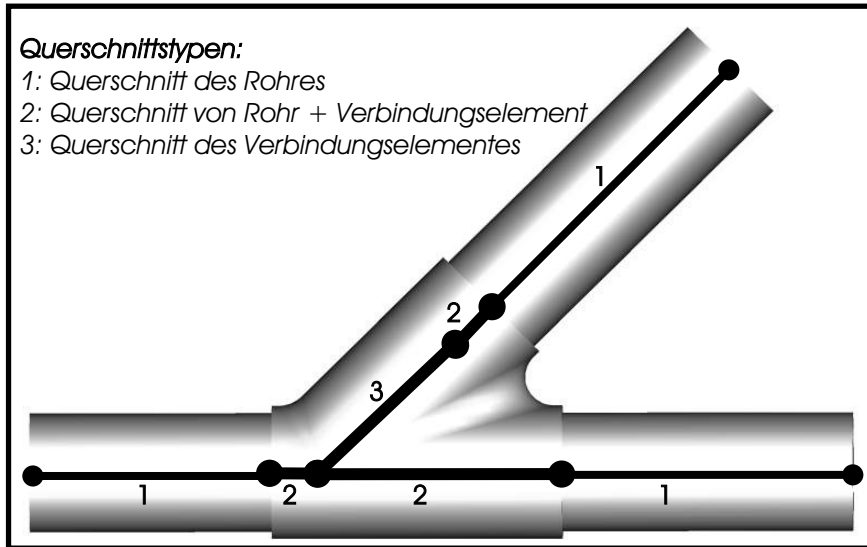


Abb. 7.10: Ersatzsystem zur angepassten Modellierung einer 45°-Verbindung mit Balkenelementen

Um die Zuverlässigkeit dieser neuen Berechnungsmethodik zu überprüfen, wurde ein Vergleich mit einer realen Struktur vorgenommen.

Mit den nach dem Roboterprojekt und der Elementenprüfung verbliebenen Verbindungselementen wurde ein erster prototypartiger Raumfachwerkträger gebaut. Dieser besteht aus drei verbundenen räumlichen Fachwerkeinheiten. Die Abmaße lauten: Länge: 3 m, Breite: 1 m, und Höhe: 0,7 m.

Vergleich zwischen Versuch und Rechnung

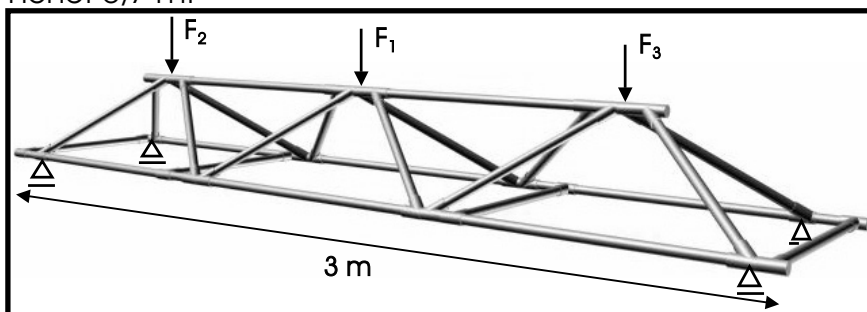


Abb. 7.11: Geprüfter Raumfachwerkträger

Das Tragwerk ist an beiden Enden einwertig, d.h. nur nach unten gestützt, gelagert. Es fanden zwei Untersuchungsreihen statt, einmal mit einer einzelnen mittigen Kraft F_1 von 3.000 N. Daraufhin wurden an den drei oberen Knotenpunkten drei gleiche Kräfte von jeweils 1.000 N in die Struktur gleichzeitig eingeleitet.

Das Fachwerk wurde im neuen Prüfstand quer zur Längsachse zwischen den Säulen eingebaut.

Über eine speziell konstruierte Umlenkvorrichtung wurden mit dem oberen Biegezyylinder kontrollierte Kräfte mittig in das Fachwerk eingeleitet.

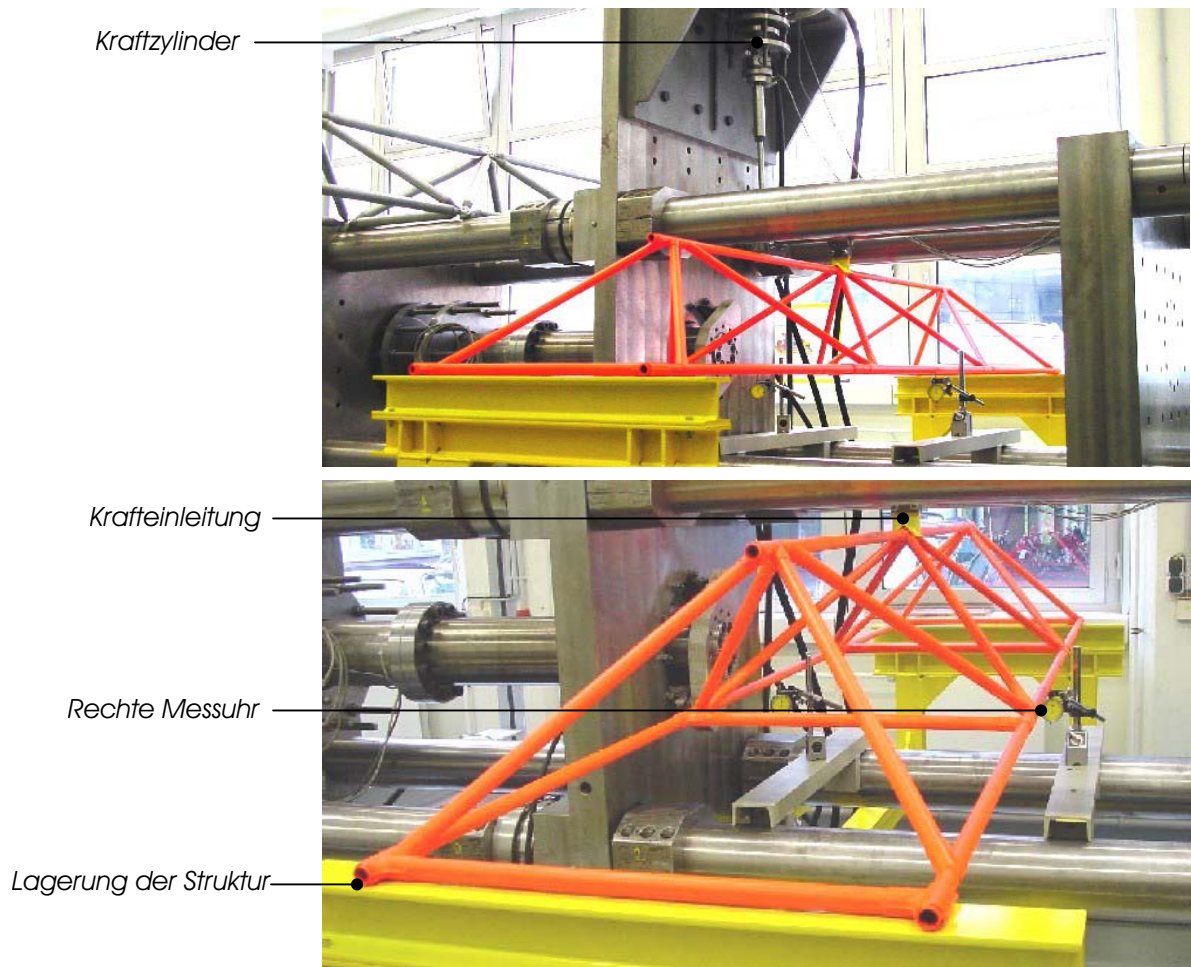


Abb. 7.12: Im Prüfstand eingebaute Struktur

In der Mitte der Struktur wurde mit Mikrometeruhren die Durchbiegung gemessen. Diese Größe wurde als Maß für

die Tragfähigkeit des Fachwerkes und als Vergleichsgröße mit den FEM-Berechnungen genommen.

Parallel zur der Strukturprüfung fand die Strukturberechnung mit der neuen Methode statt. Die Ergebnisse sind in Abb. 7.13 mit dem Vergrößerungsfaktor 100:1 dargestellt.

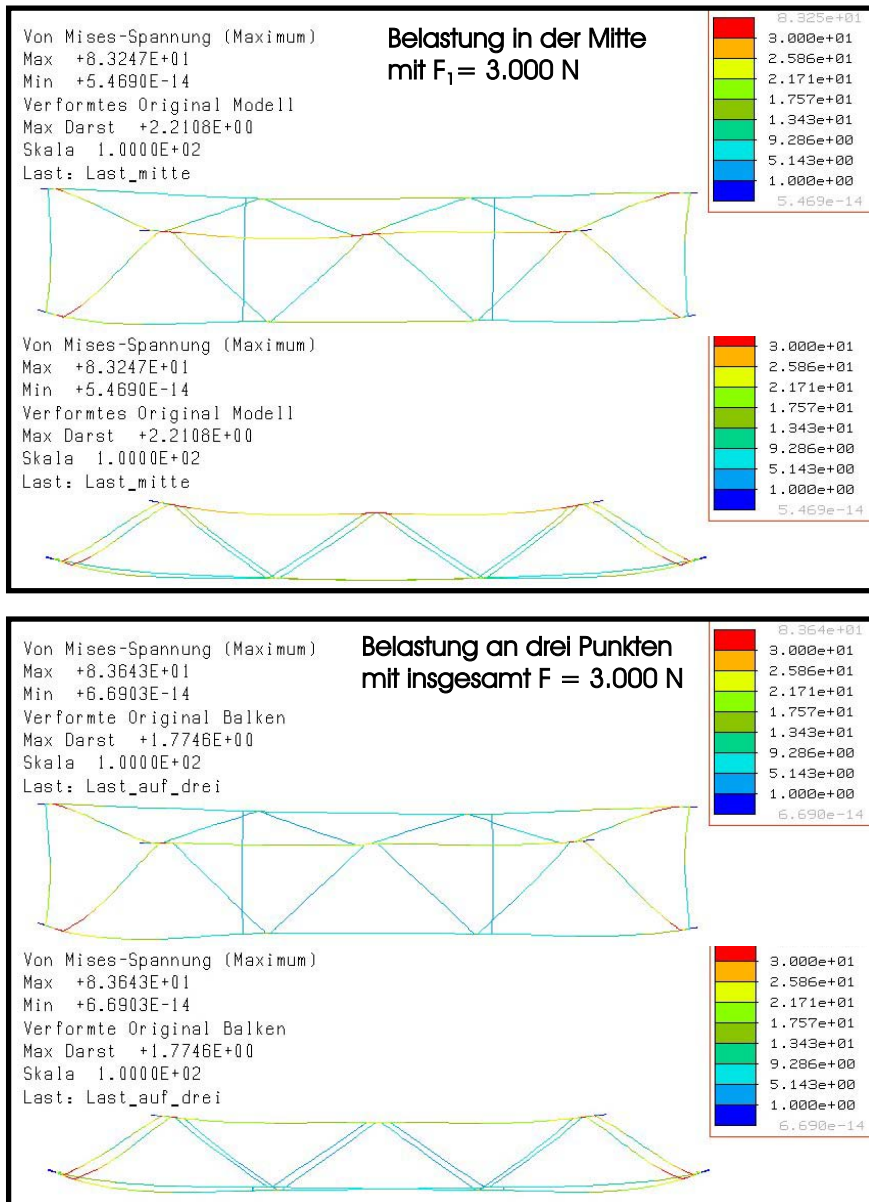


Abb. 7.13: Spannungs- und Verformungsbilder für eine und drei Lasten

Die FEM-Analysen ergaben in der Strukturmitte maximale Durchbiegungen von 1,765 mm beim Einpunktversuch und 1,475 mm bei der Dreipunktbelastung mit insgesamt 3 kN. Bei der mechanischen Strukturprüfung wurden die

