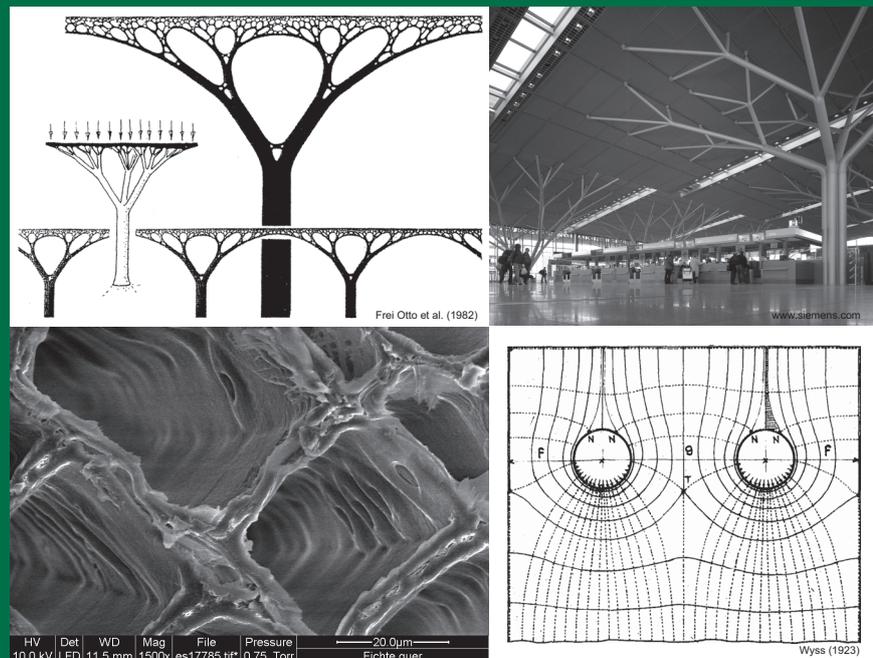


10. Grazer Holzbau-Fachtagung 10. GraHFT'14

Tagungsband

Bionische Tragstrukturen im Holzbau



Technische Universität Graz
Institut für Holzbau und Holztechnologie

Graz, am 26. September 2014

Tagungsleitung

Reinhard Brandner, Gerhard Schickhofer

Moderation

Reinhard Brandner

Veranstaltungsort

Technische Universität Graz, Hörsaal i1 | Inffeldgasse 18 | 8010 Graz

Tagungsband | Gestaltung

Reinhard Brandner

Auflage: 50 Stück

Herausgeber

Technische Universität Graz | Institut für Holzbau und Holztechnologie

Inffeldgasse 24, A-8010 Graz

Tel. +43 316 873 - 4601 | Fax. +43 316 873 - 4619 | www.lignum.at

Titelbilder: Verzweigte Stützensysteme (links-oben; Quelle: Frei Otto et al., 1982)
Dachstruktur Flughafen Stuttgart (rechts-oben; Quelle: www.siemens.com)
Mikrostruktur Zellverband Fichte, Querschnitt (links-unten; Quelle: TU Graz)
Kraftfluß im Verbindungsknoten (rechts-unten; Quelle: Wyss, 1923)

Verlag der Technischen Universität Graz

www.ub.tugraz.at/Verlag

ISBN: 978-3-85125-368-9

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

© 2014, Institut für Holzbau und Holztechnologie, TU Graz | www.lignum.tugraz.at

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten. Mit Genehmigung des Herausgebers ist es gestattet, diesen Tagungsband ganz oder teilweise auf fotomechanischem oder elektronischem Wege zu vervielfältigen.

Für den Inhalt der Einzelbeiträge sind ausschließlich die Verfasser verantwortlich, der Herausgeber behält sich geringfügige Änderungen der Formatierung vor.

Graz, am 26. September 2014

Motivation

In einigen Bereichen, so auch im Holzbau, ist ein Verlust an tradiertem Wissen, basierend auf Erfahrung aus Beobachtung, Versuch und Irrtum, zu beobachten. Antrainiertes, fachspezifisches Denken und Handeln begünstigen Erkenntnisse im jeweiligen Bereich, unterbinden jedoch nicht selten unkonventionelle, neue Zugänge durch Querdenken. Eine Forschungsdisziplin welche hingegen interdisziplinäres Forschen und Entwickeln bedingt ist die Bionik. Diese, erstmals begrifflich 1960 definierte Disziplin, welche im Englischen bekannt ist unter „biomimetics“ und „biomimicry“, befasst sich mit dem systematischen Erkennen sowie mit Analogiebetrachtungen aus der belebten Natur, als Grundlage zur Lösung technischer Problemstellungen. Durch die Evolution optimierte natürliche Strukturen, Prozesse und Funktionsweisen dienen als Basis für ein zweckgebundenes Studium. Der motivierte Begriff der „Evolution“ beschreibt die Vererbung erfolgreicher Merkmale im Sinne einer Optimierung der belebten Natur durch Anpassung an gegebene Randbedingungen. Die Bionik bemüht den Fundus von in Jahrmilliarden andauernden Entwicklungs- bzw. Optimierungsprozessen, welche vordergründig durch „Versuch und Irrtum“ einem fortlaufend verändernden Anpassungsprozess an sich dynamisch verändernden Randbedingungen unterliegen.

Der Baum und der daraus gewonnene Hochleistungsrohstoff Holz sind beeindruckende Beispiele der Evolution. Sie bieten dem Bioniker sowie bionisch denkendem Ingenieur eine reiche „Spielwiese“ zur Gewinnung von Erkenntnissen über biologische, biochemische und biophysikalische Prozesse. Mit Fokus auf Tragkonstruktionen der zeitgemäßen Ingenieurbaukunst dienen diese und weitere Erkenntnisse, gewonnen aus Beobachtung und Studie der größten biologischen Tragstruktur Baum, als Grundlage für neue Interpretationen von Tragwerken, Tragwerkelementen und Knotenlösungen. Die Teilgebiete der Bionik, die Struktur- und Konstruktionsbionik sowie die Bau- und Evolutionsbionik, sind hier primär von Interesse.

Die diesjährige 10. Grazer Holzbau-Fachtagung „Bionische Tragstrukturen im Holzbau“ fokussiert auf Erkenntnisse, gewonnen von der Natur, aufbereitet für das Bauen und Konstruieren mit Holz. Sie gliedert sich in drei Themenblöcke, Block I „Bionik abgeleitet von der Materialstruktur Holz“, Block II „Bionik im Ingenieurholzbau“ und Block III „Bionik in Entwurf und Tragwerk“, welche je zwei Beiträge im Stil von Lektionen beinhalten. Block I widmet sich thematisch dem Material Holz und der organischen Struktur des Baumes. Im Speziellen werden natürliche Strukturen, optimiert hinsichtlich minimaler Spannungsdiskontinuitäten und minimalem Materialeinsatz bei maximaler Leistungsfähigkeit, vorgestellt und mögliche technische Umsetzungspotentiale aufgezeigt. Optimierungsalgorithmen für hohe Leistungsfähigkeit bei geringem Materialeinsatz bei Tragstrukturen und Anschlüssen, unter Einbeziehung des Kraftflusses, gestalten den inhaltlichen Rahmen im Block II. Den Abschluss bieten zwei Beiträge welche sich, mit Fokus auf die Tragwerkskonstruktion, globalen, der Natur unterliegenden Konstruktionsprinzipien, Entwurfszahlen, Verhältnissen und Gesetzmäßigkeiten widmen. In diesem Sinne dient die 10. Grazer Holzbau-Fachtagung der Sensibilisierung für Natur-optimierte Gestaltungs- und Konstruktionsprinzipien bei endlichen Ressourcen.

Inhalt des Tagungsbandes

- A Gedanken zur und Erkenntnisse aus der Materialstruktur Holz**
R. Brandner
- B Stamm-Astanbindung - eine biologisch optimierte Struktur mit hoher mechanischer Leistungsfähigkeit**
U. Müller, J. Konnerth, W. Gindl-Altmutter, D. Kaserer, J. Keckes
- C Kraftfluß im Knoten - Gruppenwirkung von Verbindungsmitteln**
B. V. Wilding
- D Optimierungsalgorithmen im Ingenieurholzbau - Verfahren zur Tragstruktur- und Knotenoptimierung**
D. Zügner
- E Global Scaling - Der Maßstab der Natur**
M. Kauderer
- F Bauwerke im „goldenen Schnitt“ - eine Symbiose von Symmetrie und Antimetrie**
G. Schickhofer

A Gedanken zur und Erkenntnisse aus der Materialstruktur Holz

R. Brandner



Ass.Prof. Dipl.-Ing.(FH) Dr.techn. Reinhard Brandner

2002 – 2006	Diplomstudium Holztechnik u. Holzwirtschaft, FH Salzburg / Kuchl
2006 – 2012	Doktoratsstudium Bauingenieurwissenschaften, TU Graz
seit 2005	wiss. Mitarbeiter, holz.bau forschungs gmbh
seit 2008	(Sub-)Area Manager, holz.bau forschungs gmbh
seit 2009	Assistent der wiss. Leitung, holz.bau forschungs gmbh
2009 – 2013	Univ.-Assistent, Institut für Holzbau u. Holztechnologie, TU Graz
seit 2011	stellvertretender Leiter, Institut für Holzbau u. Holztechnologie, TU Graz
seit 2014	Ass.Prof., Institut für Holzbau u. Holztechnologie, TU Graz

1 Einleitung

Bionik als Wissenschaftsdisziplin wird als Schlüssel für neue, innovative Entwicklungen und kreative Lösungen technischer, wirtschaftlicher sowie soziologischer Herausforderungen angesehen. Dieser Beitrag hat zum Inhalt Bionik auf Grundlage von Analysen, durchgeführt an biologischen Materialien mit Fokus auf die Materialstruktur Holz, hinsichtlich möglicher Anwendungen für den Ingenieurholzbau zu beleuchten.

Nach einer kurzen Einführung in die Begrifflichkeit „Bionik“ folgen eine vertiefende Betrachtung natürlicher Konstruktionsprinzipien mit Fokus auf die Bau-Bionik. Nach allgemeiner Diskussion von gemeinsamen Struktur- und Funktionsmerkmalen organischer Materialien widmet sich der Beitrag eingehend der hierarchischen Materialstruktur Holz und bio-mechanischer Prinzipien des Baumes. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden exemplarisch Anwendungsmöglichkeiten für bionische Entwicklungen betreffend Materialoptimierung und Entwicklung von Tragstrukturen vorgestellt.

2 Eine kurze Einführung in die Bionik

„Bionik“ wird seitens Nachtigall & Blüchel (2001) als „Dechiffrierschlüssel“ für große Innovations-(Evolutions-)geheimnisse der Natur gesehen. Allgemein bekannt ist der Begriff „Bionik“ (engl.: „biomimetics“, „biomimicry“) als Kofferwort aus Biologie und Technik, als technische Disziplin welche Lehren aus der belebten Natur zieht. Nach Nachtigall (2002) ist Bionik allgemein definiert als „... *Wissenschaftsdisziplin, [welche sich] systematisch mit der technischen Umsetzung und Anwendung von Konstruktionen, Verfahren und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme ...*“ auseinandersetzt. Die Geburtsstunde des Begriffes wird J. E. Steele anlässlich des 1960 stattgefundenen Kongresses „Bionics Symposium: Living Prototypes – the Key to New Technology“ in Ohio / USA zugeschrieben, welcher zwar den Begriff „Bionics“ (übersetzbar mit „Studium des Lebens“) nicht nachweislich geprägt hat, aber bereits die Notwendigkeit zur Generalisierung anstatt Spezialisierung zum Ausdruck brachte. Konkret forderte er zukunftsweisend eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen Technikern und Biologen (Nachtigall, 2002). Nachtigall (2003) unterscheidet bei „Bionik“ explizit zwischen der „Bionik“, welche Anregungen aus der Natur für technische Umsetzungen zieht, und der „technischen Biologie“, welche teilfunktionell orientierte Gemeinsamkeiten (Analogien) für Anregungen jeweils über die jeweiligen Betrachtungsgrenzen hinweg nutzt. Nach Nachtigall & Blüchel (2001) ist „... *alles Leben [...] denselben Naturgesetzen unterworfen [so auch] die Konstruktionen des Menschen ...*“ im Sinne einer „... Technik der belebten Natur ...“.

Die „Bionik“ stellt als Wissenschaftsdisziplin eine Querschnittstechnologie dar (Nachtigall & Blüchel, 2001). Sie gilt als „Mittlerin“ zwischen den Naturwissenschaften, der Biologie und der Technik (Nachtigall, 2008). Aus dem Wissen der ersten beiden Disziplinen gilt es Umsetzungspotentiale für technische Anwendungen und Lösungen für technische Problemstellungen aus Beobachtungen der Natur und Erkenntnissen daraus zu filtern und zur Umsetzung zu führen. „Anwendung“ und „Umsetzung“ stehen im Vordergrund der wissenschaftlichen Bemühungen. Diese Aspekte werden leider oft notwendigerweise argumentativ zur Rechtfertigung für die zeit- und kostenintensiven Untersuchungen im Rahmen der Grundlagenforschung mit Fokus auf das „Verstehen“ und das „Lernen“, welches entgegen der Natur oftmals zielgerichtet, strukturiert, und weniger dem Zufall überlassen gefordert wird, verwendet.

Die belebte Umwelt hat der von Menschen geschaffenen Technik einiges an Zeit und Entwicklung voraus. So gelten minimaler Energie- und Ressourceneinsatz bei maximalem Output als Maxime der Evolutionsgeschichte bei einem Erdalter von knapp 5 Milliarden Jahren. Diese Maxime wird in lebenden Organismen durch umfangreiche Regelungstechnik, auf der Ebene von Molekülen, verfolgt (Nachtigall & Blüchel, 2001). Im Gegensatz zur Technik mit ihrem Streben nach Perfektion basiert das Evolutionssprinzip auf der erfolgreichen Selektion von Mutationen, kleinen Veränderungen im Erbgut von Lebewesen. Das Wachstum stellt hierbei ebenso wie in der Ökonomie des Menschen ein wichtiges Prinzip des Lebens dar, allerdings mit dem Bewusstsein eines begrenzten Mengenwachstums aber der Möglichkeit eines unbegrenzten Qualitätswachstums (Nachtigall & Blüchel, 2001).

Nach Nachtigall & Blüchel (2001) gilt „bestes Design“ = „optimales Design“! Hierbei stehen in der Natur nicht wie in der menschlichen Technik die „... *Maximierung der Einzelaspekte* ...“ im Vordergrund, sondern „... *die Optimierung des Gesamtkomplexes, des Systems* ...“, ein Zugang, welcher zudem auch immer zu „... *energetisch optimalen Lösungen* ...“ im Sinne eines minimalen Energieeinsatzes, führt. Auf Basis umfangreicher Studien werden seitens Nachtigall & Blüchel (2001) folgende „**10 Gebote bionischen Designs**“ formuliert:

- Integrierte, statt additive Konstruktionen: Elemente und Funktionen gehen ineinander über;
- Optimierung des Ganzen anstatt Maximierung eines Einzelelementes;
- Multi- anstatt Monofunktionalität;
- Feinabstimmung gegenüber der Umwelt;
- Energieeinsparung anstatt –verschwendung: „Haushalten“ mit dem Gesamtenergiebedarf; dieser Aspekt wird als höchster Evolutionsdruck bewertet!
- direkte oder indirekte Nutzung der Sonnenenergie;
- optimale Lebensdauer statt unnötiger Haltbarkeit;
- vollständige Rezyklierung anstatt Abfallanhäufung;
- Vernetzung anstatt Linearität;
- Entwicklungen im (Anm.: zweckgesteuerten) Versuch-Irrtum-Prozess, entsprechend der Evolutionsstrategie.

Mit Bezug auf die zuvor genannten „10 Gebote bionischen Designs“ lassen sich nach Nachtigall & Blüchel (2001) folgende typische Merkmale von biologischen Materialien zeigen:

- Materialschichtung während des Entstehungsprozesses (zeitliche Abfolge, z.T. sukzessiver Aufbau (Ausformung) eines Materials; z.B. Holz → Zelle → Zellaufbau);
- streng funktionell, oft hierarchisch;
- funktionelle Kompartimente, welche gemeinsam eine Einheit bilden; (Anmerkung: Auch Zusammenwirken zwischen Organismen im Sinne der Symbiose);
- funktionelle Differenzierung durch Nutzung von Oberflächenkräften;
- Leichtbau; Sandwichbauweise;
- Mehr-Komponenten-Materialien;
- selbstreparabel, Selbstheilung;
- multifunktionell;
- terminierte Lebensdauer & vollständiger, biologischer Abbau.

Für die Entwicklung technischer Innovationen und zur Lösung von Problemstellungen der Technik bedient sich die Bionik häufig der Analogieforschung, der Erforschung von strukturellen Ähnlichkeiten durch Form- (Proportionen, Gestalt) und Funktionsvergleich. Auch wenn im Allg. die Analogieforschung wenig zur Klärung von ursächlichen, substrukturellen Zusammenhängen beiträgt, werden doch häufig wertvolle Ansätze und

Lösungswege durch den Vergleich und die Erkenntnis einer möglichen Umsetzung gefunden. Hierbei sind (i) die physikalischen Gesetzmäßigkeiten, (ii) Maßstabseinflüsse (Scaling) und (iii) das oft unterliegende heuristische Prinzip zu beachten (Nachtigall & Blüchel, 2001).

2.1 Technische Entwicklungen basierend auf dem Prinzip der Evolution

Die Entwicklungen in der belebten Natur beruhen auf Mutations- und Selektionsprinzipien, der sogenannten Evolution. Hierbei wird in „kleinen Schritten“ eine beständige, fortschreitende (qualitative) Entwicklung durch sukzessiv verbesserte Anpassung an jeweils gegenwärtig gegebene Umwelt-(Rand-)bedingungen erzielt. Die Strategie der Evolution ist als „unscharf“ zu bezeichnen und prinzipiell ohne Ziel (sie verläuft ungerichtet) außer der qualitativen Optimierung, wobei aufgrund der zeitlichen Veränderungen der Randbedingungen eine dynamische Anpassung des Qualitätsbegriffes einhergeht. In diesem Sinne unterliegt die evolutionäre Entwicklung dem (Anm.: gerichteten) Zufall, was eine Streuung / Variation (Mutation) des Erbgutes (Genotyp) bedingt, wobei die zufälligen Optimierungen auf Vorkenntnissen der bisherigen, erfolgreichen Entwicklungen (Phänotyp) beruhen. Mutationen, welche sich nicht bewähren, werden im Sinne der Selektion, durch Konkurrenz und dem damit entstehenden (positiven & motivierenden) Selektionsdruck verworfen. Dieser strenge, selbstregulierende und selbstreproduzierende Prozess wird durch eine entsprechend hohe Anzahl an Nachkommen mit bedingt hoher Diversität erzielt. In diesem Sinne ist die Evolutionsstrategie als „... *Entwicklung (Lösungsfindung) ohne Leitfaden [...] aber mit vielen Möglichkeiten* ...“ zu klassifizieren (Nachtigall & Blüchel, 2001).

Basierend auf der Evolutionsstrategie der belebten Umwelt können für technische, aber auch wirtschaftliche, soziologische u.a. Entwicklungen und Problemstellungen mit Hilfe von evolutionären Optimierungsalgorithmen Lösungen gefunden werden. Dies unter Imitation der Mutations- und Selektionsprozesse durch zufallsgesteuerte (virtuelle) Experimente, welche, je nach Zielkatalog, einer Selektion und fortwährender Mutation unterworfen werden (Nachtigall & Blüchel, 2001), wobei die Vorkenntnisse erfolgversprechender Mutationen (Vererbung) durch weitere Diversifizierung im Sinne eines stochastischen (Anm.: z.B. Bayes'sches) Update betrachtet werden können. Möglichkeiten für Algorithmen sind vielfältig. Eine umfassende Abhandlung zur Evolutionsstrategie findet sich u.a. in Rechenberg (1994).

2.2 Bau-Bionik: Eine Kombination von Konstruktions- und Verfahrensbionik

Grundsätzlich sind die bionischen Betätigungsfelder so vielfältig wie die Natur und dementsprechend allen Bereichen unserer wissenschaftlichen Betätigungsfelder, als Abstraktionen der vom Menschen klassierten Natur, zuordenbar bzw. in all diesen Feldern als beitragend anzusehen. Mit Fokus auf die Bau-Bionik meint Nachtigall (2003): „*Optimierung in einem biologischen Bauwerk bedeutet nicht das Erreichen einer Form hochgesteckter Sicherheitsgrenzen. Es wird vielmehr eine gegenüber Schwankungen sensible, jedoch gerade dadurch effiziente Bauform erreicht. Dabei werden die zum Teil durch den Wachstumsprozess selbst hervorgerufenen Spannungen zur Stimulation eben dieses Prozesses genutzt. So ergibt sich eine Vernetzung von Bauprozess, Funktion und spezifischer Belastungsanpassung.*“. Weiter gilt, dass biologische Bauwerke nicht in einem statischen, sondern in einem dynamischen Gleichgewicht mit der Umwelt stehen. Biologische Wachstumsprozesse gelten somit nicht alleinig durch die Genetik motiviert, sondern nutzen zudem physikalische Vorgänge in allen Wachstumsstadien zur Erreichung

dynamischer Gleichgewichtszustände (Nachtigall, 2003). Nach Nachtigall (2003) können folgende „biomorphe“ Konstruktionsprinzipien identifiziert werden:

- Leichtbau; Sandwichstrukturen; verzweigte Tragwerke;
- Ausrichtung von Tragelementen / -strukturen in Richtung der Hauptspannungstrajektorien;
- fließende Umlenkung von Kräften durch Bildung von bündel- oder tauartigen Verschmelzungspunkten;
- bei Raumkonkurrenz und sich berührenden Konstruktionselementen Verschmelzung dieser zu hexagonalen Berührungskonturen (Flächen);
- leichte, biegesteife und verwindungssteife Knoten durch Verstrebungen, Auflösungen, spannungstrajektorielle Orientierung.

2.3 Gemeinsamkeiten organischer Materialien

Die überwiegende Anzahl an Materialien belebter Natur sind Komposite, aufgebaut aus einer geringen Anzahl unterschiedlicher Bio-Polymere (primär Protein- oder Zucker-basierte Polymere), Mineralien und Vernetzern (Dunlop & Fratzl, 2010). Durch entsprechender Kombination dieser Bestandteile gelingt es der Natur eine Vielfalt unterschiedlicher Eigenschaften zu kreieren und für die Ingenieurswelt widersprüchliche Kombinationen von Materialeigenschaften zu realisieren, wie z.B. hohe Steifigkeit bei hoher Zähigkeit (u.a. Gordon & Jeronimidis, 1974; Dunlop & Fratzl, 2010). Dies trotz eingeschränkter Verfügbarkeit der Grundstoffe (chem. Elemente) und dem Einfluss der physikalischen Bedingungen der Umwelt (Dunlop & Fratzl, 2010), ein Umstand, welcher besonders ortsfeste Lebewesen wie Pflanzen trifft. Die Materialien erfüllen eine Vielzahl an Anforderungen, großteils parallel. Im Folgenden ein kurzer Überblick (u.a. Speck & Burgert, 2011):

- Mechanische Anforderungen wie Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit;
- Transport von Nährstoffen, Wasser, usw.;
- Speicherung (u.a. Fette, Zucker);
- adaptives Wachstum: Anpassung an äußere Beanspruchungen auf Basis von Echtzeitinformationen aus Sensoren und Umsetzung durch entsprechende Regelmechanismen;
- Selbstheilung von Strukturstörungen;
- Isolation bzw. Wärmeregulation;
- Ernährung (u.a. Photosynthese, Jagd, Symbiose);
- Arterhaltung / Vermehrung (Selbst-Replikation);
- u.a.

Nach Vincent (2006), Fratzl & Barth (2009), Dunlop & Fratzl (2010), Speck & Burgert (2011), Ling et al. (2011) u.a. beinhalten biologische Strukturen dafür folgende Merkmale:

- Struktur entsprechend der Funktion („form follows function“): Abstimmung der äußeren Form und der inneren Struktur mit den zu erfüllenden Aufgaben;
- Optimierungsprinzipien in Strukturen: Aufgrund der Komplexität innerer Strukturen biologischer Materialien, insbesondere ihr Beziehungsgeflecht, steht in der Natur die Optimierung der Funktionalität des Gesamtkomplexes vor der Max- bzw. Minimierung einzelner Strukturen und Funktionen; Beispiele:
 - minimaler Materialeinsatz bei minimalem Abfall, ohne Verschmutzung, biologisch abbau- und rezyklierbar;
 - minimaler Energieeinsatz;

- Optimierung der mechanischen Eigenschaften durch laufende Adaption (z.B. gezielte Materialverteilung, gezielter Materialeinsatz, graduelle Strukturänderung, Optimierung der Spannungsverteilung);
 - hohle, poröse Strukturen und Verbund-(Sandwich-)Strukturen;
 - Heterogenität (geometrische Differenzierung in Elemente);
 - hierarchische Strukturen (Mehr-Ebenen-Strukturen mit (z.T.) voneinander unabhängigen funktionellen Eigenschaften; zähe Strukturen mit z.T. reversiblen, nicht-linearen Eigenschaften); Komposite auf allen Ebenen (→ Anisotropie);
- Multiple Funktionalität: Kompaktheit der Struktur durch parallele Ausführung mehrerer Aufgaben;
- laufende (dynamische) Anpassung an veränderliche Umgebungsbedingungen durch dynamische Herstellung von Gleichgewichtszuständen zwischen der inneren Struktur und der Umgebung, basierend auf Steuerung durch Reize, bekannt als Thigmomorphogenese (→ adaptives Wachstum und Strukturgestaltung als „reactio“ auf äußere Einwirkungen („actio“)).

Die Multi-Funktionalität wird insbesondere durch die komplexe, hierarchische Materialstruktur ermöglicht, welche eine funktionelle Adaptierung auf verschiedenen Strukturebenen erlaubt (Dunlop & Fratzl, 2010). Die Möglichkeit biologischer Materialien hohe Steifigkeit (zur Lastabtragung) und hohe Zähigkeit (zur Kontrolle / Vermeidung von Risswachstum) zu vereinen ist ebenfalls auf die hierarchische Komposit-Materialstruktur zurückzuführen und weniger auf Änderungen in der chemischen Zusammensetzung (Dunlop & Fratzl, 2010). Die Adaptierung der Materialstruktur passiert durch strukturelle Variation (Veränderung) der Zusammensetzung und des Aufbaues der Komposite unter Verwendung weniger Grundelemente. Hohe Steifigkeit wird dabei durch leistungsfähige Fasern und entsprechende Querverbindungen dieser untereinander in der Matrix erreicht, wohingegen hohe Zähigkeit ein Ergebnis aus (i) komplexer Faserarchitektur, (ii) ebenfalls hoher Dichte von Querverbindungen, und (iii) der hierarchischen Materialstruktur ist. Insbesondere aufgrund von (iii) stehen zum einen mehrere Ebenen zur Kontrolle und / oder Verhinderung einer Rissausbreitung sowie zum anderen die Möglichkeit einer vielfältigen Adaptierung, nicht zuletzt durch Variation der Faserarchitektur und somit durch die Beeinflussung der primär anisotropen Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen, von isotrop zu orthotrop, zur Verfügung (Dunlop & Fratzl, 2010).

Wohingegen der Ingenieur einen „top down“ Ansatz im Sinne der Materialwahl und Produktion bzw. Gestaltung entsprechend einem definierten Einsatz wählt, arbeitet die Natur „bottom up“ durch adaptives Wachstum unter Last und eigenständige, laufende Anpassungen auf allen Hierarchieebenen. Dies bedingt die Speicherung von Informationen sowie eine sensorische Erfassung und Verarbeitung (Steuerung & Regelung; Fratzl & Barth, 2009).

Die Biodiversität erscheint für Ingenieure oft als Widerspruch zur Optimierung. Bei näherer Betrachtung zeigt sich in der Natur, dass Spezialisierung im Sinne der Optimierung bzgl. eines Momentzustandes gefährlich ist im Hinblick auf sich dynamisch ändernde Rahmenbedingungen (Thibaut et al., 2001).

3 Die Materialstruktur Holz: Mögliche Anknüpfungspunkte für bionische Entwicklungen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Darlegung der hierarchischen Struktur in der Materialstruktur Holz, mit Fokus auf das Stammholz. Der hierarchische Aufbau des Holzes ist eine wesentliche Eigenschaft, welche, folgt man Abschnitt 2.3, sehr vielen, natürlichen Materialien inhärent ist.

3.1 Der hierarchische Aufbau der Materialstruktur Holz

Bei Stammholz wird im Allg. zwischen fünf (sechs) Hierarchieebenen unterschieden (Speck & Burgert, 2011; Saavedra Flores et al., 2012; u.a.):

- Nanostruktur-Ebene (biochemische bzw. molekulare Ebene): Molekulare Anordnung der kristallinen Zellulose; 0,1 nm bis 10 nm; (Ebene der Mikrofibrillen);
- Ultrastruktur-Ebene (Zellwand-Struktur): Elementarer Aufbau der Holz-Zellwand; 10 nm bis 1 µm;
- Mikrostruktur-Ebene (Zellstruktur): 1 µm bis 0,1 mm;
- Makrostruktur-Ebene (Gewebe-Ebene): Konzentrische Jahrringe; 0,1 mm bis 10 cm;
- Integralstruktur-Ebene (Stamm-Ebene): 10 cm bis 100 m in Länge und bis 10 m im Durchmesser.

Die primären fünf Ebenen nach Speck & Rowe (2006; siehe Abb. 1) werden im Folgenden kurz erläutert.

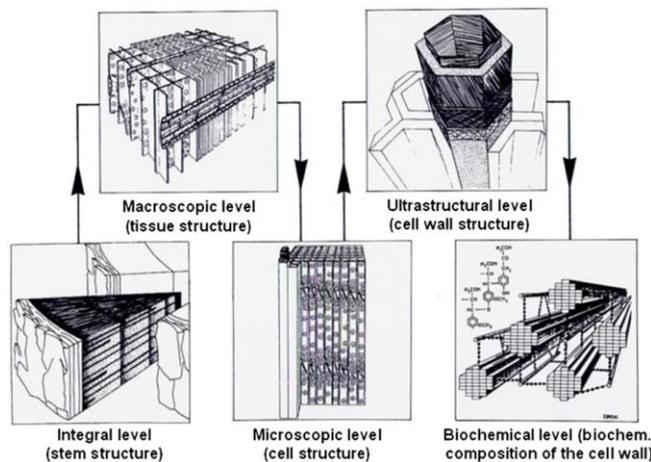


Abb. 1: Hierarchischer Aufbau der Materialstruktur Holz (Speck & Rowe, 2006)

3.1.1 Nanostruktur-Ebene

Diese Ebene beinhaltet den biochemischen Aufbau der Zellwand, insbesondere die Struktur der kettenförmigen Zellulosemoleküle (rd. 40 bis 50 % Anteil im Holz). Diese verbinden sich zuerst zu Elementar- (Durchmesser 3 bis 4 nm) und dann zu Mikrofibrillen (Durchmesser 10 bis 30 nm), mit kristallinen und amorphen Bereichen (Salmén, 2004; Wathén, 2006; u.a.). Die Zellulose verhält sich viskos-elastisch und hydrophil sowie beeinflusst durch Temperatur. Sie ist als Faser im Komposit primär für die axialen Zugeigenschaften verantwortlich. Weitere wesentliche Molekülstrukturen sind die Polyosen (hydrophil; 15 bis 35 %), primär kettenförmige Moleküle mit Seitenästen, und das Lignin (amorph, isotrop, hydrophob; 20 bis 35 %), als stark verzweigtes Makromolekül auf

Phenolbasis (Fengel & Wegener, 1989; Booker & Sell, 1998). Die Polyosen fungieren hierbei primär als Mediator, als Vernetzer der Zellulose mit dem Lignin, welches als Matrix im Komposit primär für die Druckeigenschaften in Faserrichtung verantwortlich zeichnet. Neben den individuellen Eigenschaften der Moleküle sind die Interaktion und der Verbund zwischen ihnen von entscheidender Bedeutung. Wasserstoffbrückenbindungen, als primäre Verbindung, erlauben eine enge aber trotzdem flexible Verbindung welche bei Überschreiten von Grenzbeanspruchungen relativ leicht gelöst aber auch wieder reaktiviert werden kann (Burgert & Dunlop, 2011).

3.1.2 Ultrastruktur-Ebene

Die Wandstruktur von Holzzellen, üblicherweise mit vereinfacht rechteckigem Querschnitt, stellt ein mehrschichtiges Laminat aus Primärzellwand (P), der Sekundärzellwand (S) und in manchen Holzarten auch der Tertiärwand (T) dar. Der Verbund der Zellen erfolgt durch die sogenannte Mittellamelle (ML), welche primär aus Lignin und Polyosen aufgebaut ist. Die Orientierung der Zellulosefibrillen in der Primärwand ist netzartig und bietet somit die Flexibilität notwendig während des Zellwachstums (Ausdehnung $\geq 100\%$; Thibaut et al., 2001). Ist die Endgröße erreicht folgt der Aufbau der Sekundärwand welche sich in S1, S2 und S3 gliedert. Gegenüber der Primärwand ist ein höherer Anteil an Zellulose bei strikt paralleler Anordnung der Fibrillen festzustellen. Die elastischen Eigenschaften der Zellwand werden primär durch die Orientierung der Fibrillen in der Sekundärwand und hier im Speziellen durch jene in der S2 (80 bis 90 % der Zellwandstärke) bestimmt. Der Winkel zwischen den Fibrillen und der Zellachse (Mikrofibrillenwinkel, MFA) liegt in der S2 zwischen 0 und 20°, wohingegen dieser in S1 und S3 rd. 60 bis 90° beträgt (u.a. Speck & Burgert, 2011). Folge dessen bestimmt die S2 primär die Eigenschaften der Zelle in axialer Richtung. S1 und S3, welche absperrend (verstärkend) auf die S2 wirken, tragen wesentlich zu den Eigenschaften in transversaler Richtung der Zellwand bei (Booker & Sell, 1998).

3.1.3 Mikrostruktur-Ebene

Aufgrund der gleichlaufenden Orientierung der Fibrillen je Zellwand kommt es auch auf dieser Hierarchieebene zu einer Absperrewirkung, nunmehr zwischen den Zellen. Zur Adaptierung der Zellwandstruktur an veränderte, äußere Beanspruchungen ist der Baum in der Lage sogenanntes Richtgewebe bzw. Reaktionsholz zu generieren. Dieses stellt bei Nadelhölzern Druckholz und bei Laubholz Zugholz, entsprechend der jeweiligen Wirkung, dar. Die Druckholztracheiden sind charakterisiert durch einen rundlichen Zellquerschnitt, erhöhtem Lignin-Anteil und erhöhtem MFA in S2. Letzteres erhöht den Widerstand gegen die transversale Ausdehnung der Zelle bei Erhöhung des Innendruckes, was in Folge zu einer primären axialen Ausdehnung führt (\rightarrow längliche Form), und die Knickgefahr verringert. Die axiale Verbindung zwischen den Zellen entspricht einem „plug-in“ Anschluß, mit Formschluss zwischen konischem Zellende und Zelllumen (Mattheck & Kubler, 1997). Zugholz weist einen erhöhten Zelluloseanteil und eine zusätzliche Zellschicht, die G-Schicht (gelatinöse Schicht) auf. Die Zelle dehnt sich mit zunehmendem Innendruck lateral bei axialer Stauchung zu einer weitgehend rundlichen Form. Die G-Schicht festigt die Form der Zugholztracheide, analog zur Luft in einem Pneu (Mattheck & Kubler, 1997).

Die Spannungs-Dehnungs-Beziehung von Gewebe und Zellen bei axialer Zugbeanspruchung weist drei charakteristische Phasen auf: Phase I zeigt nach einer verzögerten Verfestigung einen hohen Elastizitätsmodul; dies aufgrund der kompakten Anordnung und der starken Vernetzung zwischen den Fibrillen und der Matrix. In Phase II folgt ein Abfall des E-Moduls in Folge des Erreichens der Schubtragfähigkeit der Matrix und des somit bedingten Gleitens der Fibrillen, allerdings in einem noch reversiblen Zustand. Kurz vor dem Versagen kommt es in Phase III zu einer abermaligen Verfestigung bei nunmehr irreversibler Schädigung,

bedingt durch eine signifikante Änderung des MFA, ähnlich einer Spiralfeder (Keckes et al., 2003; Speck & Burgert, 2011). Der seitens Keckes et al. (2003) bezeichnete „stick-slip“ Mechanismus erlaubt in Phase II, trotz überschreiten einer Art Fließpunkt bei Fasern eine neuerliche Bindung dieser bei Entlastung unter Erhalt ihrer ursprünglichen Steifigkeit. Diese Regeneration der Verbindungen zwischen der Faser und der Matrix bis rd. 10 % Dehnung erfolgt auf der Nano-Ebene und resultiert makroskopisch in einer plastischen Erscheinung, vergleichbar mit den atomaren Wanderungen beim Fließen in Metallgittern.

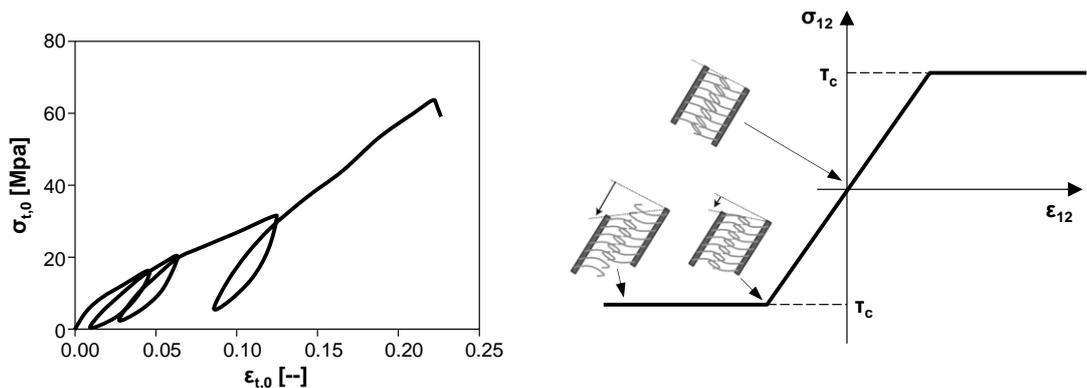


Abb. 2: Materialverhalten einer Tracheide bei axialer Zugbeanspruchung (links); „stick-slip“ Mechanismus (rechts) (Keckes et al., 2003)

3.1.4 Makrostruktur-Ebene

Der Aufbau des Holzes innerhalb einer Zuwachszone bzw. eines Jahrringes ist gekennzeichnet durch einen graduellen Anstieg der Rohdichte vom Früh- zum Spätholz. Das Frühholz dient primär der Leitung von Wasser und Nährstoffen, das Spätholz primär der Festigung des Gewebes.