entsprechenden Werte mit 1,785 mm und 1,377 mm gemessen. Dies bedeutet eine erfreulich gute Übereinstimmung zwischen Rechnung und Versuch.

Die neue Berechnungsmethodik liefert somit zuverlässige Richtwerte für die Arbeiten im Entwurfsstadium von Strukturen.

Verbindungs- technologien

Eine erste grundsätzliche Unterscheidung im Hinblick auf die Verbindung von Strukturelementen besteht darin, ob die Verbindungen lösbar oder unlösbar sein sollen.

Es wird in den Ingenieurwissenschaften weiterhin zwischen den in Abb. 7.14 aufgeführten drei Verbindungsmöglichkeiten von Bauteilen unterschieden:

Verbindungen von Bauteilen		
formschlüssig	reibschlüssig	stofflich
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Stift/Bolzen/Schraube ▪ Schwalbenschwanz ▪ Niete 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schraube ▪ Pressung ▪ Keil 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Schweißen ▪ Löten ▪ Kleben

Abb. 7.14: Verbindungsarten von Bauteilen

Das hier betrachtete System zielt in erster Linie nicht auf temporär aufgebaute, sondern auf dauerhafte Bauwerke hin. Aus diesem Grund wurden lösbare Verbindungen, z.B. durch Schrauben oder Stifte, nicht näher betrachtet.

Beim vorliegenden Tragwerk-System müssen zwei unterschiedliche Verbindungen verwirklicht werden.

Zum Einen sind die Knotenelemente auf den durchgehenden Stangen sicher zu fixieren und zum Anderen müssen die Verbindungsstangen mit den Abgängen der Knotenelemente verbunden werden (Abb. 7.15).

Zwar bestehen bei beiden Verbindungsarten Überlappungslängen zwischen den Stangen und den Knoten(abgängen),

diese Längen sind jedoch sehr verschieden. Beide Verbindungsarten werden zudem unterschiedlich belastet.

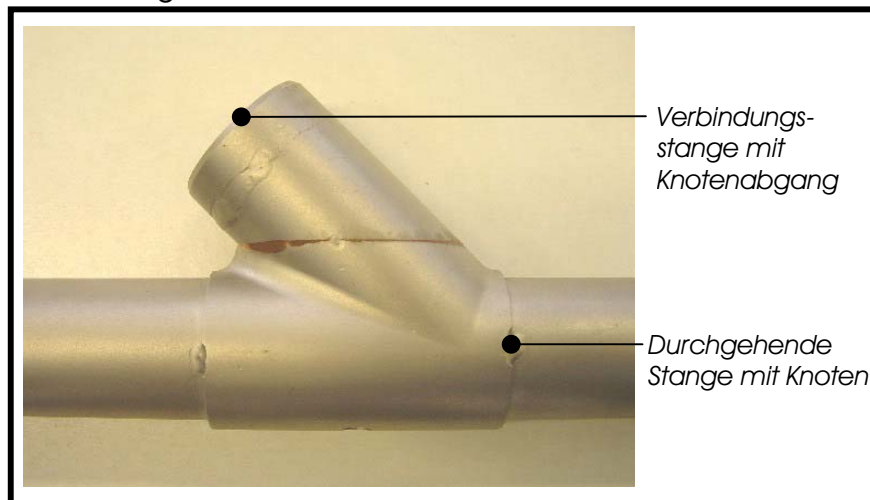


Abb. 7.15: Verbindungen an Knoten

Bei der ersten Verbindungsart (Element auf durchgehender Stange) kann je nach Tragwerk die aus konstanten und variablen Lasten bestehende Gesamtbelastung eine Verdrehung oder Verschiebung der Knotenelemente um und/oder entlang der durchgehenden Stangen bewirken. Da die Knotenelemente jedoch auch bei Verschiebung oder Verdrehung weiterhin auf den durchgehenden Stangen bleiben, erscheint dieser Fall als nicht kritisch für die Sicherheit der Struktur. In einem solchen Fall kann die Verbindung durch Nachschweissen wieder hergestellt werden.

Von größerer Wichtigkeit ist jedoch der zweite Typ der Verbindungen, und zwar zwischen den Knotenelementabgängen und den Verbindungsstangen.

Je nach Tragwerk und Position im Tragwerk wird sie auf Zug oder auf Druck belastet und kann bei Versagen die Sicherheit der Struktur gefährden. Besonders kritisch ist die Belastung in Zugrichtung, weil sich in diesem Fall die Elemente vollständig voneinander lösen können.

Da jedoch bei in der Praxis verwendeten Stab-Knoten-Tragwerken das gleiche Problem gelöst werden muss, sollte

hier auf in der Praxis bewährte Verbindungsverfahren zurückgegriffen werden.

Im Detail ist der Spalt zwischen den Verbindungselementen und den Stangen von Bedeutung.

Die erforderliche Spaltgröße wird auch von der Wahl der angewendeten Fügetechnologie bestimmt.

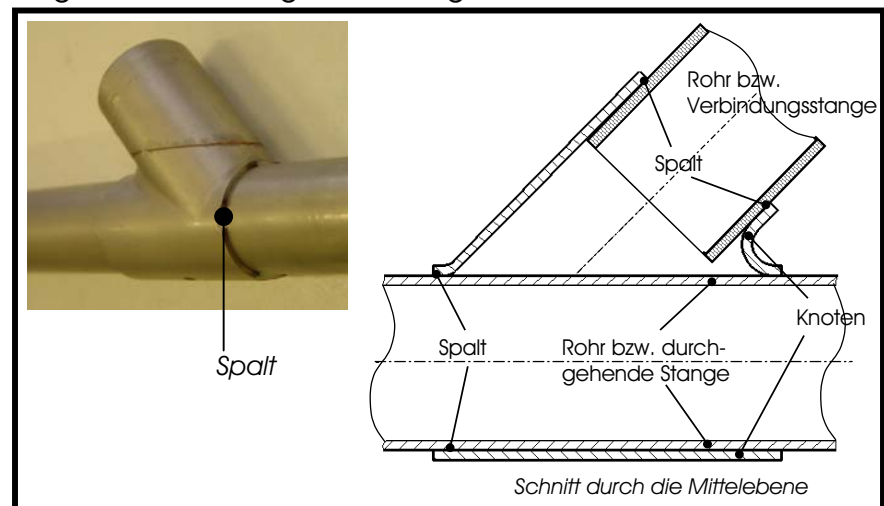


Abb. 7.16: Spalte zwischen den Stangen und dem Verbindungselement

Da Stahlrohre vom Werk her eine Unrundheit in der Größenordnung bis $\pm 0,2$ mm aufweisen und diejenige der Verbindungselemente mindestens auch in dieser Größenordnung liegt, ist die Spaltgröße zwischen den Bauteilen über den Umfang variabel. Um die Elemente einfach über die Rohre schieben zu können, muss deshalb bei der Wahl der Durchmesserpaarung auf jeden Fall ein genügend großer Spalt, z.B. in der Größe der doppelten herstellungsbedingten Unrundheit, vorgesehen werden.

Schweißen Für eine dauerhafte Verbindungen zwischen metallischen Bauteilen werden in der Praxis am häufigsten standardisierte Schweissverfahren angewendet.

Die Standardisierung betrifft einmal das Schweissverfahren selbst und zum Zweiten die maschinentechnische Anwendung des Schweissverfahrens. Bei kreisförmigen Verbindungen in großer Anzahl kommt insbesondere das

halbautomatische Orbitalschweissen in Betracht. Als Schweissverfahren kommt hierbei das WIG (Wolfram inert Gas)-Schweissen zur Anwendung.

Beim WIG-Schweissen entsteht durch eine angelegte hohe elektrische Spannung zwischen der spitzen Wolfram-Elektrode des Schweissgerätes und dem Bauteil ein Lichtbogen.

Dieser Lichtbogen mit seinem hohen örtlichen Energieinhalt schmilzt die miteinander zu verbindenden Bauteilkonturen an und schweisst sie zusammen. Da sich der in der Luft enthaltene Stickstoff negativ auf die Qualität der Schweissung auswirkt, wird durch Zufuhr eines inerten Gases während des Schweissprozesses eine Schutzatmosphäre für das Schweissbad geschaffen.

Neben den guten Automatisierungsmöglichkeiten des Verfahrens ist seine Fähigkeit zur Kompensation gewisser Fertigungsungenauigkeiten (Spalt) ein großer Vorteil. Dies wird über die Zufuhr von sogenanntem „Fülldraht“ während des Schweissprozesses geregelt. Wird der Spalt zwischen den zu verbindenden Bauteilen größer, wird entsprechend Fülldraht hinzugeführt und mitverschmolzen.

Das Problem des variablen Spaltes zwischen den hier betrachteten rohrförmigen Bauteilen über den Umfang kann z.B. mit der Einstellung einer konstanten geringen Drahtzugabe während des Schweissens angegangen werden.

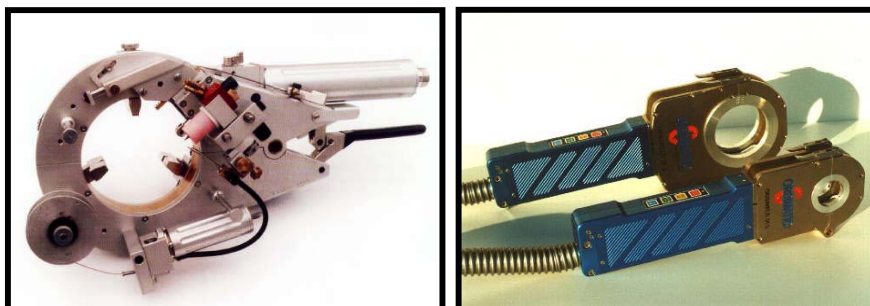


Abb. 7.17: Offene und geschlossene Orbitalschweisszange der Firma Orbimatik GmbH [65]

Die maschinelle Orbitalschweissung selbst besteht in der genauen manuellen Positionierung der Schweißzange an der Verbindungsstelle und dem anschließenden vollautomatischen Abfahren des gesamten Rohrumfangs durch die WIG-Elektrode (+Fülldraht) und den gezündeten Lichtbogen. Der Schweißprozess einer Verbindung kann weniger als eine Minute dauern. Hersteller von Orbital-schweißgeräte sind unter anderem die Firmen Orbimatik, Messer Polysoude, ESAB oder AML.

Schraubverbindungen Aus bestimmten Gründen, die beispielsweise mit einer Rationalisierung der Montagearbeiten zu tun haben können, oder mit der Lösbarkeit der Verbindung, werden Hohlprofile vielfach miteinander verschraubt.

Da die direkte Verschraubung von Hohlprofilen aufgrund der sehr schlechten Zugänglichkeit in inneren der Profile sich sehr schwierig gestaltet, werden an die Profile Stege und Flansche als Kopf- oder Verschlussbleche verschweisst, an denen die eigentlichen Schraubverbindungen stattfinden. Diese Schweißarbeiten finden in der Werkstatt statt, während auf der Baustelle die vorbereiteten Komponenten in kurzer Zeit montiert und verschraubt werden können.

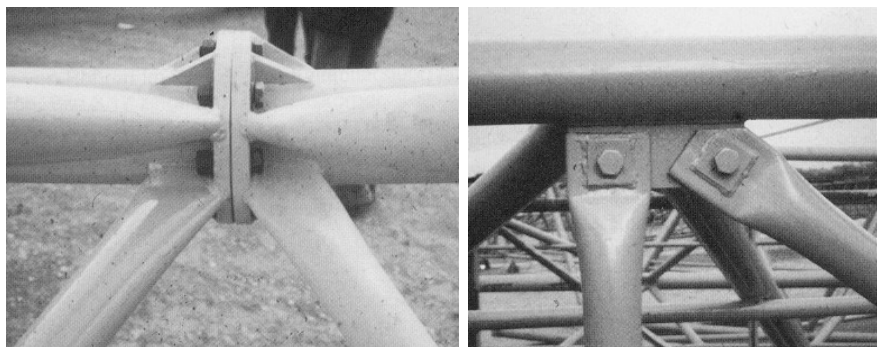


Abb. 7.18: Verschraubte Rohrverbindungen [60]

Hohlprofile können durch Bolzen oder Stifte auch gelenkig miteinander verbunden werden.

Wie bei Schraubverbindungen sind auch hier vorangehende Schweißarbeiten nötig.

Kombinationen von Verbindungstechniken sind somit sehr üblich, vielfach sogar unumgänglich.

Oft kommt es gerade darauf an, die für den Einzelfall günstigsten Eigenschaften mehrerer Verbindungstechniken an einer Stelle intelligent miteinander zu kombinieren.



Stansted Airport, England [60], [55]

Fertigstellung: 1992

Arch.: Foster & Partners

*Tragwerk: Ove Arup and Partners,
London*

Abb. 7.19: *Kombinationen mehrerer Verbindungstechniken [60], [55]*

Zur Verbindung technischer Bauteile findet das Kleben zunehmend Anwendung. Wenn Leichtbau angestrebt wird, ist auch das geringe Gewicht einer Klebverbindung von Bedeutung. Weitere Gründe für die Wahl des Klebens sind auch die hohen Festigkeitswerte moderner Hochleistungskleber.

Kleben

Für das Kleben kommen besonders Überlappungsverbindungen in Frage, da hierbei die mit dem Kleber benetzbare Fläche, die für die Festigkeit und Sicherheit der Verbindung ausschlaggebend ist, deutlich größer ist als bei einem Stumpfstoß.

Neben der mechanischen Qualifizierung von Klebverbindungen speziell für das vorgestellte Tragwerk-System sind noch weitere Eigenschaften der Klebverbindungen von Bedeutung:

- das Langzeitverhalten der Verbindung
- das Verhalten der Verbindung im Brandfall.

Hinweise auf das Langzeitverhalten von Klebeverbindungen könnten in erster Näherung Untersuchungen an mit den gleichen Klebern und Werkstoffen geklebte Maschinenbau-Komponenten geben.

In Bezug auf den Brandfall ist nachzuweisen, dass die Festigkeitsabnahme der Verbindung im Brandfall nicht unter derjenigen des Baustahls liegt.

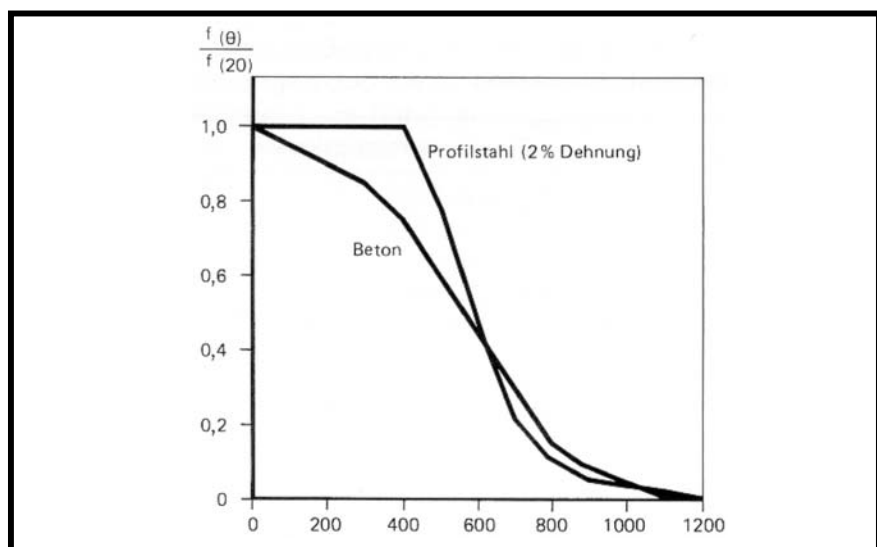


Abb. 7.20: Reduktion der Materialfestigkeiten bei Baustahl und Beton im Brandfall [34, S. 14]

Im Hinblick auf die Verarbeitung stellt das Kleben jedoch große Anforderungen an die Sauberkeit und besonders an die Fettfreiheit der Oberflächen. Beides kann auf Baustellen nicht immer gewährleistet werden.

Die Genauigkeitsanforderungen an die Bauteile, bzw. an den Spalt, sind für das Kleben ebenfalls hoch.

Aufgrund dieser noch weitgehend ungeklärten Fragen wird der Nachweis des Erfüllens der Sicherheits- und Brandschutzvorschriften mit Klebeverbindungen derzeit noch als schwierig angesehen. Daher kommt das Kleben für das hier vorgestellte System noch nicht in Frage.

In ähnlicher Weise wie beim Kleben ist auch beim Löten zum Erreichen einer hochwertigen Verbindung der Bauteile ein über den Umfang recht genau eingehaltener Spalt in der Größenordnung von 0,05 mm erforderlich. Löten

Bei einem zu großen oder zu kleinen Spalt kann sich die notwendige Kapillarwirkung zwischen den zu verbindenden Flächen nicht entwickeln, und das Lot dringt bei der Bauteilerwärmung nicht genügend in den Spalt ein. Bei der anschließenden Abkühlung werden die Flächen der Bauteile nicht oder nur teilweise miteinander verbunden. Fertigungsungenauigkeiten sind deshalb als kritisch anzusehen. Wie beim Kleben sind auch beim Löten weitere qualifizierende Untersuchungen mit einer Variation der Prozessparameter erforderlich.

Bei konventionell geschweissten Hohlprofil-Konstruktionen werden Hohlprofile ohne Zwischenelemente direkt aneinander geschweisst. Bei winkligen Verbindungen von Rundprofilen werden aufwändige Anschlusskonturen an den Profilenden realisiert.

Ökonomische Aspekte

Die Herstellung und Verschweissung dieser Anschlusskonturen macht Schweissverbindungen von runden Hohlprofilen deutlich schwieriger und kostenintensiver als die entsprechenden Verbindungen von rechteckigen Hohlprofilen mit geraden Schnitt- und Schweisskonturen [33].

Die Fertigung der Konturen kann zwar mit moderner CAD-Software sowie CNC-gesteuerten Brennschneidemaschinen rationalisiert werden, die Schweissarbeiten an den

komplexen Verbindungskonturen müssen aber weiterhin meist manuell durchgeführt werden.



Abb. 7.21: Für die Schweissarbeiten vorbereitete Profillenden [60]

Je nach Winkel zwischen den Profilen können schon bei einer Verbindung abschnittsweise unterschiedliche Schweissnähte (Stumpf- oder Kehlnaht) mit entsprechend unterschiedlichen Schweisskanten erforderlich werden [32]. Um Verbindungskonturen über den Umfang folgen zu können, müssen Schweisser bei jeder Verbindung mehrmals ihre Position und die der Schweissgeräte ändern.

Bei Verbindungen mit flachen Winkeln (schon $< 45^\circ$) werden die Schweissarbeiten wegen der eingeschränkten Zugänglichkeit des Brenners im Bereich der Schweissfuge noch zusätzlich deutlich erschwert, erst recht bei komplexen Verbindungen von mehreren Profilen (Abb. 7.22).