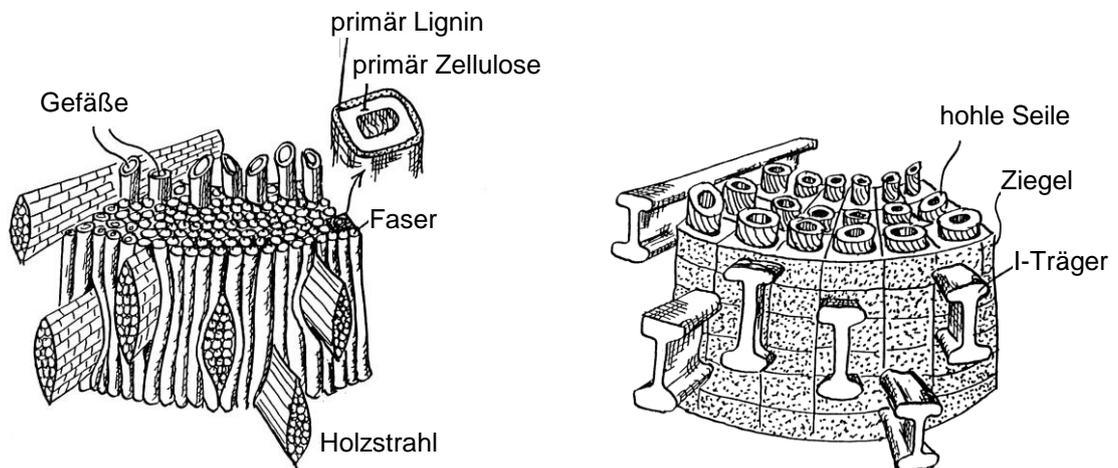


Abb. 3: Struktur des Materials Holz analog zu einem Komposit (Mattheck & Kubler, 1997; adaptiert)

Hinsichtlich des makroskopischen Aufbaues sind Nadelhölzer von zerstreut- und ringporigen Laubhölzern durch ihre einfachere Struktur und der geringeren Anzahl an Zelltypen zu unterscheiden. Ringporer wiederum weisen ein oder wenige Ringe mit großlumigen Gefäßen (Tracheen) im Frühjahr gefolgt von (primär) Fasertracheiden und Längsparenchym als Stützgewebe im Spätholz auf, wohingegen Tracheen und Tracheiden bei Zerstreutporern nahezu gleichmäßig über den Jahrring verteilt vorkommen. Das Querenparenchym

(Holzstrahlen) dient der Speicherung von Zucker und dem radialen Transport innerhalb der Materialstruktur. Es festigt zudem den primär axial orientierten Zellverband in radialer Richtung. Aufgrund der erwähnten Rohdichteänderung an der Jahrringgrenze kommt es, bedingt durch den einhergehenden Sprung im E-Modul, zu einer Schwächung im Holzgefüge, welche z.T. durch Verdickung des Holzstrahles an dieser Stelle – ähnlich einem Zugseil – kompensiert wird (Abb. 11; u.a. Mattheck & Kubler, 1997; Speck & Burgert, 2011).

3.1.5 Integralstruktur-Ebene

Das Stammholz selbst ist gekennzeichnet durch eine graduelle Änderung des Eigenschaftsprofils der Holzzellen in Abhängigkeit des jeweiligen Kambiumalters, jenes Meristems, zuständig für das für Bäume charakteristische sekundäre Dickenwachstum. Der Übergang von kurzen, biegeweichen Zellen geringerer Dichte zu langen, biegesteifen Zellen ist als Transformation von juvenilem zu adultem Holz bekannt. Die Veränderung des Eigenschaftsprofils erfolgt durch den Mikrofibrillenwinkel, primär in der S2 Schicht, und die Zelllänge. Die graduelle Änderung mit Übergang zum adulten Holz bei rund 15 bis 25 Jahren ergibt sich aus der Notwendigkeit, dass junge Bäume den Windlasten durch Ausweichen (Verbiegen) entkommen, wohingegen ab einer bestimmten Baumhöhe ein erhöhter Biege widerstand zur Abtragung der Windlasten notwendig ist. Der geringe MFA in adultem Holz erhöht nicht nur die Steifigkeit sondern verringert auch das Stabilitätsrisiko Knicken (Burgert & Dunlop, 2011).

Im Stammholz kann zudem radial zwischen dem physiologisch aktiven Splintholz (Außen) und dem inaktiven Kernholz (Innen; auch Reifholz oder Kern-Reifholz) unterschieden werden, wobei letztgenannter Bereich durch den Prozess der Verkernung, oftmals in Kombination mit einer Verfärbung und einer Reduktion der Holzfeuchte im Bereich der Fasersättigung gekennzeichnet ist. Folglich dessen sind bei der Betrachtung der mechanischen Kenngrößen und ihrer Beziehungen zum Verständnis der Materialstruktur Holz im lebenden Baum jene Eigenschaften von fasergesättigtem „grünem“ Holz von Interesse. Abb. 4 zeigt einen Überblick über wesentliche Festigkeitskenngrößen von merkmalsfreien Kleinproben in Abhängigkeit der Holzfeuchte.

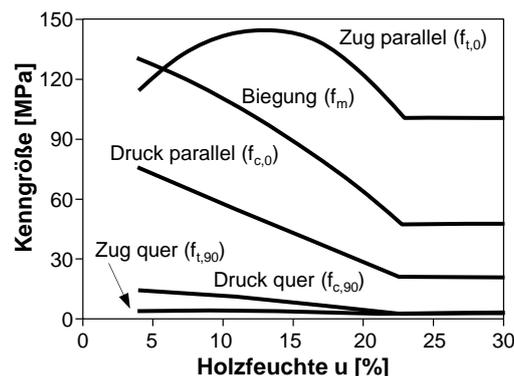


Abb. 4: Festigkeitskenngrößen vs. Holzfeuchte (Forest Products Laboratory, 2010; adaptiert)

3.2 Eine bio-mechanische Betrachtung des Baumes

Im Folgenden wird die Biomechanik des Baumes, wie sie u.a. in Mattheck & Kubler (1997) erarbeitet wurde, zusammenfassend dargelegt. Darauf basierende Entwicklungen und Umsetzungspotentiale für Ingenieure werden kurz angesprochen bzw. in den weiteren Abschnitten diskutiert.

„Any analytical approach that is based on formulas is bound to fail miserably because the interrelationships of nature are not caught by formulas.“ (Mattheck & Kubler, 1997).

Fünf Theoreme der Selbst-Optimierung von Bäumen nach Mattheck & Kubler (1997):

- (1) Prinzip der minimalen Hebelarme: Bäume minimieren Spannungen durch aktive Gegensteuerung und Neuausrichtung (→ Reaktionsholz) oder passiv durch Fließen flexibler Bereiche;
- (2) Axiom konstanter Spannungen: Unabwendbare Spannungen werden gleichmäßig an der Oberfläche verteilt; gewachsene Kerben werden kerboptimiert, sprich spannungsfrei;
- (3) Minimierung kritischer Schubspannungen: Durch Regelung der axialen und transversalen Anordnung der Fasern und Jahrringe;
- (4) Form- und Strukturoptimierung: Lokale Adaptierung der inneren Struktur aufgrund externer Beanspruchung;
- (5) Wachstumsspannungen: Zur Kontrolle von unabwendbaren Strukturstörungen.

Während (1) und (2) die äußere Gestalt des Baumes bestimmen (→ Formoptimierung), betreffend Theoreme (3) bis (5) die innere Struktur des Holzes (→ Strukturoptimierung). Im Folgenden werden die einzelnen Axiome kurz erläutert und wesentliche Teilaxiome besprochen.

3.2.1 Ad (1): Prinzip der minimalen Hebelarme

3.2.1.1 Negativer Geotropismus

Unter „negativem Geotropismus“ wird das „Wachsen entgegen der Sonne“ verstanden; dies unter der Führung des Leittriebes im Sinne der „Apikaldominanz“ (Unterdrückung möglicher Führungsansprüche der Seitenäste). Bei Ausfall des Leittriebes („Wipfelbruch“) übernimmt ein Seitenast, durch lokale Ausbildung von Reaktionsholz, dessen Position. Dies im Sinne der Minimierung der Biegespannungen, insbesondere am Stammfuß. Die Reaktionen des Stammholzes im Sinne des „negativen Geotropismus“ sind nach Speck & Burgert (2011) zu rd. 57 % auf Asymmetrien in den tangentialen Spannungen in Folge der Ausdifferenzierung von Zellen und folglich gegebener axialer Schrumpfung und transversaler Ausdehnung der Zelle zurückzuführen (Thibaut et al., 2001). Rund 13 % (Laub-) bzw. 24 % (Nadelholz) entfallen auf das Reaktionsholz und die Änderung des E-Moduls (→ Strukturanpassung) und rund 31 % bei Laub- und 26 % bei Nadelholz werden dem exzentrischen Wachstum (→ Formanpassung) zugeschrieben.

3.2.1.2 Flexibilitätsstrategie

Hierunter wird die Reduktion der Biegespannungen am Stammfuß durch passives „Ausweichen“ der Krone bzw. der Äste, Zweige und Blätter bei Windeinwirkung verstanden. Junge Zweige weisen im Vergleich zu Ästen oder Stammholz einen E-Modul längs von rund 1 bis 2 GPa auf und somit eine um den Faktor ≥ 5 geringere Biegesteifigkeit als das adulte Stammholz. Die Veränderung in der Steifigkeit erlaubt es in frühen Jahren Windbeanspruchungen zu entgehen und im Alter diesen erfolgreich zu widerstehen (Speck & Burgert, 2011). Nach Mattheck et al. (1993) bedient sich der Baum zudem einer effizienten Rückversicherung z.B. bei Stürmen, in dem die Versagenswahrscheinlichkeit von Baumstrukturen in Abhängigkeit ihrer jeweiligen Hierarchie abgestuft wird; sprich Zweige und Äste weisen einen geringeren Sicherheitsfaktor von $S = 4,0$, mit S definiert als Versagenslast / Gebrauchslast, als der Stamm ($S = 4,5$) auf. Auf diesen Aspekt wird später,

im Zuge der Erklärung des Verzweigungssystems von Bäumen, in Abschnitt 4.3 nochmals eingegangen.

Ein Vergleich betreffend Sicherheit: Im Holzbau gilt nach Eurocode 5 eine angestrebte Versagenswahrscheinlichkeit von einzelnen Bauteilen von 10^{-6} . Diese Wahrscheinlichkeit gilt für Primärstrukturen aber auch nachrangige Konstruktionen (Sekundär-, Tertiär- u. a. Tragstrukturebenen) ohne Abstufung und ist somit als konstant zu betrachten. Im Hinblick der Wirtschaftlichkeit ist dieser Ansatz zu hinterfragen und suggeriert, dass lokale Schäden demnach gleich wahrscheinlich sind wie das Versagen der Primärtragstruktur. Da im allgemeinen die Nachweise an einem Regelsystem und hier für die einzelnen Bauteile geführt und nicht das Sicherheitsniveau der gesamten Tragstruktur mit gegebenen Systemwirkungen betrachtet wird ist eine indirekte Variation der Sicherheit durch die unterschiedliche Anzahl an Tragelementen gleicher Art gegeben. Sprich: Bei 1 % Versagenswahrscheinlichkeit ist der erwartbare Ausfall bei zehn Bindern der Primärtragstruktur gleich 0,1 Elemente, wohingegen jener bei 100 Einhängepfetten als Sekundärstruktur gleich 1,0 Element und der Lattung (1.000 Stk.) gleich 10 ist.

3.2.2 Ad (2): Axiom konstanter Spannungen

3.2.2.1 Betrachtungen der ungestörten Baumstruktur

Nach Metzger (1893) gilt, dass die Biegespannungen an der Oberfläche des Baumstammes konstant bleiben, solange $D^3 \sim h$, mit D als Stammdurchmesser und h als Bodenabstand der horizontal angreifenden Windlast, siehe Gl. (1) und Abb. 5. Dies wird durch die Konizität der Stammform erreicht. In Folge verändert sich der Stammdurchmesser sprunghaft nach Einbindung eines Seitenastes um das zusätzliche Biegemoment entsprechend abzuleiten.

$$\sigma_0 = \frac{F_{\text{Wind}} \cdot h}{\pi/32 \cdot D^3} = \text{konst.} \rightarrow h = \frac{\pi \cdot \sigma_0}{32 \cdot F_{\text{Wind}}} \cdot D^3 \quad (1)$$

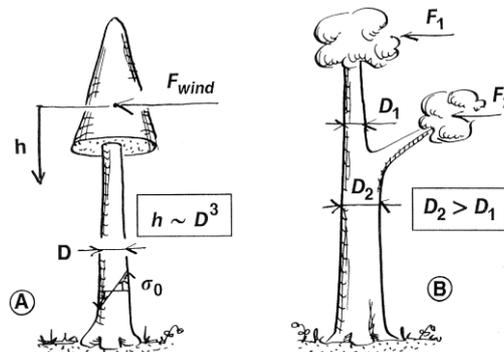


Abb. 5: (A) Konizität der Stammform zur Erhaltung konstanter Biegespannungen; (B) lokale Änderung des Stammdurchmessers infolge zusätzlicher Biegemomente aus anschließendem Ast (Mattheck & Kubler, 1997)

Selbiges gilt auch für die Wurzeln des Baumes und Querschnittsformen von Ästen: Auch hier ist eine Formanpassung entsprechend der äußeren und inneren Einwirkungen durch Ausformung von I-Querschnitten bei primärer Biegebeanspruchung oder der Bildung von pfeilerartigen Querschnitten bei kombinierter Biege- und Zugbeanspruchung gegeben.

Das adaptierte Wachstum lässt sich auch in der Art und Weise der Ausbildung des sekundären Dickenwachstums selbst und in der Bildung von exzentrischen, ovalen Stammquerschnitten entgegen der Hauptwindrichtung von Bäumen in entsprechend exponierten Lagen beobachten. Somit kann mit jeder neu gebildeten Zelle auf geänderte,

äußere Umstände reagiert werden um wieder in einen optimalen Zustand konstanter Spannungen zu gelangen.

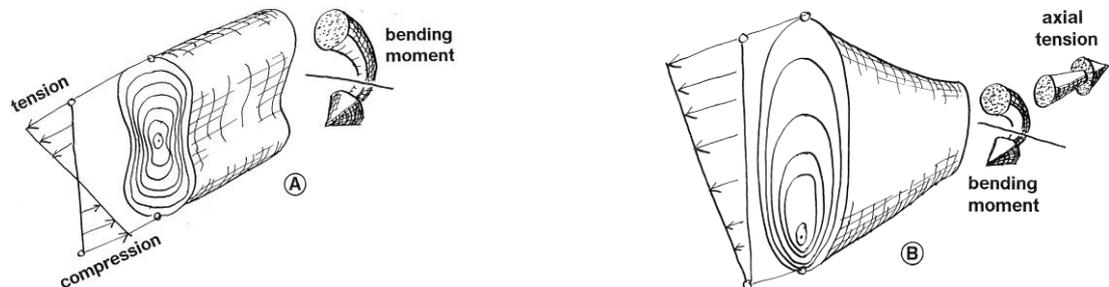


Abb. 6: (A) Querschnittsform ähnlich einem I-Träger bei primärer Biegebeanspruchung; (B) Querschnittsform ähnlich einem Pfeiler bei kombinierter Biege-Zugbeanspruchung (Mattheck & Kubler, 1997)

3.2.2.2 Betrachtungen der gestörten Baumstruktur

Mattheck & Kubler (1997) betonen, dass nur natürlich gewachsene Kerben, wie z.B. in der Anbindung von Ästen an das Stammholz, frei von Kerbspannungen sind. Extern herbeigeführte Strukturstörungen führen zu Kerbspannungen welche ihrerseits wiederum im Sinne der Thigmomorphogenese einen sukzessiven Stabilisierungsvorgang durch lokale Form- und Strukturanpassung wie etwa die Bildung von Wundgewebe (Kallus) initiieren und im Sinne von Reizsteuerung herbeiführen. Das heißt: Bereiche oder Zonen von Verletzungen und folglich erhöhten Kerbspannungen werden bevorzugt durch adaptives Wachstum einer Spannungsreduktion unterzogen (siehe Abb. 7).

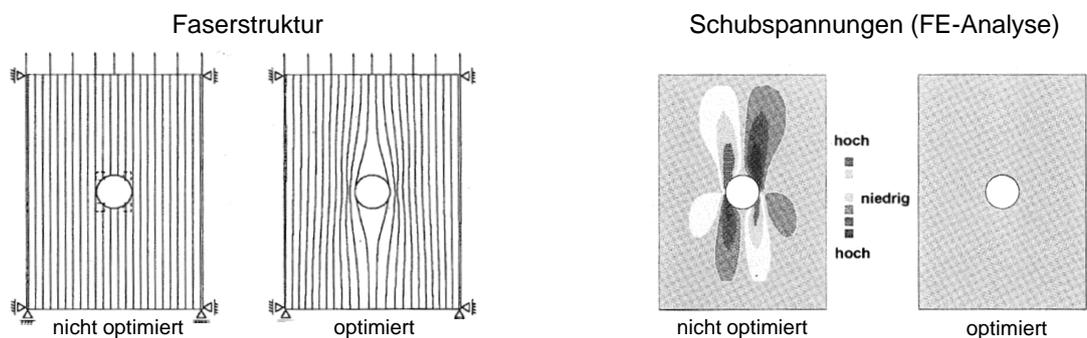


Abb. 7: Optimierung der Faserstruktur in einem Faser-Verbundwerkstoff in Analogie zu einer Ast-Stammanbindung. Reduktion der Schubspannungen um rd. 98 % (Mattheck, 1997)

Eine biomechanisch basierte iterative Optimierungsmethode, welche diesem spannungsgesteuerten Adaptierungsmechanismus folgt, ist CAO („Computer Aided Optimization“). Es ermöglicht „biologisches Wachstum“ in Zonen erhöhter Spannungen welche durch Temperaturänderungen initiiert werden und einen Kraftfluss entlang der Hauptspannungstrajektorien bewirken (Ausdehnung → Materialanlagerung; Stauchung → Materialschwund).

3.2.3 Ad (3): Minimierung kritischer Schubspannungen

3.2.3.1 Spindelformen: Vor- u. Nachteile

Spindelförmige Faserumlenkungen sind im Allg. im Holz in Folge des Radialparenchyms, den Holzstrahlen, zu finden. Der Vorteil dieser Querschnittsform liegt in den geringen Kerbspannungen (siehe Abb. 7). Bei axialer Druckbeanspruchung kommt es aufgrund der

Lastumleitung um den Holzstrahl an dessen Enden zu transversalem Druck und auf halber Höhe zu einer Querkzugbeanspruchung zwischen den umlaufenden Holzfasern und dem Holzstrahl, was zu einer Separierung selbiger und somit, aufgrund des Verlustes seitlicher Abstützung, zum Ausknicken der Fasern führen kann. Axialer Zug der Fasern bedingt hingegen eine Querdruckbeanspruchung auf halber Höhe der Holzstrahlen und eine Querkzugbeanspruchung der umlaufenden Faserbereiche an den Enden des Holzstrahls was in Folge ebenfalls zu einer Delaminierung selbiger führen kann. Beide Lastfälle führen zu Mikrorissen, welche sich bei wiederholter und vor allem wechselnder Beanspruchung zu Konglomerationen zusammenschließen und Makrorisse bilden können. Zur Verhinderung dessen reagiert der Baum mit tangentialer Vorspannung (Überdrückung) der Zellstruktur, siehe Abschnitt 3.2.5.2. Dieser Umstand wird insbesondere sichtbar im Falle der Holztrocknung und bedingter tangentialer Zugbeanspruchung: Es kommt zu radialen Rissen entlang der Holzstrahlen.

3.2.3.2 Globale Faserabweichungen (Schrägfaser und Drehwuchs)

Betreffend globaler Faserabweichung kann nach Mattheck & Kubler (1997) in folgende Bereiche unterschieden werden: (i) mechanisch kontrollierte Faserabweichung und (ii) genetisch programmierte Faserabweichung.

Ad (i): Die mechanische Kontrolle basiert auf den Torsionsspannungen, induziert durch äußere Einwirkungen (wie etwa Windbeanspruchung), und führt zu einer Verdrehung des Stammes um die Fasern wiederum in Richtung der Hauptspannungstrajektorien auszurichten. Durch die Torsion kommt es zu einer Komprimierung der Fasern und somit, in Folge der positiven Interaktion von Schub und Druck quer zur Faser, zu einer Reduktion der Versagenswahrscheinlichkeit auf Schub (Abb. 8).

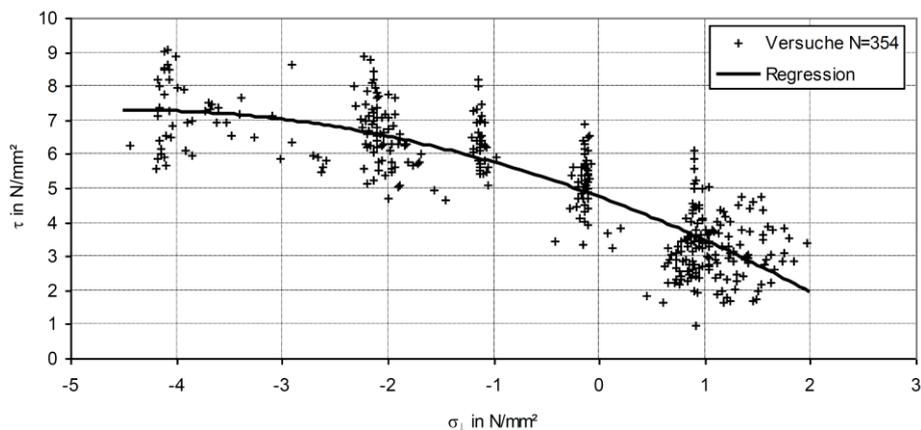


Abb. 8: *Interaktion von Schub und Querdruck bzw. Querkzug von merkmalsfreiem Fichtenholz bei $u = 12\%$ Holzfeuchte nach Spengler (1982)*

Ad (ii): Nach Kubler (1991) führt Spiralwuchs zu einer verbesserten transversalen Wasser- und Nährstoffversorgung in Folge von Ast- oder Wurzelverlust. Die Motivation dafür ist somit von den mechanischen Grundsätzen und dem Ziel der Optimierung des Kraftflusses zu unterscheiden.

Der Nachteil der Optimierung ist die Spezialisierung welche bei dynamischer Änderung der äußeren Umstände rasch auch zu unerwünschten Umständen führen kann. Bäume, optimiert für Torsion, welche aber auf Biegung beansprucht werden reagieren hierbei mit einer Adaptierung der Mittellamelle durch Steigerung ihrer Zugfestigkeit (Dietrich & Mattheck, 1995).

Eine Methode zur Erklärung dieser internen Optimierungsvorgänge und welche diese Erkenntnisse ihrerseits zur Strukturoptimierung für das Ingenieurwesen nutzt ist CIAO („Computer Aided Internal Optimization“) nach Kriechbaum et al. (1992). Die Faserorientierung gilt demnach als optimal, wenn die Fasern nach den Hauptspannungstrajektorien (schubspannungsfrei!) ausgerichtet sind.

3.2.4 Ad (4): Form- und Strukturoptimierung

3.2.4.1 Axiale Anordnung der Jahrringe

Wiederum motiviert durch die Optimierung des Kraftflusses werden in Folge von Hindernissen und / oder Verletzungen Jahrringe unter einem Winkel von 90° auf das jeweilige Hindernis bzw. die extern bedingte Strukturstörung ausgerichtet (siehe Abb. 9). Dies dient wiederum der Minimierung kritischer Schub- und Querspannungen im Bereich der Jahrringgrenzen.

3.2.4.2 Tangentiale Jahrringausrichtung / -anordnung

Selbiges gilt für die Bildung von Wundgewebe (Kallus) sowie im Falle von Wund- und Fremdkörpereinschluss in tangentialer Richtung. Auch hier folgt die Orientierung des Jahrringverlaufes dem optimalen Kraftfluss und auch hier treffen die Jahrringe unter 90° auf den jeweiligen Bereich auf, siehe Abb. 9. Der Grund hierfür ist die Minimierung der Schubspannungen zwischen den Jahrringen.

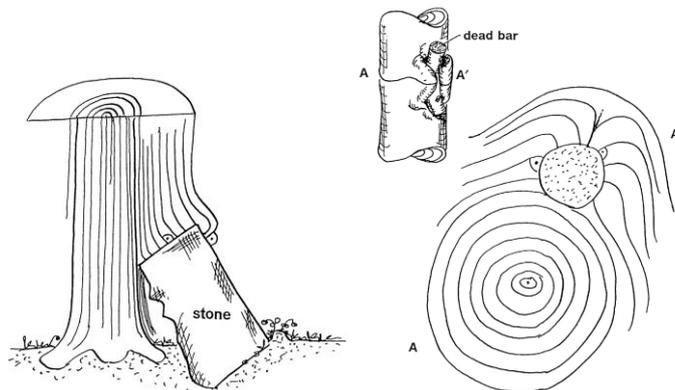


Abb. 9: *Ausbildung der Jahrringe in Folge von extern herbeigeführten Strukturstörungen: In axialer Richtung (links); in transversaler Richtung (rechts) (Mattheck & Kubler, 1997)*

3.2.5 Ad (5): Wachstumsspannungen

Kubler (1987) untersuchte die Wachstumsspannungen im Stammholz. Qualitative Verläufe sind Abb. 10 zu entnehmen.

Es zeigt sich, dass Wachstumsspannungen durch ein pneumatisches Prinzip gesteuert werden: Normalholz expandiert demnach lateral bei axialer Stauchung. Dieser Vorgang wird durch benachbarte Zellen, insbesondere in axialer und tangentialer Richtung, behindert, wohingegen der Gegendruck seitens der Rinde (radial) als vernachlässigbar gilt (Thibaut et al., 2001). Bei Druckholz zeigt sich eine axiale Expansion zusammen mit lateraler Stauchung, wohingegen bei Zugholz eine stark ausgeprägte laterale Expansion in Kombination mit axialer Stauchung zu beobachten ist. Betrachtet man die Verhältnisse der E-Module, so zeigt sich bei Druck- vs. Normalholz ein Faktor von rd. $1/3$ wohingegen das Zugholz einen rund zweifachen E-Modul von Normalholz aufweist. Die Dehnungen bei Zellwachstum und die zugeordneten Mikrofibrillenwinkel sind: Normalholz (MFA 7 bis 25°)

bei Stauchungen von 0,05 bis 0,1 %; Druckholz (MFA 20 bis 30°) bei Dehnungen von +0,05 bis +0,2 %; Zugholz (MFA rd. 0°) bei Stauchungen von 0,2 bis 0,5 % (Thibaut et al., 2001).

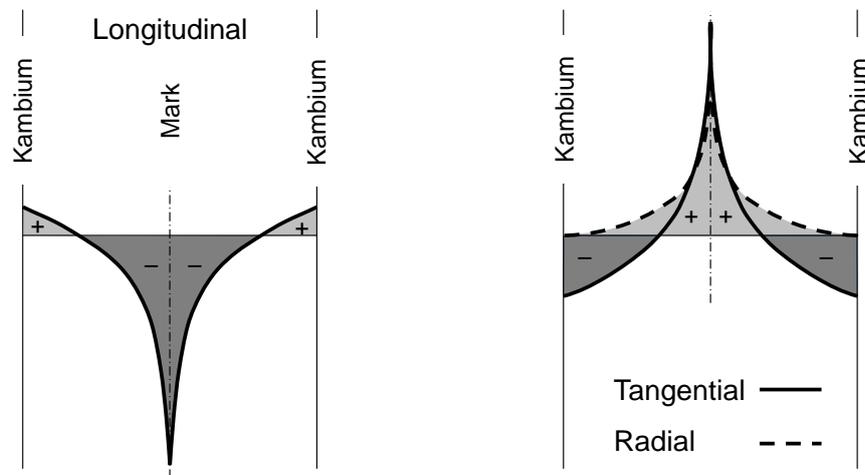


Abb. 10: Strukturinterne Wachstumsspannungen nach Kubler (1987; aus Mattheck & Kubler, 1997; adaptiert)

Wachstumsspannungen wirken zudem unerwünschten Spannungszuständen im Baum entgegen und verringern damit das globale Versagensrisiko. Axiale Zugspannungen verringern das Risiko eines Stabilitätsversagens der Fasern auf Knicken wohingegen tangentielle Druckspannungen der Rissneigung von Holzstrahlen entgegenwirken (Mattheck & Kubler, 1997).

3.2.5.1 Axiale Normalspannungen

Da der Widerstand von Holz auf Druck längs zur Faser nur einem Bruchteil von jenem auf Zug entspricht (siehe Abb. 4) würde im Stammholz ein hohes Risiko für ein Stabilitätsversagens durch Knicken bestehen. Um dem zu entgegen übt der Baum im Zuge der Ausdifferenzierung von Zellen eine axiale Vorspannung aus was in Folge zu einer Druckspannung im Inneren des Stammes führt. Diese Wachstumsspannungen sind i.Allg. hoch im Sommer aber geringer im Winter. Laub- bzw. nadelabwerfende Baumarten reduzieren das Risiko eines Stabilitätsversagens daher zudem durch Laub- bzw. Nadelabwurf im Herbst.

3.2.5.2 Tangentiale Normalspannungen

Der Gefahr einer Delaminierung oder eines Stabilitätsversagens von Fasern angrenzend an Holzstrahlen wird durch tangentielle Vorspannung auf Druck entgegengewirkt. Eine tangentielle Verstärkung findet zudem durch den hohen Ligninanteil in der Mittellamelle im Sinne einer Art Klebstoff statt. Der Baum nutzt aber auch die Holzstrahlen als potentielle Versagensbereiche durch Austrocknung von abgestorbenen Ästen, was eine Rissbildung und den Abwurf dieser zur Folge hat (Dietrich & Mattheck, 1995).

3.2.5.3 Radiale Normalspannungen

Holzstrahlen verstärken das Holz radial und festigen somit dessen Verbund (Mattheck & Kubler, 1997). Zwischen den Jahrringen, mit den an den Jahrringgrenzen gegebenen potentiellen Versagensbereichen in Folge der Wachstumspause und des Rohdichte- respektive Steifigkeitssprunges, zeigen sich oftmals Verdickungen in den Holzstrahlen um die Jahrringe stärker aneinander zu binden und somit den axialen Schubwiderstand zwischen

den Jahrringen zu erhöhen (z.B. durch Wind biegebeanspruchter Baum → nachgiebiger Verbund; siehe Abb. 11). Bei Krümmungen oder Schrägstellungen und damit einhergehenden erhöhten Querkzugbeanspruchungen ist ein gehäuftes Auftreten von Holzstrahlen und dadurch ein erhöhter Biege- und Querkzugwiderstand nachweisbar. Man spricht von einer spannungsgesteuerten Verteilung der transversalen Festigkeit durch Steuerung der Häufigkeit von Holzstrahlen. Demnach wird die laterale Festigkeit von Holz im Sinne der Thigmomorphogenese, durch laterale Spannungen gesteuert.

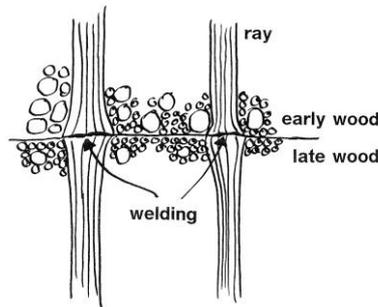


Abb. 11: Verdickungen im Radialparenchym an der Jahrringgrenze (Mattheck & Kubler, 1997)

3.3 Erkenntnisse aus dem hierarchischen Aufbau von Holz und der Bio-Mechanik von Bäumen: Eine zusammenfassende Betrachtung

Im Folgenden Ergänzungen zu wesentlichen Aspekten der Struktur natürlicher Materialien und eine Zusammenfassung der primären Inhalte vorausgehender Kapitel zum Material Holz:

- **Adaptives Wachstum**

Im Gegensatz zu Knochen oder anderen hierarchisch organisierten natürlichen Materialien verfügen die Holzzellen nach Ausdifferenzierung über keine Versorgung mit Nährstoffen; sie sterben unmittelbar nach ihrer Fertigstellung. Zur Anpassung der mechanischen Eigenschaften bedient sich der Baum eines adaptiven, sukzessiven Wachstums durch Materialanlagerung in Axial- und Dickenrichtung. Für den Baum bzw. Pflanzen allgemein ist die zunehmende Masse, da an einem Standort verankert, nur bedingt eine Herausforderung; zur Maximierung der Photosyntheseleistung im Konkurrenzkampf mit anderen Bäumen und Vegetation sogar ein Muss. Für Tiere und Menschen wäre die zunehmende Anlagerung von Material in der Stützstruktur auf Dauer nicht tragbar. Zur Reaktion auf geänderte Rahmenbedingungen erlaubt die Natur hier eine Adaptierung der inneren Struktur von Knochen und anderen Geweben.

- **Motivation für hierarchische Materialstrukturen**

Zhang et al. (2010) analysierte die Anzahl an Materialhierarchien zur Erzielung einer maximalen Zähigkeit. Ein theoretisches Optimum wurde bei vier bis sechs Ebenen festgestellt, in guter Übereinstimmung mit der Anzahl hierarchischer Ebenen in natürlichen Materialien. Das gilt als Beleg, dass die Natur die makroskopische Zähigkeit von Materialien maximiert. Vincent (2006) untersuchte die hierarchische Struktur des Holzes und bekräftigte, dass hierarchische Strukturen nicht automatisch selbstähnlich bzw. fraktal sein müssen. Die Ordnung oder Grad der hierarchischen Struktur wird definiert als Anzahl an Skalenebenen mit einer anerkannten Struktur. Holz gilt als selbstähnliche, hierarchische Materialstruktur. Aufgrund der strukturellen Mechanismen und Bindungen zwischen den Elementen, typisch für die jeweilige Ebene, gilt Holz nicht als fraktal. Vincent (2006) betont, dass „... *shape (information and*

structure) is cheaper than material ...“, womit begründet ist, warum die Natur komplexe Materialstrukturen mit optimaler Effizienz gegenüber z.B. komplexer chemischer Molekülstrukturen präferiert.

- **Regelungsmechanismus Mikrofibrillenwinkel (MFA)**

Änderungen im Mikrofibrillenwinkel, sprich der Orientierung der Zellulose relativ zur Zellachse, erlauben die Adaptierung mechanischer Kenngrößen wie Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit. Dies zudem in Abhängigkeit der jeweiligen Holzfeuchte. Bei Quellung von Zellen mit einem MFA $> 45^\circ$ dehnen sich diese axial, wohingegen bei einem MFA $< 45^\circ$ eine axiale Kontraktion folgt. Die Kombination von Zellverbänden mit unterschiedlichen MFAs innerhalb von Tragelementen (Stamm, Ast, Zapfenschuppen, etc.) erlaubt, analog einem Bi-Metall, eine Verformung / Bewegung in Abhängigkeit der Feuchtigkeit. Dieser „Antrieb“ wird als „hygromorph“ bezeichnet (Fratzl & Barth, 2009). Hierbei reagiert die Zellulose als steifes Element wohingegen die Matrix-Polymere aufgrund der hydrophilen Eigenschaften Quellen und Schwinden (Burgert & Fratzl, 2009). Nach Masselter & Speck (2011) wird die Brucharbeit von Tracheiden durch den MFA in S2 bestimmt. Bei einem MFA $> 0^\circ$ kommt es bei hohen Lasten zu einem „Fließen“ des Lignins zwischen den Zellwänden in der Mittellamelle. Dies erlaubt einen Anstieg der Faserdehnung ohne Versagen und folglich eine entsprechende Energiedissipation und Erhöhung der Brucharbeit. Die maximale Brucharbeit wurde für Biegung und Zug parallel zur Faser bei einem MFA = 15° festgestellt. Darüber kommt es zu einer zunehmenden Schubbeanspruchung der Matrix.

- **Thigmomorphogenese: Wachstumssteuerung durch externe Reize**

Die Beeinflussung des pflanzlichen Wachstums durch häufig auftretende externe Reizvermittlung wird als Thigmomorphogenese bezeichnet. Es ist eine Eigenschaft die es dem Baum erlaubt auf geänderte äußere Rahmenbedingungen zu reagieren. Beispielsweise weisen Bäume bei zunehmender exponierter Windbeanspruchung ein verringertes Dämpfungsverhältnis sowie eine reduzierte Biegesteifigkeit und Schwingfrequenz auf. Weiters sind eine stärkere Konizität und ein reduziertes Höhenwachstum festzustellen was in Verbindung mit dem geringeren E-Modul zu einer gesteigerten Flexibilität der Krone bei erhöhter Steifigkeit an der Stammbasis führt (Speck & Burgert, 2011).

- **Vorspannungseffekte**

Das Stammholz ist in den äußeren Zonen axial unter Zugspannung und im Kern unter Druck. Zudem ist das Holz radial und tangential vorgespannt. Nach Speck & Burgert (2011): „... *trees secondary growth allows slow but continuous and very efficient adaptation to external stimuli ...“*.

- **Parallele, sub-serielle Strukturen**

Das „gemeinsame“, parallele Wirken von Elementen mit viskos-plastischem oder rein plastischem Verformungspotential in Systemen ermöglicht, dass möglichst viele der Elemente zur Tragwirkung im Gesamtsystem beitragen und ihre volle Tragfähigkeit weitestgehend realisieren können. Die Streuungen in den Kenngrößen ermöglichen zudem eine plastische Verformung im Sinne eines „gutmütigen“ Materialverhaltens auch im System. In diesem Sinne dient die plastische Verformungskapazität der Möglichkeit zur Anregung möglichst vieler Elemente zum gemeinsamen Wirken; im Idealfall des ideal elastisch-plastischen Materials das Fließen aller Elemente und somit Erhalt der erwarteten Tragfähigkeiten der Elemente bei deutlicher Reduktion der Streuungen in den Systemkenngrößen (Brandner, 2013).

- **Spiralformen in der Natur**

Die spiralförmige Wicklung der Zellulosefibrillen um das Zelllumen ermöglicht eine Regelung des Festigkeits-, Steifigkeitspotentials und der Zähigkeit der Zellen in Abhängigkeit der Packungsdichte, der Vernetzung untereinander, des MFA, der Verbundfläche zwischen den Zellen (absperrende, armierende Wirkung), u.a.