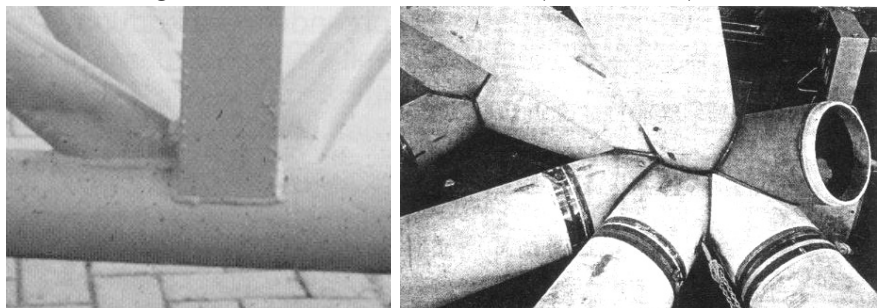


Abb. 7.22: Komplexe Schweissverbindungen von Rohen [60], [57]

Da die Herstellungskosten im konstruktiven Stahlbau primär eine Funktion der Arbeitsstunden an den Konstruktionsteilen sind [33, S.9], ist die günstige Gestaltung der Knotenverbindungen unmittelbar kostenwirksam.

Die wirtschaftlichste schweisstechnische Verbindung zweier Rundprofile ist die gerade Stoss- oder Überlappungsschweißung wie sie beim hier behandelten System an allen Stellen vorliegt.

Die Anschlusskonturen sind an allen Verbindungen dieses Systems immer glatte Schnitte, die mittels Orbital-schweißgeräte rationell verschweisst werden können.

Bei einem Kostenvergleich müssen deshalb die Kosten für die Verbindungselemente beim neuen System den höheren Kosten für die Verbindungsarbeiten bei konventionellen Schweißkonstruktionen gegenübergestellt werden.

Je mehr Verbindungen bei einer Struktur verwirklicht werden müssen, desto deutlicher kommen die ökonomischen Vorteile eines rationellen Bausystems zum Ausdruck.

Beim hier behandelten System ist dies besonders im Zusammenhang mit der Hydroform-Technologie der Fall. Wenn eine Struktur eine geringe Anzahl von Verbindungen aufweist (Abb. 7.23), kann die Einzelfertigung der konventionell geschweißten Konstruktion unter Umständen wirtschaftlicher sein als die Fertigung und der Einsatz spezieller Verbindungselemente.



Abb. 7.23: Struktur mit sehr vielen Verbindungen (Abb. 7.34, 7.35) [60]

*Verwaltungsgebäude der dvv
2000 in Hannover [52], [60]*

Fertigstellung: 1999

*Arch.: Hascher + Jehle mit
Heinle, Wischer & Partner*

*Tragwerk: Weischede, Herrmann
und Partner*

*L: Bank of China, Hongkong [6]
 Fertigstellung: 1990
 Arch.: Pei Cobb Freed
 & Partners
 Tragwerk: LERA Structural
 Engineers, New York*

*R: Expo Lissabon, Portugal [6]
 Arch. und Tragwerk: Skidmore,
 Owings & Merrill, New York*



Abb. 7.24: Strukturen mit wenigen Verbindungen

Weitere Fachwerk-Systeme Die meisten auf dem Markt vorhandenen Tragwerkssystemen basieren auf Kombinationen von Schweiß-, Schraub-, oder Steckverbindungen.

Hohlprofile werden bevorzugt mit Verbindungskomponenten verschweisst, die wiederum mit weiteren Komponenten über Schrauben oder Bolzen verbunden werden.

MERO, KK-System

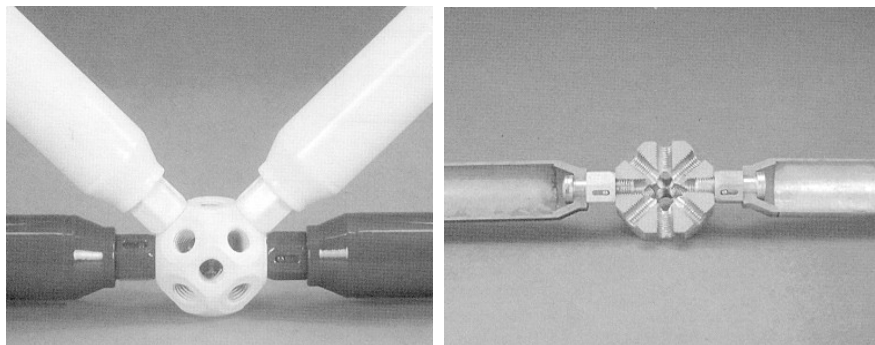


Abb. 7.25: KK-System von MERO [37]

Das Kugelknoten-System (KK-System) der Firma MERO Systeme GmbH & Co. KG ist das weltweit verbreitetste

Fachwerk-System und wurde im Jahre 1937 von Max Mengerlinghausen entwickelt. Es wird seit 1942 als erstes industriell vorgefertigtes Fachwerkssystem eingesetzt.

Es besteht aus der Schraubverbindung von Stäben mit Verbindungswürfeln. Die Würfel, die geschmiedet werden, weisen 18 regelmässige winklige Anschlussfasen mit Bohrungen und Gewinde auf. Die Stäbe verfügen ihrerseits an beiden Enden über Gewindeanschlüsse, die mittels massiver Konusse frei drehbar an den Stäben angebracht sind. Das System ermöglicht die Verschraubung der Stäbe an die Würfel durch Drehen lediglich der Gewindespitze und nicht des gesamten Stabes.

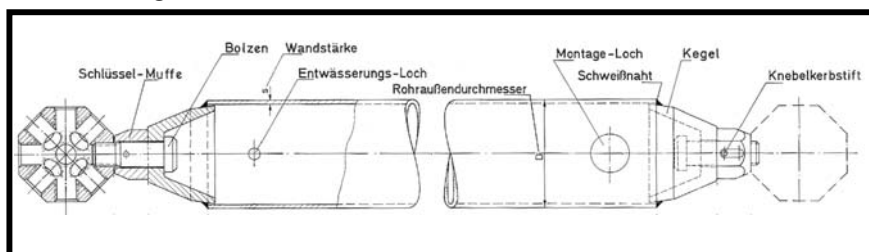


Abb. 7.26: Schnittansicht des KK-Systems [35]

Besonders auffällig ist jedoch, dass ein Standard Systemstab mit 42 mm Aussendurchmesser und 1,5 mm Wandstärke an beiden Enden mit jeweils einem durchgebohrten Gewindestift mit lediglich 12,5 mm Durchmesser mit dem KK-Würfel verbunden wird (Abb. 7.27).

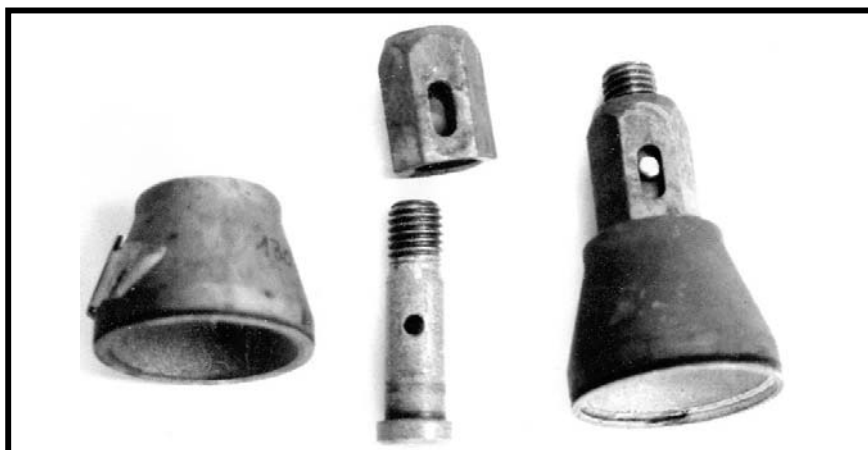


Abb. 7.27: Bestandteile eines Rohres des KK-Systems

Der Gewindeanschluss des Systemstabes hat, wenn man den deutlich reduzierten Querschnitt des Bolzens und den spannungsmechanischen Einfluss der Durchbohrung mit einer Kerbwirkungszahl β_k [38, S.46 ff] berücksichtigt, bei Zugbelastung eine Tragfähigkeit von nur rund 9,8% der Tragfähigkeit des Rohres.

Neben der erhöhten Anzahl der Schweißverbindungen, auch längs der höchst belasteten Lastpfade, stellen die Gewindebolzen deutliche Schwachstellen der sonst recht massiv dimensionierten Systemkomponenten dar.

MERO, NK- und
TK-System

Neben dem KK-System führt die Firma MERO weitere Systeme zum Aufbau von Hohlprofil-Tragwerken in ihrem Produktprogramm, die hauptsächlich bei Dach- und Fassadenkonstruktionen zu Einsatz kommen.

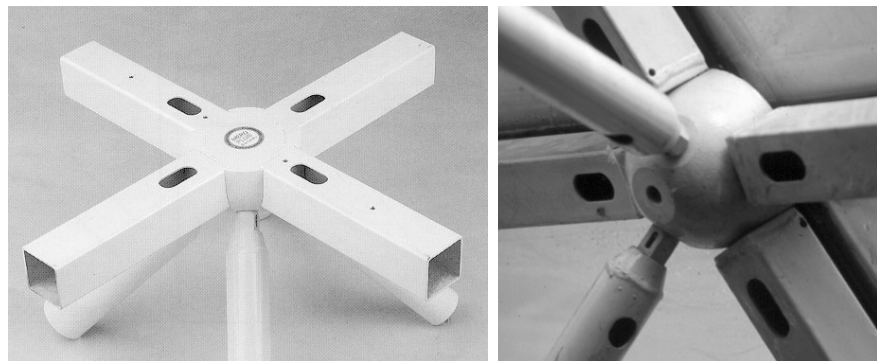


Abb. 7.28: NK-System von MERO [37]

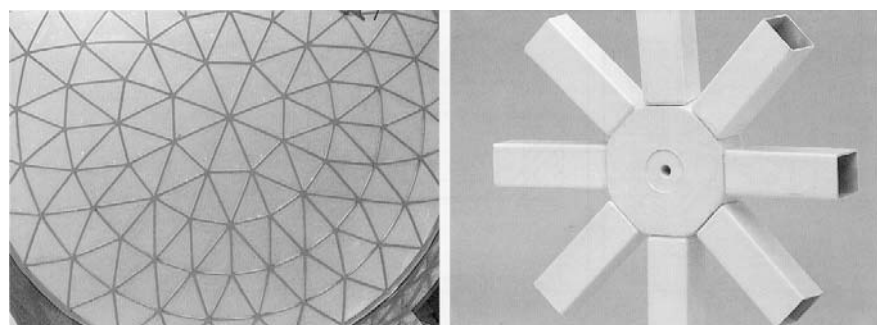


Abb. 7.29: Kuppel mit dem TK-System, TK-Systemkomponenten [37]

Die flachen Seiten der NK- und TK-Komponenten eignen sich besonders gut zur Befestigung von Glaselementen oder weiterer Ebener Dach- und Fassadenverkleidungen.