- **Verstärkung von Knotenregionen**

Wie z.B. im radialen Parenchym an der Jahringgrenze beobachtbar reagiert das Holz auf lokale Spannungserhöhungen in Knoten bzw. Anschlusspunkten durch lokale Verstärkung (Materialanlagerung) und Form- und Strukturoptimierung (graduelle Änderungen der äußeren Form und der inneren Faserstruktur) sowie Reduktion der Schubspannungen zwischen einzelnen Schichten (Jahringen) durch Optimierung des Kraftflusses (Form- und Strukturorientierung gemäß den Hauptspannungstrajektorien).

4 Auswahl an möglichen Potentialen für bionische Entwicklungen im Ingenieurholzbau

Nach Ling et al. (2011) lassen sich Erkenntnisse der strukturellen Bionik für mechanische Gestaltung in folgenden Bereichen anwenden:

- „Optimal Design Principle (ODP)“: Nicht Maximierung / Minimierung von Teilbereichen und ihren Eigenschaften / ihrer Leistungsfähigkeit, sondern Optimierung der Gesamtstruktur / des Gesamtkomplexes durch
 - genetische Algorithmen,
 - adaptive Algorithmen,
 - smarte Berechnungen;
- Fokus auf die Mikrostruktur: Makroskopische Eigenschaften biologischer Materialien werden durch die mikroskopische Struktur und Organisation des Materials determiniert;
- intelligente Systematisierung, beinhaltend: Multi-Funktionalität, Anpassungsfähigkeit, Selbstheilung, ...;
- minimale Verschmutzung & Umweltschutz als Lösungsmöglichkeit des gegenwärtigen Konflikts zwischen wirtschaftlicher Entwicklung und Energieverbrauch.

Im Folgenden ein paar Ideen und Gedanken zu möglichen Umsetzungspotentialen im Ingenieurholzbau.

4.1 Lokale Verstärkungen im Holz

Es ist hinlänglich bekannt, dass Holz bei Schub- und / oder Querkzugbeanspruchung nur geringe Widerstände aufweist. Im Stammholz wird diesem Umstand durch ein vermehrtes Auftreten von radialen Holzstrahlen, als Armierung der Materialstruktur radial, begegnet, siehe Burgert et al. (2000, 2001). Basierend auf Untersuchungen der genannten Autoren lässt sich z.B. für Eiche, mit einem Quer-E-Modul von $E_{90} \approx 500 \text{ N/mm}^2$ und einem Anteil von Holzstrahlen mit 15 % und $E_0 \approx 4.000 \text{ N/mm}^2$ (axiale Zugfestigkeit bei Buchen-Holzstrahl $f_{t,0}$ rd. 80 N/mm^2) der Quer-E-Modul auf 1.000 N/mm^2 steigern. Das Verhältnis zwischen dem Längs-E-Modul der Holzstrahlen und jenem von Eichenholz quer zur Faser ohne Holzstrahlen beträgt somit $4.000 / 500 = 8$. Ähnliche Vergleiche auf Datenbasis von sieben weiteren Laubholzarten ergeben eine Bandbreite des Verhältnisses von 3 bis 30, im Durchschnitt 10. Ein Unterschied zwischen Ring- und Zerstreuporen ist nicht festzustellen was vermuten lässt, dass die genannten Beobachtungen auch auf Nadelholz übertragbar sind.

Gegenwärtig werden im Ingenieurholzbau zunehmend Querkzug- und Schubverstärkungen mittels Vollgewindeschrauben, Schraubstangen und eingeklebten Gewindestangen aus Stahl ausgeführt. Aktuelle Untersuchungen in Wallner (2012) und nachfolgende, interne Prüfungen an Brettschichtholz (BSH) verstärkt mit Schraubstangen haben gezeigt, dass Verstärkungen in diesen Proben ohne äußere Beanspruchung allein durch die Quell- und Schwindvorgänge bei einer Feuchteänderung von $\Delta u = 4\%$ zum Fließen kommen können und zudem Risse in Folge der Überschreitung des Querkzugwiderstandes im Prüfkörper auftreten. Das Verhältnis des E-Moduls der Schraubstange zum Quer-E-Modul des BSH-Trägers kann hier mit $210.000 / 350 = 600$ angegeben werden, und beträgt somit rd. das 20 bis 60-fache des zuvor diskutierten und seitens der Natur tolerierbaren Verhältnisses. Auch wenn nicht alleinig das Verhältnis der E-Module sondern jenes der Steifigkeiten von Interesse ist erscheint es als sinngebend Materialien für die Querkzug- und / oder Schubverstärkungen zu verwenden, welche geringere E-Modul-Verhältnisse zum umgebenden Holz aufweisen, wie z.B. Kunststoffe in Form von Klebstoffen und / oder Faser-Verbundmaterialien. Man beachte, dass auch bei Brettspertholz (BSP) und Furnierspertholz ein E-Modul-Verhältnis z.B. für Fichte (*Picea abies*) von $E_0 / E_{90} = 11.000 / 350 \approx 30$ seitens des Materials toleriert wird, solange die Schichtstärken gering bleiben. Will man Risse infolge von Verstärkungen vermeiden erscheint die Verwendung von Verstärkungsmaterialien mit einem E-Modul längs geringer dem 30-fachen des Quer-E-Moduls von Holz als notwendig. Analoge Betrachtungen können auch für Verklebungen angestellt werden, hier mit Fokus auf den Schubmodul.

4.2 Smarte Komposite

Ein Komposit besteht aus steifen und spröden Faserstrukturen, eingebettet in eine i.Allg. weiche und zähe Matrix. Dabei übernehmen die Fasern die Lastabtragung primär auf Zug axial und die Matrix die Scher- sowie Druckkräfte. Aufgrund dieser Struktur weisen Komposite oder Faserverbundmaterialien ausgeprägte anisotrope Eigenschaften auf.

Natürliche Materialien sind zumeist Komposite, welche oftmals hohe Festigkeit, Steifigkeit und Zähigkeit vereinen. Dies insbesondere durch ihre Interfaces, welche die Zähigkeit, Verformungskapazität, Bindung zwischen unterschiedlichen Stoffen und die Beweglichkeit verbessern. Nach Zhou (1994) werden die genannten Eigenschaften der natürlichen Komposite, ergänzt um die selbstständige funktionelle und strukturelle Adaptierung und Regeneration geschädigter Bereiche, durch die multiple Kombination und den hierarchischen Aufbau der Strukturelemente erzielt. Als wesentliche Parameter zur Charakterisierung der Komposite gelten (i) der Volumenanteil an Fasern, (ii) die Stärke der Zellwand und (iii) die Orientierung der Fasern in der Matrix; letztgenannter Parameter gilt als primärer Indikator für Festigkeit und Steifigkeit. Der geschichtete Aufbau der Zellwand erlaubt hierbei eine graduelle Änderung und Adaptierung der mechanischen Eigenschaften, die spiralförmige Wicklung der Fibrillen um die Zellwand die entsprechende Zähigkeit (Zhou, 1994; Li et al., 1995). Der große Vorteil von Kompositen liegt somit darin, dass durch Kombination von unterschiedlichen Materialien Werkstoffe mit Eigenschaften kreiert werden können, welche sich durch Verwendung der einzelnen Komponenten nicht realisieren lassen. Die Variationsmöglichkeiten einzelner Parameter (Materialwahl, Schichtstärke, Anordnung, etc.) erlauben eine gezielte Optimierung der Struktur und ihres Verhaltens (Burgert & Dunlop, 2011).

Technische Komposite zeigen nach Zhou (1994) folgende Eigenschaften und Potential für eine Optimierung:

- Definition geeigneter Formfaktoren für Fasern:

- Sprödes Versagen bei Verwendung kontinuierlicher Fasern in Folge der schlagartigen Freisetzung hoher Bruchenergien;
- vorzeitiges Versagen der Fasern auf Herausziehen bei Verwendung kurzer Fasern durch Verlust der Verbundwirkung zwischen Matrix und Fasern auf Schub;
- Optimierung des Interface-Design / der Verbundwirkung zwischen Fasern und Matrix:
 - Fehlende Zähigkeit hochleistungsfähiger aber spröder Komposite (Fasern in Matrix aus Keramik, u.a.);
 - fehlende Möglichkeit der eigenständigen Reparatur von inneren Strukturstörungen und Beschädigungen von außen.

Gordon et al. (1980) analysierten das Optimierungspotential von Faser-Verbundstrukturen in Analogie zur Tracheide im Holz. Basierend auf Hohlzylindern mit spiralförmiger Faserumwicklung und Einbettung dieser in einer Matrix wurde ein signifikanter Anstieg der Bruchenergie bei nur geringem Abfall der Steifigkeit und Festigkeit vergleichbarer Faser-Verbundstrukturen mit Fasern in rein axialer Ausrichtung festgestellt. Als idealer Wicklungswinkel wurden 15° identifiziert. Ähnliche Prüfungen von Li et al. (1995) zeigen, dass eine gegenläufige, zweite dünne Schichtung aus spiralförmig angeordneten Fasern einen axial auf Druck beanspruchten Zylinder zusätzlich stabilisieren. Im Vergleich zur parallelen Faseranordnung konnte bei gegenläufiger spiralförmiger Umwicklung eine Verdoppelung der Plastizität bzw. der Brucharbeit bei nur 15 % Festigkeitsabfall beobachtet werden. Untersuchungen von Saavedra Flores et al. (2011), durchgeführt an mehrfach geschichteten Faserverbundwerkstoffen bestätigen die Ergebnisse bei rd. 10 % Verlust an Zugfestigkeit. Für die Verankerung diskontinuierlicher Fasern in der Matrix schlägt Zhou (1994) eine Analogiebetrachtung mit der Wurzel- und Verzweigungsstruktur von Bäumen, im Sinne einer fraktalen Verästelung, vor. Für die Ausrichtung der Fasern in der Matrix wird seitens Mattheck (1997) die Orientierung dieser gemäß der Hauptspannungstrajektorien vorgeschlagen, was insbesondere bei lokalen Strukturstörungen (Kerbfällen) zur Vermeidung von lokalen Spannungsspitzen und induzierten Rissbildungen führen kann, siehe Abb. 7.

4.3 Baumstrukturen als Basis für Stützensysteme weitgespannter Überdachungen

Verzweigte Tragstrukturen, insbesondere Stützensysteme (engl.: „branching structure“, „dendriform“) wurden bereits mehrfach, in Folge von Analogiebetrachtungen mit Bäumen, in der Architektur und dem Bauwesen eingesetzt (Abb. 12).



Abb. 12: Dachstruktur Flughafen Stuttgart (<http://designontopic.wordpress.com/2014/01/18/branching/>; 2014-08-26; links); Tote Restaurant, Mumbai, Indien (Serie Architects; <http://designontopic.wordpress.com/2014/01/18/branching/>; 2014-08-28; rechts)

Wesentliche Entwicklungen und Formfindungsprozesse gehen u.a. auf die Arbeiten von O. Frei (Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau, Entwerfen und Konstruieren) in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts zurück (Abb. 13). Wohingegen der Baum mit seiner Krone und dem Stamm primär horizontale Windlasten und vertikale Lasten aufgrund des Eigengewichtes (aber auch z.T. Regen, Schnee, etc.) abzutragen hat, sind die analog entwickelten Stützensysteme primär bzw. ausschließlich durch Normalkräfte beansprucht und für die Abtragung vertikaler Decken- bzw. Dachlasten verantwortlich. Die Vorteile verzweigter Strukturen sind u.a. die zunehmende Verteilung der einwirkenden Lasten auf mehr Bauteile, die Reduktion der Knicklängen für die primär auf Druck axial beanspruchten Stützen und Streben, die räumliche, großflächige Lastaufnahme und Ableitung dieser in konzentrierter Form. Dies ermöglicht in Summe ein optisch leichtes und auch effizientes Tragwerk zur Überspannung weiträumiger Decken- und Dachkonstruktionen. Nachteilig ist die höhere Anzahl an Tragelementen und Anschlussknoten.

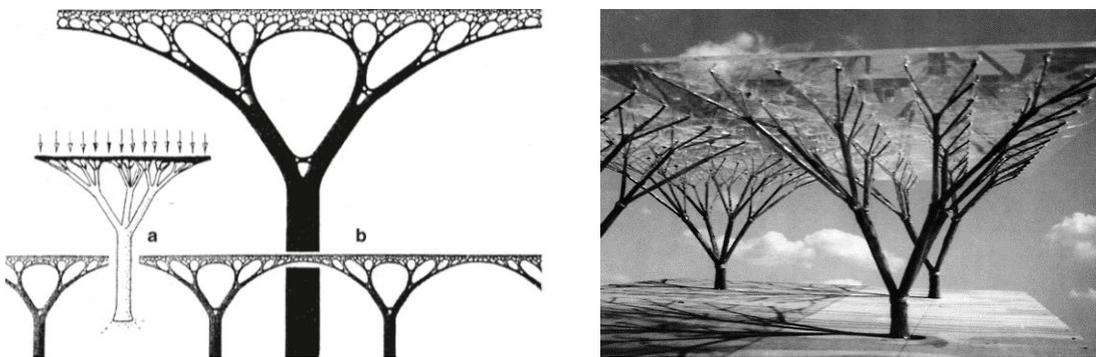


Abb. 13: Verzweigte Stützensysteme als Flächentragwerke in Analogie zu Bäumen: (a) Konzeptskizze; (b) Schaummodell (nach Frei Otto et al. 1982; entnommen Nachtigall & Pohl, 2013; links); Stützenmodell mit Deckenplatte von Frei Otto 1960 (<http://tank-studio.tumblr.com/post/43024298633/archiveofaffinities-frei-otto-tree-structures>; 2014-08-27; rechts)

Durch Beobachtung des Baumes und seiner Verzweigungsstruktur wurde bereits im 15. bzw. 16. Jhdt. von Leonardo da Vinci eine Regel betreffend die Durchmesser von Ästen vor und nach Verzweigung aufgestellt, siehe

$$d^{\Delta} = \sum_{i=1}^N d_i^{\Delta} \quad (2)$$

mit d als Astdurchmesser vor Verzweigung (Rang $j+1$) und d_i als Durchmesser der Äste nach Verzweigung (Rang j), mit $i = 1, \dots, N$ als Grad der Verzweigung, und $\Delta = 2$ (Eloy, 2011). Feldmessungen ergaben für den Potenzparameter Δ Werte zwischen 1,8 und 2,3 und bestätigen somit Leonardo's empirische Gleichung. Zur Erklärung dieses Potenzansatzes wurden seither verschiedene Modelle definiert (Eloy, 2011): Eines davon, bekannt als „pipe model“ bedient sich dem Ansatz des Stofftransportes im Baum unter Gewährleistung einer konstanten Durchflussgeschwindigkeit (Summe der Querschnitte vor und nach Verzweigung konstant). Eine Verifizierung scheitert u.a., da nur ein bedingter Anteil des jeweiligen Stamm- bzw. Astquerschnittes am Stofftransport beteiligt ist. Ein weiterer Ansatz postuliert das „Prinzip der konstanten Elastizität“ unter Betrachtung, dass die Biegesteifigkeit der Äste unter ihrem Eigengewicht konstant ist. Metzger (1893) formulierte das „Modell konstanter Spannungen“ unter dem Aspekt, dass Biegespannungen, induziert durch Windlasten, in allen Ästen konstant sind. Die Anwendung dieser Regel, auch in baupraktischer Hinsicht, führt zu einem äußerst leichten Tragwerksentwurf, bedingt allerdings, dass die Versagenswahrscheinlichkeit in allen Rängen der Verzweigung konstant ist. Wie bereits erwähnt (Abschnitt 3.2.1.2), zeigen Beobachtungen an Bäumen allerdings eine abnehmende

Versagenswahrscheinlichkeit mit zunehmendem Verzweigungsgrad (Anm.: Zweige brechen vor den Ästen und diese vor dem Stamm). Eloy (2011) wies unter dem Ansatz einer verhältnismäßig zum Rang des Astes gegebenen Versagenswahrscheinlichkeit und einer fraktalen Verzweigungsstruktur nach, dass die Verzweigung in Bäumen durch Windkräfte induziert wird und die Durchmesser der Äste in Folge der dadurch gegebenen Spannungen gemäß Gl. (2) angepasst werden. Die Regel nach Leonardo da Vinci gilt zudem unabhängig vom Verzweigungsgrad N .

Eine sehr elegante Methode die Schnittgrößen von genannten Verzweigungsstrukturen bestehend aus mittels Normalkraft beanspruchten Stäben zu finden und die Struktur hinsichtlich der gleichmäßigen Lastabtragung je Rang der Verzweigung zu optimieren bietet hierbei die graphische Statik. Die rechnerische Optimierung des Systems kann zudem sehr elegant unter Anwendung des Maxwell Theorems (Maxwell, 1965) gelöst werden (Baker et al., 2012; Saliklis & Houston, 2013; u. a.). Gemäß diesem Theorem folgt:

$$\text{interne Energie} \equiv \text{externe Energie} \rightarrow \sum N_i \cdot l_i \equiv \sum \vec{F}_i \cdot \vec{r}_i \quad (3)$$

mit N_i und l_i als Normalkräfte und Längen der Stäbe und der rechten Seite der Gleichung als Summe der Skalarprodukte der Lastvektoren \vec{F}_i und Vektoren \vec{r}_i als Abstände der Lastangriffspunkte zu einem Bezugspunkt in einem globalen Koordinatensystem. Die interne Energie wird unterteilt in Zug- und Druckanteile. Dies ergibt:

$$\sum l_t \cdot N_t - \sum l_c \cdot N_c = \sum V_t \cdot \sigma_t - \sum V_c \cdot \sigma_c = \sum \vec{F}_i \cdot \vec{r}_i = \text{konst.} \quad (4)$$

mit N_t und N_c als Zug- und Drucknormalkraft längs zur Faser, l_t und l_c als Länge der Zug- und Druckstäbe, σ_t und σ_c als Zug- und Druckspannung längs zur Faser. Änderungen in der Tragstruktur bei gegebener Einwirkungssituation bewirken demnach Änderungen in den Schnittgrößen, wobei die Balance zwischen Druck- und Zugspannungen durch die Konstanz der inneren Energie gewahrt wird. Eine potentielle Anwendung des Theorems nach Maxwell ist die numerische Optimierung der Tragstruktur z. B. hinsichtlich einer gleichmäßigen Spannungsverteilung je Verzweigungsebene bei minimalem Materialeinsatz. Als Faktor zur Beurteilung der (Energie-)Effizienz gilt der Nettobetrag der internen Energie (Saliklis & Houston, 2013)

$$\left| \sum V_t \cdot \sigma_t \right| + \left| \sum V_c \cdot \sigma_c \right| = \text{Nettobetrag interne Energie} \rightarrow \text{Minimum!} \quad (5)$$

Analysen, durchgeführt an Verzweigungsstrukturen in Saliklis & Houston (2013) und an allgemeinen Fachwerkstrukturen in Baker et al. (2012), zeigen, dass Konstruktionen optimiert auf minimalen Materialeinsatz auch die höchsten Steifigkeiten aufweisen.

4.4 Tensegrity – Eine Tragstruktur mit erheblichem Potential

„Tensegrity“ ist ein aus dem Englischen stammendes Kofferwort, generiert von R. B. Fuller aus den Wörtern „Tension“ (Zugspannung) und „Integrity“ (Ganzheit, Zusammenhalt) mit seiner berühmten Definition „... *islands of compression in a sea of tension* ...“. Man versteht darunter Tragstrukturen, welche aus kontinuierlichen Zugelementen (oftmals Seilen) und diskontinuierlichen Druckstäben bestehen, wobei sich die Druckstäbe in keinem Punkt berühren sondern allein durch die Zugelemente indirekt in Verbindung stehen und so ein in sich stabiles Tragwerk bilden (Swanson II, 2013). Umfangreiche Entwicklungen gehen hierbei auf R. B. Fuller, K. Snelson und D. G. Emmerich in den 60er Jahren des letzten Jahrhunderts zurück. Erste Entwicklungen werden u. a. K. Ioganson bereits am Beginn des letzten Jahrhunderts zugeschrieben (Jáuregui, 2009). Allgemein können die Druckstäbe

durch beliebige, starre Körper ersetzt werden in welchen, neben Druck- auch Biegespannungen auftreten können. Ein allseits bekanntes Beispiel ist das Speichenrad, bestehend aus Nabe, Felge (Druckelemente) und Speichen (Zugelemente) (siehe Abb. 14, links). Tensegrity-Strukturen können im Vergleich zu ihrem Eigengewicht und dem Materialeinsatz unerwartet steife Strukturen hoher Tragfähigkeit ergeben.

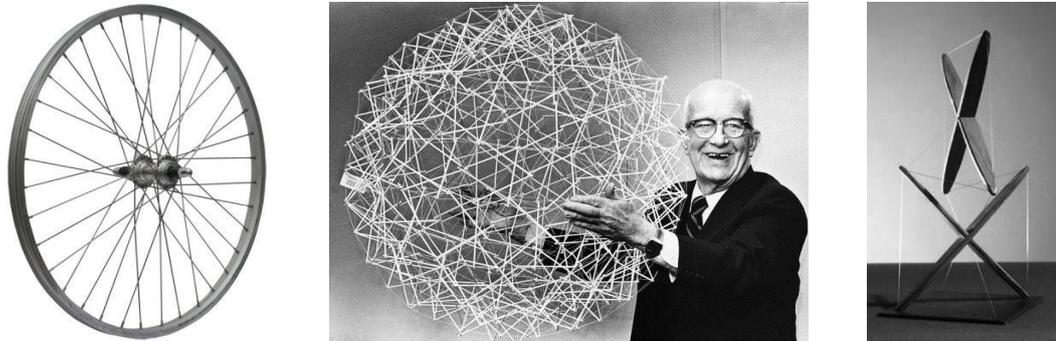


Abb. 14: Speichenrad als Beispiel einer Tensegrity-Struktur (links); R. B. Fuller's geodätische Tensegrity Kugel (<http://cerebrovortex.com/2014/06/02/dr-william-feindel-1918-2014/>; 2014-08-21; mittig); „X-Piece“ von K. Snelson 1948 (<http://www.grunch.net/snelson/rmoto.html>; 2014-08-27; rechts)

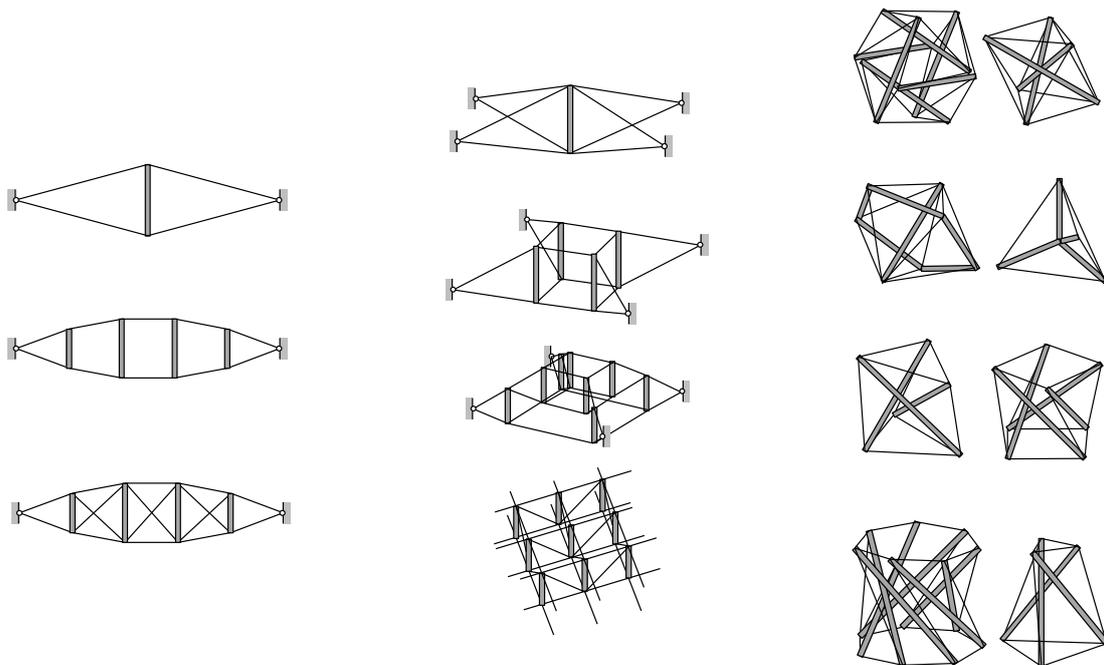


Abb. 15: Tensegrity-Systeme: offene ebene (links); offene räumliche (mittig); geschlossene räumliche Systeme (rechts) (Gengnagel, 2002; adaptiert)

D. E. Ingber (Ingber, 1998; Ingber, 2003a,b; Swanson II, 2013) entdeckte Tensegrity als inhärente Struktur der belebten Natur. Er bewies, dass Zellen und Zellstrukturen sowie tierische und menschliche Körper auf allen Hierarchieebenen durch Tensegrity erklärbar sind (Bio-Tensegrity). Als Motivation der Natur dafür gelten (i) der minimale Materialeinsatz, bedingt durch die alleinig axial mittels Normalkräften beanspruchten Bauteile, (ii) die strukturelle Nachgiebigkeit und (iii) die Anordnung der Tragelemente zueinander, welche die effizienteste Art der Raumnutzung darstellt. D. E. Inger beschreibt Tensegrities als geodätische, räumliche Tragwerke, als Strukturen mit optimaler Position der Tragelemente zur Erzielung maximaler Tragfähigkeit. Nach ihm gelingt Tensegrities mittels des Prozesses

der „Nano-Transduktion“ die Konvertierung mechanischer Information („actio“) in biochemische Veränderungen („reactio“) (Swanson II, 2013).

Fuller (1961, 1962) unterscheidet hinsichtlich der Struktur zwischen „vorgespannten Tensegrities“ und „geodätischen Tensegrities“. Vorgespannte Tensegrities sind charakterisiert durch kontinuierliche Zug- und diskontinuierliche Druckelemente. Diese Strukturen können durch den Grad der Vorspannung auf Zug oder durch Re-Positionierung der Druckelemente beeinflusst werden. Geodätische Tensegrities sind durch Kraft-Triangulation stabilisiert. Obwohl auch unter Vorspannung ist der wesentliche Unterschied zu vorgespannten Tensegrities, dass alle Elemente sowohl Zug- als auch Druckspannungen erzeugen bzw. aufnehmen können. Möglichkeiten diese Strukturen zu beeinflussen sind die Re-Positionierung sowie die Änderung der Anzahl der Zug- und Druck-Elemente innerhalb des Systems (Swanson II, 2013).

Eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit ist jene in „offene“ und „geschlossene“ Systeme. Offene Systeme benötigen zur Stabilisierung eine Lagerung zur Weitergabe der Lasten, wohingegen geschlossene Tensegrities ohne Lagerung als in sich stabil gelten (Abb. 15; Gengnagel, 2002).

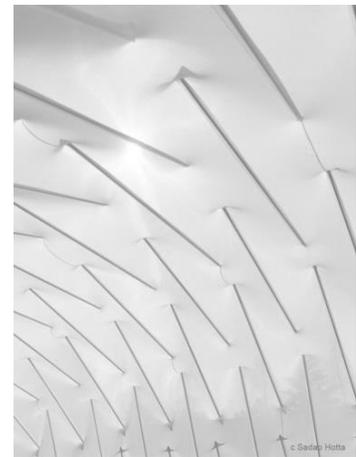


Abb. 16: MOOM Temporärer Pavillion 26 x 7,5 m als Tensegrity Membran Struktur (Noda, Chiba) von Kazuhiro Kojima (www.c-and-a.co.jp/projects/other/moom.html; 2014-08-21)

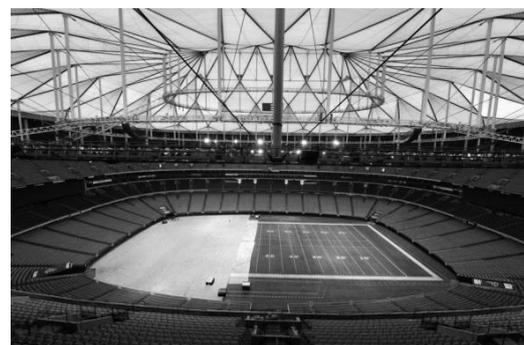
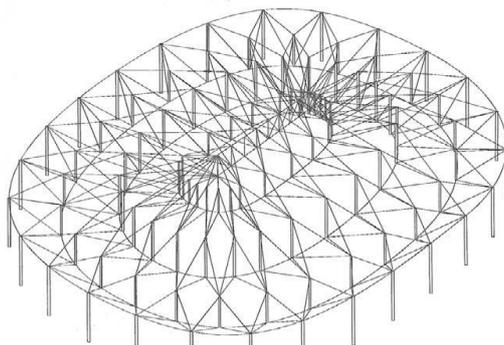


Abb. 17: Georgia Dome: 227 x 185 m – American-Football-Stadion in Atlanta / Georgia / USA, erbaut 1992, Konstruktion: Mathys P. Levy, Weidlinger Associates; links; arch-tour.blogspot.com; 2014-08-21; Impression (rechts; www.ajc.com; 2014-08-21)

Wesentliche Merkmale von Tensegrity-Strukturen (Swanson II, 2013):

- Inhärente Selbst-Stabilisierung aufgrund der Vorspannung und der Kraft-Triangulation;

- äußere Beanspruchungen werden durch die gesamte Struktur geleitet, dies bei hoher Flexibilität und minimaler Beeinflussung der Struktur;
- aufgrund der Vorspannung im System kehren Tensegrities, nach Wegnahme äußerer Lasten, in ihre Ausgangslage zurück;
- durch Beschränkung auf kontinuierliche Zug- und diskontinuierliche Druckelemente sind Tensegrities äußerst effiziente und widerstandsfähige Leichtbaustrukturen.

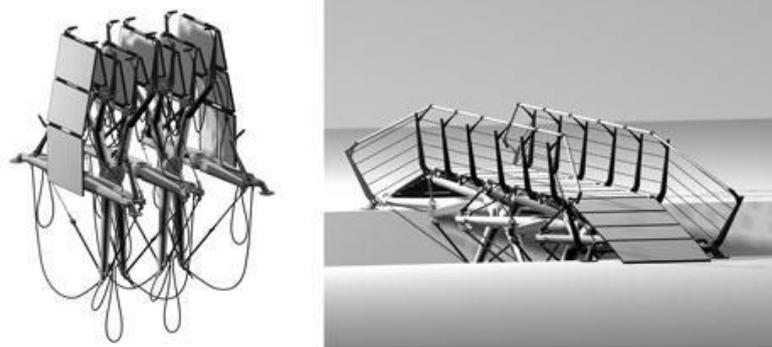


Abb. 18: *Faltbare Tensegrity-Struktur für mobile Brückentragwerke* (Siegel, 2005; <http://siegel.unfoo.net/foldingtensegrity.html>; 2014-08-27)

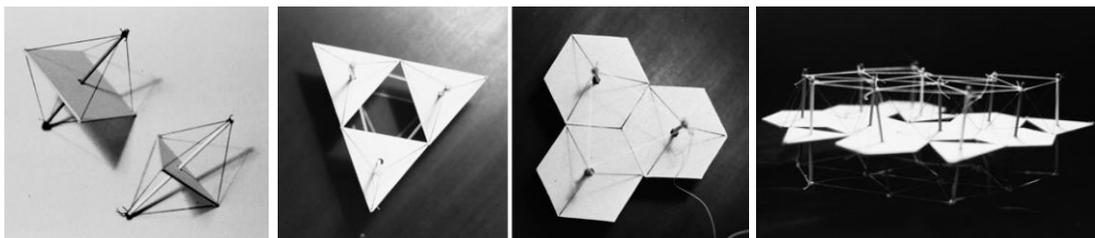


Abb. 19: *Tensegrity in Kombination mit 2D-Elementen* (Falk, 2005)

Umsetzungspotential für Tensegrity-Strukturen im Bauwesen: Eine kritische Betrachtung (Gengnagel, 2002 u.a.):

- Die komplexe Kraftabtragung, die hohe Knotenanzahl, die aufwendige Detailausbildung und Montage gelten als hinderlich;
- Potential wird für kleinere, demontierbare Bauten sowie faltbare, mobile Tragwerke (z.B. Siegel, 2005; Abb. 18);
- die Möglichkeit Tensegrity-Elemente mit anderen Tragsystemen zu kombinieren kann zu neuen, leistungsfähigen Tragwerkslösungen führen;
- erfolgreiche, gegenwärtige Umsetzungen werden bei großen Spannweiten mit offenen Tensegrity-Systemen unter Verwendung textiler Membrane, z.B. wie in Abb. 16, sowie als „Cable Domes“ (z.B. Georgia Dome, Abb. 17; Levy & Jing, 1994), Tragwerke gemäß „System Geiger“ nach H. Geiger oder dem „Aspension Dome“ nach R. B. Fuller, u.a. gesehen;
- Potential für selbsttragende und selbststabilisierende Systeme im gravitationsfreien Raum (Juan & Tur, 2008);
- einfache Beeinflussung der Steifigkeit und der Eigenfrequenz durch Modulation der Vorspannung (Juan & Tur, 2008);
- Skalierbarkeit: Anwendbarkeit für kleine aber auch sehr große Strukturen (Juan & Tur, 2008);
- beschränkter Einsatz von Dachelementen (außer Membrane), sowie Einschränkungen in der Eingliederung von ebenen Tragelementen; als ein innovativer Ansatz kann hier die

Verbindung von Tensegrity mit 2D-Elementen, z.B. in Form von Brettsperrholz (BSP) gesehen werden (Falk, 2005; Abb. 19).

Zusammenfassend gilt aufgrund der bereits genannten Punkte wie der Komplexität in Produktion, Montage und Verbindungstechnik, die hohe Verformbarkeit und die bedingte Ausformung von ebenen Tragelementen gemäß der ursprünglichen Definition von Tensegrity ein bedingtes Umsetzungspotential für Tensegrity-Tragstrukturen im Ingenieurholzbau. Das große Potential für Tensegrity liegt, neben gestalterischen, architektonischen Möglichkeiten, in der Erklärung biologischer Strukturen über mehrere Hierarchieebenen hinweg, aber insbesondere für das Verständnis der Mechanik und Funktion von Zellen und ihren Kompartimenten. Die Kombination von Druckelementen mit Zugelementen und raumabschließenden Membranen als Dachhaut zeigt sich leistungsfähig besonders zur Überdachung großer, bevorzugt rund bzw. ovaler Flächen. Möglichkeiten zur Umsetzung werden auch in mobilen, temporären, leicht demontier- und transportierbaren Konstruktionen gesehen. Als eine weitere, innovative Möglichkeit für Tensegrity wird der Ansatz von Falk (2005), in der Verbindung mit 2D Elementen, beurteilt. Hier kann durch den Materialeinsatz von Holz bzw. flächigen Holzprodukten wie Brettsperrholz (BSP) aber auch Furniersperrholz in zweifacher Hinsicht eine Optimierung erzielt werden: Zum einen in der Tragkonstruktion selbst, und zum anderen durch die Verwendung eines Rohstoffes mit optimalen Festigkeits- und Steifigkeits- zu Rohdichteverhältnissen.

5 Zusammenfassung und Schlussbetrachtungen

Dieser Beitrag beschäftigte sich Eingangs allgemein mit dem Begriff „Bionik“ um, mit Fokus auf die „Bau-Bionik“, Gemeinsamkeiten organischer Materialien zu diskutieren. Mit Vertiefung auf das Material Holz wurde die Struktur und Funktion des hierarchischen Materials erläutert und wesentliche Arbeiten betreffend die „Bio-Mechanik“ des Baumes zusammengefasst. Das Ziel dieses Unterfanges war die Darstellung der Komplexität des vorliegenden Materials, welche sich, unter Berücksichtigung der Form-, Struktur- und Funktionsoptimierung und Gewährung einer abstrakten Betrachtung, auf folgende wesentliche Aspekte zurückführen lässt:

- Eigenschaften von biologischen Materialien auf Makroebene werden durch die Struktur auf Mikro-(Nano-)Ebene definiert;
- hierarchischer Aufbau als komplexe Materialstruktur mit Potential der Adaptierung auf allen Ebenen unter Verwendung weniger, relativ einfacher Molekülstrukturen;
- Verbundwerkstoffe zur Generierung von Eigenschaftsprofilen, welche in den einzelnen Werkstoffen nicht möglich wären;
- adaptives Wachstum bei Struktur-, Form- und Funktionsanpassung, gesteuert durch äußere Reize (→ Thigmomorphogenese); Fokus: Erzielung gleichmäßiger Spannungen durch Optimierung des Kraftflusses, sprich Orientierung nach den Hauptspannungstrajektorien; minimaler Material- und Energieeinsatz (→ Leichtbau);
- graduelle Struktur- und Formänderungen zur Vermeidung von Spannungskonzentrationen;
- Multifunktionalität; paralleler anstatt serieller Funktionsausführung;
- Minimierung von Schub- und Querspannungen, jenen für Holz kritischen Beanspruchungen;
- Plastifizierungspotential und parallel (sub-seriell) wirkende Strukturen zur Maximierung des Nutzungsgrades aller beteiligten Elemente;
- Armierungen bzw. absperrende Schichtungen zur Regulierung der axialen und transversalen Eigenschaftsprofile sowie zur Kontrolle / Vermeidung von Rissen;

- Selbstheilung bzw. Adaptierung von Strukturstörungen zur Reduktion von Spannungsakkumulationen;
- terminierte Lebensdauer in Verbindung mit Selbstreplikation inkl. Mutation & vollständiger biologischer Abbau.

Thibaut et al. (2001): “... *due to both, genetic and ontogenic aspects in trees, wood specimens, even from the same tree, exhibit usual variation of basic properties in the range of 1 to 3; these variations are not, however, randomly distributed, but organized within well-known trends and gradients ...*”.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden exemplarisch Möglichkeiten zur Umsetzung dieser für den Ingenieurholzbau im Sinne der Bionik dargelegt. Dies sowohl betreffend die Entwicklung von Materialien als auch im Hinblick auf Tragstrukturen. Nach Thibaut et al. (2001): “... *admit that diversity is a treasure, not a pledge, for smart engineers.*”

6 Literaturverzeichnis

Baker WF, Beghini A, Mazurek A (2012) **Applications of structural optimization in architectural design**. 20th Analysis & Computation Specialty Conference, ASCE, 257–266

Brandner R (2013) **Stochastic system actions and effects in engineered timber products and structures**. In: G. Schickhofer, R. Brandner (ed.) Timber Engineering and Technology (TET), Volume 2, Verlag der Technischen Universität Graz, ISBN 978-3-85125-263-7

Burgert I, Eckstein D, Bernasconi A (2000) **The strength and volume fraction of rays in trees subjected to radial tensile stresses**. In: H-C Spatz, T Speck (ed.) Plant Biomechanics 2000. Proceeding of the 3rd Plant Biomechanics Conference Freiburg-Bodenweiler, Georg Thieme Verlag, Stuttgart – New York, 413–419

Burgert I, Bernasconi A, Niklas KJ, Eckstein D (2001) **The influence of rays on the transverse elastic anisotropy in green wood of deciduous trees**. *Holzforschung*, 55:449–454

Burgert I, Fratzl P (2009) **Actuation systems in plants as prototypes for bioinspired design**. *Philosophical Transactions of the Royal Society, Series A, Physical and Engineering Sciences*, 367:1541–1557

Dietrich F, Mattheck C (1995) **Cracks in saber-shaped trees and branches**. *J. Theor. Biol.*, 173:321–327 (zitiert in Mattheck & Kubler, 1997)

Dunlop JWC, Fratzl P (2010) **Biological composites**. *Annual Review of Materials Research*, 40:1–24

Eloy C (2011) **Leonardo’s rule, self-similarity, and wind-induced stresses in trees**. *Physical Review Letters*, 107(258101):1–5

Falk A (2005) **Architectural aspects of massive timber: structural form and systems**. Doctoral Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Luleå University of Technology, ISSN: 1402-1544

Forest Products Laboratory (2010) **Wood handbook – Wood as an engineering material**. General Technical Report, FPL-GTR-190, Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 508 p.

Fratzl P, Barth FG (2009) **Biomaterial systems for mechanosensing and actuation**. *Nature*, 462(26):442–448

- Fuller RB (1961) **Tensegrity**. *Portfolio Art News Ann.*, 4:112–127 (zitiert von Swanson II, 2013)
- Fuller RB (1962) **Tensile-integrity structures**. US patent 3,063,521 (zitiert von Swanson II, 2013)
- Gengnagel C (2002) **Arbeitsblätter “Tensegrity”**. Fakultät für Architektur, Lehrstuhl für Hochbaustatik und Tragwerksplanung, Technische Universität München
- Gordon JE, Jeronimidis G, Richardson MOW (1980) **Composites with high work of fracture**. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 294(1411):545–550
- Hu N, Feng P, Dai G (2013) **The gift from nature: bio-inspired strategy for developing innovative bridges**. *Journal of Bionic Engineering*, 10(4):405–414
- Ingber DE (1998) **The architecture of life**. *Scientific American*, 31–39
- Ingber DE (2003a) **Tensegrity I. Cell structure and hierarchical systems biology**. *Journal of Cell Science*, 116(7):1157–1173
- Ingber DE (2003b) **Tensegrity II. How structural networks influence cellular information processing networks**. *Journal of Cell Science*, 116(8):1397–1408
- Jáuregui VG (2009) **Controversial origins of tensegrity**. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), Valencia, Spain
- Juan SH, Tur JMM (2008) **Tensegrity frameworks: static analysis review**. *Mechanism and Machine Theory*, 43:859–881
- Kriechbaum R, Schäfer J, Mattheck C (1992) **CAIO – computer aided internal optimisation**. Proc. 1st Eur. Conf. on Smart Structures and Materials, Glasgow, pp 281–284 (zitiert in Mattheck & Kubler, 1997)
- Kubler H (1987) **Growth stresses in trees and related wood properties**. *For. Abstr.*, 48:131–189 (zitiert in Mattheck & Kubler, 1997)
- Kubler H (1991) **Function of spiral grain in trees**. *Trees Struct. Funct.*, 5:125–135 (zitiert in Mattheck & Kubler, 1997)
- Küppers U (2000) **Bionik des Organisationsmanagements**. *io-management*, 6:22–31
- Levy MP, Jing, T-F (1994) **Floating saddle connections for the Georgia Dome, USA**. *Structural Engineering International*, 3:148–150
- Li S, Fu S, Zhou B, Zeng Q (1995) **Experimental investigation of biomimetic double-helical reinforcing elements**. *Journal of Materials Science Letters*, 14:769–772
- Ling Z, Hongliang G, Ting W (2011) **Biological structure characteristics applied in mechanical bionic design**. International Conference on Transportation, Mechanical and Electrical Engineering (TMEE), Changchun, China, 2142–2145
- Masselter T, Speck T (2011) **Biomimetic fiber-reinforced compound materials**. In: M Cavrak (ed.) *Advances in Biomimetics*, chapter 9, INTECH, ISBN 978-853-307-191-6
- Mattheck C, Bethge K, Schäfer J (1993) **Safety factors in trees**. *J. Theor. Biol.*, 165:185–189 (zitiert in Mattheck & Kubler, 1997)
- Mattheck C (1995) **Wood – the internal optimization of trees**. *Arboricultural Journal*, 19:97–100 (zitiert in Mattheck & Kubler, 1997)

- Mattheck C (1997) **Design in der Natur: Der Baum als Lehrmeister**. 3. Auflage, Rombach Verlag, Freiburg
- Mattheck C, Kubler H (1997) **Wood: The internal optimization of trees**. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN 3-540-62019-2
- Maxwell JC (1965) **The scientific papers of James Clerk Maxwell: Edited by W.D. Niven, M.A., F.R.S.** Two Volumes Bound as One, Dover Publications, Inc., New York,
- Metzger K (1893) **Der Wind als maßgeblicher Faktor für das Wachstum der Bäume**. *Mündl. Forstl. Hefte*, Springer (Berl.), 3:35–86 (zitiert in Mattheck & Kubler, 1997)
- Nachtigall W, Blüchel KG (2001) **Das große Buch der Bionik: Neue Technologien nach dem Vorbild der Natur**. 2. Auflage, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart / München, ISBN 3-421-05379-0
- Nachtigall W (2002) **Bionik: Grundlagen und Beispiele für Ingenieure und Naturwissenschaftler**. 2. Auflage, Springer-Verlag, ISBN 3-540-43660-X
- Nachtigall W (2003) **Bau-Bionik: Natur – Analogien – Technik**. Springer-Verlag, ISBN 3-540-44336-3
- Nachtigall W, Pohl G (2013) **Bau-Bionik: Natur – Analogien – Technik**. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Vieweg Verlag, ISBN 978-3-540-88994-6
- Nachtigall W (2008) **Bionik: Lernen von der Natur**. Verlag C.H. Beck oHG, München, ISBN 978-3-406-536366
- Rechenberg I (1994) **Evolutionsstrategie'94: Werkstatt Bionik und Evolutionstechnik, Band 1**. frommann-holzboog, ISBN 3-7728-1642-8
- Saavedra Flores EI, Murugan MS, Friswell MI, de Souza Neto EA (2011) **Computational multi-scale constitutive model for wood cell wall and its application to the design of bio-inspired composites**. *Proceeding of SPIE*, 7975D:1–11
- Saavedra Flores EIS, Friswell MI, Xia Y (2012) **Variable stiffness biological and bio-inspired materials**. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(5):529–540
- Saliklis E, Houston J (2013) **Graphical statics and Maxwell's theorem applied to an elementary branching structure**. *Proceeding of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*, Wroclaw, Polen
- Siegel T (2005) **Folding Tensegrity: Umsetzung anhand einer mobile Fußgängerbrücke**. Diplomarbeit, Institut für Hochbau, TU Wien
- Speck T, Rowe NP (2006) **How to become a successful climber – mechanical, anatomical, ultra-structural and biochemical variations during ontogeny in plants with different climbing strategies**. In: L Salmen, *Proceeding of the 5th Plant Biomech. Conf.*, Vol. I, pp. 103–108 (zitiert in Speck & Burgert, 2011)
- Speck T, Burgert I (2011) **Plant stem: functional design and mechanics**. *Annual Review of Materials Research*, 41:169–193
- Spengler T (1982) **Festigkeitsverhalten von Brettschichtholz unter zweiachsiger Beanspruchung**. *Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke*, Heft 62, Technische Universität München
- Swanson II RL (2013) **Biotensegrity: a unifying theory of biological architecture with applications to osteopathic practices, education, and research – a review and analysis**. *The Journal of the American Osteopathic Association*, 113(1):34–52

Thibaut B, Gril J, Fournier M (2001) **Mechanics of wood and trees: some new highlights for an old story.** *C. R. Acad. Sci. Paris*, 329(IIb):701–716

Vincent JFV (2006) **Making a mechanical organism: being the fourth in series of essays on the materials of nature.** *Journal of Bionic Engineering*, 3(1):43–58

Wallner B (2012) **Versuchstechnische Evaluierung feuchteinduzierter Kräfte in Brettschichtholz verursacht durch das Einbringen von Schraubstangen.** Masterarbeit, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz

Zhang Z, Zhang YW and Gao H (2010) **On optimal hierarchy of load-bearing biological materials.** *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 278(1705):519–525 (zitiert in Saavedra Flores et al., 2012)

Zhou BL (1994) **The biomimetic study of composite materials.** *JOM*, 57–62

B Stamm-Astanbindung – eine biologisch optimierte Struktur mit hoher mechanischer Leistungsfähigkeit

U. Müller, J. Konnerth, W. Gindl-Altmutter, D. Kaserer, J. Keckes



PD Dr. Ulrich Müller

1994 – 1995 Lehrling (mit Gesellenabschluss) bei Tischlerei Ing. Hans Kremer, Wien

1998 – 1999 Technischer Mitarbeiter, Institut für Botanik, Boku-Wien

1999 – 2001 Technischer Verkauf und Arbeitsvorbereitung bei Büromöbel Svoboda, St. Pölten

2001 – 2005 Assistent am Institut für Holzforschung, Boku-Wien

2005 – 2013 Bereichsleiter „Wood Materials Technologies“ bei Kompetenzzentrum Holz GmbH (Wood K plus)

seit 2013 Assistent am Institut für Holztechnologie u. Nachwachsende Rohstoffe, Boku-Wien und Key-Researcher bei Kompetenzzentrum Holz GmbH



Prof. Wolfgang Gindl-Altmutter

1987 – 1989 Tischlerlehre mit Gesellenabschluss

1990 – 1997 Studium Holzwirtschaft, Boku-Wien

1997 – 2000 Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Institut für Botanik, Boku-Wien

2000 – 2003 Assistent am Institut für Holzforschung, Boku-Wien

2001 – 2003 Senior Researcher der Kompetenzzentrum Holz GmbH

2003 Habilitation an Boku-Wien

2004 – 2012 Ao Prof. am Institut für Holzforschung, Boku-Wien

seit 2007 Key-Researcher der Kompetenzzentrum Holz GmbH

seit 2012 Professur für Naturfaserwerkstoffe und Leitung des Instituts für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe, Boku-Wien



PD Dr. Johannes Konnerth

2001 Studium Holztechnik und Holzwirtschaft an der Fachhochschule Salzburg/Kuchl

2002 – 2005 Verschiedene Tätigkeiten in der Holzindustrie in Österreich und Italien

2005 Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei FWF-Projekt □“The mechanics of adhesive bonds in bio-based composites” P16837-N07“ und Beginn des Doktoratsstudiums an der Boku

seit 2006 Assistent am Institut für Holztechnologie und Nachwachsende Rohstoffe, Boku-Wien

seit 2012 Habilitation, Stelle als Assoziierter Professor am Institut für Holztechnologie und Key-Researcher im Kompetenzzentrum Holz GmbH



David Kaserer

seit 2008 Studium Holz- u. Naturfasertechnologie an der Boku
2010 – 2011 Tutor am Institut für Holztechnologie u. Nachwachsende Rohstoffe, Boku-Wien

2014 Meisterprüfung für Instrumentenbau
seit 2014 Technischer Mitarbeiter am Institut f. Holztechnologie u. Nachwachsende Rohstoffe, Boku-Wien



PD Dr. Jozef Keckes

1986 – 1991 Universitätsstudium an der Slowakischen Technischen Universität in Bratislava, Slowakei. Fach: Festkörperphysik

1992 – 1996 Vierjähriges Doktoratsstudium an der Slowakischen Technischen Universität in Bratislava, Slowakei. Fach: Materialphysik

1996 – 1998 PostDoc am Institut für Anorganische Chemie, Slowakische Akademie der Wissenschaften, Bratislava, Slowakei und Tätigkeiten am Physik Institut, Universität Augsburg

1998 PostDoc am Physik Institut, TU Graz

1999 – 2003 PostDoc am Erich Schmid Institut, ÖAW, Leoben

2004 – 2005 Gruppenleiter Werkstoffkompetenzzentrum Leoben GmbH

seit 2006 Gruppenleiter Montanuniversität Leoben

2007 Habilitation an der Montanuniversität Leoben

2009 Gastprofessur am Paul Cezanne University, Marseilles, Frankreich

seit 2012 Interimistischer Leiter des Department Materialphysik der Montanuniversität Leoben

1 Einleitung

Für praktisch alle Verarbeitungsprozesse bzw. in allen Prozessketten muss der Rohstoff Holz mechanisch aufgeschlossen (zerlegt, aufgeteilt, zerkleinert, etc.) werden. Holz zeigt in Faserrichtung hervorragende Steifigkeits- und Festigkeitswerte. Aber schon geringfügige Faserabweichungen führen bereits zu deutlichen Festigkeits-, bzw. Steifigkeitsverlusten (Eberhardsteiner, 2002). Bei der aktuellen Schnittholzerzeugung (aber auch bei allen anderen Zerteilungsverfahren, z.B. bei Furnieren oder Strands) wird jedoch im Zerteilungsprozess auf die Orientierung der Holzfaser keine Rücksicht genommen. So wird aus einem kegelförmigen und zum Teil auch mehr oder weniger gekrümmten Stamm prismatisches Schnittholz erzeugt. Bedingt durch die natürlichen Wuchseigenschaften des Holzes (Äste, Drehwuchs, Abholzigkeit) und den starren Schnittrichtungen folgt die Richtung der Schnittführung nicht zwingend der Faserrichtung. Insbesondere im Bereich von Ästen erfolgt die Zerteilung also nicht entlang, sondern oftmals quer zur Faserstruktur (Meierhofer, 1976) – zum Nachteil der Festigkeit und Steifigkeit (Müller et al., 2014). Die Schnittholzerzeugung fordert, dass für die Herstellung von prismatischem Schnittholz die Randbereiche des Stammes abgespannt werden. Diese Randbereiche werden dann zu Hackschnitzel bzw. Spanmaterial zerlegt. Untersuchungen haben allerdings gezeigt (Teischinger et al., 2006), dass aber gerade diese Teile des Stammes die beste mechanische Eigenschaften aufweisen.

Die erzeugte Brettware zeigt im Vergleich zum unzerstörten biologischen System „Baum“ signifikante Defizite in den Festigkeitseigenschaften. Im Bereich der Äste wird die Faserorientierung sowohl in radialer als auch in tangentialer Richtung ausgelenkt (Meierhofer, 1976). Für das herausgeschnittene Brett stellt die „Fehl- bzw. Störstelle“ Ast eine Schwachstelle dar. Mittels Festigkeitssortierung ist es möglich, Bretter zumindest nach Festigkeitsklassen zu sortieren, aber die Ausbeute an höchsten Festigkeitswerten ist gering und das Potenzial der Sortierung ist noch nicht voll ausgeschöpft (Sandomeer et al., 2009). Die Forschungen auf dem Gebiet der Festigkeitssortierung von Schnittholz ermöglichen eine deutlich verbesserte Differenzierung der Brettware im Vergleich zur visuellen Schnittholzsortierung.

Über den Weg der Sortierung und das Zusammensetzen bzw. Zusammenfügen von einzelnen Brettern bzw. Holzfraktionen erfolgt eine Homogenisierung des Werkstoffs, wodurch eine weitere Verbesserung der Berechenbarkeit von daraus hergestellten Bauelementen erzielt werden kann. Dennoch, das klassische Zerlegen und Zusammenfügen von Holzteilen zu Bauteilen führt ganz allgemein zu Werkstoffen, die das Festigkeitspotenzial von Holz in seiner natürlichen Form nicht mehr erreichen können (Teischinger, 2001). Die biologisch optimierte Struktur des Baumes ist hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften nicht für die Herstellung von Brettern und Spanfraktionen optimiert (Müller et al., 2014), sondern erfüllt physiologische und mechanische Funktionen (Shigo, 1985, 1990).

Um die mechanische Leistungsfähigkeit des natürlich optimierten Werkstoffes Holz besser auszunützen, wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten des Kompetenzzentrums Holz GmbH (Wood K plus) gemeinsam mit dem Institut für Holztechnologie u. Nachwachsende Rohstoffe, Boku-Wien und der Fa. Doka ein neues Stamm-Zerteilungsverfahren entwickelt. Mit dem Verfahren werden Schwachholzstämmen aus Nadelholz zu hochwertigen Fasern verarbeitet (Joscak et al., 2006). Dabei werden durch einen speziellen Quetschvorgang (Frybort et al., 2012a) Holzpartikel (sog. Makrofasern) aus dem Stammkörper herausgelöst. Diese Makrofasern folgen auch im Astbereich der Faserorientierung. Durch die geregelte Faserorientierung in den Makrofasern zeigen diese im Vergleich zu OSB Strands signifikant höhere Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften. Untersuchungen an den aus diesen Fasern hergestellten Holzwerkstoffen liefern bei gleicher Dichte auch signifikant höhere

mechanische Leistungsfähigkeit als OSB (Frybort et al., 2012b). Für eine technologische Umsetzung des Verfahrens wurde eine Pilotanlage mit einem Investitionsvolumen von ca. 0.5 Mio. Euro gebaut. Neben der Optimierung des Verfahrens beschäftigt sich das Projekt mit den technologischen Prozessen für die Herstellung von Holzwerkstoffen aus diesen sog. Makrofasern.

Auch wenn Ast-Stammanbindungen in der Holztechnologie als Stör- bzw. Schwachstellen anzusehen sind, so stellen gerade diese Bereiche im lebenden Baum hoch optimierte und mechanisch äußerst trag- und strapazierfähige Strukturen dar. Aufgrund der hohen mechanischen Leistungsfähigkeit von Stamm-Ast-Anbindungen wurden diese Strukturen auf unterschiedlicher Ebene untersucht. Durch die Forschungen auf diesem Gebiet soll ein besseres Verständnis für den „Ast im Brett“ gefunden werden (Buksnowitz et al. 2010). Damit können ggf. neue Impulse für die Schmittholzsortierung und das Dilemma der Zerteilung des Rundholzes gefunden werden. Andererseits eröffnet sich durch die Strukturanalyse der Ast-Stammanbindung die Möglichkeit diese komplexen Strukturen technisch nachzubilden und damit hoch leistungsfähige Knotenpunkte und Anschlussstellen von Baustrukturen zu konstruieren (Burns et al. 2010).

Die Idee natürlich optimierte Strukturen aus dem Baumbereich als Vorbild für Bauelemente heranzuziehen wurden schon früher vorgeschlagen. In seinem Buch „Design in Nature – Learning from Trees“ beschreibt Mattheck (1998) Ast-Stammanbindungen als ein herausragendes Beispiel für eine biologische Formoptimierung. Die Arbeiten von Mattheck beziehen sich vorrangig auf die äußere Formoptimierung von Bauelementen (Äste, Wurzeln, Zwiesel, etc.). Der Aufbau einer Ast-Stammanbindung geht aber über diese augenscheinliche Formoptimierung hinaus. Im Bereich einer Stamm-Ast-Anbindung unterscheiden sich die Zellstruktur und die Zellanatomie deutlich vom normalen Stammholz (Shigo, 1985). Das Stammgewebe ist durch eine höhere Dichte (im Bereich über 900 kg/m³) und durch hohe Mikrofibrillenwinkel und hohem Ligningehalt charakterisiert (Trendelenburg, 1955; Timell, 1986; Shigo, 1985, 1990).

Neben den Arbeiten von Mattheck zur Formoptimierung dieser Strukturen (Mattheck, 1991, 1997), verwendete Reuschel (1999) Computer-Aided Internal Optimization (CAIO) Software um die inneren Strukturelemente von Stamm-Ast-Anbindungen zu untersuchen und zu verstehen.

In früheren Arbeiten von Müller et al. (2005) wurden Electronic Speckle Pattern Interferometrie (ESPI) Messungen angewandt, um direkt an belasteten Ast-Stammanbindungen Deformationen zu beobachten. Um den Effekt der äußeren Formoptimierung zu untersuchen, wurden Negativabdrücke von den untersuchten Stammstrukturen hergestellt. Von diesen Negativabdrücken wurden Epoxidharz-Probekörper gewonnen. Die hinsichtlich ihrer äußeren Form identen Probekörper wurden den gleichen Belastungen wie das Baummaterial unterworfen. Parallel dazu wurden ebenfalls aus Epoxidharz Probekörper hergestellt, bei denen zwei Zylinderstümpfe (jeweils mit den Durchmessern des Astes und des Stammes) scharf verschnitten wurden. Diese Proben zeigten unter Belastung deutlich höhere Dehnungskonzentrationen als die nach dem natürlichen Vorbild hergestellten Proben (Müller et al., 2005). Dementsprechend versagten diese Proben bei etwa der halben Biegespannung. Die trockenen Holzproben lieferten hingegen etwa um 20 Prozent höhere Biegefestigkeiten als die Abformungen aus Epoxidharz. Die bis zum Bruch aufgenommene Energie lag um ein Vielfaches über den Proben die aus Epoxidharz hergestellt wurden (siehe Abb. 1). Unter Verwendung von feuchtem Holz konnte noch eine deutlich höhere Energieaufnahme während des Bruchvorganges nachgewiesen werden.

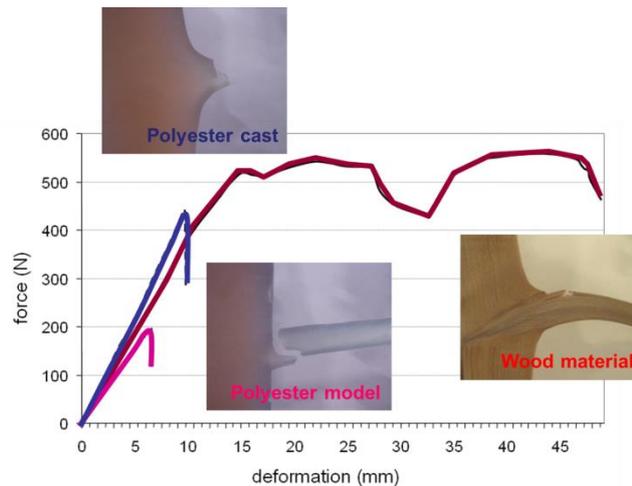


Abb. 1.: Bruchversuche an Stamm-Ast-Anbindungen aus trockenem Holz (rot), an einer Abformung der natürlichen Struktur aus Epoxidharz (blau) und zwei scharf verschnittenen Zylindern mit entsprechenden Durchmessern wie Ast und Stamm

In den früheren Arbeiten (Müller et al. 2005) wurde aus den Ergebnissen der Schluss gezogen, dass neben der äußeren Formoptimierung durch die spezielle Anordnung der Zellen und dem veränderten Mikrofibrillenwinkel (MFA) in dieser Region eine Strukturoptimierung vorliegt.

Um diese Strukturoptimierung weiter zu untersuchen, wurden (bezogen auf den Stamm) radial orientierte Schichten gewonnen und die Orientierung des MFA mittels Wide Angle X-ray Scattering (WAXS) untersucht. Weitere Proben von Ast-Stammanbindungen wurden bis zur Ausbildung von Rissen in der Struktur belastet und nachfolgend die Bruchebenen mithilfe der Computertomographie (CT) beobachtet.

Um die Orientierung der Holzzellen in diesem Bereich zu untersuchen, wurden Mikrotom-Dünnschnitte in radialer, tangentialer und axialer Richtung hergestellt und mittels Lichtmikroskop untersucht.

Die Ergebnisse zeigen, dass es sich bei einer Ast-Stamm-Anbindung um eine natürliche optimierte Struktur auf allen hierarchischen Ebenen handelt.

2 Material und Methoden

2.1 Material

Fichte hat aufgrund ihrer holztechnologischen Eigenschaften und aufgrund des Aufkommens in den Forstgebieten eine hohe wirtschaftliche Bedeutung für die österreichische Holzwirtschaft. Auch wenn derzeit aufgrund der veränderten Klimabedingungen eine Anpassung und Veränderung der waldbaulichen Maßnahmen diskutiert wird, ist auch in Zukunft mit einer hohen wirtschaftlichen Bedeutung der Fichte (insbesondere im Bereich der Bauindustrie) zu rechnen. Aus biologischer Sicht ist der holzanatomische Aufbau der Nadelhölzer deutlich einfacher als der der Laubholzarten. Aus diesen Gründen wurde für die ersten Untersuchungen Fichtenholz ausgewählt. Als Untersuchungsmaterial dienten junge (ca. 15 bis 25 Jahre alte) Fichtenstämme (*Picea abies*). Für die mechanischen Untersuchungen wurden die Stämme im grünen Zustand entrindet. Um eine Austrocknung des Materials zu verhindern wurden die Proben bis zur Prüfung bei ca. -20°C gelagert.

2.2 Methoden

Alle mechanischen Prüfungen wurden an grünem Material durchgeführt. Für die mechanischen Untersuchungen wurden die Stämme an einer Sperrholzkonstruktion fixiert. Die auf 120 mm Länge gekappten Äste wurden mit einer frei gelagerten Schubstange in einem Abstand von 100 mm vom Stammmantel mit einer Universalprüfmaschine (Zwick Z100) belastet (siehe Abb. 2).

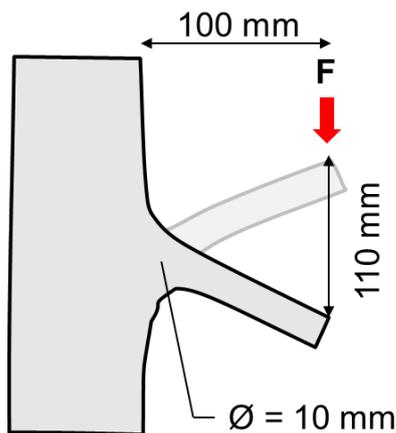


Abb. 2.: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Biegeversuche an Fichtenästen

Die Proben wurden bis zu einer Biegespannung von über 100 N/mm² belastet. Vereinzelt wurden auch zyklische Belastungsversuche mit steigender Biegespannung durchgeführt.

Für die Untersuchung mittels CT wurde der Ast am Ende der Biegeprüfung unter Spannung fixiert. Durch Schichtbilder in alle drei Raumrichtungen wurde die entstandene Rissfläche untersucht.

Von einer weiteren Probe wurden dünne Schichten gewonnen, die mittels WAXS untersucht wurden. Nähere Details zu der Untersuchungsmethode finden sich bei Lichtenegger et al. (1998).

Analog zu den Schichtbildern der CT wurden in den drei holzanatomischen Hauptrichtungen Dünnschnittpräparate mittels eines konventionellen Schlittenmikrotoms hergestellt. Die 10 bis 15 µm dicken Schnitte wurden mit Patentblau gefärbt und mit 25 bzw. 50-facher Vergrößerung fotografiert. Die einzelnen Bilder des Dünnschnittpräparates wurden mittels Bildverarbeitungssoftware (Adobe Photoshop) zusammengesetzt.

3 Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 3 zeigt eine gehobelte und geschliffene Oberfläche einer der geprüften Ast-Stamm-Anbindungen. Die Bruchfläche folgt einem Zick-Zack-Muster. In der Bruchregion sind aufgrund des Tracheid-Effektes (Nyström, 2003) dunkle und helle Bereiche zu erkennen. In den dunkeln Bereichen stehen die Tracheiden aus der Bildebene heraus und Licht wird in das Probeninnere geleitet. Hingegen in den hellen Regionen sind die Tracheiden in der Bildebene orientiert und das eintreffende Licht wird an der Oberfläche der Probe reflektiert.

Die wechselnde Faserorientierung im Bereich der Ast-Stammanbindung ist auch eindeutig in den Dünnschnittpräparaten zu erkennen. Das von Shigo (1985) vorgeschlagene Modell für die Darstellung der Organisation der Fasern im Bereich der Ast-Stammanbindung ermöglicht

die Erklärung des Wassers- und Nährstofftransportes. Ein virtueller Schnitt durch das Modell von Shigo (siehe Abb. 4B) würde aber signifikante Unterschiede zu den Beobachtungen der Faseranordnung in den Dünnschnittpräparaten liefern. Wie in dem Dünnschnittpräparat (siehe Abb. 4A bzw. 4C) dargestellt, kann in der Übergangsregion zwischen Ast und Stamm ein abrupter Wechsel innerhalb von wenigen 100 µm beobachtet werden. Die Tracheiden sind daher in diesem Bereich kreuzweise angeordnet bzw. wechseln teilweise mehrfach ihre räumliche Orientierung innerhalb eines Jahrrings. Die lokal unterschiedliche Orientierung der Tracheiden konnte auch in den Schichtbildern der CT beobachtet werden (nicht dargestellt). Somit stellt das Modell von Shigo eine Vereinfachung der tatsächlich sehr komplexen und sprunghaft wechselnden Faserorientierung im Astbereich dar.

Aufgrund der beobachteten Bruchbilder der untersuchten Proben, kann angenommen werden, dass die Rissöffnung primär in den Bereichen erfolgt, in denen die Tracheiden quer zur Bruchrichtung orientiert sind. In diesen Zonen versagt die Holzstruktur daher einerseits auf Querkzug, andererseits aufgrund von Schubbeanspruchung quer zur Faser. Teilweise vertikal angeordnete Tracheiden fungieren als Stopper für die weitere Rissöffnung. An diesen Stellen wird der Riss zum nächsten Feld mit horizontal orientierten Tracheiden abgelenkt. Anhand der Bruchbilder und der Schichtbilder aus der CT ist zu erkennen, dass es neben der gezackten Rissfortpflanzung auch zu „Fibre bridging“ in den Versagenszonen kommt. Durch den Bruchvorgang wird somit sehr viel neue Oberfläche erzeugt und es muss dementsprechend viel Energie aufgewendet werden, um den Bruchvorgang fortzusetzen.

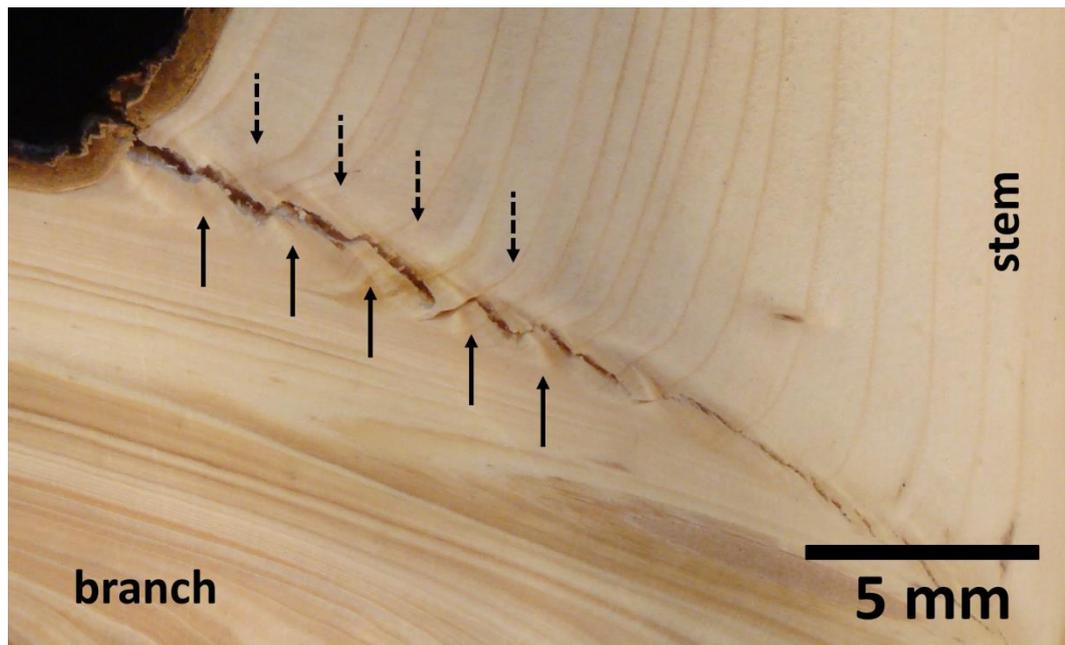


Abb. 3.: Radialschnitt durch eine Ast-Stamm-Anbindung nach Belastung. Der Bruch verläuft von der Rinde zum Mark in einem typischen Zick-Zack-Muster

Die gefundenen Werte des MFA im Ast- und Stammbereich entsprechen den Literaturwerten (Reiterer et al., 1999; Färber et al., 2001; Jungnickl et al., 2009). Marknahe Tracheiden im Stamm zeigen einen MFA von etwa 30 bis 40°. In den äußeren Jahrringen sind hingegen MFA von 10 bis 20° zu finden. Die höchsten MFA mit über 45° wurden im unteren Bereich des Astes beobachtet. Auf der Oberseite des Astes sind die MFA mit ca. 35° etwas geringer. Durch den hohen MFA im Ast, ist dieser besonders auf Biegung verformbar (insbesondere im feuchten Zustand). Gleichzeitig verfügt das Astgewebe mit 0,95 g/cm³ über eine deutlich

höhere Dichte als das Stammholz ($\rho_0 = 0,45 \text{ g/cm}^3$). Die durch die Witterungseinflüsse beanspruchten Äste sind so besonders für erhöhte Biegebeanspruchungen gerüstet.

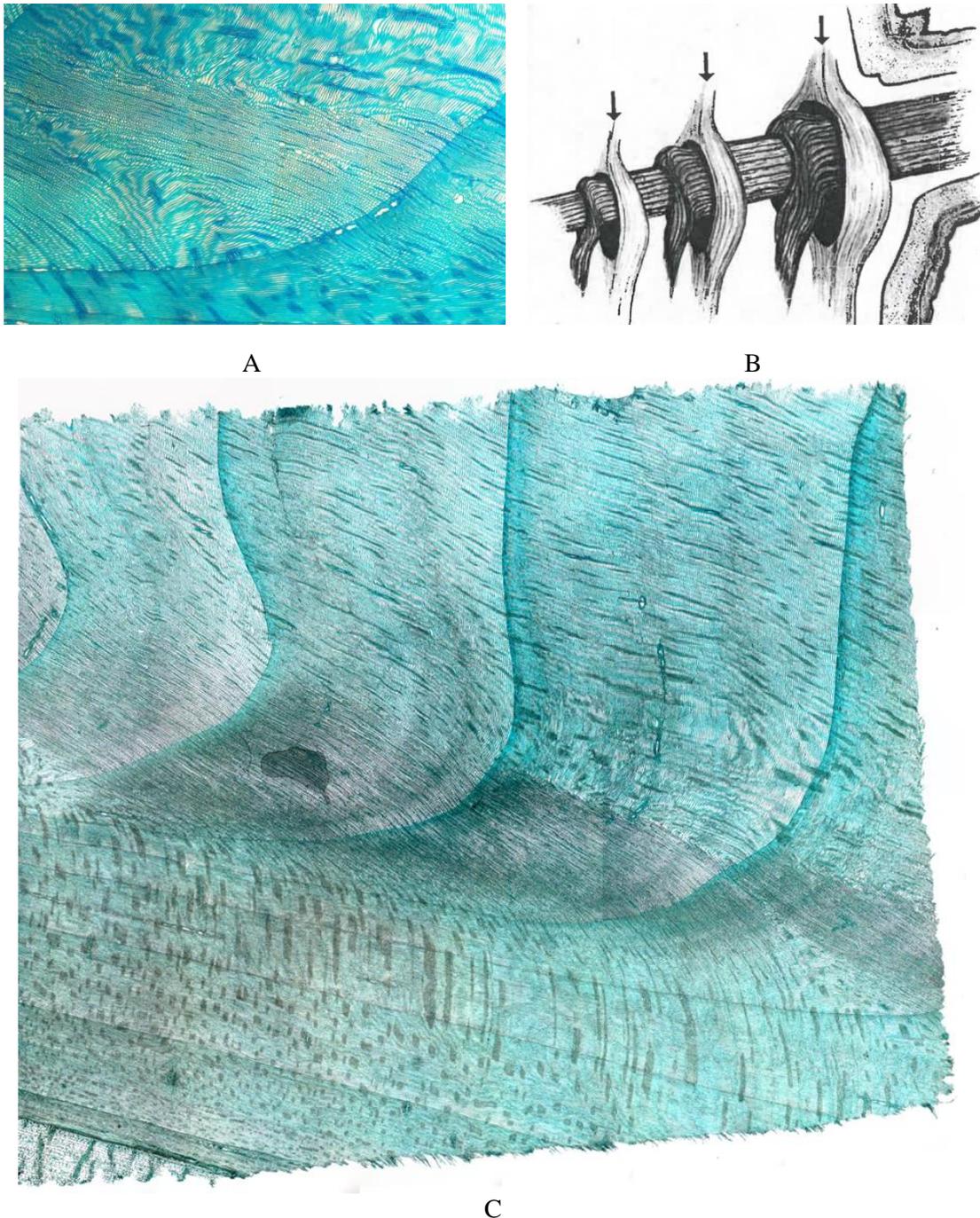


Abb. 4.: **A:** Dünnschnittpräparat in radialer Richtung im oberen Bereich einer Stamm-Ast-Anbindung. Die Abbildung zeigt, dass die Faserorientierung der Tracheiden innerhalb eines Jahresringes mehrfach wechselt (siehe mittlerer Jahrring). In der Mitte des Bildes sind die Tracheiden normal zur Bildebene orientiert. Ober- und unterhalb liegen die Tracheiden in der Bildebene und wechseln von vertikaler (Stamm = rechts oben) zu horizontaler (Ast = links unten) Richtung. **B:** Modell der Faserorientierung im Bereich der Ast-Stammanbindung nach Shigo (1985). Das Modell erklärt die physiologische Funktion des Nährstoff- und Wassertransports. **C:** Durch die wechselnde Faserorientierung wird im beanspruchten Bereich des Überganges vom Ast zum Stamm die Bruchlinie vorgegeben

Vergleichende Messwerte des MFA im Übergangsbereich zwischen Ast und Stamm sind bislang nicht verfügbar. Die mittlere Dichte in diesem Bereich liegt etwa bei 0.55 g/cm^3 . Aufgrund der wechselnden Faserorientierung und der veränderten Zellmorphologie (teilweise sehr gedrungene Zellen) ist in diesem Bereich eine starke Streuung des Mikrofibrillwinkels zu beobachten. Der MFA variiert etwa um 30° .