Der Aufbau des Fachwerksystems der Firma Züblin AG Züblin-System gleicht dem des KK-Systems von MERO. Anstelle von Würfeln werden beim Züblin-System Kugeln verwendet.

Diese werden an den gewünschten Stellen mit Bohrungen und Gewinde versehen. Es sind deshalb beliebige Anschlusswinkel möglich. Die Stäbe weisen auch bei diesem System drehbare Gewindeanschlüsse auf. [39]

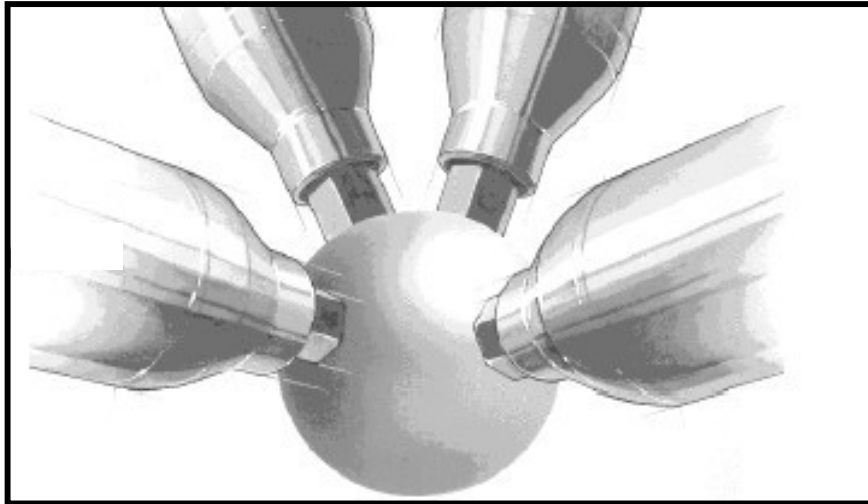


Abb. 7.30: Fachwerk-System von Züblin [39]

Auch das Krupp-Montal-System der Firma Krupp Stahlbau Hannover weist die Aufbauweise des KK-Systems von MERO auf. Krupp Montal-System

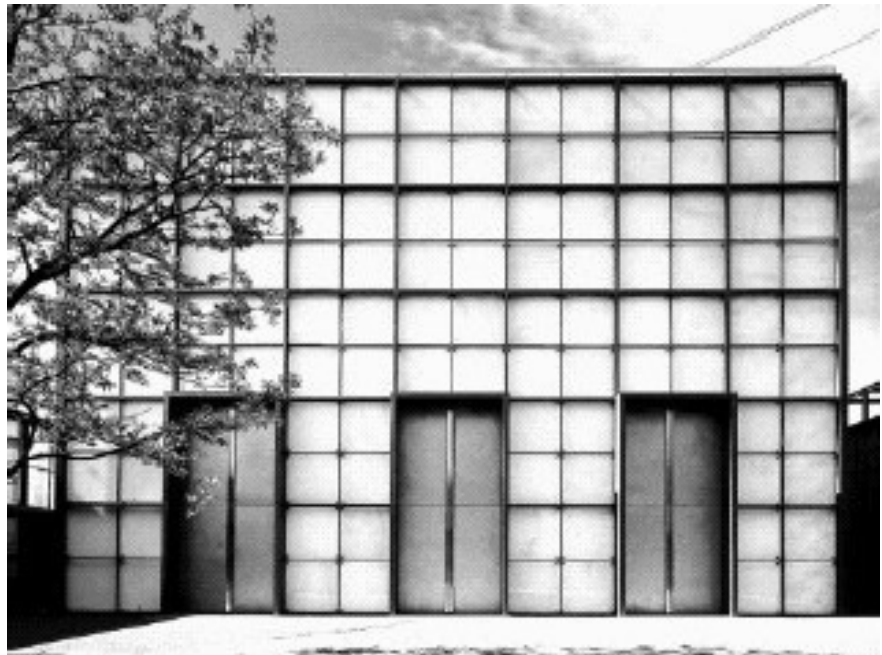
Es handelt sich hierbei auch um Schraubverbindungen zwischen einem Hohlprofil mit Schraubenanschluss in Konusform und einem Kugelkopf mit entsprechendem Gewinde an den Anschlussfasen .



Abb. 7.31: Fachwerk-System von Krupp-Montal [71]

Das Sigma-Knoten-System Beim Tragwerk-System mit Sigma-Knoten handelt es sich um eine Steck- und Stiftverbindung von viereckigen Hohlprofilen (Abb. 7.33).

Zum ersten mal kam dieses System zur Anwendung beim Christus-Pavillon auf der EXPO 2000 in Hannover, wodurch es bekannt geworden ist (Abb. 7.32).



*Christus-Pavillon [47], [51]
Fertigstellung: 2000
Arch.: gmp von Gerkan,
Marg + Partner
Tragwerk: Büro Dr. Ing. W.
Binnewies*

Abb. 7.32: Christus-Pavillon auf der EXPO 2000 [47]

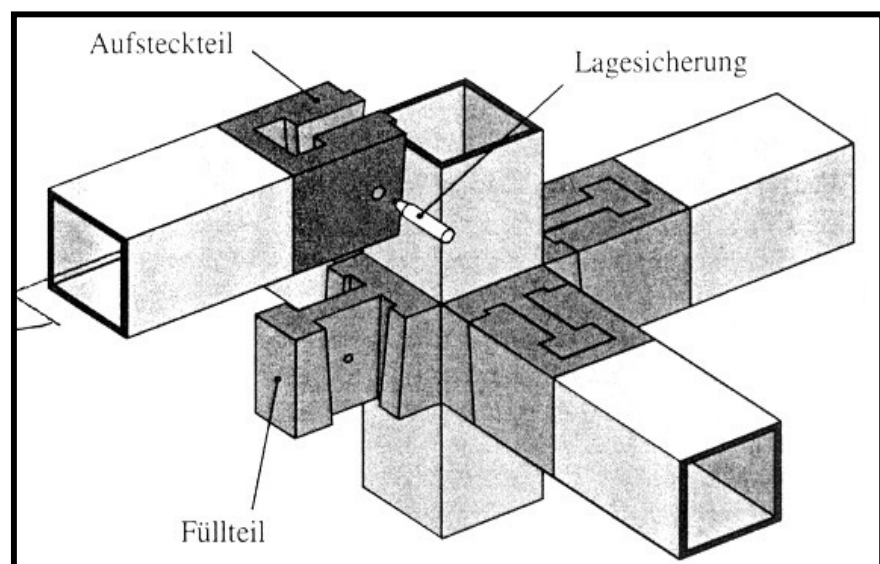
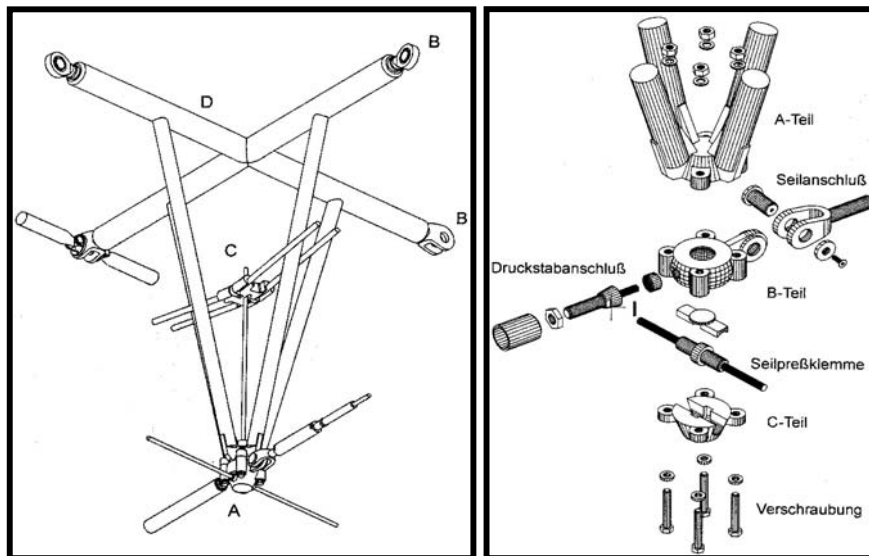


Abb. 7.33: Verbindungen von Hohlprofilen mit Sigma-Knoten [51]

Die keilförmige Verbindung ist durch Formschluss in der Lage, Normal-, Quer- und Biegekräfte aufzunehmen.

Die Füll- und die Aufsteckteile der Verbindungen sind keine hohlen Elemente, sondern gegossen oder aus Vollmaterial gefräst. An diese Verbindungselemente werden rechteckige Hohlprofile angeschlossen.



Das Triax-Tragsystem

Abb. 7.34: Räumliches Fachwerkelement des Triax-Tragsystems und untere Konstruktion zum Anschluss unterer Gurtstäbe [60]

Das Triax-Tragsystem verfolgt eine gänzlich verschiedene Aufbauphilosophie als alle bisher behandelten Systeme.

Es besteht aus gelenkig verbundenen stählernen räumlichen Fachwerkelementen. Diese weisen als oberer Gurt ein rechtwinkliges Kreuz aus zwei runden Hohlprofilen, als Füllstäbe vier im unteren Gurt zusammenlaufende schlanke Stäbe und eine untere Anschlusskonstruktion für die sehr schlanken unteren Gurtstäbe (Abb. 7.35).

An jedem Fachwerkselement wird gelenkig ein weiteres angeschlossen.

Über die Längen der unteren Gurtstäbe kann eine winkelige Verbindung der Elemente und damit eine Krümmung im Fachwerk erzeugt werden (Abb. 7.23).

Die bekannteste Anwendung des Triax-Tragsystems ist das Dach des Gebäudes der Gesellschaft dvg in Hannover.