Die hohe Energieaufnahme entspricht auch den Spannungs-Dehnungsdiagrammen die aus den Biegeversuchen gewonnen wurden. In Abbildung 5 sind zyklische Biegeversuche einer Ast-Stammanbindung dargestellt. Die am Ende der Beanspruchung auftretenden Kräfte von nahezu 1.2 kN entsprechen bei der Prüfkongfiguration einer maximalen Biegespannung im Bereich der Ast-Stammanbindung von etwa 130 N/mm^2 . In der gewählten Prüfkongfiguration ist es nicht gelungen den Ast bis zum vollständigen Bruch zu belasten. Der Versuch musste abgebrochen werden, da die frei gelagerte Schubstange für die Übertragung der Biegespannung von der Prüfmaschine auf den Ast aus der Halterung glitt. Aufgrund des Kurvenverlaufs ist mit keinem weiteren starken Anstieg der Biegespannung bei noch höheren Verformungen (über 105 mm im gegebenen Falle, bei einer Länge des Astes im Krafteinleitungspunkt von 100 mm) zu rechnen.

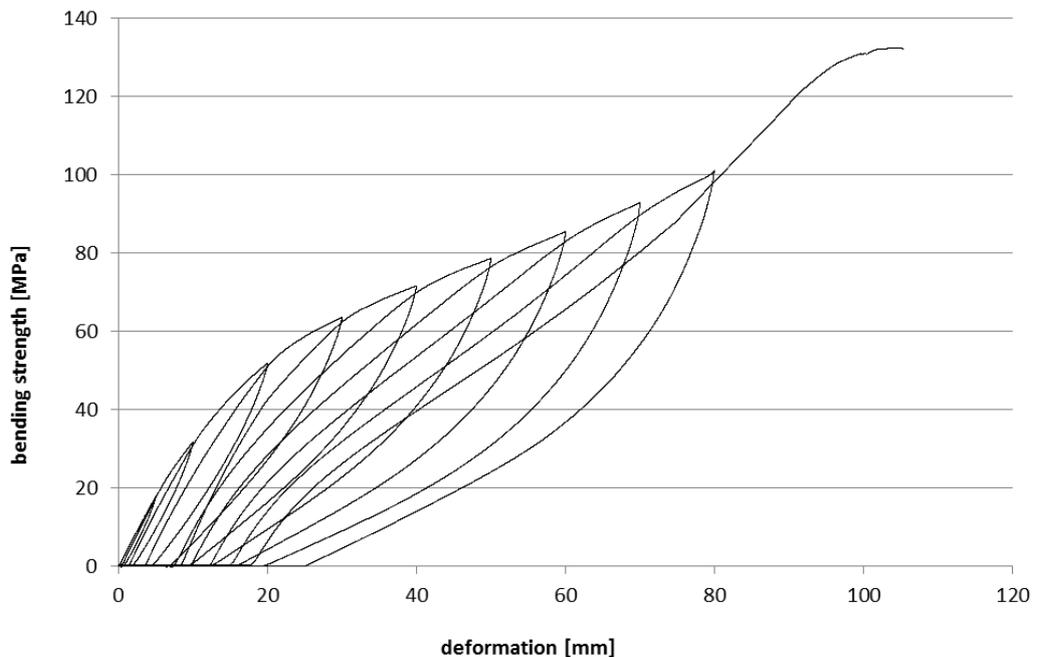


Abb. 5.: 10 zyklische Belastungen einer Ast-Stammanbindung mit steigender Belastung

Während des Versuchs war lediglich auf der Oberseite des Astes ein schmaler halbmondartiger Riss zu erkennen. Dieser Riss schloss sich selbst nach der höchsten Belastungsstufe im unbelasteten Zustand wieder vollständig. Die CT Schichtbilder bzw. nach dem Versuch zerteilte Proben zeigen hingegen, dass die Rissoberfläche tief in die innere Struktur vordringt (siehe Abb. 2). Auf der Unterseite des Astes sind mit zunehmender Belastung Stauchungen der Struktur zu erkennen. Dadurch, dass sich der entstandene Riss durch die starke Verformbarkeit (hoher MFA) der Struktur nach der Belastung wieder vollständig schließt und die Eintrittsöffnung in den Riss bei lebenden Bäumen durch Harz verschlossen wird, sind die physiologischen Funktionen eines Astes nach so einer Belastung nur geringfügig bis gar nicht beeinträchtigt. Entstandene Risse werden vermutlich in der

nächsten Wachstumsperiode von außen überwältigt. Damit ist auch die mechanische Belastbarkeit nach einigen Jahren fast wieder vollständig hergestellt.

4 Literaturverzeichnis

Eberhardsteiner J (2002) **Mechanisches Verhalten von Fichtenholz – Experimentelle Bestimmung der bi-axialen Festigkeitseigenschaften**. Springer Wien – New York.

Meierhofer U (1976) **Der Ast als qualitätsbeeinflussendes Strukturmerkmal**. Bulletin 4/2, Schweizer Arbeitsgemeinschaft für Holz ‚Lignum‘, Zürich

Müller U, Vay O, Martinez-Conde A, Frybort S, Krenke T, Konnerth J, Teischinger A (2014) **Innovative Trenn- und Aufteiltechnologien**. In: Technische Universität Dresden, Institut für Holz- und Papiertechnik, Tagungsband des 16. holztechnologischen Kolloquiums, Dresden, TU Dresden, Schriftenreihe Holz- und Papiertechnik, Band 12, ISBN 978-3-86780-385-4, S. 113-120

Teischinger A, Patzelt M (2006) **XXL-Wood – Materialkenngrößen als Grundlage für innovative Verarbeitungstechnologien und Produkte zur wirtschaftlich nachhaltigen Nutzung der Österreichischen Nadelstarkholzreserven (softwood material parameters for innovative technologies and products)**. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), Wien, Bericht aus Energie- und Umweltforschung, Nr. 27/2006

Sandomeer M, Steiger R (2009) **Rohstoff Holz. Potenzial der maschinellen Festigkeitssortierung von Schnittholz**. In: Zukunft Holz. Statusbericht zum aktuellen Stand der Verwendung von Holz und Holzprodukten im Bauwesen und Evaluierung zukünftiger Entwicklungspotenziale, Hrsg. K. Schwaner, Institut für Holzbau, Hochschule Biberach, S. 361-370

Teischinger A (2001) **Holztechnologien der Zukunft. Herausforderung für Forschung und Lehre (1)**. *Holzforschung und Holzverwertung*, (1):12–14.

Shigo AL (1985) **How tree branches are attached to trunks**. *Can J Bot*, 63:1391–1401

Shigo AL (1989) **A new tree biology**. Shigo and Trees, Associates

Joscak T, Teischinger A, Müller U, Mauritz R (2006) **Production and material performance of long-strand wood composites – Review**. *WOOD RES*, 51(3):37–49

Frybort S, Gräter P, Mauritz R, Müller U (2012) **Device for the production of macro-fibres from wood trunks and method for the production of a wood composite material by means of macro-fibres**. WO002012042028A1

Frybort S, Gräter P, Mauritz R, Müller U (2012) **Wood composite material**. WO002012042027A1

Buksnowitz C, Hackspiel C, Hofstetter K, Müller U, Gindl W, Teischinger A, Konnerth J (2010) **Knots in trees: strain distribution in a naturally optimised structure**. *WOOD SCI TECHNOL*, 44(3):389–398

Burns LA, Feih S, Mouritz A, Pook D (2010) **Tree joints: Biomimetic insights for aerospace composite joints**. 27th International Congress of the Aeronautical Sciences, 19-24 September, Nice, France

Mattheck C (1998) **Design in nature – learning from trees**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York

Trendelenburg R (1955) **Das Holz als Rohstoff**. Carl Hanser Verlag, München

- Timell TE (1986) **Compression wood in gymnosperms**. Springer, Berlin
- Mattheck C (1991) **Trees – the mechanical design**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York
- Mattheck C, Kubler H (1997) **Wood – the internal optimization of trees**. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, New York
- Reuschel JD (1999) **Untersuchungen der Faseranordnung natürlicher Faserverbunde und Übertragung der Ergebnisse auf technische Bauteile mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode**. Dissertation, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe
- Müller U, Gindl W, Jeronimidis G (2006) **Biomechanics of a branch-stem junction in softwood**. *Trees (Berl)*, 20:643–648, doi:10.1007/s00468-006-0079-x
- Lichtenegger H, Reiterer A, Tschegg S, Fratzl P (1998) **Determination of spiral angles of elementary fibrils in the wood cell wall: comparison of small-angle x-ray scattering and wide-angle x-ray diffraction**. In: Butterfield BGE (ed) Proceedings of the international workshop on the significance of microfibril angle to wood quality, Westport
- Nyström, J (2003) **Automatic measurement of fiber orientation in softwoods by using the tracheid effect**. *Computers and Electronics in Agriculture*, 41(1–3):91–99
- Reiterer A, Lichtenegger H, Tschegg S, Fratzl P (1999) **Experimental evidence for a mechanical function of the cellulose microfibril angle in wood cell walls**. *Philos Mag A*, 79(9):2173–2184
- Färber J, Lichtenegger HC, Reiterer A, Stanzl-Tschegg S, Fratzl P (2001) **Cellulose microfibril angles in a spruce branch and mechanical implications**. *J Mater Sci*, 36:5087–5092
- Jungnikl K, Goebbels J, Burgert I, Fratzl P (2009) **The role of material properties for the mechanical adaptation at branch junctions**. *Trees*, 23:605–610

C Kraftfluss im Knoten – Gruppenwirkung von Verbindungsmitteln

B. Wilding



MSc. Bastian Wilding, BSc.

2013 – 2014	Auslandssemester KTH Stockholm
2012 – 2014	TU Graz Masterstudium Konstruktiver Ingenieurbau
2009 – 2012	TU Graz Bachelorstudium Bauingenieurwissenschaften
2008 – 2009	Zivildienst Rotes Kreuz Leoben
2000 – 2008	Bundesgymnasium Rein

1 Einleitung

Im folgenden Beitrag werden Verbindungen im Holzbau in Bezug auf den Kraftfluss untersucht. Ansätze zur Abrundung von Ecken, die zu Spannungsspitzen führen können, werden präsentiert, sowie Möglichkeiten zur Formoptimierung bei Stabdübelverbindungen gezeigt. Abschließend wird ein bereits realisiertes Bauwerk vorgestellt, bei dem Verbindungen eingesetzt wurden, die auf bionischen Prinzipien basieren.

2 Lastableitung und Spannungsspitzen

Der Kraftfluss tendiert immer dazu den geradlinigsten und direktesten Weg durch eine Struktur zu nehmen, so auch bei Verbindungen. Dieses Verhalten führt einerseits zu sehr stark belasteten Bereichen und andererseits zu gering-, bis unbelasteten Zonen, die Potential für Materialreduktion zeigen.

Abb. 1 zeigt verschiedene, unter axialem Zug beanspruchte Typen von Verbindungen und die dazugehörige Dehnungsverteilung über den Holzquerschnitt. Jene Verbindung, welche die geringsten Lastumlenkungen aufweist und dadurch den direktesten Kraftfluss ermöglicht, zeigt die höchste Effektivität in Bezug auf die Lastabtragung pro eingesetztem Holzquerschnitt.

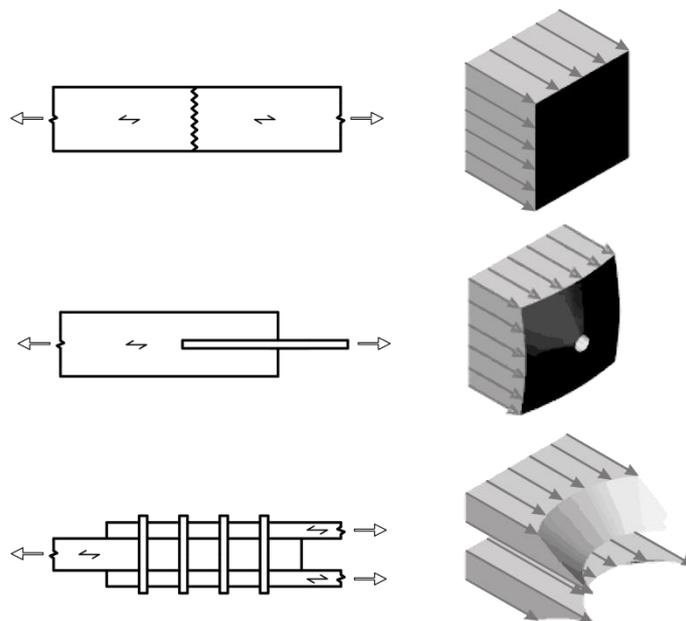


Abb. 1: Verschiedene, axial auf Zug beanspruchte Verbindungstypen und die Dehnungsverteilung entlang des Holzquerschnittes (Schickhofer, 2009)

Die Klebeverbindung (z.B. in Form einer Keilzinkung) zeigt sich am effektivsten, da die Last ohne Umwege direkt von einem Holzbauteil in das nächste übertragen werden kann. Die Verbindung mit der in Holz eingeklebten Gewindestange hat noch immer einen relativ geradlinigen Kraftfluss und ermöglicht nahezu die gesamte Ausnutzung des Querschnittes zur Kraftübertragung. Das dritte Beispiel ist eine auf Abscheren beanspruchte Stabdübelverbindung. In diesem Fall erfährt die Last während der Übertragung einige Richtungswechsel. Die daraus resultierende Dehnungsverteilung ist am ungleichmäßigsten

und die Ausnutzung des Holzquerschnittes im Vergleich zu den vorher genannten Varianten am geringsten. Vom Standpunkt der Bionik her, weist diese Art von Verbindung die geringste Leistungsfähigkeit auf, allerdings zeigt sie andere bedeutende Vorteile, wie zum Beispiel die höchste Duktilität im Versagensfall. Außerdem kann eine Stabdübelverbindung relativ leicht zusammengesetzt und wieder demontiert werden.

Wie Spannungsspitzen vermieden und effektive Verbindungen hergestellt werden können, zeigt die Natur. Bäume (oder auch Knochen) zum Beispiel haben ein lastorientiertes Wachstumsverhalten, das heißt die Bereiche, welche am stärksten belastet werden, wachsen auch am stärksten, um ein gleichmäßig über die Oberfläche verteiltes Spannungsniveau zu erhalten. Der Bereich der Astanbindung beim Baum kann als natürlich optimierte Verbindung angesehen werden. Die Anschlusswinkel sind optimal ausgeformt um Spannungsspitzen auf ein Minimum zu reduzieren und dadurch die Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Verbindung zu erhöhen (Scherrer, 2004).



Abb. 2: Ast-Stamm-Anbindung mit optimal ausgeformten Anschlusswinkeln (links); Wurzel mit Hauptbelastung auf Biegung in vertikaler Ebene und dadurch für diesen Zweck optimiertem Querschnitt (rechts) (Scherrer, 2004)

Allgemein bekannte Bereiche lastabtragender Strukturen mit üblich auftretenden Spannungsspitzen sind Ausklinkungen und Durchbrüche. In Abbildung 3 wird ein auf Zug belastetes Bauteil mit einer Ausklinkung gezeigt.

Abb. 3 (links) zeigt qualitativ die Zughauptspannungen im betrachteten Element. Es ist offensichtlich, dass die Spannungen im Bereich der Ausklinkung zusammenlaufen, während es im Gegenzug einen (weitgehend) unbelasteten Bereich gibt, der im gegebenen Lastfall ohne Nutzen ist. Dieser unbelastete Bereich wird bei der Lastabtragung nicht verwendet, da der maximale Winkel der Richtungsänderung von Spannungen 45° beträgt. Dies wird in Abb. 3 (rechts) mittels einer Schubebene durch das Element dargelegt. Um im Gleichgewicht zu bleiben, benötigen die Schubspannungen in Lastrichtung ihr Äquivalent in orthogonaler Richtung. Dadurch wird ein „Schubviereck“ aufgespannt. Dieser Zustand von reinem Schub ist gleich einem Zustand von reinen Normalspannungen rotiert um 45° (Scherrer, 2004; Sörensen, 2009).

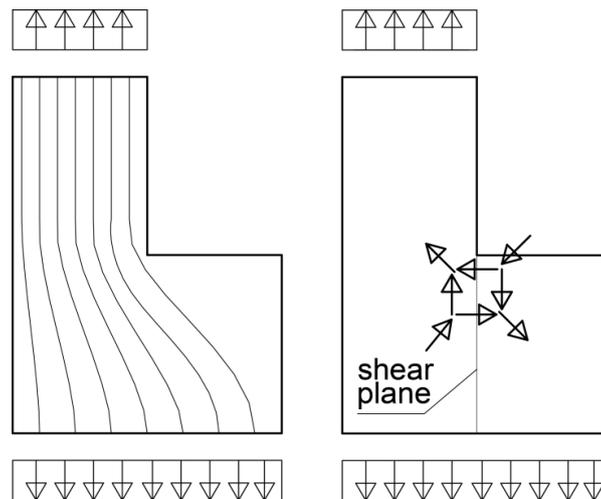


Abb. 3: Ausklinkung mit Spannungsspitzen: qualitative Richtung der Zughauptspannungen (links); Schubebene mit Schubviereck und Hauptnormalspannungen (rechts)

Abb. 4 zeigt den Fall von Spannungsspitzen bei einem Durchbruch im lastabtragenden Element. Diese können als Überlagerung von Zugspannungen, resultierend aus der externen Belastung, und einem internen Biegemoment, welches durch Verformungen am Loch verursacht wird, gesehen werden. Man kann die Bereiche des Elementes seitlich des Durchbruchs auch als gekrümmte Balken, die auf Zug belastet werden, betrachten und somit das Auftreten des Momentes erklären. Außerdem werden auch Spannungen quer zur Lasttrichtung durch die Verformung des gekrümmten Balkens induziert (Scherrer, 2004; Sörensen, 2009).

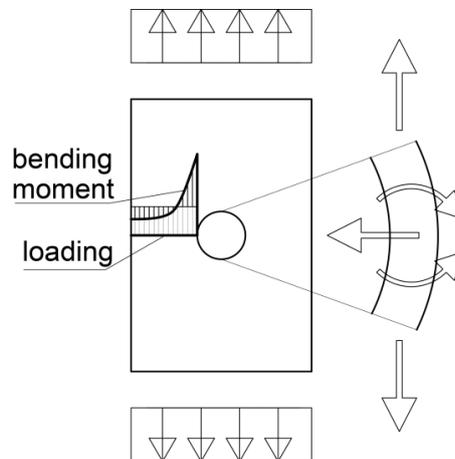


Abb. 4: Durchbruch in einem auf Zug belasteten Element mit den resultierenden Spannungsspitzen

3 Formoptimierung

3.1 Verschiedene Ansätze

Mattheck (1990, 1997, 2010) entwickelte verschiedene Ansätze mit denen eine Ausrundung von Ecken bei Bauteilen durchgeführt werden kann, von denen drei im Folgenden vorgestellt werden.

3.1.1 CAO-Methode

Die sogenannte „Computer Aided Optimisation Method“ (CAO) ist ein FEM gestütztes Verfahren, welches das natürliche Wachstumsverhalten in der Natur durch spannungsgesteuerte Temperaturexpansion simuliert. In einem ersten Schritt wird die Spannungsverteilung im belasteten nicht optimierten Bauteil ermittelt. Um den Spannungen äquivalentes Wachstum zu erhalten, wird in einem zweiten, von der ursprünglichen Last befreiten, Schritt eine fiktive Temperaturbelastung auf eine Wachstumsschicht mit reduziertem E-modul ($1/400$ des originalen, um Zwangsspannungen aufgrund des Wachstumsprozesses zu vermeiden) aufgebracht:

$$T_i = A(\sigma_i - \sigma_{ref}) \quad (1)$$

- | | | |
|------------------|--|------------------------|
| ▪ A | Skalierungsfaktor, bestimmt die Größe des Wachstums | [K mm ² /N] |
| ▪ σ_{ref} | Referenzspannung, beschreibt das Spannungslevel, welches durch das Wachstum erreicht werden sollte | [N/mm ²] |
| ▪ σ_i | Spannungslevel, das im jeweiligen Punkt vorherrscht | [N/mm ²] |
| ▪ T_i | Temperaturbelastung, die auf den jeweiligen Punkt aufgebracht wird | [K] |

Der Wachstumsschicht wird ein Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha_T > 0$ zugewiesen, während der Rest des betrachteten Elementes ein $\alpha_T = 0$ erhält. Auf die, durch die Temperaturbelastung verformte Geometrie, wird wieder die anfängliche Belastung aufgebracht und die Spannungen berechnet. Dieses Verfahren kann iterativ solange wiederholt werden, bis die gewünschte Spannungsabminderung erreicht wurde. Dieses Verfahren zeigt sehr gute Ergebnisse, ist jedoch rechen- und zeitintensiv (Scherrer, 2004).

3.1.2 Analytische Methode der Multilinearisierung

Bei dieser analytischen Methode wird eine Ecke mittels Multilinearisierung ausgerundet. Durch die bei der Linearisierung erhaltenen Punkte wird schlussendlich eine Spline-Kurve gelegt. Dieses Verfahren benötigt keine FEM, ist daher schneller und die Resultate sind mit denen der CAO-Methode vergleichbar. Es wurde hergeleitet indem Kerbformen generiert mit der CAO-Methode linearisiert und die auftretenden Kräfte sowie Winkel untersucht wurden (Scherrer, 2004).

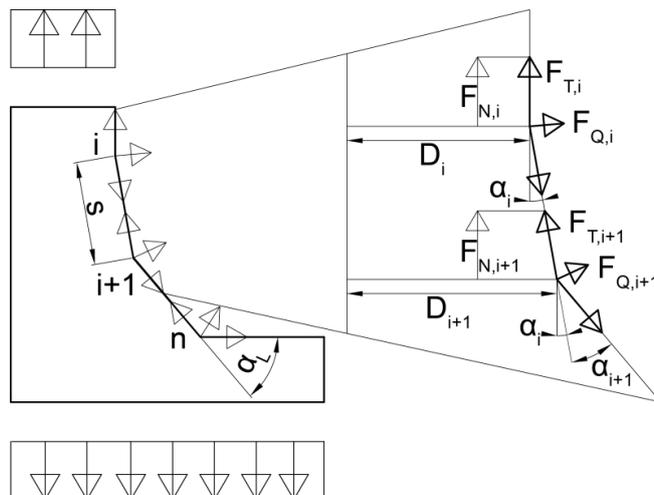


Abb. 5: Analytische Methode zur Minimierung von Spannungsspitzen mittels Multilinearisierung

Das Prinzip wird in näher erklärt. Wenn sich die Ausrichtung der Oberfläche unter einem bestimmten Winkel α_i ändert, sind veränderte Kräfte sowohl orthogonal zur als auch in Oberflächenrichtung die Folge.

Die Methode basiert auf der Erkenntnis, dass die optimale Linearisierung dann gefunden wurde, wenn die Änderung der Kräfte tangential zur Oberfläche (ΔF_T), dieselbe ist, wie jene der Kräfte orthogonal (ΔF_Q), die als die Spannungsspitzen beschreibenden Kräfte gesehen werden können.

Deshalb:

$$\Delta F_T = -\Delta F_Q \quad (2)$$

$$F_{T,i} - F_{T,i+1} = -(F_{Q,i} - F_{Q,i+1}) \quad (3)$$

Mit diesem Ansatz kann eine Reihe von Winkeln bestimmt werden, die zu minimalen Spannungsspitzen und daher zu einer möglichst optimalen Kerbform führen.

Der Start- und Endwinkel müssen jedoch angenommen werden. Ein Startwinkel von $\alpha_i = 3^\circ$ wird in Scherrer (2004) für die meisten Anwendungen empfohlen. Der Endwinkel hängt von verschiedenen Einflüssen ab. Einerseits ist ein möglichst kleiner Winkel vorzuziehen, da dieser zu geringeren Spannungsspitzen führt, andererseits würde ein zu klein gewählter Endwinkel zu einem unnötigen Materialverbrauch führen. Daher muss ein Kompromiss gefunden werden. Generell haben Vergleiche mit CAO gezeigt, dass ein Endwinkel von $\alpha_L = 45^\circ$ die Bedingungen gut erfüllt (Scherrer, 2004; Sörensen 2009).

3.1.3 Methode der Zugdreiecke

Die Methode der Zugdreiecke ist ein graphisches Verfahren zur Reduktion von Spannungsspitzen durch Ausrundung von Ausklinkungen. Eine weitere Möglichkeit ihrer Anwendung liegt in der Verminderung von unbelastetem und daher für den jeweiligen Lastfall überflüssigem Material, wie in Abb. 8 gezeigt. Dieser Methode liegt die Beobachtung zu Grunde, wie die Natur spitze Ecken ausrundet (Bäume, Knochen oder auch Steine, die einer Strömung ausgesetzt sind). Die Konstruktion wird in gezeigt.

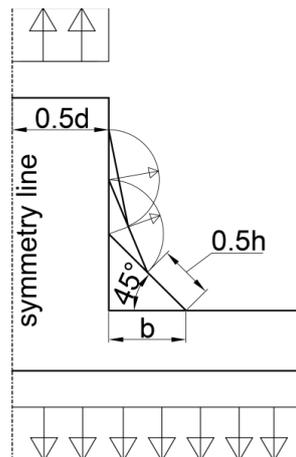


Abb. 6: Konstruktion von Zugdreiecken

Im Mittelpunkt der Hypotenuse h des rechtwinkligen gleichschenkeligen Dreiecks beginnt die Hypotenuse des zweiten Dreiecks, welche die ursprüngliche Oberfläche unter einem Winkel von 22.5° erreicht. Dasselbe wird für das dritte Dreieck durchgeführt, das daher

einen Winkel von 11.25° mit der vorherigen Oberfläche des Bauteils und dem Mittelpunkt der Hypotenuse des zweiten Dreiecks einschließt.

Parameterstudien (Sørensen, 2009) haben gezeigt, dass b ungefähr $0.4d$, für ein auf Zug belastetes Element und ca. $0.2d$, für ein auf Biegung belastetes, ausmachen sollte. Die verbleibenden Ecken werden dann mit den größtmöglichen Radien ausgerundet.

Diese resultierende Form kann als die „universale Kerbform der Natur“ bezeichnet werden, da sie sowohl bei lastorientiertem Wachstum (Bäume, Knochen), als auch bei von äußeren Einflüssen abgerundeten Strukturen (Steine) erscheint.



Abb. 7: Beispiele in der Natur für die Anwendung der Zugdreiecke (Mattheck, 2010)

Vergleiche in Sørensen (2009) haben gezeigt, dass diese Form gute Spannungsreduzierungs-fähigkeiten, ähnlich wie CAO und analytische Methoden, aufweist, während das Verfahren keine Rechenzeit benötigt und bereits mittels einer Handzeichnung realisiert werden kann.

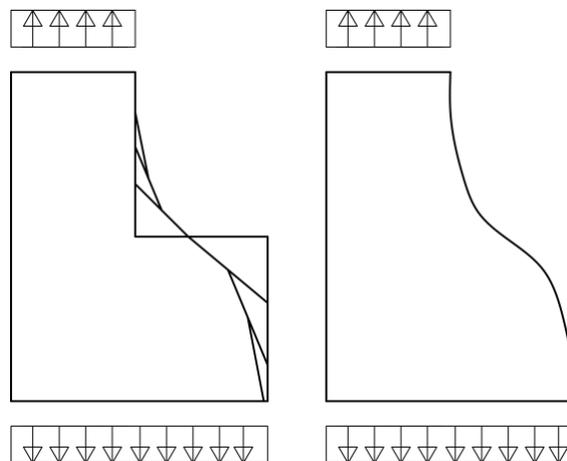


Abb. 8: Ausrundung einer Ausklinkung und Reduzierung von unnötigem Material mithilfe der Methode der Zugdreiecke

3.2 Stabdübelverbindung

3.2.1 Lastpfade in x - y Ebene

Wie in Abb. 9 gezeigt, wird die Kraft in Holzteil eins mit einem gewissen Faktor c_i mal F pro Verbindungsmittel reduziert. Bei Annahme einer gleichmäßigen Lastverteilung zwischen

den einzelnen Verbindungsmitteln beträgt dieser Faktor $1/n$. Diese Annahme trifft theoretisch allerdings nur für unendlich steife Holzteile zu.

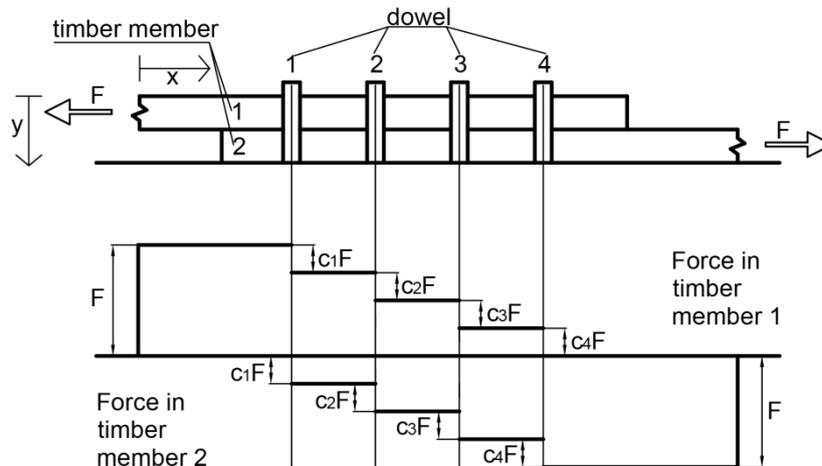


Abb. 9: Lastfluss in x-y-Ebene ($n = 4$)

Wird die Elastizität der Holzfügeteile berücksichtigt, ist im linear elastischen Be- und Entlastungsfall eine ungleichförmige Verteilung der Last zwischen den Verbindungsmitteln die Folge. Auch tragen Herstellungsungenauigkeiten, die in ungleichen Lochspielen resultieren können, und Materialimperfectionen zur Ungleichförmigkeit der Lastverteilung zwischen den Verbindungsmitteln bei. Dies alles hat unterschiedliche lokale Last-Verschiebungskurven für die Verbindungsmittel bei gleicher globaler Verformung der Verbindung zur Folge.

Der Einfluss der Elastizität des Holzes kann mit einem linear elastischen Ansatz veranschaulicht werden wenn man die Verbindungsmittel durch eine elastische Ebene ersetzt (Grenzfall $n \rightarrow \infty$).



Abb. 10: Verbindung auf Abscheren mit elastischer Ebene

Der Verlauf der Kraft durch die Verbindung ist in Abb. 11 dargestellt. Er ist klar nichtlinear und zeigt Spannungsspitzen an den Rändern der Verbindung.

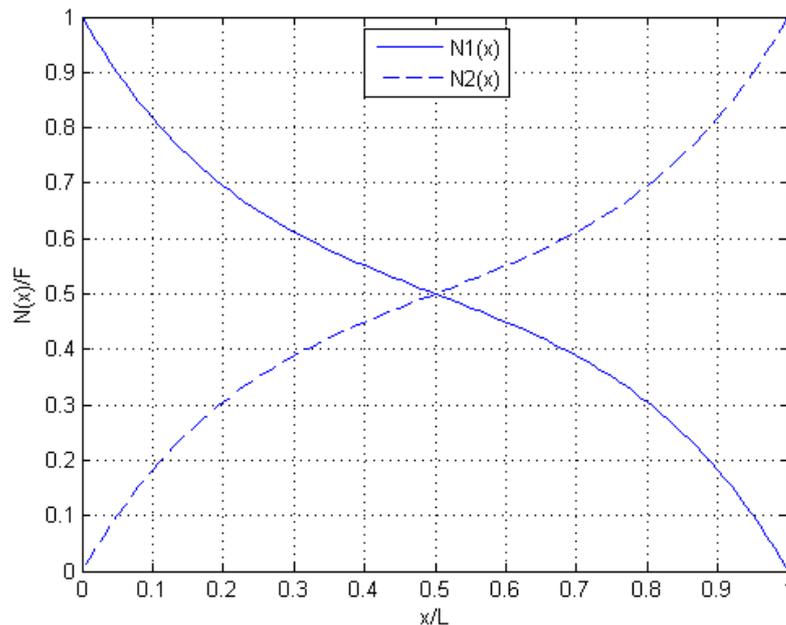


Abb. 11: Lastverteilung in den beiden Teilen einer Verbindung mit elastischer Ebene (Klebefläche)

3.2.2 Lastpfade in x-z-Ebene

Bei mehr als einer Reihe von Verbindungsmitteln in Faserrichtung ($m > 1$) teilt sich die Last entsprechend einem Faktor c_{ij} mal F unter diesen auf. Dieser Faktor wird abermals bei rund $1 / (n m)$ liegen, kann sich aber, wie bereits geschildert, sehr wohl auch anders darstellen.

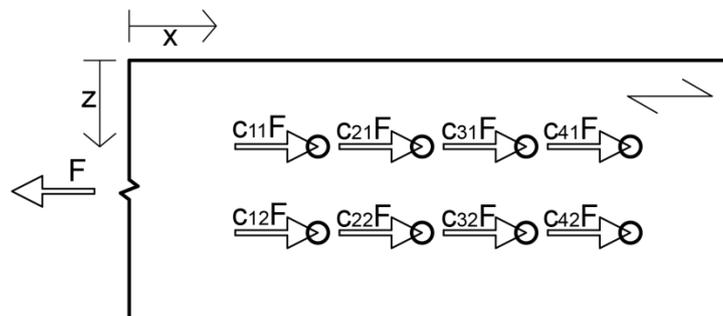


Abb. 12: Stabdübelverbindung unter Zug

Die Kräfte, die auf die Verbindungsmittellöcher im Holz wirken, induzieren, aufgrund der Lochleibungsspannungsverteilung und von Verformungseffekten am Verbindungsmittelloch, ebenfalls eine Kraft quer zur Faserrichtung. Wenn man die Verbindung aus Abb. 12 in virtuelle Balken aufteilt können diese quer zur Faser wirkenden Kräfte wie in dargestellt werden.

Diese Kräfte verursachen eine Spannungssituation in der Schubfuge in Faserrichtung zwischen den Verbindungsmitteln, bei der es zu einer Überlagerung von Querkzugspannungen und Schubspannungen kommt (Abb. 14). Dies ist eine äußerst nachteilige Kombination, da beide Festigkeiten eher gering im Vergleich zu den Festigkeiten in Faserrichtung sind ($f_{t,90,mean} \sim 3 \text{ N/mm}^2$, $f_{v,mean} \sim 4.5 \text{ N/mm}^2$, während $f_{t,0,mean}$ und $f_{c,0,mean} \sim 30 \text{ N/mm}^2$). Dies kann unter üblichen geometrischen Randbedingungen als der

Schwachpunkt der Verbindung angesehen werden, da eine Interaktion von Querkzug und Schub in den meisten Fällen zum Versagen führt.

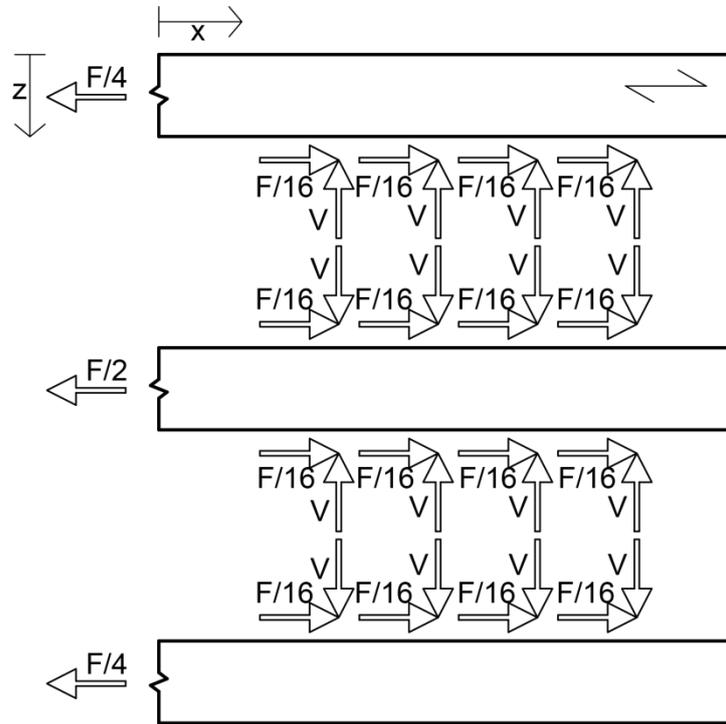


Abb. 13: Situation der Kräfte – Holzbauteil in virtuelle Balken geteilt (Annahme gleicher Kraftaufteilung pro Verbindungsmittel)

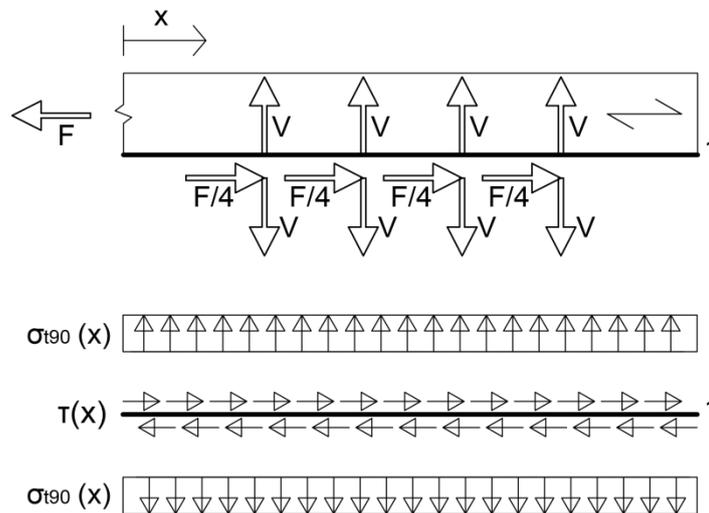


Abb. 14: Kräfte und daraus resultierende Spannungssituation in der Schubfuge (I)

Die aus analytischen linear elastischen Berechnungen (nach Jorissen, 1998) gewonnenen Querkzug- und Schubspannungsverteilungen im Versagensfall entlang dieser Fuge sind in Abb. 15 und Abb. 16 dargestellt. Sind mehrere Verbindungsmittel hintereinander in Faserrichtung angeordnet, kommt es zu einer Spannungsakkumulation in der Schubfuge welche in einer theoretisch verminderten Tragfähigkeit pro Verbindungsmittel im Vergleich zum Widerstand eines Einzelverbindungsmittels führt. Dies ist, neben Herstellungs-

ungenauigkeiten und Imperfektionen des Materials Holz, einer der Gründe für den „Gruppeneffekt“ bei auf Abscheren belasteten Verbindungsmitteln mit stiftförmigen Verbindungsmitteln.

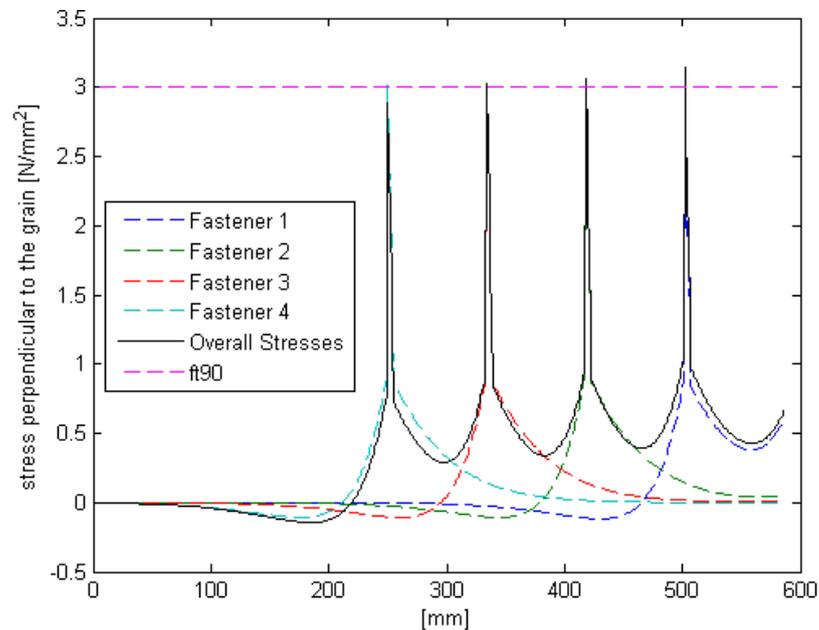


Abb. 15: Querspannungsverteilung entlang einer Schubfuge (linear elastische Berechnung nach Jorissen, 1998)

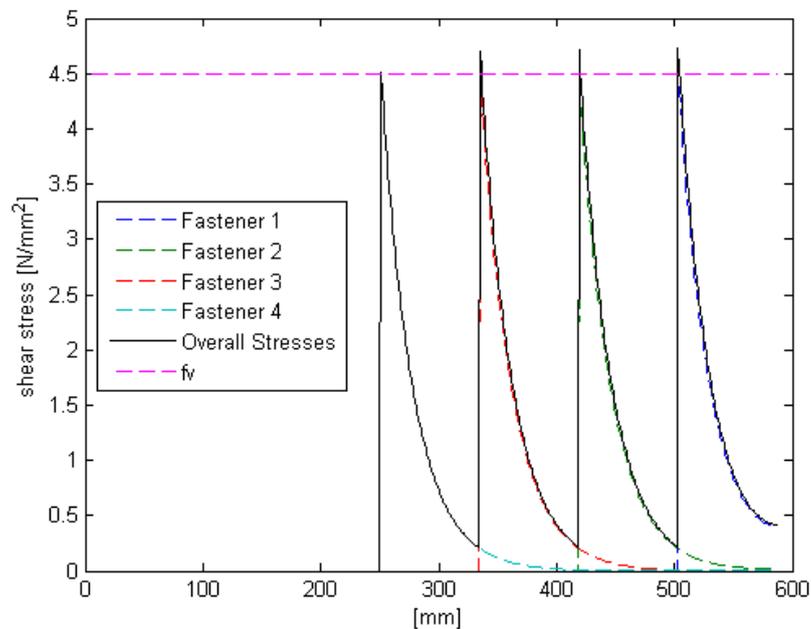


Abb. 16: Schubspannungsverteilung entlang einer Schubfuge (linear elastische Berechnung nach Jorissen, 1998)

Ein weiterer zu berücksichtigender Aspekt ist der Weg der Hauptspannungen durch die Verbindung. In Abb. 17 sind die Zughauptspannungstrajektorien qualitativ dargestellt (Wyss, 1923).

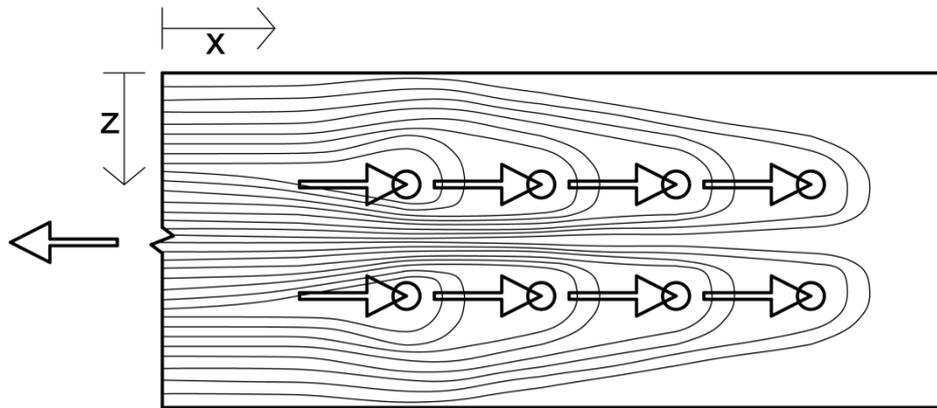


Abb. 17: Qualitativer Verlauf der Zughauptspannungstrajektorien (nach Wyss, 1923)

Die Trajektorien scheinen jedes Verbindungsmittel „zurück zu halten“ und nehmen den direktesten Weg. Das bedeutet, dass zwischen den beiden Verbindungsmittelreihen mehr Zugspannungen auftreten, die in einer größeren Kraft resultieren, als in den äußeren Bereichen, welche rund die halbe Last abzutragen haben. Wenn der Abstand zwischen den beiden Reihen zu klein gewählt wird, könnte eine Kombination von Ausreißen des Zwischenstücks und Blockscheren entlang der beiden Verbindungsmittelreihen zum Versagen führen, da die Zugkräfte in Faserrichtung die Zugfestigkeit des Holzes überschreiten.

Offensichtlich hat die Verbindungsmittelanordnung einen großen Einfluss auf den Kraftfluss entlang der Verbindung. Werden die Verbindungsmittel zu eng zueinander angeordnet führt das zu einer Spannungsakkumulation sowohl in x - als auch in z -Richtung. Auch das Platzieren von einzelnen Verbindungsmitteln zwischen zwei Verbindungsmittelreihen, zur Steigerung der Tragfähigkeit der Verbindung, kann den gegenteiligen Effekt zur Folge haben, da noch mehr Spannungen zwischen den beiden Reihen übertragen werden müssen.

3.2.3 Formoptimierung einer Stabdübelverbindung

Im Folgenden wird die Form einer Stabdübelverbindung, die in Faserrichtung auf Zug belastet ist, optimiert. Es muss hierbei gesagt werden, dass die erhaltene Form der Verbindung nur eine Optimierung für diesen einen Lastfall, Zug in Faserrichtung, darstellt. Für andere Lastfälle kann sie sich als nachteilig herausstellen. Auch in der Natur funktioniert die Formoptimierung nach diesem Prinzip. Die Formen sind effizient und dauerhaft für die am häufigsten auftretende Lastsituation, auch wenn das mit Nachteilen in weniger häufig auftretenden Lastfällen einhergehen mag (z.B. in Abb. 2 die Biegewurzel). Bäume können ihren Standort nicht verändern, also müssen sie das Beste aus den gegebenen Umständen machen, das heißt, sie müssen die vorhandenen, limitierten Ressourcen effektiv und nachhaltig nutzen um überleben und gedeihen zu können.

Um einen direkten Kraftfluss mit geringen Spannungsspitzen zu ermöglichen, werden die Verbindungsmittel nicht mehr hintereinander in Faserrichtung angereiht, sondern der Abstand zwischen den einzelnen Verbindungsmitteln quer zur Faser (a_2) wird geändert. Diese Maßnahme sollte die Spannungsakkumulation von Querspannung und Schubspannung verhindern, da sich keine durchgehende Schubfuge in Faserrichtung entlang der Verbindungsmitteln mehr ausbilden kann. Zusammen mit a_2 wird auch der unbelastete Randabstand quer zur Faser ($a_{4,c}$) dermaßen geändert, dass die Zughauptspannung möglichst ungestört verlaufen können.

Zur Konstruktion der Form, die in Abb. 18 dargestellt ist, werden Anfangswerte für a_1 und a_2 (Verbindungsmittelzwischenabstand in und quer zur Faserrichtung), $a_{3,t}$ (belasteter Randabstand in Faserrichtung), $a_{4,c}$ (unbelasteter Randabstand quer zur Faserrichtung) und den Änderungswinkel α (15° in der Abbildung) für die erste Reihe von Verbindungsmitteln quer zur Faser gewählt. So kann für die weiteren Reihen leicht die Änderung des Querschnittes (Δ) bestimmt werden. b ist die Breite des ungestörten Stabquerschnittes. Die Ecke zwischen Verbindungsmittelkopf und Stabquerschnitt wird mittels der Methode der Zugdreiecke ausgerundet.

Die Figur, welche durch die Konstruktion erreicht wird (links in Abb. 8) wurde dann mittels AutoCAD 2011 durch den Befehl „*pedit*“ – „*Kurvenlinie*“ in die ausgerundete Form, die rechts in Abb. 8 zu sehen ist, überführt. Dieser Befehl legt durch die vorgegebenen Anfangs- und Endpunkte der Segmentlinien eine Bezier-Spline.

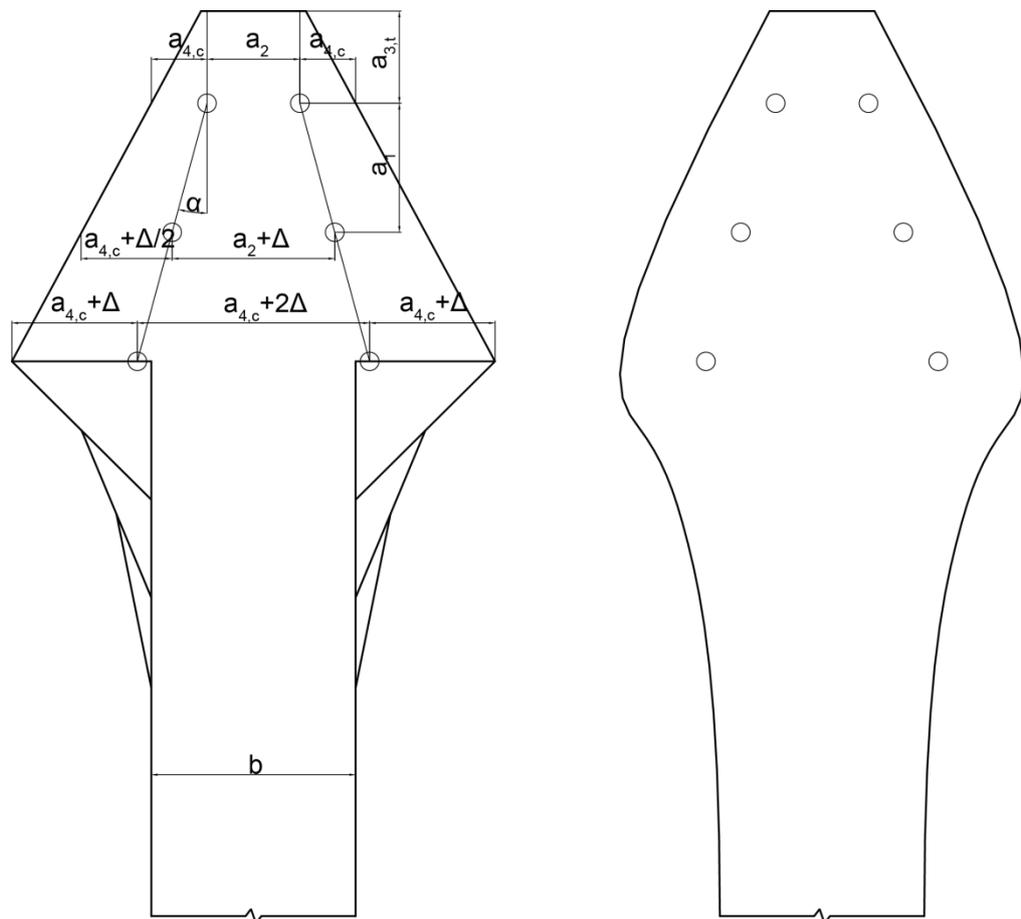


Abb. 18: Konstruktion des formoptimierten Verbindungskopfes (links); resultierende Form nach Ausrundung (rechts)

Eine zweite Möglichkeit der Formoptimierung des Verbindungskopfes ist im Folgenden gegeben. Dieser kann als das Verbindungsgegenstück zu obiger Form gesehen werden. Abermals werden die Abstände zwischen den Verbindungsmitteln quer zur Faser (a_2) variiert, allerdings diesmal umgekehrt, das heißt, die Verbindungsmittel welche dem belasteten Rand am nächsten sind weisen nun das größte a_2 auf. Dadurch entsteht eine Situation, die besonders günstig in Bezug auf die Querspannungs- und Schubakkumulation in der Verbindung ist. Einerseits kann sich durch ein veränderliches a_2

keine durchgehende Schubfuge mehr ausbilden und andererseits erschwert ein „Keil“ zwischen den Verbindungsmitteln auch das Ausbilden einer abgestuften Fuge.

Die Konstruktion, dargestellt in Abb. 19, ist ähnlich wie bei voriger Form. Es werden Anfangswerte für die Abstände a_1 , a_2 , $a_{3,t}$, $a_{4,c}$ und den Änderungswinkel α gewählt. In weiterer Folge kann die Änderung der Verbindungsmittelabstände quer zur Faser mit Δ bestimmt werden. Der Übergang zwischen Verbindungskopf und ungestörtem Stabquerschnitt kann mittels der Methode der Zugdreiecke ausgerundet werden.

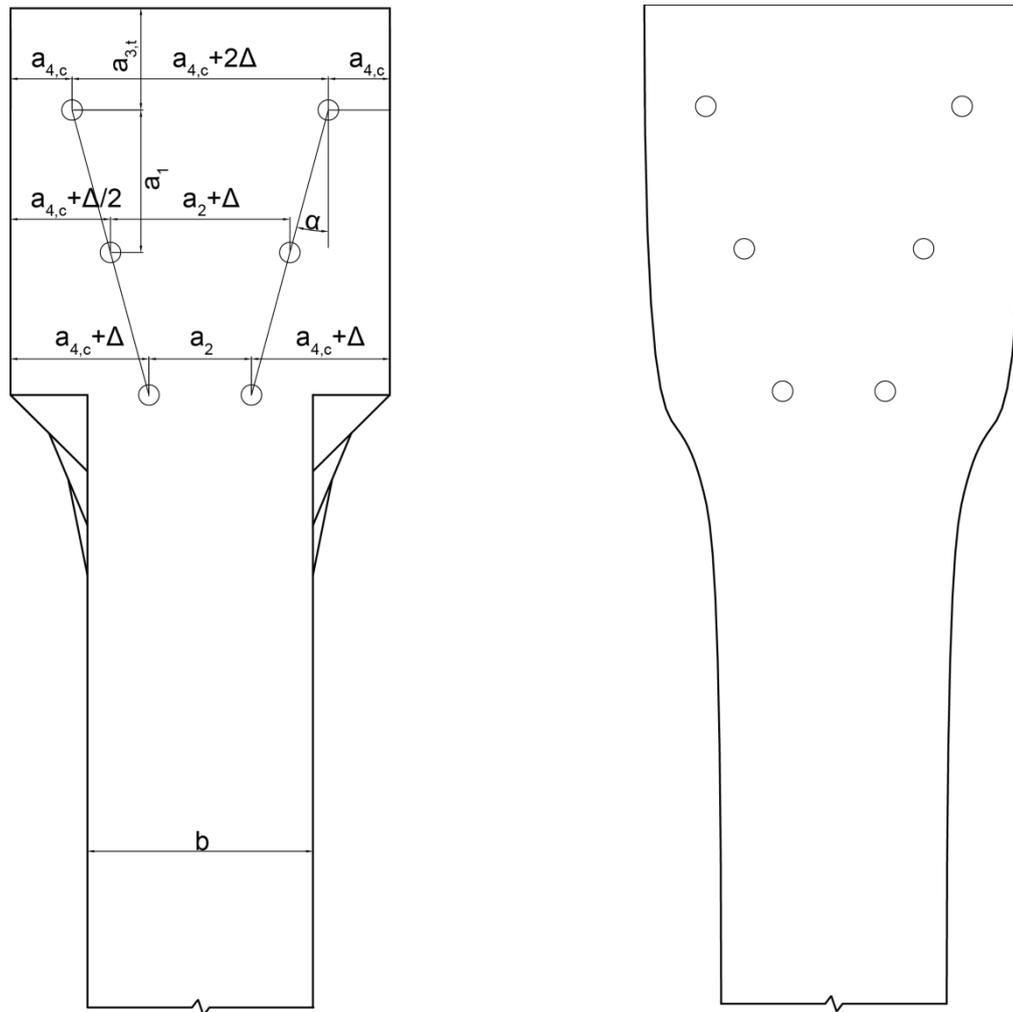


Abb. 19: (links) Konstruktion des formoptimierten Verbindungskopfes; (rechts) resultierende Form nach Ausrundung

Um die angenommenen Spannungsveränderungen in der Verbindung durch die Formoptimierung rechnerisch zu überprüfen wurden Vergleichsrechnungen mit dem Finite-Elemente Programm RFEM 5.1 durchgeführt. Das Material wurde als 2D elastisch orthotrope Ebene mit konstanter Dicke eingegeben. Zur Erzielung einer stabdübelähnlichen Lastaufbringung wurden gelenkige Kopplungsstäbe verwendet, die von einem belasteten Knoten in der Mitte des Verbindungsmitteloches ausgehen und zur Lochwand in der belasteten Hälfte des Loches führen. Der dadurch erreichte Effekt kann als Belastung des Verbindungsmitteloches durch einen Stabdübel ohne Lochspiel und ohne Reibung zwischen Verbindungsmittel und Holz (Reibungswinkel $\varphi = 0^\circ$) gesehen werden. In den folgenden Abbildungen werden die Spannungszustände in beiden vorgestellten Verbindungsformen mit

der einer gewöhnlichen Zuglasche verglichen (Abb. 20: Normalspannung in Faserrichtung, Abb. 21: Normalspannung quer zur Faser, Abb. 22: Schubspannung). Pro Loch wird eine Last, welche der Versagenslast für eine Stabdübelverbindung mit Einzelverbindungsmittel nach EN 1995-1-1 (Johansen Versagensmodus I) entspricht, aufgebracht. Bei einer Materialdicke von $t = 24$ mm, einem Verbindungsmitteldurchmesser $d = 12$ mm und einer Holzdichte $\rho = 400$ kg/m³ ergibt sich eine Kraft von $F = 8312.8$ N.

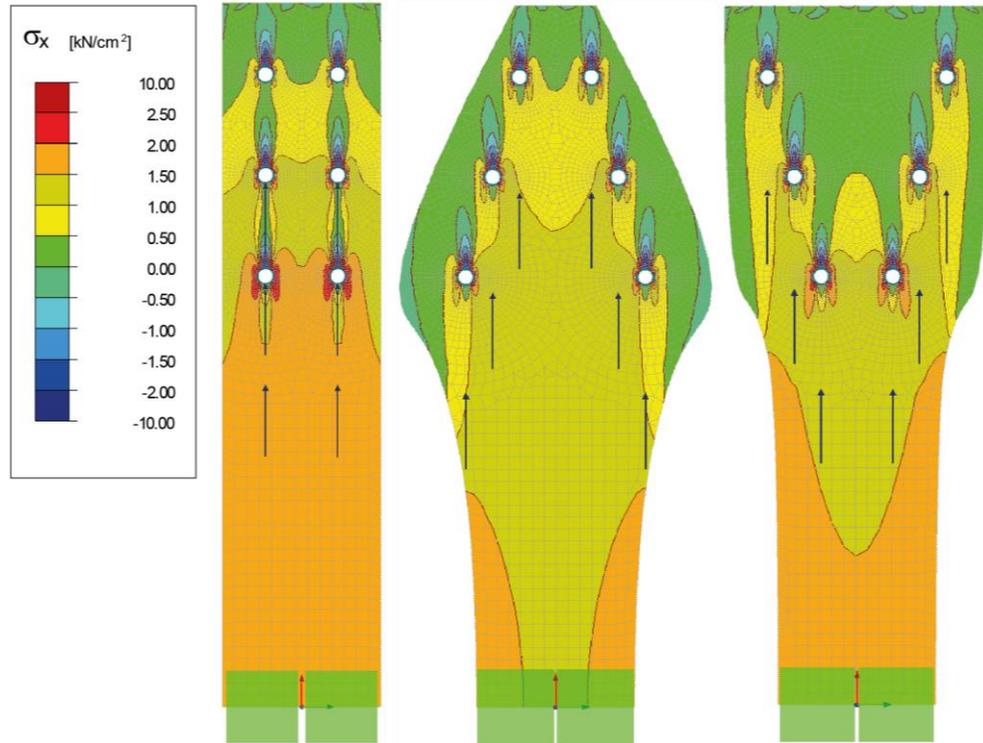


Abb. 20: Vergleich der Normalspannungen in Faserrichtung in RFEM 5.1

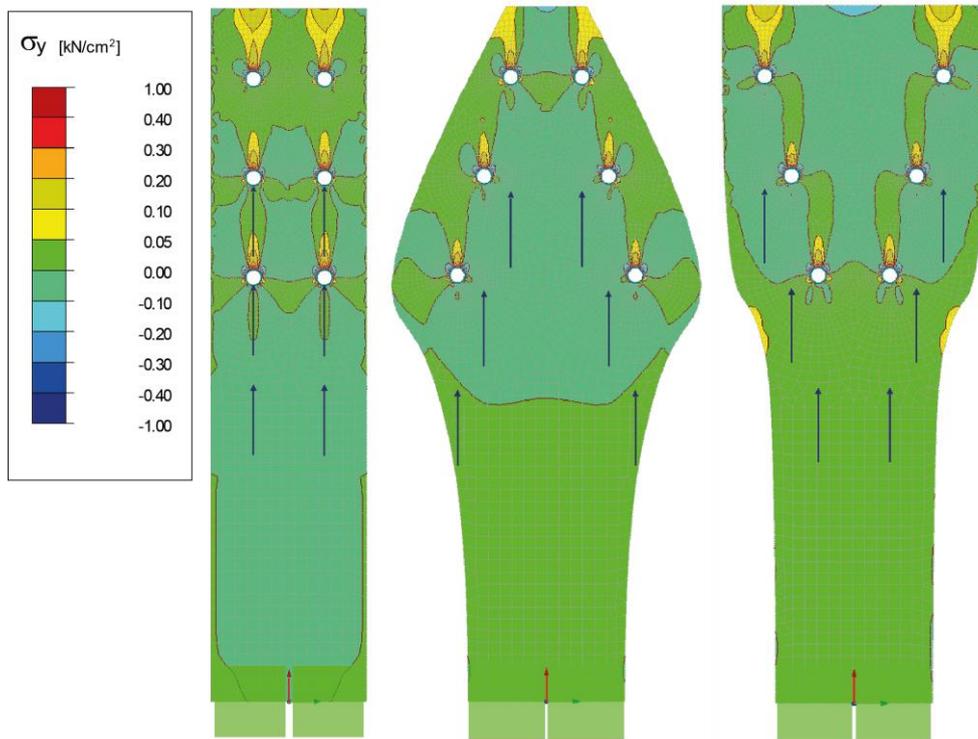


Abb. 21: Vergleich der Normalspannungen quer zur Faser in RFEM 5.1

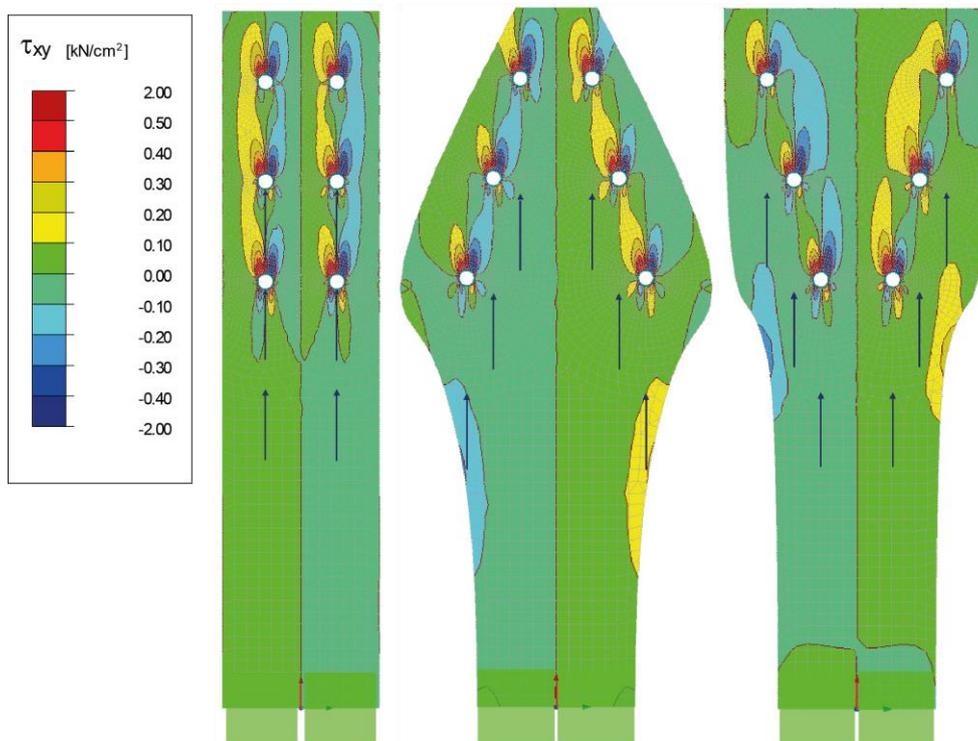


Abb. 22: Vergleich der Schubspannungen in RFEM 5.1

Es ist ersichtlich, dass bei der gewöhnlichen Zuglasche im Bereich der Verbindungsmittel eine Überlagerung von Querkzug- und Schubspannungen stattfindet, während bei den beiden anderen Formen diese Überlagerung geringer ausfällt und nur noch teilweise gegeben ist. Während sich bei der mittleren Form noch eine abgestufte Schubfuge entlang der Verbindungswinkel in Faserrichtung ausbilden und zum Versagen führen kann, dürfte diese durch die Verbindungsmittelanordnung in rechter Form nicht entstehen. Beide optimierten Formen zeigen allerdings erhöhte Schub- und Querkzugspannungen im Verengungsbereich zum ungestörten Stabquerschnitt hin. Diese sind jedoch gering und könnten durch weiteres großzügigeres Ausrunden noch vermindert werden.

Ein klarer Nachteil der veränderten Formen wäre ihr höherer Materialbedarf und Aufwand in der Fertigung. Da heutzutage allerdings passgenau vorgefertigte Verbindungsfügeteile Stand der Technik sind und durchaus eingesetzt werden (siehe Kapitel 3.3) sollte dies nicht zu kritisch gesehen werden.

3.2.4 Formoptimierung eines Verbindungsmittels

Abhängig vom Reibungswinkel zwischen Holz und dem Verbindungsmittel (φ) kann der Verbindungsmittellochumfang in drei Sektionen unterteilt werden: Erstens kann zwischen der Kontaktregion, wo, wie der Name bereits sagt, das Verbindungsmittel einen, wie auch immer gearteten, Last-übertragenden Kontakt mit dem Holz hat, und der kontaktlosen Region unterschieden werden. Die Kontaktregion wiederum kann in die Kompressionsregion direkt in Lastrichtung, wo die Holzfasern komprimiert und gepresst werden, und in die Rutschregion unterteilt werden. Hier werden die Holzfasern eher zur Seite gedrückt und dadurch Querkzug induziert. Die Grenze zwischen diesen beiden Regionen repräsentiert jene Schubebene wo die in Kapitel 3.2.2 vorgestellte Schub / Querkzug-Interaktion stattfindet. Die theoretische Lage dieser Schubebene wird vom Reibungswinkel (φ) bestimmt, wie in Abb. 23 ersichtlich (Werner 1993; Jorissen, 1998; Heine, 2001).

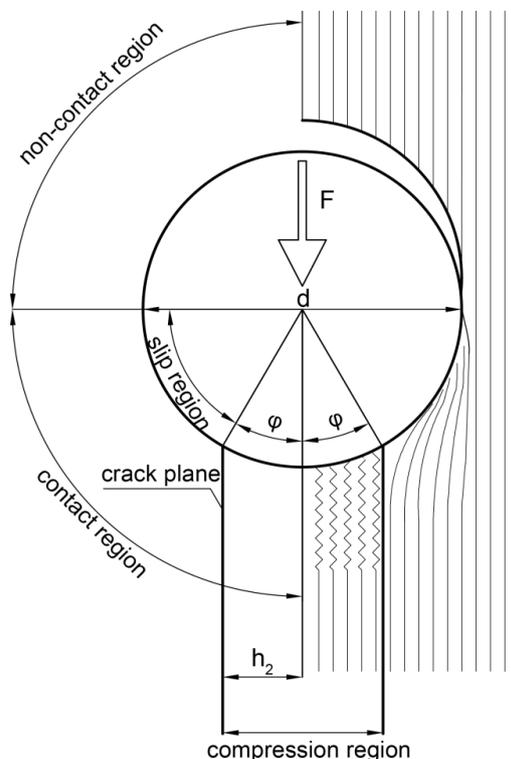


Abb. 23: Situation eines Verbindungsmittels, belastet in Faserrichtung

Die radiale Spannungsverteilung $\sigma_R(\gamma)$ um das Verbindungsmittelloch kann mittels eines Ansatzes nach Gl. (4), welcher die beschriebene Situation am Verbindungsmittelloch berücksichtigt, approximativ bestimmt werden.

$$\sigma_R(\gamma) = \left\{ \begin{array}{l} \gamma \leq \frac{\pi}{2} - \varphi: \sigma_{R,max} \sin^2\left(\frac{\gamma\pi}{\pi - 2\varphi}\right) \\ \gamma > \frac{\pi}{2} - \varphi: \sigma_{R,max} \end{array} \right\} \quad (4)$$

Die tangentialen Spannungen um das Verbindungsmittelloch, sowie die Spannungen in x -Richtung (Faserrichtung) und z -Richtung (quer zur Faser) ergeben sich in weiterer Folge aus geometrischen Beziehungen wie in dargestellt.

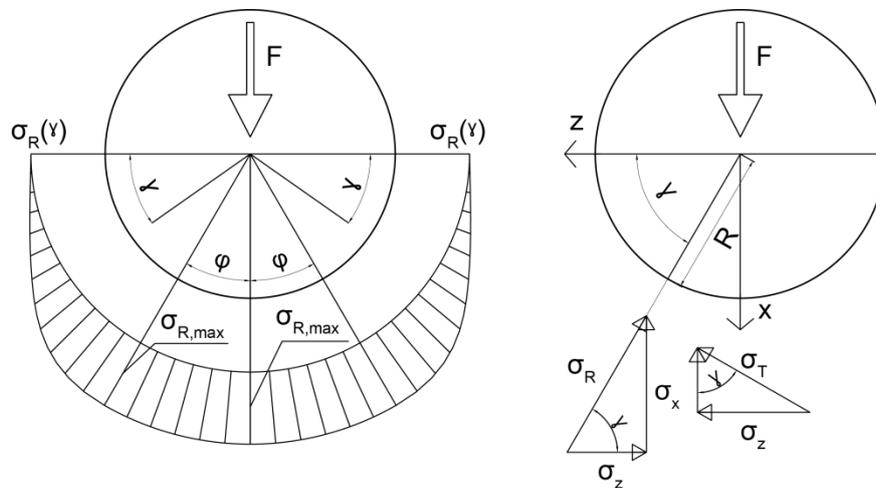


Abb. 24: (links) angenommene Lochleibungsspannungsverteilung; (rechts) geometrische Situation der Spannungen

Für den Fall einer Ellipse kann ganz ähnlich vorgegangen werden. Was sich ändert ist, dass der Ortswinkel (β) nicht mehr mit dem Steigungswinkel der Tangente an die Figur (γ) übereinstimmt. Diese Winkel können jedoch durch geometrische Verhältnisse ineinander überführt werden

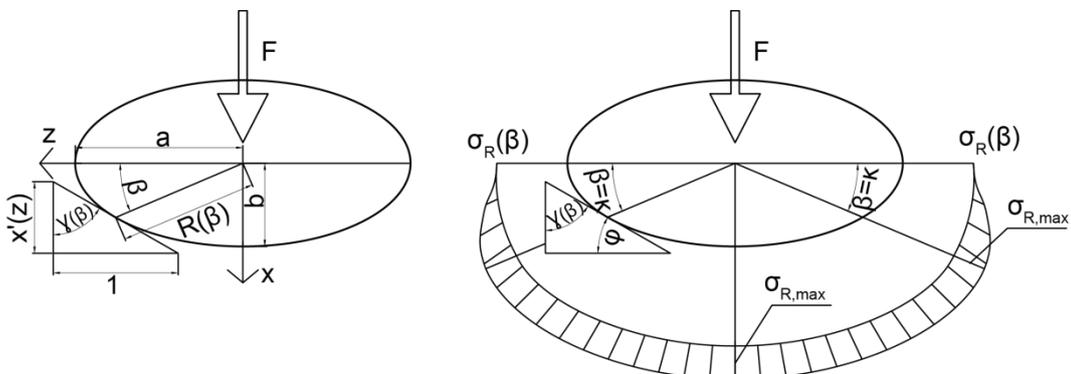


Abb. 25: (links) geometrische Randbedingungen einer Ellipse; (rechts) angenommene Lochleibungsspannungsverteilung

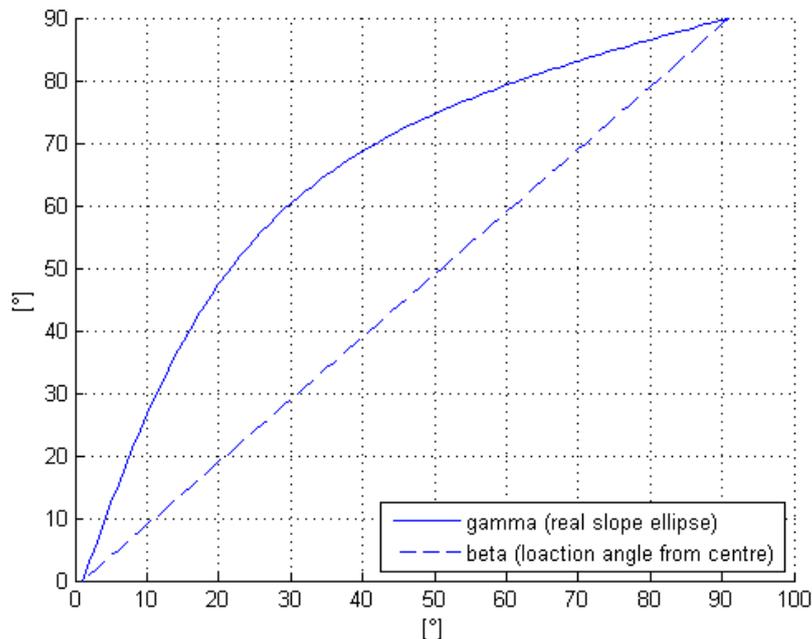


Abb. 26: Unterschied zwischen dem Ortswinkel und dem Steigungswinkel bei einer Ellipse ($a/b = 1.78$)

Es wird angenommen, dass sich die Schubebene in dem Punkt (κ) ausbildet, wo dieselbe Steigung der Tangente an die Figur herrscht wie beim Kreis, und zwar der Reibungswinkel (φ). Daher:

$$\gamma(\beta = \kappa) = \frac{\pi}{2} - \varphi \quad (5)$$

Somit kann Gl. (6) für die radialen Lochleibungsspannungen an der Ellipse verwendet werden:

$$\sigma_R(\beta) = \left\{ \begin{array}{l} \beta \leq \kappa: \sigma_{R,\max} \sin^2\left(\frac{\beta\pi}{2\kappa}\right) \\ \beta > \kappa: \sigma_{R,\max} \end{array} \right\} \quad (6)$$

Zum Vergleich der Geometrien wird ein kreisförmiges Verbindungsmittel mit dem Durchmesser $d = 12$ mm und ein ellipsenförmiges mit den Halbachsen $a = 8$ mm und $b = 4.5$ mm, die denselben Flächeninhalt ergeben ($A \approx 113$ mm²), verwendet. Das Verbindungsmittel wird mit einer Kraft F , die entsprechend Versagensmodus I nach EN 1995-1-1 in Gl. (7) ermittelt wird, belastet. Die angenommene Holzdicke ist $t = 24$ mm, die Holzdichte $\rho = 400$ kg/m³ und der Reibungswinkel $\varphi = 18^\circ$.

$$F = 0.082(1 - 0.01d)\rho dt = 8312.8 \text{ N} \quad (7)$$

Wie in ersichtlich, zeigt die Ellipse bei diesem Lastfall bessere Eigenschaften als der Kreis. Die Spannungen in Faserrichtung sind geringfügig kleiner, während die Spannungen quer zur Faser deutlich reduziert werden.