Abb. 7.35: Tragkonstruktion am Dach der dvg in Hannover [60]

Weitere Im Laufe der Jahrzehnte sind eine Reihe weiterer Systeme zur
Tragwerk-Systeme Realisierung von Stab-Tragwerken vorgeschlagen worden.
Die meisten von Ihnen konnten sich jedoch in der Praxis bis
heute nicht auf breiter Basis durchsetzen. Deshalb wird an
dieser Stelle lediglich ein Überblick über solche Lösungs-
ansätze gegeben, ohne diese Systeme und ihre Funktions-
weisen detailliert zu beschreiben.

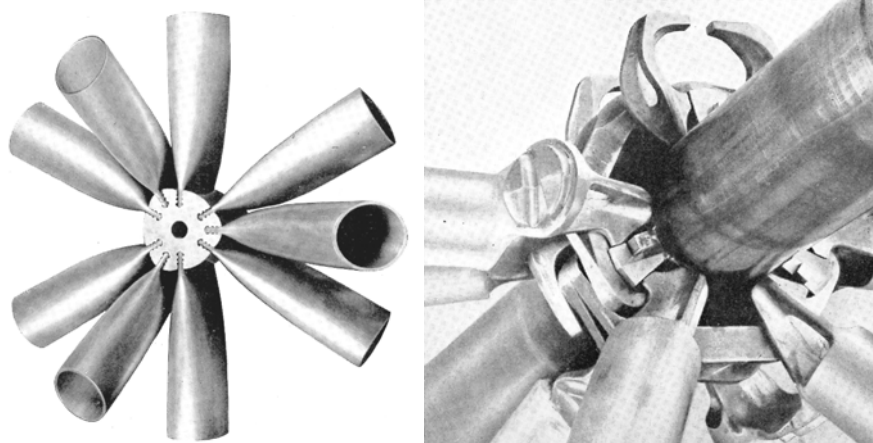


Abb. 7.36 a: Beispiele für Tragwerk-Systeme und Verbindungselemente aus der Vergangenheit und in der Gegenwart [22]

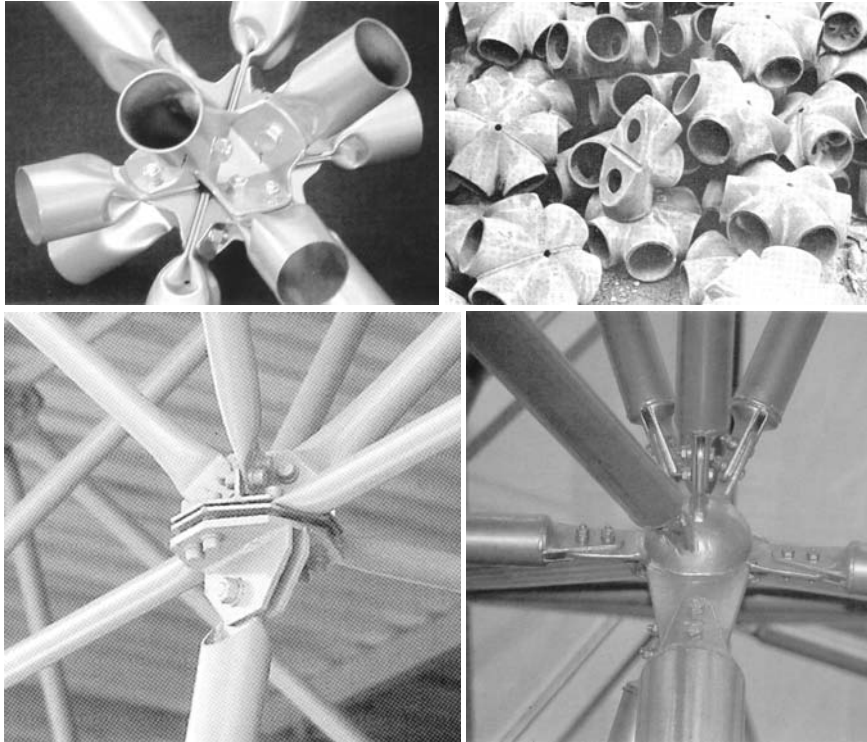


Abb. 7.36 b: Beispiele für Tragwerk-Systeme und Verbindungselemente aus der Vergangenheit und in der Gegenwart [8], [22]

8. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde im Rahmen des Teilprojektes A7 „Leichtbaufertigung von Roboterarmen“ des Sonderforschungsbereichs 291 mit dem Titel „Elastische Handhabungssysteme für schwere Lasten in komplexen Systemen“ eine neuartige Konstruktionsmethode für Stab-Tragwerke aus metallischen Hohlprofilen entwickelt.

Herausragendes Merkmal dieses neuen Aufbausystems ist die Zurückführung komplexer Strukturen auf wenige unterschiedliche Verbindungselemente, die sehr rationell mit der Hydroform-Technologie gefertigt werden können.

Es wurden umfangreiche Optimierungsarbeiten an den Stab-Knoten-Strukturen und an den Einzelelementen mittels CAD und FEM durchgeführt.

In Rechnung und Versuch zeigte die entwickelte Roboterarm-Struktur eine ausserordentlich hohe Belastbarkeit. Aufgrund der positiven Ergebnisse erfolgte eine internationale Patentanmeldung.

Die entwickelte neue Tragwerk-Systematik hat eine weit über den Maschinenbau hinausgehende Bedeutung im Bereich der Architektur. Aus diesem Grund sollten in der vorliegenden Arbeit architektonische Aspekte beim neuen Tragwerksystem umfassend herausgearbeitet werden.

Einerseits werden durch die klassische Zusammenführung mehrerer Stäbe aus unterschiedlichen Richtungen an gemeinsamen Verbindungspunkten Biegemomente vermieden. Auf der anderen Seite entstehen auf diese Weise komplexe, vielfach unterschiedliche Verbindungsstellen.

Bei der neuen Systematik für Stab-Tragwerke bestehen alle Verbindungen aus hintereinander positionierten möglichst einheitlichen Verbindungselementen mit vorzugsweise einem Abzweig. Diese werden auf durchgehenden Stangen zu den benötigten Stellen geschoben, in die Richtung des

benötigten jeweiligen Abzweigs ausgerichtet und in der endgültigen Position fixiert.

Bei diesem neuen Tragwerk-System ergeben sich dadurch zwei kennzeichnende Strukturmerkmale, die vom „idealen“ Fachwerkaufbau divergieren:

- Geometrisch ergibt sich ein Versatz der Achsen der einzelnen Abzweige an den Verbindungsstellen. Diese Erscheinung ist von konventionellen Schweisskonstruktionen mit Hohlprofilen her bekannt. Zur Dimensionierung der Strukturen stehen hier die anerkannten Richtlinien der internationalen Vereinigung CIDECT zur Verfügung.
- Spannungsmechanisch strebt dieses neue System keine gelenkigen, sondern im Gegenteil, möglichst (biege-) feste Verbindungen zwischen den Stäben an. Die Verbindungselemente wurden deshalb ausser für den Zug- und Druckfall auch gezielt auf Biegebelastungen ausgelegt und diesbezüglich gestaltoptimiert. Im Vergleich zu konventionellen Rohrverbindungen wurde damit die Tragfähigkeit für verschiedenste Belastungsfälle im Schnitt verdoppelt. Diese hohe Standhaftigkeit der Verbindungen auch gegenüber Biegung ermöglicht zusätzlich die Realisierung von schnittaktiven Rahmenträgern, also Tragwerke mit komplett anderer Aufbau- und Tragcharakteristik, mit dem gleichen System. Insgesamt verwirklichen diese Verbindungselemente das Bestreben im Stahlbau nach standardisierten und möglichst stabilen und sicheren Verbindungen zwischen Hohlprofilen, sogenannte „full strength joints“ [9, 45].

Die rationelle Anwendung von Tragwerksystemen setzt jedoch eine gewisse geometrische Regelmässigkeit der zu realisierenden Strukturen voraus. Im allgemeinen gilt deshalb, dass je regelmässiger eine Struktur ist, desto besser geeignet ist sie für die Anwendung eines Bausystems.

Unregelmässigkeiten bedeuten in diesem Zusammenhang Abweichungen von in einer Struktur wiederholt und konstant vorkommenden geometrischen Größen wie Krümmungsradien oder Winkel.

Betrachtet man die Formen gegenwärtiger Stahlkonstruktionen mit Hohlprofilen, so findet man unter anderem

- ebene, eckige Formen,
- bogenartige, gekrümmte Formen
- und hochgradig unregelmässige Freiformen.

Für den ersten und teilweise für den zweiten Formtyp bietet das entwickelte Tragwerk-System rationelle Realisierungsmöglichkeiten.

Komplexe räumliche Krümmungen und unregelmässige Freiformen sind vielfach erst mit modernen CAD/CAM Werkzeugen darstellbar und führen bereits in konventionell geschweisster Bauweise zu aufwändigen Einzelstückfertigungen weitestgehend unterschiedlicher Komponenten, sogenannte „industrialization in the lot of one“ [10].

Alle Systeme in Natur und Technik funktionieren jedoch innerhalb fallspezifischer Rahmenbedingungen.

Um möglichst wenige unterschiedliche Elementtypen zu benötigen, gestaltet sich deshalb der Entwurf von Strukturen mit dem vorliegenden System innerhalb aufgeführter Richtlinien. Diese nehmen Bezug auf die Regelmässigkeit der Strukturen und führen in dieser Hinsicht alle gängigen vektoraktiven Tragwerktypen (ebene, gekrümmte und räumliche) auf regelmässige Verbindungen und damit einheitliche Verbindungselemente zurück.

Es werden Realisierungsmöglichkeiten für die einzelnen Fachwerktypen aufgezeigt. Innerhalb dieser Rahmenbedingungen sind große Freiheiten bei der Stabanordnung möglich, besonders für ebene und übertragene ebene Fachwerke.

Die Flexibilität des Systems besteht in der fallbezogenen Festlegung der Elementform(en) einschließlich Anzahl und Winkel ihrer Abgänge und in der großen Freiheit bei der Positionierung bzw. Verdrehung der Elemente auf den durchgehenden Stäben.

Diese Vorteile zeigen sich beispielsweise bei der Realisierung von Tragwerken in der Form von Bögen, Wellen und Linsen sowie bei komplexen Fachwerken, die mit bionischen Methoden, wie z.B. Evolutionsstrategien, entwickelt werden. Diese Tragwerke weisen neben signifikanten Vorteilen hinsichtlich eines geringeren Materialeinsatzes auch neuartige Stab-Anordnungen und Formen auf, die stark an natürliche, organische Strukturen erinnern. Neben den objektiven Vorteilen wie geringeres Gewicht entstehen so auch vielfache, interessante und innovative Formvorschläge für den entwerfenden Architekten.

Fertigungstechnisch gesehen ersetzen die Verbindungselemente stets unterschiedliche und komplexe Schweissverbindungen durch immer gleiche glatte, runde und standardisierte Überlappungsschweissungen, dessen Festigkeitsverhalten konstant und bereits durchgehend untersucht worden sind.

Diese vereinfachte Schweissgeometrie bedeutet deshalb eine signifikante Rationalisierung der arbeitsintensiven manuellen Nahtvorbereitungs- und Schweissarbeiten an den Verbindungen durch den Einsatz automatisierter Schweiss-technologien, wie z.B. das maschinelle Orbitalschweissen.

Insgesamt wird im vorgestellten neuen Tragwerk-System ein Beitrag zur systematischen und ökonomischen Realisierung konventioneller aber auch innovativer Hohlprofil-Tragwerke in der Architektur gesehen.

9. Literaturverzeichnis

- [1] Krauss, Franz; Führer, Wilfried; Joachim, Neukäter:
Grundlagen der Tragwerklehre 1, Rudolf Müller Verlag, 8.
Auflage, 1999
- [2] Krauss, Franz; Führer, Wilfried; Willems, Claus-Christian:
Grundlagen der Tragwerklehre 2, Rudolf Müller Verlag, 5.
Auflage, 2000
- [3] Krauss, Franz; Führer, Wilfried; Jürges, Thomas: Tabellen zur
Tragwerklehre, Rudolf Müller Verlag, 7. Auflage, 1999
- [4] Engel, Heino: Tragsysteme / Structure Systems, Verlag Gerd
Hatje, 2. Auflage, 1999
- [5] Spies, Karl: Konstruktives Entwerfen im Hochbau. Von der
Grundrissdisposition zum Tragwerk. Dissertation an der Uni-
versität Stuttgart, Karl Krämer Verlag, 1982
- [6] Cerver, Fransisco Asensio: Zeitgenössische Architektur, Köne-
mann Verlagsgesellschaft, 2000
- [7] Gympel, Jan: Geschichte der Architektur, Könemann
Verlags-gesellschaft, 1996
- [8] Eekhout, Mick: Hohlprofile in der Architektur, Hrsg.: CIDECT
- [9] Wardenier, Jaap: From a tubular morning mist to the tubular
morning glow, Proceedings on the 9th Int. Conference on
Tubular Structures ists 9, Düsseldorf, 2001, S.3-12
- [10] Eekhout, Mick: Tubular Structures on the Cutting Edge of
Technology, in: Stahlbau, Heft 3/2001, S.193-201
- [11] Eekhout, Mick: Changing Morphology in Tubular Structures,
Proceedings on the 9th Int. Conference on Tubular Structures
ists 9, Düsseldorf, 2001, S.37-48.
- [12] Ackermann, Kurt: Tragwerke in der konstruktiven Architektur,
Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 1988
- [13] Salvadori, M.: Tragwerk & Architektur, Vieweg Verlag, 1977
- [14] Davis, Colin: High-Tech Architektur, Verlag Gerd Hatje,
Stuttgart, 1988
- [15] Sebestyén, G.: Leichtbauweise (in der Architektur), Verlags-
gesellschaft Rudolf Müller, Köln, 1978

- [16] Pothorn, Herbert: Das große Buch der Baustile, Cormoran Verlag, 1992
- [17] Mattheck, Claus: Design in der Natur – Der Baum als Lehrmeister, Rombach Verlagshaus, Freiburg, 1992
- [18] Nowack, H., Jung, M., Hachmann, B., Schweitzer, K.-H.: Ein Innenhochdruck-Umformverfahren mit besonderen Vorteilen, Bänder Bleche Rohre, 3, 1996
- [19] Schuler: Metal Forming Handbook, Springer Verlag, 1998
- [20] Hartl, Christoph: Ein Beitrag zur Flexibilisierung der Innenhochdruck-Umformung, Aachen, Shaker Verlag, 1995
- [21] Michailenko, W.I.; Kaschtschenko, A.W.: Natur - Geometrie – Architektur, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1986
- [22] Makowski, Z.: Räumliche Tragwerke aus Stahl, Verlag Stahleisen mbH, Düsseldorf, 1963
- [23] Tubular Structures IX, Proceedings of the 9th Int. Symposium and Euroconference on Tubular Structures ists 9, Düsseldorf, 3-5.4.2001
- [24] Tsui, Eugene: Evolutionary Architecture, Nature as a Basis for Design, Verlag John Wiley & Sons, Inc., Kanada, 1999
- [25] Greguss, F: Patente der Natur, Verl. Quelle & Meyer, 1988
- [26] Bappert, Reiner et.al.: Bionik, Zukunfts-Technik lernt von der Natur. Hrsg.: Siemens Forum München/Berlin, Landesmuseum für Technik und Arbeit, Mannheim, 1996
- [27] Nachtigal, Werner: Bionik, Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler, Springer Verlag, 1998
- [28] Nachtigal, Werner: Vorbild Natur, Bionik-Design für funktionelles Gestalten, Springer Verlag, 1997
- [29] Kähne, Heinz: Leonardo da Vinci, Prestel Verlag, 1999
- [30] Roland, Conrad: Frei Otto - Spannweiten, Verl. Ullstein, 1965
- [31] Otto, Frei: Natürliche Konstruktionen, Deutsche Verlags-Anstalt, GmbH, Stuttgart, 1982
- [32] Wardenier, J.; Kurobane, Y. et al.: Berechnung und Bemessung von Verbindungen aus Rundhohlprofilen unter vorwiegend ruhender Beanspruchung, Hrsg.: CIDECT Konstruieren mit Stahlhohlprofilen, Verlag TÜV Rheinland, 1991

- [33] Packer, J.A.; Wardenier, J. et. al.: Knotenverbindungen aus rechteckigen Hohlprofilen (Beanspruchung), Hrsg.: CIDECT Konstruieren mit Stahlhohlprofilen, Verl. TÜV Rheinland, 1993
- [34] Twilt, L. et al.: Bemessung von Hohlprofilstützen unter Brandbeanspruchung, Hrsg.: CIDECT Konstruieren mit Stahlhohlprofilen, Verlag TÜV Rheinland, 1994
- [35] Mengerlinghausen, Max: Raumfachwerke aus Stäben und Knoten, Bauverlag GmbH Wiesbaden, 1975
- [36] Mero Systeme GmbH & Co. KG: Mero-Vision Nr. 36, 2000/01
- [37] Mero Systeme GmbH & Co. KG: Grundlagen der Raumstrukturen, 2/2000
- [38] Matek, Wilhelm: Roloff/Matek Maschinenelemente, Vieweg Verlag, 12. Auflage, 1992
- [39] Firma Züblin AG, Firmenprospekt
- [40] AD Architectural Digest, Ausgabe August/September 2000
- [41] DETAIL, Zeitschrift für Architektur und Baudetail, Ausgabe 6/1998 Dachtragwerke
- [42] DETAIL, Zeitschrift für Architektur und Baudetail, Ausgabe 3/2000 Bauen mit Glas
- [43] DETAIL, Zeitschrift für Architektur und Baudetail, Ausgabe 6/2000 Bauen mit Membranen
- [44] DETAIL, Zeitschrift für Architektur und Baudetail, Ausgabe 4/1995 Dachtragwerke
- [45] Nachtigal, Werner; Blüchel, Kurt G.: Das große Buch der Bionik, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart/München, 2000
- [46] Gössel, Peter; Leuthäuser, Gabriele: Architektur des 20. Jahrhunderts, Taschen Verlag, 2001
- [47] gmp von Gerkan, Marg + Partner, Internetseiten
- [48] Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, Sonderforschungsbereich SFB 291, Projektunterlagen, Internetseiten
- [49] Firma CargoLifter GmbH, Internetseiten
- [50] Mero GmbH & co. KG: Firmenbroschüre "Bausysteme"
- [51] Grube, R.; Landskröner, S.: Der Sigma Knoten – eine biege-steife Steckverbindung. Stahlbau 70 (3), S.165-170, 2001

- [52] Weischede, D.; Held, K.; Meckelburg, H.; Lerner, B.: Das Triax-Tragsystem für das dach der dvg 2000. Stahlbau 69 (8), S.636-647, 2000
- [53] Steinamann, R.; Menkenhagen, J.: Die Dachkonstruktion des neuen Zentralgebäudes des Flughafens Düsseldorf International. Stahlbau 73 (7), S.142-152, 2001
- [55] Foster and Partners, Internetseiten
- [56] Sischka, J.; Brown, S.; Handel, E.; Zenker, G.: Die Überdachung des Great Court im British Museum in London. Stahlbau 70 (7), S.492-502, 2001
- [57] Lange, J.; Ewald, K.: Das Düsseldorfer Stadttor – ein 19geschossiges Hochhaus in Stahlverbundbauweise. Stahlbau 67 (7), S.570-579, 1998
- [58] Knebel, K.; Sanchez, J.; Zimmermann, S.: Das Eden-Projekt. Stahlbau 70 (8), S.513-525
- [59] The British Airways London Eye, Internetseiten
- [60] Schulz, Barbara: Recherche und Evaluierung hochbelasteter Tragwerke und deren konstruktiver Elemente, Diplomarbeit Universität Duisburg, 2002
- [61] Firma HOTdoc, digital system technology, Solingen, Firmendokumentation über Hydroform-Prozesse, 2001
- [62] Horschig, J.: Der Trend heißt kristalline Architektur, VDI-Nachrichten, Nr. 46, 15.11.2002, S.15
- [63] Ando, Tadao: Sehen. Erinnern. Sichtbar machen. Ausdruck verleihen. Das Bauzentrum Baukultur, 6/2002, S.29-36
- [64] Deutsches Institut für Normung, DIN 8582
- [65] Firma Orbimatik GmbH, Buseck, Internetseiten
- [66] Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart, Internetseiten
- [67] Ove Arup and Partners, London, Internetseiten
- [68] DETAIL, Institut für internationale Architektur-Dokumentation, Internetseiten
- [69] Firma Gartner GmbH, Gundelfingen, Internetseiten
- [70] archINFORM, Internat. Architekturdatenbank, Internetseiten
- [71] Firma Krupp Stahlbau, Hannover, Internetseiten