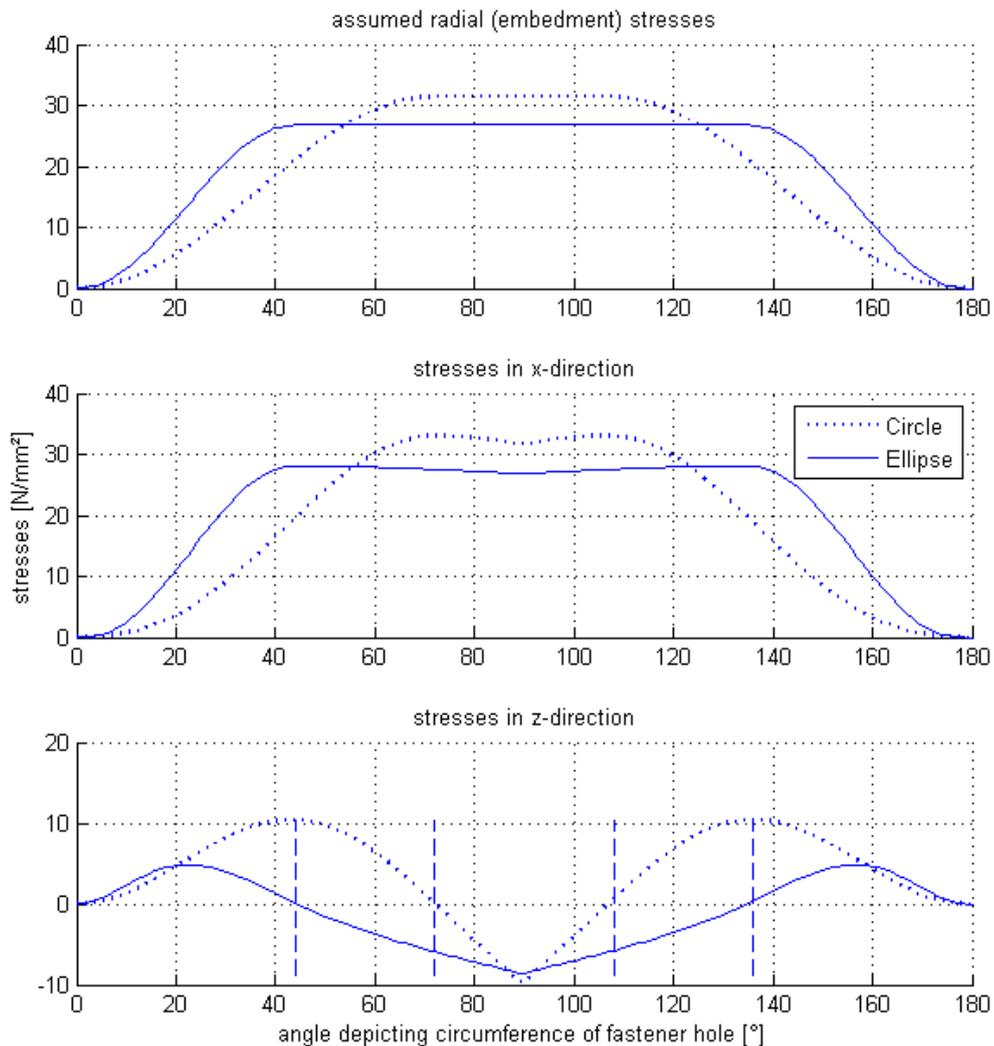


Abb. 27: Vergleich der (linear elastischen) Spannungsverläufe am Verbindungsmittelloch

Es kann beobachtet werden, dass die Spannungen quer zur Faser im Falle des Kreises beim Reibungswinkel ($\gamma = \pi / 2 - \varphi$) einen Nulldurchgang haben, was als Position der Schubfuge gedeutet werden kann, da hier der Vorzeichenwechsel in den Spannungen stattfindet. Bei der Ellipse wird die Querspannung bei einem äquivalenten Winkel ($\beta = \kappa$) Null wo die Steigung der Tangente dem Reibungswinkel entspricht.

Die Querspannungen in der Kompressionsregion müssen mit Vorsicht betrachtet werden, da sie sich aufgrund ihrer entgegengesetzten Wirkungsrichtung aufheben und daher nicht zum Versagen führen.

In der Rutschregion sind die Querspannungen sehr hoch. Das Versagen aufgrund von Querzug wäre bereits viel früher eingetreten. Der Grund dafür ist, dass keine Plastizität und Lastumleitung in weniger beanspruchte Bereiche im Holz berücksichtigt wurde. Weiters fand die Orthotropie des Holzes nur in der angenommenen Lochleibungsspannungsverteilung des Holzes implizit Eingang. Für Vergleichszwecke mit dem Ellipsenquerschnitt sollten die Ergebnisse jedoch aussagekräftig genug sein.

Beim Ellipsenquerschnitt wird ein bedeutend geringerer Querzug induziert was die Tragfähigkeit erhöht. Aufgrund des geänderten Querschnittes sinkt das plastische Moment

des Verbindungsmittels zwar. Dies ist jedoch nicht unbedingt ein Nachteil, da deshalb Johansen Versagensmodus III früher tragend und somit das duktile Verhalten einer Verbindung forciert wird, was in Konstruktionen durchaus erwünscht ist.

Natürlich muss gesagt werden, dass die zuvor gezeigt Verbesserung des Spannungszustandes um das Verbindungsmittelloch nur bei der untersuchten Lastrichtung erfolgt. Würde die Ellipse in orthogonaler Richtung zur gezeigten belastet werden, führte dies zu einer Verschlechterung des Spannungszustandes (mehr induzierter Querzug) und dadurch zum „Aufspalten“ des Holzes.

3.3 Beispiel einer bionischen Verbindung

Ein Beispiel für ein Bauwerk in dem eine Verbindung eingesetzt wurde, die bionischen Gesichtspunkten folgt, ist das Tamedia Haus in Zürich. Hier wurde eine Verbindung für die lastabtragende Struktur entwickelt, die völlig ohne Stahlteile auskommt und wo stärker beanspruchte Bereiche mit Holz höherer Dichte bewährt wurden. Außerdem wurden Ausklinkungen ausgerundet um einen möglichst ungestörten Kraftfluss zu ermöglichen.



Abb. 28: *Tamedia Haus in Zürich, Beispiel eines Bauwerks mit angewandten bionischen Verbindungen (aasarchitecture.com, 5/2014)*

Im Bereich der Verbindung verbreitert sich der Querschnitt der 21 m lang durchgehenden Stütze (Normalquerschnitt 44 x 44 cm²) und es wurden 4 cm dicke Buchensperrholzplatten sowohl an beiden Seiten der Stütze, als auch an den anzuschließenden Zangenträgern als Verstärkung eingeklebt um den von den Zangenträgern induzierten Querdruck abzutragen.

Diese ausgerundete Vergrößerung hat eine elliptische Form und konsequenterweise ist auch der Holzdübel (ebenfalls aus Buchenholz hoher Dichte), der aus dem inneren Kern herausragt um die Zangenträger und den Querbalken anzuschließen, ellipsenförmig. Diese ellipsoide Form wurde gewählt um den Knoten möglichst biegesteif auszuführen und eine Verdrehung der Zangenträger zu verhindern (Mikado Magazin, 2.2013).

An der Vorderfläche des Dübels steht ein Haken heraus um den Querbalken, der normal zum Zangenbalken auf die Stütze zuläuft, anzuschließen. Dieser wird aufgrund dieser Anschlussform nicht in der Lage sein große Zugkräfte zu übertragen, sondern hauptsächlich auf Druck funktionieren.

Die Herstellung der CNC-gefrästen Verbindungsteile wurde im Werk durchgeführt und so mussten diese in weiterer Folge auf der Baustelle nur noch „zusammengesteckt“ werden.

Allgemein besteht die tragende Holzstruktur des Gebäudes aus zehn Holzrahmen der Festigkeitsklasse GL24 bis GL32, mit einem Zwischenabstand von 5.45 m und einer Breite von ca. 18 m, zu je vier Stützen, die sieben Stockwerke formen (Schweizer Holzbau 6/2013).

4 Zusammenfassung

Charakteristische Bereiche für das Auftreten von Spannungsspitzen und der Gründe dafür wurden in Kapitel 2 gezeigt. Darüber hinaus wurden Methoden zu deren teilweiser Vermeidung durch Formoptimierung dargestellt. Der Kraftfluss in Stabdübelverbindungen und dessen Einfluss auf den Gruppeneffekt wurde in Kapitel 3.2 untersucht. Außerdem wurde deren Schwachstelle in Form der Schubfuge, in der Querkzug- und Schubinteraktion zu Versagen führt, identifiziert. Daraufhin wurden Formoptimierungen eines Zugstoßes (Kapitel 3.2.3) und eines Verbindungsmittels (Kapitel 3.2.4) vorgenommen. Abschließend wurde ein Beispiel für ein Gebäude bei dem Verbindungsmittel eingesetzt wurden die auf bionischen Prinzipien beruhen, in Kapitel 3.3 präsentiert.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass ein möglichst ungestörter Kraftfluss auch in Verbindungen gegeben sein sollte. Umlenkungen sollten vermieden werden, da sie zu Spannungsspitzen und ungleichmäßigen Belastungen der einzelner Bereiche führen können, was eine geringere Dauerhaftigkeit und Effektivität zur Konsequenz hat. Ist dies aufgrund des eingesetzten Verbindungsmitteltyps nicht möglich, sollte versucht werden auf die Schwachstellen der Verbindung einzugehen und diese größtmöglich durch Form- oder Materialoptimierung zu entlasten.

5 Literaturverzeichnis

- Heine CP (2001) **Simulated Response of Degrading Hysteretic Joints With Slack Behaviour**. Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, USA
- Internet (Zugriff: 5/2014) <http://aasarchitecture.com/2013/10/tamedia-by-shigeru-ban-architects.html>
- Jorissen A (1998) **Double Shear Timber Connections with Dowel Type Fasteners**. Delft University Press, Delft, Netherlands
- Mattheck C (2010) **Denkwerkzeuge nach der Natur**. ISBN: 978-3-923704-73-6
- Mattheck C (1997) **Design in der Natur – Der Baum als Lehrmeister**. 3. Auflage, Rombach Verlag, Freiburg, Germany, (zitiert in Scherrer, 2004)
- Mattheck C (1990) **Why they grow, how they grow: The Mechanics of Trees**. *Arboricultural Journal*, 14:1–17 (zitiert in Scherrer, 2004)
- ÖNORM EN 1995-1-1 (2009) **Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten. Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau**. Austrian Standards Institute, Vienna, Austria
- Pfäffinger J (2013) „**Sicherer als Stahl und Beton**“. *Mikado Magazin*, 2:14–21
- Scherrer M (2004) **Kerbspannung und Kerbformoptimierung**. Wissenschaftliche Berichte FZKA 7021, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Technische Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Germany
- Schickhofer G (2009) **Holzbau Nachweisführung für Konstruktionen aus Holz**. Graz University of Technology, Graz, Austria
- Sörensen J (2009) **Untersuchungen zur Vereinfachung der Kerbformoptimierungen**. Wissenschaftliche Berichte FZKA 7397, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. Technische Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Germany
- Werner H (1993) **Tragfähigkeit von Holz-Verbindungen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln unter Berücksichtigung streuender Einflussgrößen**. Berichte der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine der Universität Fridericana in Karlsruhe, 4. Folge, Heft 28, Karlsruhe, Germany
- Wyss T (1923) **Beitrag zur Spannungsuntersuchung an Knotenblechen eiserner Fachwerke**. ETH Zürich, Zürich, Switzerland
- bo- (2013) **Knotenreich verbunden: Holzskelett für einen Siebengeschosser**. Schweizer Holzbau 6

D Optimierungsalgorithmen im Ingenieurholzbau – Verfahren zur Tragstruktur- und Knotenoptimierung

D. Zügner



DDI David Zügner

Feb. 2013

Abschluss des Masterstudiums „Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau“ an der Technischen Universität Graz

Nov. 2013

Abschluss des Masterstudiums „Wirtschaftsingenieurwesen – Bauingenieurwissenschaften“ an der Technischen Universität Graz

seit 2014

Projektingenieur
Zentrale Technik Wien | Strabag AG

1 Einleitung

Seit jeher nimmt sich der Mensch bei der Entwicklung technischer Systeme und Bauteile die Natur zum Vorbild, sei es zur Formbildung in der Luftfahrt, zur Oberflächenstrukturbildung in der Kleidungstechnik oder in der konstruktiven Strukturmechanik des Bauwesens.

Durch die evolutionäre Fortschreibung (Vererbung) haben sich die Systeme der Natur perfekt und individuell an die jeweiligen Umweltbedingungen angepasst und optimiert. Diese Prozesse lassen sich durch konsequente Anwendung auf die von Menschen geschaffenen Werke übertragen. Die Wissenschaft der Bionik versucht diese Verbindung zwischen der Biologie, der Natur und der modernen Technik herzustellen. Die Bionik ist dabei nicht ein reines Kopieren der Natur, sondern eine Analyse der natürlichen Strategien, die zur Optimierung führen. Mit diesen Erfahrungen lassen sich in kürzester Zeit Verbesserungen mit Optimierungsprozessen erzielen.

Im Bauwesen spielt primär die „Strukturbionik“ eine Rolle. In der Natur sind dafür zahlreiche Ansätze zur Optimierung von Strukturen vorhanden. Neben der bekanntesten und am häufigsten angewendeten Lösungsmöglichkeit der Gewichtsreduktion bieten sich auch Materialverbesserungen oder Erhöhung der Steifigkeit durch z.B. Faltungen an.

Die Findung von effektiven und kostengünstigen Tragwerken ist die traditionelle Hauptaufgabe von Ingenieuren. Durch eine Vielzahl an Interessen, Bedürfnissen, Formen, Materialien und Methoden ist diese Aufgabe heute wesentlich komplexer als noch in den letzten Jahrzehnten. Zusätzlich wird im gängigen Planungsablauf der Statik meist erst zu einem sehr späten Zeitpunkt Beachtung geschenkt, der Tragwerksplaner hat dadurch kaum noch Möglichkeiten, Optimierungsvorschläge oder Planungsalternativen zu unterbreiten.

Hat die Natur sich durch die Evolution über Jahrtausende hindurch perfekt an die Umgebungseinflüsse anpassen können, so stehen dem Tragwerksplaner meist nur wenige Stunden bzw. Tage zur Verfügung, die bestoptimierte Lösung zu finden.

Ist die Wichtigkeit der Optimierung des Ressourceneinsatzes aufgrund ökonomischer, aber zunehmend auch ökologischer Gründe bereits weitgehend anerkannt, kommen Optimierungsmethoden im Bauingenieurwesen gezielt nur in seltenen Fällen zur Anwendung. Obwohl für die statische Berechnung von Ingenieurbauwerken und die Optimierung von Stabquerschnitten seit einigen Jahren sehr effiziente EDV-Programme am Markt erhältlich sind, fehlt es an geeigneten Planungsinstrumenten für den Tragwerksplaner, die ökonomischen Aspekte während der gesamtheitlichen Tragwerksplanung und -dimensionierung einzubinden. Gründe dafür liegen in den teilweise komplexen mathematischen Modellen des optimalen Entwerfens. Aufgrund der meist nichtlinearen Problemstellungen sind besonders aufwendige Lösungsalgorithmen notwendig. Eine der Hauptschwierigkeiten liegt darin, aus einer beinahe unendlich großen Menge an Lösungsmöglichkeiten unter Einhaltung der eingrenzenden Beschränkungen, die wirtschaftlichste und konstruktiv beste Lösung zu finden.

Im Folgenden werden grundlegende Optimierungsmethoden aufgezeigt, die mit Hilfe moderner Computertechnik rasch auf sich ändernde Entwurfsbedingungen reagieren und trotzdem verlässliche Lösungen finden. Nach einer Einteilung und Klassifikation von Optimierungsaufgaben wird die allgemeine Formulierung einer Tragwerksoptimierungsaufgabe beschrieben und das Prinzip des Lösungsvorganges dargestellt. Weiters werden die gängigsten Lösungsalgorithmen angeführt und die erlangten Erkenntnisse an Beispielen des Ingenieurholzbaus angewendet und Vergleiche zur Strukturbionik gezogen.

2 Einteilung und Klassifikation von Optimierungsaufgaben in der Strukturmechanik

„Die Lösung eines Problems besteht im Ausgleich einer erkannten Soll-Ist-Differenz mit einem vorhandenen oder zu suchenden Lösungsoperator. Voraussetzung zur Lösung ist ein formaler, nachvollziehbarer, logischer Lösungsalgorithmus.“ [7]

Erfolgt in der Natur die Erkennung der Soll-Ist-Differenz und deren Ausgleich durch die biomechanische Selbstoptimierung immanent, z.B. wird ein Baum durch eine Kerbe verletzt, versucht er sich schnellstmöglich durch lokale Materialoptimierungsvorgänge selbst zu heilen um keine Schwachstellen zuzulassen, so muss bei technischen und wirtschaftlichen Prozessen der Benutzer das optimierbare Problem zuerst eigenständig erkennen und dann einen Lösungsweg dafür erarbeiten.

Optimieren bedeutet dabei die bestmögliche Gestaltung dieser Prozesse, entsprechend den Zielvorgaben und den dafür zur Verfügung stehenden Mitteln. Eine Optimierung kann nach verschiedenen Zielkriterien erfolgen, z.B. Wirtschaftlichkeit, Ressourceneinsatz (Material, Maschine, Mensch), Zeit, Umweltbedingungen etc.

Für eine erfolgreiche Optimierung müssen für das vorliegende Problem einige allgemeingültige Voraussetzungen erfüllt werden [7]:

- es muss ein optimierbares Problem vorliegen,
- das Problem muss verbal beschreibbar sein,
- das Problem muss mathematisch formulierbar sein,
- das Ziel der Untersuchung muss formulierbar sein,
- das erforderliche Datenmaterial muss beschaffbar sein,
- ein notwendiger Lösungsoperator muss verfügbar sein,
- es müssen mehrere gegenläufige Einflussgrößen miteinander in Beziehung stehen.

Sind in den allgemeinen Wissenschaften beinahe unendlich viele zu optimierende Probleme bekannt, so können diese in der **Strukturmechanik** in drei wesentliche Teilbereiche von Optimierungsaufgaben klassifiziert werden (vgl. Abb. 1):

1) Bemessungs- und Geometrieoptimierung

- z.B. am 1D Modell: Querschnittsfindung bei Biegebalken
- 2D Modell: Geometrie- und Querschnittsfindung eines Fachwerkes
- 3D Modell: Optimierung eines dreidimensionalen Tragwerkes (Geometrie + Querschnitt)

2) Form- und Berandungsoptimierung

- z.B. Formfindung einer Holzschraube

3) Optimierung von Volumina

- z.B. Materialverteilung einer Brettsperrholzplatte

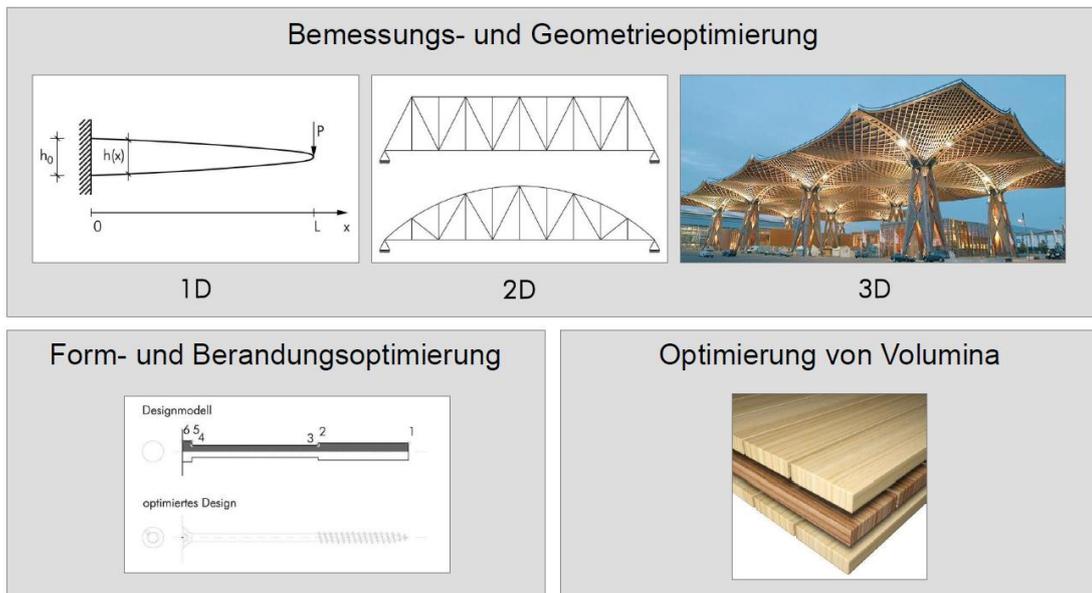


Abb. 1: Beispiele von Tragwerksoptimierungsproblemen in der Strukturmechanik [1]

Um eine Optimierungsaufgabe lösen zu können, muss sie zuvor ausführlich und eindeutig beschrieben werden. Die vier wesentlichsten Bestandteile sind dabei:

- **Optimierungskriterium oder -ziel**
 (in Beispiel 1D-Modell: die veränderliche Querschnittshöhe, um einen konstanten, maximalen Biegespannungsbetrag zu erreichen)
Frage beim Entwurf: Was ist das Entwurfsziel?
- **Entwurfsvariablen**
 (in Beispiel 1D-Modell: der veränderliche Verlauf der Querschnittshöhe h)
Frage: Was ist am Entwurf änderbar?
- **Restriktionen, Nebenbedingungen**
 (in Beispiel 1D-Modell: die Forderung, dass die zul. Spannungen nicht überschritten werden)
Frage: Welche Randbedingungen sind beim Entwurf zu beachten?
- **Entwurfsmodell**
 (in Beispiel 1D-Modell: die mathematische Beschreibung des Euler-Bernoulli-Balkens)
Frage: Wie kann der Entwurf mathematisch beschrieben werden?

Eine vertiefte Beschreibung dieser vier Punkte erfolgt in Kapitel 3.1. Im Folgenden werden für die zuvor erwähnten Anwendungsbeispiele in der Strukturmechanik die vier Hauptbestandteile genauer definiert:

Beispiel 2D-Modell, hierbei sind:

- das Optimierungskriterium: niedriges Gewicht
- die Entwurfsvariablen: Stablängen, Stabquerschnitte
- die Restriktionen: Festigkeit (max. Zug-/Druckspannung), Stabilität (kein Ausknicken der Druckstäbe), Vermeidung kritischer Eigenfrequenzen, fertigungsgerechte Gestaltung
- das Entwurfsmodell: z.B. Fachwerk mit Zug-/Druckstäben

Beispiel 3D-Modell, hierbei sind:

- das Optimierungskriterium: niedriges Gewicht, geforderte Steifigkeit
- die Entwurfsvariablen: Stablängen, Stabquerschnitte
- die Restriktionen: Festigkeit (max. Zug-/Druckspannung), vordefinierte Geometriegrenzen, Stabilität (kein Ausknicken der Druckstäbe), Vermeidung kritischer Eigenfrequenzen, fertigungsgerechte Gestaltung
- das Entwurfsmodell: z. B. dreidimensionale Rippenschalen-konstruktion

Beispiel Formfindung, hierbei sind:

- das Optimierungskriterium: optimale Tragfähigkeitseigenschaften
- die Entwurfsvariablen: Abstand der Kurvenpunkte von der Symmetrieebene und Gewindeform
- die Restriktionen: Festigkeit des Materials (max. Zug-/Druckspannung)
- das Entwurfsmodell: FEM-Modell des Schraubenquerschnitts

Beispiel Materialverteilung, hierbei sind:

- das Optimierungskriterium: hohe Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften
- die Entwurfsvariablen: Brettstärken, Anzahl Brettlagen, Material
- die Restriktionen: Beschränkung der Brettabmessungen, Geometrie und Gewicht, Fertigung
- das Entwurfsmodell: FEM-Modell

Die behandelten Beispiele geben einen Eindruck der in der Technik angewandten Tragwerkoptimierungen. Es ist ersichtlich, dass einfache Annahmen und Rechenabfolgen die Ausnahme bilden und dass bei komplexeren Optimierungsproblemen der Umfang an Entwurfsvariablen und Restriktionen sowie der Rechenaufwand rasch ansteigen. Aus diesem Grund ist es wichtig, für das Finden des Optimums bei komplexen Anwendungsfällen, eine systematische Vorgehensweise anzuwenden.

3 Allgemeine Formulierung der Tragwerksoptimierungsaufgabe und Darstellung des Prinzips des Lösungsvorganges

Im Folgenden wird die mathematische Grundformulierung eines Optimierungsproblems mathematisch erfasst und dabei die zuvor erwähnten Hauptbestandteile genauer definiert. Anschließend wird das grundsätzliche Prinzip eines Lösungsvorganges vorgestellt.

3.1 Grundformulierung des Optimierungsproblems

Das Ziel einer allgemein formulierten Optimierungsaufgabe ist es, eine Zielfunktion $f(x)$ zu minimieren bzw. zu maximieren.

$\min/\max z(x)$		Zielfunktion
$g_j(x) \leq 0$	$j = 1 \text{ bis } m_g$	Ungleichheitsrestriktionen
$h_k(x) = 0$	$k = 1 \text{ bis } m_h$	Gleichheitsrestriktionen
$x_i^u \leq x_i \leq x_i^o$	$i = 1 \text{ bis } n$	explizite Restriktionen

Es soll ein Entwurfsvariablenvektor $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}^T$ bestimmt werden, der die Funktion $f(x)$ minimiert/maximiert, die Nebenbedingungen der Funktionen $g_j(x)$, $h_k(x)$ einhält und die Variablenschranken x_i^u , x_i^o beachtet. Dabei ist es wichtig, die Aufgabe vollständig und umfassend zu beschreiben, damit möglichst wenig Aufwand zur Auswertung der Systemgleichungen notwendig ist.

3.1.1 Entwurfsmodelle

Die Aufgabe der Modellbildung ist es, ein Optimierungsproblem in einen geeigneten mathematischen Formelapparat überzuführen. Die dadurch entstehenden Systemgleichungen errechnen die durch die Ziel- und Restriktionsfunktion beeinflusste Systemantwort. Als Input dienen die sich während der Optimierungsiterationen ändernden Entwurfsvariablen. Den Systemgleichungen kommt eine besonders hohe Bedeutung zu, da sie die Qualität des Optimierungsmodells bestimmen und durch möglichst geringen Rechenaufwand die Systemantwort liefern sollen.

In der Tragwerksoptimierung stehen verschiedene Verfahren für die Modellbildung zur Verfügung. Dazu zählen die klassischen Methoden der Strukturmechanik (Kräfte- und Momentengleichgewicht), aber auch moderne numerische Verfahren wie die Finite-Element-Methode. Wegen ihrer hohen Anwendungsbreite bei komplexen Aufgaben kommt in der heutigen Strukturoptimierung hauptsächlich die zweitgenannte Methode zum Einsatz.

Neben den bis jetzt behandelten deterministischen Optimierungsproblemen können auch stochastische Zusammenhänge Einfluss auf die Modellbildung haben. Der stochastische Ansatz berücksichtigt, dass viele Abmessungen und Einflussgrößen (Werkstoffeigenschaften, Belastungen) einer tragenden Struktur streuen und nicht genau bekannt sind. Sie sind Zufallsgrößen und lassen sich nur mittels statistischer Methoden beschreiben. Deterministische Ansätze haben den Vorteil, dass sie in den meisten einfachen Fällen zu einer geschlossenen Lösung führen.

3.1.2 Entwurfsvariablen

Entwurfsvariablen können auf sämtliche zur Verfügung stehende Tragwerksparameter zurückgreifen. In Tab. 1 ist eine grobe Einteilung von diskreten und kontinuierlichen

Parametern aufgelistet. Diskrete Entwurfsvariablen sind Variablen, die nur bestimmte vorgegebene Werte annehmen dürfen.

Tab. 1: Entwurfsvariablen [10]

kontinuierliche Entwurfsvariablen	Bemessungsgrößen	Abmessungen (Wandstärken, Längen, ...)
		Flächen (Querschnitte, ...)
		Volumina
	Berandungsgrößen	Formparameter (Krümmungsradius, ...)
	Verteilungsgrößen	Dichten (Faservolumenanteil bei FVW, ...)
Richtungen (Faserorientierung bei FVW, ...)		
diskrete Entwurfsvariablen		Bautyp
		Werkstoff
		Konstruktionselemente, ...

Anmerkung: FVW ... Faserverbundwerkstoff

3.1.3 Optimierungskriterien (Entwurfsziel, Kostenfunktion)

Um ein Optimierungsziel zu erreichen, müssen zuerst die Kriterien definiert werden, nach denen ein Tragwerk optimiert werden soll.

Einige Beispiele aus verschiedenen Anwendungsgebieten sind [10]:

- Leichtbau: minimale Masse bzw. minimales Gewicht,
- Festigkeitsberechnung: minimaler Spannungsbetrag, minimaler Kerbfaktor,
- Elastostatik: maximale Steifigkeit, minimale Knickempfindlichkeit,
- Bruchmechanik: maximale Lebensdauer, maximale Zuverlässigkeit,
- Schwingungsanalyse: minimale Resonanzempfindlichkeit, maximale Dämpfung,
- Fertigung: minimale Kosten, maximale Umweltverträglichkeit,
- Betrieb: minimale Kosten, maximale Umweltverträglichkeit,
- usw.

3.1.4 Nebenbedingungen (Restriktionen)

Neben den grundsätzlichen Optimierungskriterien sollen die Restriktionen die zu optimierende Aufgabe genauer und umfassender beschreiben. Sie schränken die Entwurfsvariablen ein. Ihre Formulierung muss geschickt gewählt werden, damit die Auswertung der Systemgleichungen mit möglichst wenig Aufwand erfolgen kann. Nebenbedingungen können formuliert werden zu [10]:

- Eingrenzung der Entwurfsvariablen durch Ausschluss negativer Längen,
- Einhaltung von Abmessungen bei Strukturkomponenten,
- maximal zulässige Zug- oder Druckspannung,
- maximal zulässige Verformungen,
- Vermeidung von Knicklasten,
- Vermeidung kritischer Eigenfrequenzen,
- u.a.m.

Eine Unterteilung der Zusatzbedingungen kann in Haupt- und Nebenrestriktionen sowie in Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungen durchgeführt werden.

3.2 Das Prinzip des Lösungsvorganges

In diesem Abschnitt wird das Prinzip des Lösungsvorganges soweit diskutiert, dass die wesentlichen Schritte deutlich werden und die in den weiteren Abschnitten besprochenen Grundlagen und Anwendungen auch diesbezüglich entsprechend eingeordnet werden können.

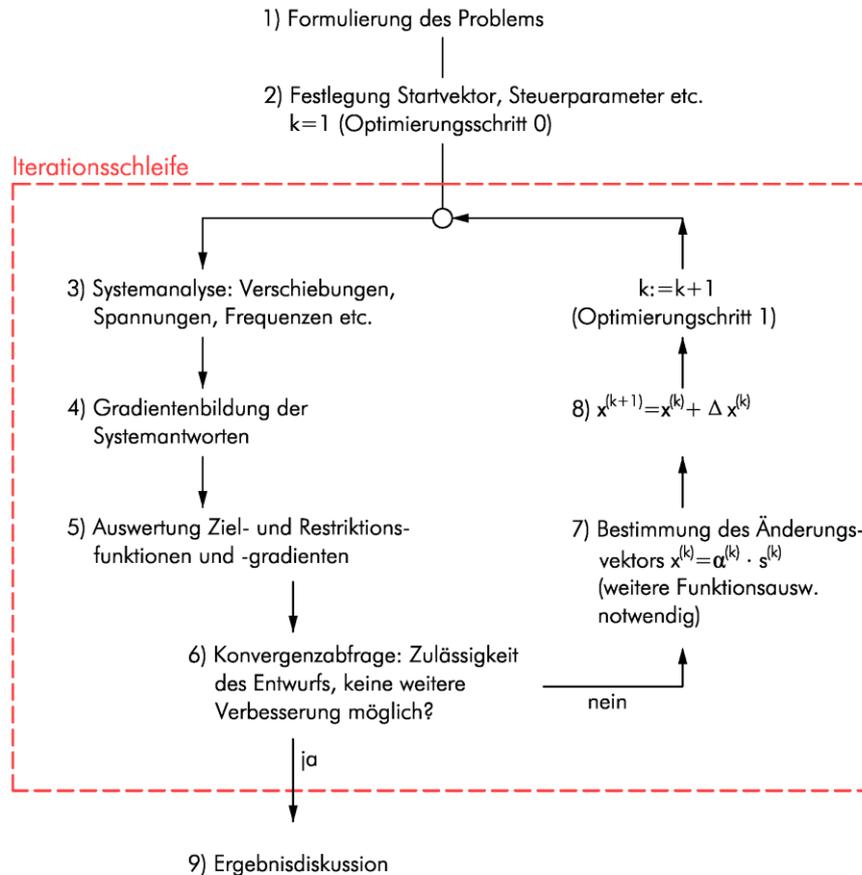


Abb. 2: Lösungsvorgang einer Optimierung [3]

Zu Beginn eines jeden Optimierungsvorganges wird in Schritt 1 (vgl. Abb. 2) das Optimierungsproblem definiert, formuliert und einem Optimierungsprogramm zugeordnet. Wesentlich dabei ist, dass die Systemgleichungen geschickt aufbereitet werden, da sie zur Qualität des Optimierungsmodells beitragen und den Rechenaufwand zur Erlangung der Systemantworten beeinflussen. Bei umfassenderen Aufgaben kann eine Zerlegung in Teilaufgaben erfolgen.

Die notwendigen Steuerparameter für die Lösungsalgorithmen werden in Schritt 2 festgelegt. Außerdem kommt es zu einer ersten ingenieurmäßigen Abschätzung des Lösungsvektors, der als Startvektor dient. Dem Startvektor kommt eine sehr wichtige Rolle im Optimierungsablauf zu, gibt er doch die Optimierungsrichtung vor. Vor den eigentlichen Optimierungsiterationen sollte mit dem Startvektor eine erste Tragwerksberechnung

durchgeführt werden ($k = 1$), um die Steuerparameter zu prüfen und gegebenenfalls zu modifizieren.

In Schritt 3 wird eine Systemanalyse zur Berechnung der Antwortgrößen durchgeführt. Dazu können bei der ersten Iteration die Werte aus Schritt 2 ($k = 1$) benutzt werden. Die Antwortgrößen können zum Beispiel Verschiebungen, Spannung, etc. sein. Sind für Optimierungsalgorithmen Gradienten der Antwortfunktionen erforderlich, so werden diese in Schritt 4 berechnet. Die Auswertung der Restriktionsfunktionen und ihrer Gradienten erfolgt in Schritt 5.

Im nächsten Schritt wird überprüft, ob der Variablenvektor zulässig ist und ob die Zielfunktion einer weiteren Verbesserung unterzogen werden kann. Diesen Vorgang nennt man Konvergenzabfrage. Ist eine weitere Optimierung möglich, so wird in Schritt 7 der Änderungsvektor Δx bestimmt, mit dem in der nächsten Iteration die Zielfunktion abgeändert wird. Der Änderungsvektor kann bei den meisten Algorithmen mit der Suchrichtungsbestimmung ermittelt werden. Dabei wird eine Suchrichtung s gesucht, die dem Änderungsvektor die Richtung des verbesserten Entwurfs zeigt. Abbildung 3 zeigt diesen Vorgang. Die zwei strichlierten roten Linien geben eine sinnvolle Begrenzung des möglichen Bereiches von s vor. Die Länge des Änderungsvektors wird mit dem Beiwert α so skaliert, dass in der Suchrichtung kein besserer Variablenvektor als $x + \Delta x$ zu finden ist. Dieser Vorgang heißt "eindimensionale Optimierung" und erfolgt iterativ. Auch ist dazu eine Auswertung der Ziel- und Nebenbedingungsfunktionen, sowie der Systemgleichungen erforderlich, um möglichst kleine Zielfunktionswerte in Richtung von s zu bekommen.

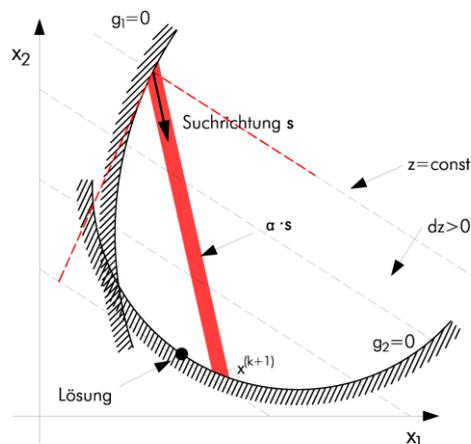


Abb. 3: Iterationsschritt [3]

In Schritt 8 wird der Zielvektor $x^{(k)}$ mit dem Änderungsvektor $\Delta x^{(k)}$ abgeändert und es folgt ein neuer Iterationsdurchgang mit einem um Eins erhöhten Iterationsindex.

Die Iterationsschleife durchläuft den vorgängig beschriebenen Ablauf (Schritt 3 bis 8) so oft, bis ein Abbruchkriterium erreicht ist. Abbruchkriterien sind zum Beispiel die Erfüllung aller Restriktionsanforderungen.

Im Anschluss an den Iterationsvorgang muss das Ergebnis auf seine Relevanz geprüft werden. Wichtig dabei ist, dass die ermittelten Lösungen der Entwurfsaufgabe entsprechen und dass eine Prüfung erfolgt, ob ein absolutes Optimum vorliegt (es kann passieren, dass der Lösungsalgorithmus aufgrund eines ungültigen Parameters frühzeitig abgebrochen wird).

Der rechnerische Aufwand für einen Optimierungsprozess wird hauptsächlich bestimmt von:

- der Anzahl der notwendigen Iterationsschritte,
- dem Aufwand zur Bestimmung der Systemantworten und der Gradienten in einer Iteration,
- dem rechnerische Aufwand für den eigentlichen Algorithmus,
- dem Datenmanagement.

4 Überblick über Optimierungsalgorithmen

Das wesentliche Element einer Strukturoptimierung ist der mathematische Optimierungsalgorithmus. Er ist sozusagen der Motor, der während der Optimierungsrechnung die Verbesserung der Optimierungsvariablen steuert. Die richtige Wahl des Algorithmus ist maßgeblich für die Effizienz der Optimierungsrechnung verantwortlich.

4.1 Was ist ein Algorithmus?

Unter einem Algorithmus versteht man einen Satz von Regeln und Anweisungen, welche Eingangsdaten (Input) durch präzise definierte Schritte zu einem bestimmten Berechnungsergebnis (Output) umwandeln. Algorithmen sind so gestaltet, dass sie in eine Computersprache übergeführt werden können. Dies schließt subjektive Entscheidungen durch den Algorithmus aus. Mit Hilfe von Rechenprogrammen können Algorithmen effizient genutzt werden.

Das Grundprinzip von Optimierungsalgorithmen ist wie folgt:

- 1) Definition des Startvektors $\mathbf{x}^{(k)}$, Iterationsindex $k = 1$;
- 2) Bestimmung des Änderungsvektors $\Delta\mathbf{x}^{(k)}$, der den Startvektor in Richtung des gesuchten Zielwertes verbessert (Verwendung Zielfunktion und Restriktionen);
- 3) Bildung des verbesserten Entwurfsvariablenvektors: $\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \Delta\mathbf{x}^{(k)}$;
- 4) Kontrolle des Abbruchkriteriums;
 wenn nein: $k_{\text{neu}} = k + 1$; gehe zu 2)
 wenn ja: Stopp; Lösungsvektor $\mathbf{x}_{\text{opt}} = \mathbf{x}^{(k+1)}$.