10. Abbildungsverzeichnis

Abb.	Inhalt	Quelle
1.1	Messe Hannover, Hallen 8/9	[47]
1.2	Flughafen Kanzai, Osaka	[6], [8]
1.3	DZ-Bank, Berlin	[46], [69]
1.4	BMW-Messepavillon	[46]
2.1	Räumlich komplexer Roboter	[48]
2.2	Experimentalsystem (Entwurf) des SFB 291	[48]
2.3	Gewählte Struktur für ARM 3	Eigene
2.4	Auf durchgehender Stange positionierte und fixierte standardisierte Verbindungselemente	Eigene
2.5	Erforderliche Knotenelemente für ARM 3	Eigene
2.6	CAD-Darstellung der ARM 3 - Struktur	Eigene
2.7	Zusammenbau der ARM 3 - Struktur	Eigene
2.8	CAD-Abbildung des Anlagenkonzeptes	Eigene
2.9	Mögliche Prüfbelastungen an Roboterarmen	Eigene
2.10	Realisierte Prüfanlage	Eigene
2.11	Prüfanlage mit eingespanntem Roboterarm	Eigene
2.12	Roboterarm unter Biegeprüfung	Eigene
2.13	Positionen der DMS am Roboterarm	Eigene
2.14	An einem 45°-Knoten applizierter DMS	Eigene
2.15	Signalverläufe der Dehnungen und des Weges während der mechanischen Prüfung des Roboterarms	Eigene
3.1	Einteilung der Umformverfahren gemäß DIN 8582	[64]
3.2	Verbesserungen an einem Abgassystem	[19]
3.3	Geöffnete Presse und Werkzeug bei der Firma HOTdoc GmbH	Eigene
3.4	Herstellung eines T-Stückes mittels IHU	[19]
3.5	Hochdruck-Blechumformung HBU	[61]
3.6	Beispiele metallischer Flächen mittels HBU	[61]
4.1	Veränderungen an der Geometrie des Kreuzknotens	Eigene

4.2	Vergleich zweier Optimierungsschritte am 45°-Knoten	Eigene
4.3	FEM-Analyse und Optimierung eines 45°-Knotens mit dem Programmpaket Pro/Engineer und Pro/Mechanica	Eigene
4.4	Größere Elementlängen für größeren Radien	Eigene
4.5	Detaillierte Modellierung der Roboterarm-Struktur	Eigene
4.6	Abschnittsweise Modellierung und Berechnung von ARM 3	Eigene
4.7	FEM-Untersuchungen der gesamten Struktur und Analyse der Beanspruchungen der Elemente im Detail	Eigene
4.8	Umformsimulation eines Viertelmodells des Kreuzknotens	Eigene
4.9	Simulation der Umformung eines 90°-T-Stückes	Eigene
4.10	Simulation des Nachschiebens bei der Umformung eines 90°-T-Stückes	Eigene
4.11	Werkzeughälfte mit gefrästen Knotengeometrien	Eigene
4.12	Umformschritte beim 45°-Knotenelement	Eigene
4.13	Fertige 45°- und Kreuzknoten	Eigene
4.14	Element unter Biegung bei 0°	Eigene
	Element unter Biege-Torsionsbelastung (90°)	Eigene
4.15	Ergebnisse der Messungen unter 0°	Eigene
4.16	Richtungen der Hauptspannungen	Eigene
4.17	Spannungsbilder von 45°-Verbindungen	Eigene
4.18	Spannungsbilder von 90°-Verbindungen	Eigene
5.1	Behandlung von Kräften in der Natur und Analogie zu Tragsystemen in Bauwerken	[4]
5.2	Formaktive Tragwerktypen	[4]
5.3	Schnittaktive Tragwerktypen	[4]
5.4	Flächenaktive Tragwerktypen	[4]
5.5	Höhenaktive Tragwerktypen	[4]
5.6	Ebener Fachwerkträger	Eigene

5.7	Luftschiffhalle der Firma CargoLifter bei Berlin	[49]
5.8	Vektoraktive Tragwerktypen	[4]
5.9	Gekrümmtes Fachwerk und Stab-Knoten-Tragwerk	[37]
5.10	Ebenes und räumliche Fachwerkelemente (B und C)	Eigene
5.11	Linienförmiger Raumfachwerkträger	Eigene
5.12 a	Flughafen Hamburg	[47]
5.12 b	The British Airways London Eye Waterloo International Terminal Roof, London	[60], [59] [60]
5.13	Erweiterung eines räumlichen Fachwerkelementes in zwei Richtungen	Eigene
5.14	Ebenes zweilagiges Raumfachwerk	Eigene
6.1	Verbindungselemente-Katalog	Eigene
6.2	Ebener Fachwerkrahmen mit parallelem Ober- und Untergurt sowie Innen- und Aussengurt	Eigene
6.3	Ebenes Fachwerk (Bogensegment)	Eigene
6.4	Elemente mit gekrümmten x-Achsen	Eigene
6.5	Winkelzustände an sich kreuzenden Geraden	Eigene
6.6	Ebener Fachwerkrahmen (3-Gelenk-Rahmen) mit geraden, jedoch nicht-parallelen Gurtungen	Eigene
6.7	Bogenförmiges ebenes Fachwerk mit 2 Ebenen	Eigene
6.8	Bogen mit variabel gekrümmtem und nicht-parallelem Verlauf der Gurtungen	Eigene
6.9	Wellenförmiges Fachwerk mit vier Ebenen hintereinander	Eigene
6.10	Linsenförmiges Fachwerk mit der größten Fachwerkhöhe in der Strukturmitte	Eigene
6.11	Modell Messe Hannover, Halle 4	[47]
6.12	Flächige Dachstruktur bestehend aus paarweise verbundenen Fachwerkebenen	Eigene

6.13	Dachstruktur mit gleichem Abstand zwischen den einzelnen Fachwerkebenen	Eigene
6.14	Ebenes Fachwerk mit gekrümmten Gurtungen	Eigene
6.15	Freizeitbad Neckarsulm	[66]
6.16	Unterschiede bei gekrümmten Flächen	Eigene, [4]
6.17	Gewächshaus in Cornwall, England	[36]
6.18	Great Court im British Museum, London	[55], [56]
6.19	Konstant gekrümmte Netze	[22]
6.20	Beispiele mit dem vorgestellten System realisierbarer gekrümmter Tragwerke mit drei- und viereckigen Netzen	Eigene
6.21	Beliebig verdrehte Anordnung einzelner Fachwerkebenen	Eigene
6.22	Messehalle Messe Hannover	[41]
6.23	Mit dem System aufgebautes ebenes Raumfachwerk	Eigene
6.24	Ebenes Raumfachwerk mit modifizierten Elementen	Eigene
6.25	Fortsetzbares Segment eines einsinnig und konstant gekrümmten Raumfachwerks	Eigene
6.26	Flughafen Düsseldorf	[53]
6.27	Teilgebiete und Anwendungsfacetten der Bionik	[27]
6.28	Bauwerke und biologische Analogien	[45]
6.29	Standard Fachwerkträger (Ausgangsform der Optimierung)	[27]
6.30	Evolutionstrategisch optimierter Fachwerkträger	[27]
6.31	Konstruktion eines bionischen Fachwerks	Eigene
6.32	Zwei Biegeträger mit gelenkiger Verbindung	Eigene
6.33	Paarweise angeordnete ebene Fachwerkträger	Eigene
6.34	Gleichmäßig verteilte Fachwerkebenen	Eigene

6.35	Optimierung der Bauteilgeometrie, Verringerung von Spannungsspitzen, Entstehung natürlicher Formen	[26]
6.36	Konventioneller Biegebalken und gewichtsoptimierte SKO-Alternative	[17]
7.1	Versatz der Systemlinien der Stäbe	Eigene
7.2	Definition und Darstellung der Exzentrizität	[32]
7.3	Ausgangsmodell der Untersuchungsreihen	Eigene
7.4	Verlauf der Mises-Spannungen σ_v für Untersuchungsreihe 1	Eigene
7.5	Graphischer Verlauf von $ \sigma_b/\sigma_z $	Eigene
7.6	Durchbiegung des Tragwerke bei der Untersuchungsreihe 2	Eigene
7.7	Graphischer Verlauf von $ \sigma_b/\sigma_z $	Eigene
7.8	Durchbiegung des Tragwerke bei der Untersuchungsreihe 3	Eigene
7.9	Graphischer Verlauf von $ \sigma_b/\sigma_z $	Eigene
7.10	Ersatzsystem zur angepassten Modellierung einer 45°-Verbindung mit Balkenelementen	Eigene
7.11	Geprüfter Raumfachwerkträger	Eigene
7.12	Im Prüfstand eingebaute Struktur	Eigene
7.13	Spannungs- und Verformungsbilder für eine und drei Lasten	Eigene
7.14	Verbindungsarten von Bauteilen	Eigene
7.15	Verbindungen an Knoten	Eigene
7.16	Spalte zwischen den Stangen und dem Verbindungselement	Eigene
7.17	Orbitalschweisszangen der Firma Orbimatik GmbH	[65]
7.18	Verschraubte Rohrverbindungen	[60]
7.19	Stansted Airport, England	[60], [55]
7.20	Reduktion der Materialfestigkeiten bei Baustahl und Beton im Brandfall	[34]
7.21	Für die Schweissarbeiten vorbereitete Profilenden	[60]

7.22	Komplexe Schweissverbindungen von Rohen		[60], [57]
7.23	Verwaltungsgebäude der dvg 2000 in Hannover		[60]
7.24	Bank of China, Hongkong		[6]
	Expo Lissabon, Portugal		[6]
7.25	KK-System von MERO		[37]
7.26	Schnittansicht des KK-Systems		[35]
7.27	Bestandteile eines Rohres des KK-Systems		Eigene
7.28	NK-System von MERO		[37]
7.29	Kuppel mit dem TK-System, TK-Systemkomponenten		[37]
7.30	Fachwerk-System von Züblin		[39]
7.31	Fachwerk-System von Krupp-Montal		[71]
7.32	Christus-Pavillon auf der EXPO 2000		[47]
7.33	Verbindungen von Hohlprofilen mit Sigma-Knoten		[51]
7.34	Räumliches Fachwerkelement des Triax-Tragsystems und untere Konstruktion zum Anschluss unterer Gurtstäbe		[60]
7.35	Tragkonstruktion am Dach der dvg 2000 in Hannover		[60]
7.36	Beispiele für Tragwerk-Systeme und Verbindungselemente	S.129 S.130 oben links S.130 oben rechts S.130 unten	[22] [8] [22] [8]