Der wesentliche Unterschied der einzelnen Algorithmen liegt in der Bildung des Änderungsvektors $\Delta\mathbf{x}^{(k)}$. Die unterschiedlichen Algorithmen können durch die Anzahl der Iterationsschritte zur Findung der Lösung miteinander verglichen werden. Direkt damit sind der Rechenaufwand und die Gesamtrechenzeit eines Computers bis zur Lösung des jeweiligen Problems verbunden. Bei großen Optimierungsaufgaben ist die Anzahl der Iterationen und Systemanalysen wesentlich für die Gesamtrechenzeit verantwortlich.

4.2 Klassifizierung von Algorithmen

Die Anzahl der verfügbaren Lösungsverfahren für Tragwerksoptimierungsaufgaben ist in den letzten Jahren enorm gestiegen. Es haben sich jedoch einige Algorithmen aus der Menge hervorgehoben, die besondere Vorteile besitzen. Qualitätskriterien für Algorithmen sind insbesondere Effizienz, Zuverlässigkeit und Allgemeingültigkeit.

Grundsätzlich lassen sich Optimierungsverfahren in zwei große Hauptgruppen unterteilen:

- Optimalitätskriterienverfahren,
- Verfahren der mathematischen Programmierung.

Bei dem Optimalitätskriterienverfahren wird explizit ein Lösungsvektor gesucht, der zugleich alle erforderlichen Bedingungen erfüllt. Im Gegensatz dazu wird bei den Verfahren der mathematischen Programmierung von einem definierten Startvektor $\mathbf{x}^{(k)}$ aus diejenige Suchrichtung s iterativ gesucht, in der unter Einhaltung der Restriktionen die größte Verbesserung der Zielfunktion zu erwarten ist. Dabei wird mit Hilfe der „Eindimensionalen Optimierung“ die optimale Schrittweite α in Richtung der Suchrichtung s ermittelt und der verbesserte Entwurfsvariablenvektor ergibt sich zu:

$$\mathbf{x}^{(k+1)} = \mathbf{x}^{(k)} + \alpha \cdot \mathbf{s}^k \quad (1)$$

In der folgenden Übersicht sind die wichtigsten Vertreter von Optimierungsverfahren aufgelistet:

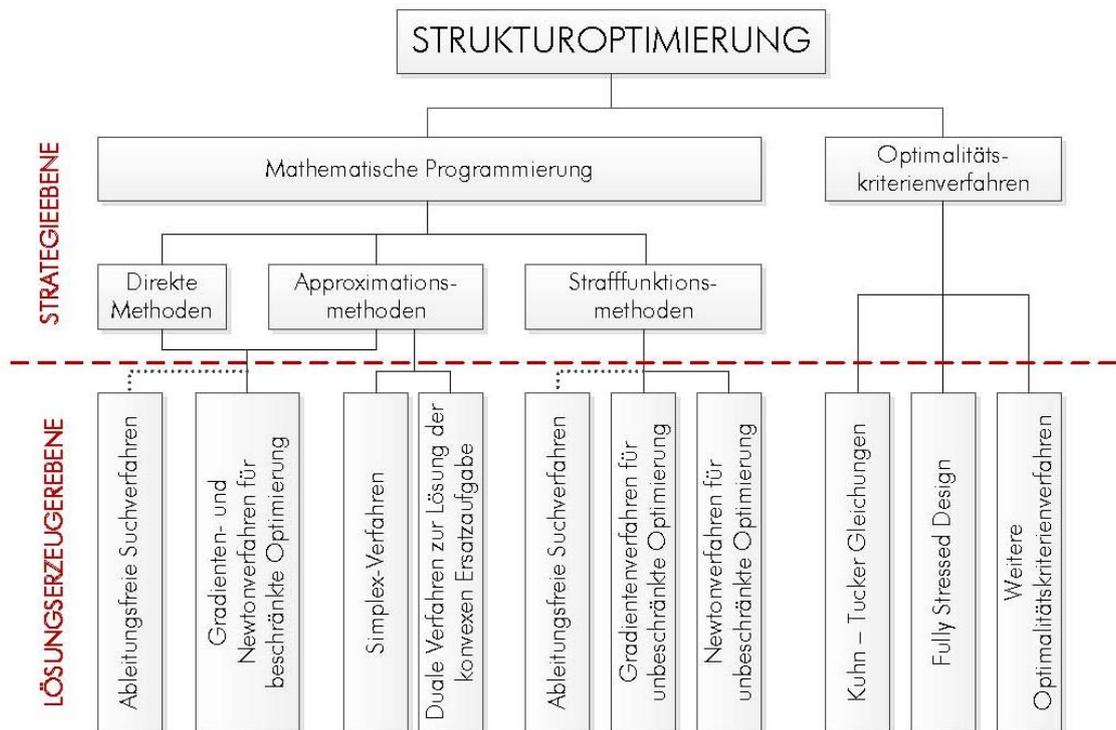


Abb. 4: Optimierungsalgorithmen für Strukturoptimierungen [3]

Auf eine genaue Beschreibung aller Algorithmentypen wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Fachliteratur verwiesen. Als ein Beispiel wie man die Prinzipien der natürlichen Evolution durch die Unterstützung von Computern nachbilden kann, wird in Kapitel 4.4 ein kurzer Einblick in „Evolutionäre Algorithmen“ gegeben.

4.3 Lösungsvorgang

Die prinzipielle Lösung eines Optimierungsproblems erfolgt in zwei Ebenen: der Lösungsstrategieebene und der Lösungserzeugerebene.

4.3.1 Lösungsstrategien

Der Lösungsweg wird durch die Lösungsstrategie beschrieben. Dabei wird das Hauptaugenmerk auf die Anwendung der Restriktionen und ihre Integration in die Zielfunktion gerichtet.

4.3.2 Lösungserzeuger

Der Lösungserzeuger ist der Antrieb der Optimierung. Er übernimmt nach Festlegung der Lösungsstrategie die iterative Veränderung des Optimierungsvariablenvektors $x^{(k)}$. Dies geschieht grundsätzlich durch die Erzeugung eines Änderungsvektors $\Delta x = \alpha^{(k)} \cdot s^{(k)}$, der aus einem Skalar $s^{(k)}$ und einem Suchrichtungsvektor $\alpha^{(k)}$ errechnet wird.

Die Suchrichtung $s^{(k)}$ wird mit dem „Suchrichtungserzeuger“ und die Schrittweite $\alpha^{(k)}$ mit der „Eindimensionalen Suche“ bestimmt. Beispiele für Suchrichtungserzeuger sind ableitungsfreie Suchverfahren (z.B. Monte-Carlo Verfahren) oder die Methode des steilsten Abstieges (z.B. Gradientenverfahren).

4.4 „Evolutionäre Algorithmen“ – Evolutionsstrategien

Aufbauend auf die Idee der biologischen Evolution werden bei „Evolutionären Algorithmen“ aus einer Population von Individuen immer besser angepasste Individuen erzeugt. Dabei werden aus guten Lösungen die Eigenschaften übernommen und durch Mutation diese fortlaufend verbessert.

Die Implementierung am Computer erfolgt meist durch stochastische Such- und Optimierungsverfahren. Diese werden von der klassischen Evolutionstheorie abgeleitet, wobei die Grundidee ist, dass an die Umwelt angepasste Populationen von Individuen langfristiger überleben können. Zurückgegriffen wird dabei oft auf die darwinistische Evolutionstheorie, deren einfachste Formulierung „survival of the fittest“ als Regel bei der Umsetzung in Computerprogrammen dient. Beispiele von evolutionären Algorithmen sind „genetische Algorithmen“ oder „Evolutionsstrategien“.

Im Anwendungsgebiet der Strukturmechanik kommen vor allem Evolutionsstrategien zum Einsatz. Mit ihnen können anlehnend an die Regeln der Evolution Zielfunktionen optimiert werden. Evolutionen können dabei durch verschiedene Faktoren vorangetrieben werden. Dies sind:

- Rekombination
Bei der Rekombination erben die Nachkommen von selektierten Individuen die Eigenschaften ihrer Eltern.
- Mutation
Die Mutation sorgt für eine Veränderung der Erbinformationen der Eltern beim Übergang an die Nachkommen; es kann sich dabei eine Verbesserung aber auch eine Verschlechterung einstellen.
- Selektion
Bei der Selektion werden nur die fittesten Individuen selektiert, durch die sich eine ständig verbessernde Population entwickelt.

Grundsätzlich ist der Ablauf einer Evolutionsstrategie ähnlich wie das Prinzip des Lösungsvorganges aus Kapitel 3.2. Er kann in drei Schritte zusammengefasst werden:

Schritt 1: Erstellung einer Population

Zuerst müssen die erforderlichen Kenngrößen initialisiert und damit eine Startpopulation generiert werden. Aufbauend darauf werden für jedes Individuum ihre Fitnesswerte bestimmt.

Schritt 2: Erzeugung von Nachkommen, Bewertung der Fitness der Individuen, Durchführung der Selektion

Im zweiten Abschnitt werden aus der Startpopulation wiederholend neue Generationen erzeugt, wobei in der Regel für jeden Nachkommen zwei Elternteile ausgewählt werden. Die Kinder erben (rekombinieren) dabei die Strategieparameter ihrer Eltern, welche anschließend zusätzlich mutiert werden. Der Algorithmus sucht sich aus dem dabei entstanden Pool an neuen Individuen nur die „Besten“ aus und bildet eine neue Elterngeneration. Dieser Ablauf wird solange fortgeführt, bis die zuvor definierten Abbruchbedingungen gelten.

Schritt 3: Ausgabe der Lösung

Zuletzt wird die beste gefundene Lösung für das Ausgangsproblem ausgegeben.

4.5 Beurteilung der Optimierungsstrategien

Die Wahl des passenden Optimierungsverfahrens ist der ausschlaggebende Punkt um eine effiziente Optimierung einer Aufgabenstellung gewährleisten zu können. Die Eignung der vorgestellten Optimierungsverfahren zur Lösungsfindung einer Tragwerksaufgabe hängt von mehreren Faktoren ab, deren Wichtigkeit von der Aufgabenstruktur und den Zielerwartungen des Anwenders abhängt. Kriterien dafür sind:

- Allgemeingültigkeit bzw. Anwendungsbreite,
- Effizienz,
- Robustheit und Zuverlässigkeit,
- Zulässigkeit von Zwischenlösungen.

4.5.1 Allgemeingültigkeit bzw. Anwendungsbreite

Die Allgemeingültigkeit definiert den Anwendungsbereich eines Lösungsverfahrens. Ungeeignete Verfahren für eine zu optimierende Aufgabe sollen damit ausgegrenzt werden. Algorithmen können in Klassen eingeteilt werden, die sich nach der Größe der Aufgabe und der Art der Zielfunktion, der Optimierungsvariablen und der Restriktionen richten.

4.5.2 Effizienz

Der wesentliche Maßstab, um die Effizienz von Optimierungsverfahren vergleichen zu können, ist die Rechenzeit zur Findung der Lösung der Optimierungsaufgabe. Die Gesamtrechenzeit setzt sich zusammen aus der für die Strukturanalyse erforderlichen Zeit, der Rechenzeit des Optimierungsmoduls und der damit verbundenen Berechnung der Gradienten. Je häufiger diese Analysen und Berechnungen in einem Iterationsschritt durchgeführt werden müssen, desto langsamer wird der Berechnungsalgorithmus und die Effizienz zur Lösung der Optimierungsaufgabe sinkt.

4.5.3 Robustheit und Zuverlässigkeit

Mit der Zuverlässigkeit kann die Wahrscheinlichkeit eines Algorithmus beschrieben werden, eine bestimmte Optimierungsaufgabe positiv gelöst zu haben. Je mehr Anwendungsgebiete ein Algorithmus bewältigen kann, desto robuster ist er.

4.5.4 Zuverlässigkeit von Zwischenlösungen

Werden aus Zeitgründen nur eine begrenzte Zahl von Iterationsschritten zugelassen, wird die Optimierung meist vor dem Finden der optimalen Lösung abgebrochen. Dabei ist es wichtig, dass das letzte berechnete Ergebnis zulässig ist und keine Restriktionen verletzt werden.

Im Rahmen der Masterarbeit „Anwendung von Optimierungsalgorithmen auf Problemstellungen des Ingenieurholzbaus“ [1] wurde unter der Verwendung des Tabellenkalkulationsprogrammes Microsoft EXCEL ein Bemessungstool entwickelt, das automatisiert das Hallentragsystem mit dem Ziel der minimalen Querschnittsflächen oder des kostengünstigsten Querschnittes optimiert und vorgibt.

Im Bemessungstool werden dabei im Programmhintergrund viele komplexe Algorithmen ausgeführt, wie zum Beispiel zur Optimumsuche der maßgebenden Schnittgrößen, zur Wahl der Geometrie oder zur Querschnittsoptimierung.

Im Folgenden werden Auszüge dieser implementierten Algorithmen exemplarisch anhand der linken Pendelstütze betrachtet. In einem vorgeschalteten Algorithmus wurden bereits die maßgebenden Schnittgrößen entlang der Stützenachse ermittelt und ausgegeben. Ausgehend von diesen Schnittgrößen soll der Querschnitt der Holzstütze unter Einhaltung der Bestimmungen gemäß ÖNORM EN 1995-1-1:2009 [4] bzw. ÖNORM B 1995-1-1:2010 [5] minimiert werden.

5.1.2 Definition Zielfunktion und Restriktionen

Als Entwurfsvariablen werden der Stabquerschnitt und als Zielfunktion die Querschnittsfläche definiert. Die in den Normen genannten Tragfähigkeitsnachweise werden mittels Restriktionen berücksichtigt.

Entwurfsvariablen:

Die Entwurfsvariablen sind die Breite b und die Höhe h des Querschnittes.

$$x_1 = b ; x_2 = h$$

Zielfunktion:

Als Zielfunktion wird die minimale Querschnittsfläche definiert.

$$Z = x_1 \cdot x_2 = \text{Min}$$

Restriktionen:

- Querschnittsminimum:

1. Restriktion: $g_1 = x_1 \geq 20,0 \text{ [mm]}$

2. Restriktion: $g_2 = x_2 \geq 20,0 \text{ [mm]}$

- Tragfähigkeitsnachweise des Bauteiles:

3. Restriktion: $g_3 = \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 0$

4. Restriktion: $g_4 = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 0$

5. Restriktion: $g_5 = \frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 0$

5.1.3 Lösung der Optimierungsaufgabe

Die Lösungsfindung erfolgt in diesem Beispiel mit dem im Bemessungstool verwendeten Algorithmus der *Direkten Lösung der restringierten Optimierungsaufgabe*. In Abbildung 6 ist ein Ausschnitt dieses Programmcodes dargestellt. Die Pendelstütze wird dabei auf die Tragfähigkeitsnachweise Biegedruck und Schub optimiert.

Der Programmablauf zeigt, dass für die im Holzbau gängigen Querschnittsbreiten b (100, 120, 140, 160, 180, 200 mm) die erforderlichen Mindestquerschnittshöhen h iterativ berechnet werden.

Der abgebildete Algorithmus setzt sich aus zwei Iterationsschleifen zusammen: Die erste Breitenschleife veranlasst, dass alle Querschnittsbreiten berücksichtigt werden. Der eigentliche Optimierungsalgorithmus ist eine DoUntil-Schleife, die bei jedem Iterationsschritt prüft, ob die Restriktionen (Tragfähigkeitsnachweise) für die aktuell behandelten Querschnittsabmessungen erfüllt sind. Trifft dies nicht zu, dann wird ein erneuter Iterationsschritt mit einem um die Breite „ dh_x “ erhöhten h durchgeführt.

Die Bestimmung der Suchrichtung s erfolgt mit einem *ableitungsfreien Verfahren*. Sie wird in Richtung der steigenden Querschnittshöhe h mit der Schrittweite a gleich „ dh_x “ für jeden Iterationsschritt definiert.

Aus den ermittelten, optimierten Querschnittsabmessungen kann nun der Querschnitt mit der geringsten Querschnittsfläche bzw. wahlweise jener mit den geringsten Materialkosten ausgewählt werden.

5.1.4 Ergebnis

Das Ergebnis der ausgeführten Algorithmen sind für den Anwender optimierte Querschnitte.

Tab. 2: *optimierte Querschnitte der linken Pendelstütze aus dem entwickelten Bemessungstool*

Stütze 1			
b [mm]	h [mm]	A [cm ²]	Kosten [€]
100	740	740	146
120	460	552	108
140	340	476	90
160	260	416	77
180	220	396	73
200	200	400	74

```

For i = 0 To 5 ' Breitenschleife #####

    b = (10 + i * 2) * 10

    -----
    |
    |
    |
    |
    |
    |
    -----

    ' ##### Nachweis Lastfall N auf DRUCK #####

    If NLFNmin < 0 Then

        ' Nachweis in y-Richtung #####

        NW = False
        NWLFN = 100
        NWLFQ = 100
        h = 100

        Do Until NW = True

            '### Knickbeiwert

            kcy = FKC(h, sth1, fc0k, E005, bc)

            '### Kippbeiwert

            kcrity = FKCRIT(b, h, lef, E005, G005, fmyk)

            '### Höhenbeiwert

            khy = FKHY(bc, h)

            '### Widerstand

            fmydN = fmyk * kmod * khy / gammam
            fc0dN = fc0k * kmod / gammam
            fvdQ = fvk * kmod / gammam

            '### Nachweis

            NWLFN = ((Abs(NLFNmin) + NV) * 1000) / (kcy(0, 0) * b * h * fc0dN) + _
                (Abs(MyLFNmin) * 10 ^ (6) * 6) / (b * h ^ (2) * fmydN * kcrity(0, 0))
            NWLFQ = (1.5 * Abs(QLFQ) * 1000) / (b * kcr * h * fvdQ)

            If NWLFN < 1# And NWLFQ < 1# Then

                NW = True

            End If

            h = h + dhx

        Loop

    -----
    |
    |
    |
    |
    |
    |
    -----

Next i

```

Abb. 6: Auszug aus dem Quellcode für Stützenbemessung einer Holzhalle

5.2 Stabdübelanschluss

Neben der Verwendung von Algorithmen in der Tragwerks- und Querschnittsoptimierung ist im Holzbau vor allem die Optimierung von Holzbauanschlüssen ein wichtiges Anwendungsgebiet für Algorithmen. Bei der Bemessung eines Holzbauanschlusses treten viele verschiedene variable Parameter auf. Neben den Materialparametern wirkt sich vor allem die Geometrie des Anschlusses auf die Tragfähigkeit der Verbindungen aus. Durch die richtige Wahl dieser Parameter kann die Leistungsfähigkeit einer Verbindung gezielt gesteigert werden. Im folgenden Beispiel wird dies anhand eines mehrschnittigen Stabdübelanschlusses gezeigt.

5.2.1 Angabe

Die folgende Abbildung zeigt einen mehrschnittigen Stabdübelanschluss.

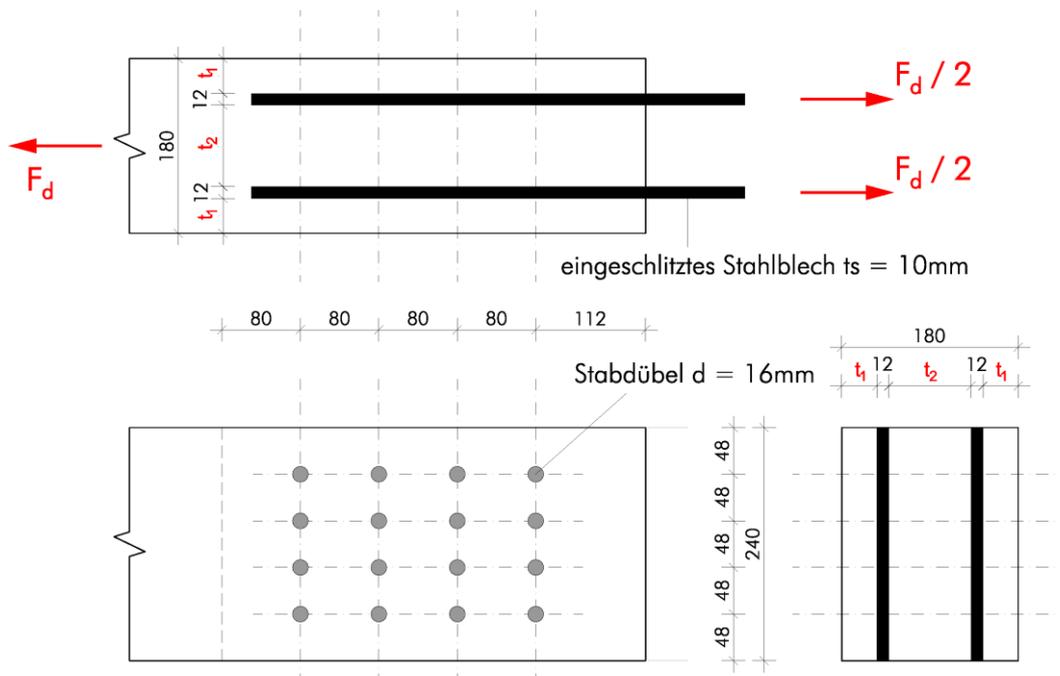


Abb. 7: Geometrie einer vierschnittigen Holz-Stahlblech-Verbindung [1]

Die Tragfähigkeit mehrschnittiger Verbindungen ist laut ÖNORM EN 1995-1-1:2009 [4] und ÖNORM B 1995-1-1:2010 [5] als Summe der Tragfähigkeiten einer Reihe zweischnittiger Verbindungen zu ermitteln.

Die Tragfähigkeit berechnet sich zu:

$$F_k = F_{I,k} + F_{II,k}$$

F_k ...Tragfähigkeit je Stahlblech und Verbindungsmittel [N]

$F_{I,k}$...Tragfähigkeit der Scherfuge I je Stahlblech und Verbindungsmittel (Mechanismen f,g,h)

$F_{II,k}$...Tragfähigkeit der Scherfuge II je Stahlblech und Verbindungsmittel (Mechanismen l,m)

Die Gleichungen für die Tragfähigkeit der einzelnen Mechanismen sind für innen und außen liegende Stahlbleche auf Basis der JOHANSEN-Theorie festgelegt (siehe 5.3.2). In diesen Tragfähigkeitsgleichungen sind neben den Materialeigenschaften und dem Durchmesser des Stabdübels vor allem die Dicke des Seitenholzes t_1 und die Dicke des Mittelholzes t_2

maßgebende Faktoren. Diese Holzabmessungen sollen nun für einen vorgegebenen Stabdübel so optimiert werden, dass die Tragfähigkeit des Verbindungsmittels maximiert wird.

Für das im Folgenden behandelte Beispiel sind folgende Randbedingungen festgelegt:

- Brettschichtholz GL 28h
- Rohdichte ρ_k : 410 kg/m³
- Querschnittsbreite b : 180 mm
- Querschnittshöhe h : 240 mm
- Blechdicke t_b : 2 x 10 mm
- Zugfestigkeit Stabdübel (S 235) $f_{u,k}$: 360 N/mm²
- Durchmesser Stabdübel d : 16 mm
- $k_{mod} = 0,9$ und $\psi_{m,Verbindung} = 1,30$

5.2.2 Definition Zielfunktion und Restriktionen

Entwurfsvariablen:

Die Entwurfsvariablen sind die Seitenholzbreite t_1 und die Mittelholzbreite t_2 .

$$x_1 = t_1 ; x_2 = t_2$$

Zielfunktion:

Als Zielfunktion wird die maximale Tragfähigkeit eines Verbindungsmittels definiert.

$$Z = F_{VM,Rk} = 2 \cdot \min \left\{ \begin{array}{l} f(x_1, d) \\ g(x_1, d) \\ h(d) \end{array} \right\} + 2 \cdot \min \left\{ \begin{array}{l} l(x_2, d) \\ m(d) \end{array} \right\} \stackrel{!}{=} \text{Max}$$

$f(x_1, d), g(x_1, d), h(d)$, ... Johansen-Gleichungen, Scherfuge I

$l(x_2), m(d)$... Johansen-Gleichungen, Scherfuge II

Restriktionen:

- Querschnittsminimum:

1. Restriktion: $g_1 = x_1 \geq 20,0$ [mm] (Annahme)

2. Restriktion: $g_2 = x_2 \geq 20,0$ [mm] (Annahme)

- Querschnittsbreite des Bauteiles:

3. Restriktion: $g_3 = 2 \cdot x_1 + x_2 \cdot (t_b + 2,0) = b$

5.2.3 Lösung der Optimierungsaufgabe

Als Lösungsverfahren wird für dieses Beispiel die direkte Lösung der restringierten Optimierungsaufgabe gewählt. Die Umsetzung erfolgt im Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft EXCEL unter Hilfenahme der Programmiersprache Visual Basic. Ein Ausschnitt des Programmcodes ist in Abbildung 8 dargestellt. Von einer definierten Mindestbreite der Seitenholzdicke ($t_{1,(1)} \geq 20$ mm) ausgehend, wird im ersten Iterationsschritt die charakteristische Tragfähigkeit $F_{VM,Rk,(1)}$ eines Stabdübels nach der Zielfunktion berechnet. Die maßgebenden JOHANSEN-Gleichungen und die Breitenrestriktionen werden dabei berücksichtigt. Im nächsten Iterationsschritt wird die Seitenholzdicke um 1 mm erhöht ($t_{1,(2)} = 21$ mm) und die Zielfunktion erneut berechnet. Die nun errechnete Tragfähigkeit $F_{VM,Rk,(2)}$ wird mit jener des vorangegangenen Iterationsschrittes verglichen. Der Algorithmus wird abgebrochen, wenn die Abbruchbedingung $F_{VM,Rk,(k+1)} \leq F_{VM,Rk,(k)}$ erfüllt ist.

Somit kann die Suchrichtung s in Richtung der steigenden Randholzdicke t_1 und die Schrittweite α mit 1 mm für jeden Iterationsschritt definiert werden.

Die Umsetzung im Programmcode erfolgt nach folgenden Schritten (vgl. Abb. 8):

A) Berechnung der Materialparameter

myk ... Fließmoment [Nmm]
 fh1k und fh2k ... charakt. Lochleibungsfestigkeit [N/mm²]
 t1 = 20 ... Startwert der Seitenholzbreite [mm]

B) Ablauf der Iteration (DoUntil-Schleife)

- 1) Berechnung der Mittelholzbreite t_2
- 2) Berechnung der charakt. Tragfähigkeit des Verbindungsmittels (FVMRk)
 - 2a) Funktion (FfArk) zur Berechnung der Tragfähigkeit der Scherfuge I. Es werden die JOHANSEN-Gleichungen f, g und h berechnet und der kleinste Wert wird an den Iterationsalgorithmus zurückgegeben
 - 2b) Funktion (FfBrk) zur Berechnung der Tragfähigkeit der Scherfuge II. Es werden die JOHANSEN-Gleichungen l und m berechnet und der kleinste Wert wird an den Iterationsalgorithmus zurückgegeben
- 3) Kontrolle der Abbruchbedingung
 - wenn ja: t_1 und t_2 sind Lösung der Aufgabe
 - wenn nein: Erhöhung der Seitenholzbreite um 1 mm und erneute Iteration

5.2.4 Ergebnis

In Abbildung 9 ist das Ergebnis der Optimumssuche grafisch dargestellt. Für eine Holzbreite von $b = 180$ mm und einem Stabdübeldurchmesser von $d = 16$ mm sind die charakteristischen Verbindungsmitteltragfähigkeiten in Abhängigkeit von der Seitenholzbreite t_1 aufgetragen. Die maximale Tragfähigkeit des Stabdübels von 61,14 kN wird bei einer Seitenholzbreite von $t_1 = 36$ mm und einer Mittelholzbreite von $t_2 = 83$ mm erreicht.

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass sich die Wahl der Seiten- und Mittelholzbreiten sehr stark auf die Tragfähigkeit des Verbindungsmittels auswirken.

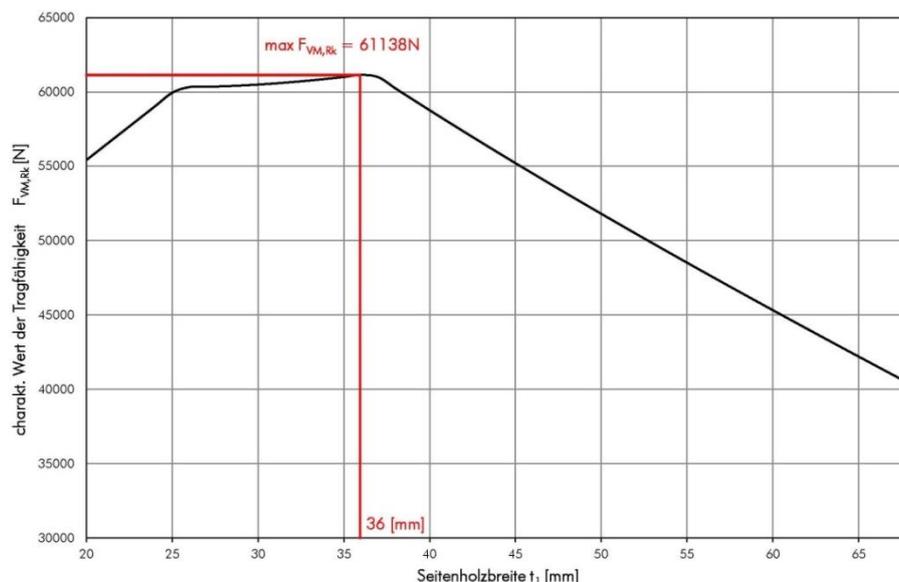


Abb. 8: charakteristischer Wert der Tragfähigkeit eines Stabdübels $d = 16$ mm in Abhängigkeit der Seitenholzbreite t_1 bei einer Gesamtquerschnittsbreite von $b = 180$ mm

```

Sub Tragfähigkeit()
    myk = 0.3 * fuk * d ^ (2.6)
    fh0k = 0.082 * (1 - 0.01 * d) * roh
    k90 = 1.35 + 0.015 * d
    fh1k = fh0k / (k90 * (Sin(alpha1)) ^ (2) + (Cos(alpha1)) ^ (2))
    fh2k = fh0k / (k90 * (Sin(alpha2)) ^ (2) + (Cos(alpha2)) ^ (2))
    t1 = 20
    NW = False
    FrkVma = 1
} A)

Do Until NW = True
    t2 = th - 2 * t1 - 2 * ts
    FVMRk = 2 * FfArk(t1, d, fh1k) + 2 * FfBrk(t2, d, tb, fh2k)
    If FVMRka > FVMRk Then
        NW = False
        FVMRka = FVMRk
    Else
        NW = True
    End If
    t1 = t1 + 1
} B)

Loop

End Sub

Function FfArk(t1, d, fh1k) 'Scherfuge I
    fArk1 = fh1k * t1 * d 'Mechanismus f
    fArk2 = fh1k * t1 * d * ((2 + 4 * myk / (fh1k * (t1 ^ (2) * d) ^ (1 / 2) - 1) 'Mechanismus g
    fArk3 = 2.3 * (myk * fh1k * d) ^ (1 / 2) 'Mechanismus h
    fark = fArk1
    If fArk2 < fark Then
        fark = fArk2
    End If
    If fArk3 < fark Then
        fark = fArk3
    End If
    FfArk = fark
} 2a)

End Function

Function FfBrk(t2, d, tb, fh2k) 'Scherfuge II
    fBrk1 = fh2k * (t2 / 2) * d 'Mechanismus l
    fBrk2 = 2.3 * (myk * fh2k * d) ^ (1 / 2) 'Mechanismus m
    fbrk = fBrk1
    If fBrk2 < fbrk Then
        fbrk = fBrk2
    End If
    FfBrk = fbrk
} 2b)

End Function

```

Abb. 9: Auszug aus dem Quellcode für die vierschnittige Stabdübelbemessung

Der entwickelte Algorithmus kann weiterführend so adaptiert werden, dass für verschiedene Stabdübeldurchmesser das ideale Verhältnis der Seiten- und Mittelholzbreiten berechnet werden kann. Abbildung 10 zeigt die idealen Holzbreiten t_1 und t_2 für eine Bauteilbreite von 180 mm in Abhängigkeit des Stabdübeldurchmessers. Weiters sind die maximalen charakteristischen Tragfähigkeiten der Stabdübel angegeben.

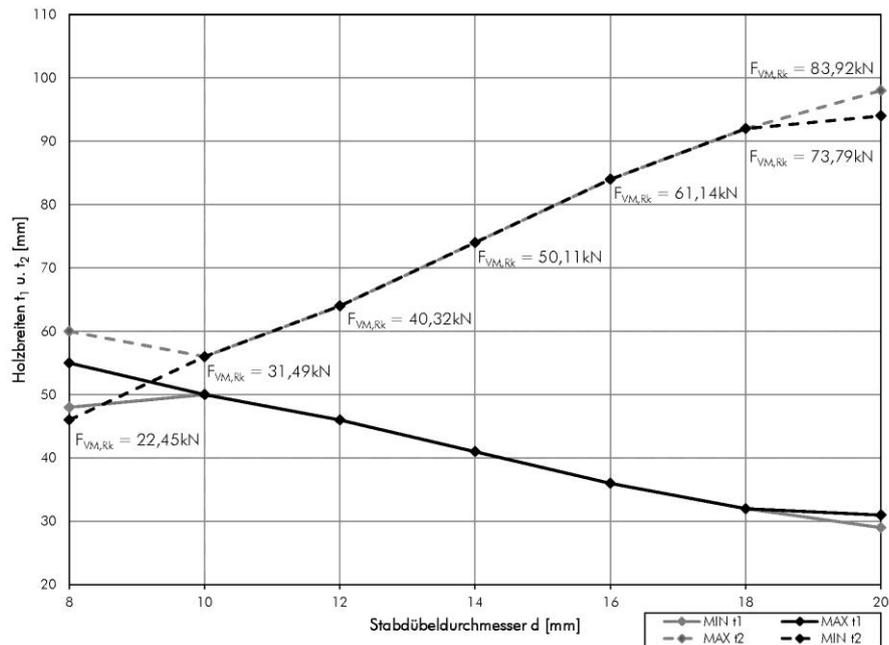


Abb. 10: optimierte Seitenholz- und Mittelholzbreiten in Abhängigkeit des Stabdübeldurchmessers bei einer Gesamtquerschnittsbreite von $b = 180$ mm

5.3 Baumähnliche Strukturen

Abschließend zeigt das letzte Beispiel einen kurzen Einblick in Tragwerkstrukturen, bei denen die Natur als Vorbild dient.

Das Tragverhalten von Bäumen hat viele Architekten inspiriert, die Tragstrukturen von Ingenieurbauwerken entsprechend zu entwickeln. Vor allem der deutsche Architekt Otto Frei hat sich speziell mit baumähnlichen Stützen und Verzweigungsstrukturen beschäftigt. Verzweigungsstrukturen weisen eine besonders enge Beziehung zwischen dem Verlauf der Kräfte und der Form des Gesamterscheinungsbildes der Tragstruktur auf. Der Vorteil von baumartigen Verzweigungssystemen ist die kurze Entfernung zwischen dem Lasteinleitungspunkt und den Auflagern. Es besteht eine funktionale Beziehung zwischen der Dach- und der Stützkonstruktion.

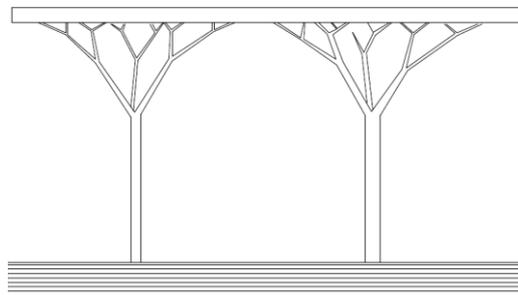


Abb. 11: Designzeichnung von Frei Otto

Baumähnlich verzweigte Stützkonstruktionen werden im Vergleich zu Bäumen, deren Äste auch Biegemomente aufnehmen können, so designt, dass die einzelnen Stäbe nur durch Druckkräfte beansprucht werden. Sie werden dadurch nur auf ein bestimmtes Belastungsschema (vertikaler Lastabtrag) optimiert. Alle anderen Belastungen würden

Biegemomente im System verursachen, welche zu vermeiden sind. Treten auf Grund der Belastungssituation (z.B. Wind) horizontale Kräfte auf, so müssen diese durch zusätzlich angeordnete Zug und Druckstäbe in der Dachebene abgeleitet werden.

Die geometrisch optimierte Anordnung der Stäbe in solchen verzweigten Stützkonstruktionen kann mittels moderner Optimierungsalgorithmen erfolgen.

5.3.1 Angabe

Ähnlich der in Abb. 11 gezeigten Verzweigungsstruktur sollen die Lasten einer Dachkonstruktion mit einer lichten Höhe von 12,6 m durch eine optimierte Stützkonstruktion abgetragen werden. Aus Gründen der Vereinfachung wird die Dachkonstruktion auf einen Balkenstab reduziert und die abzuleitenden Lasten mit 20 kN/m definiert. Die Stäbe der Stützkonstruktion sollen dabei so optimiert angeordnet werden, dass Biegemomente vermieden und minimale Querschnittsflächen eingesetzt werden. In Abbildung 12 sind die Ausgangsparameter dargestellt.

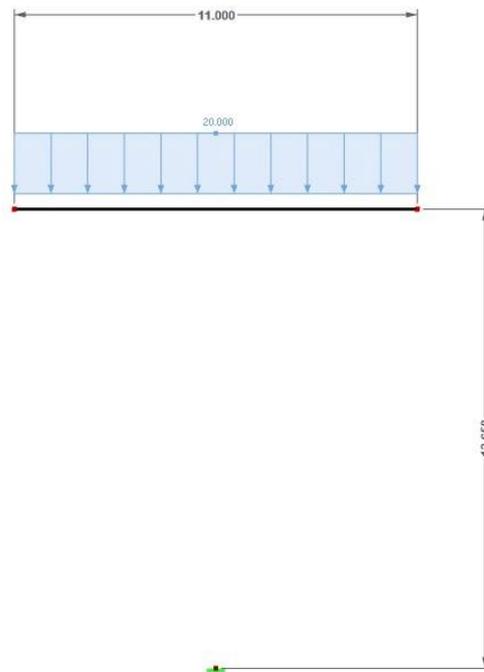


Abb. 12: Angabe Beispiel 3: Ausgangsgeometrieparameter der zu optimierenden Stützkonstruktion

5.3.2 Definition Zielfunktion und Restriktionen

Entwurfsvariablen:

Die Entwurfsvariablen sind die Knotenkoordinaten x_i und y_i , die Breite b und die Höhe h der Querschnitte.

$$x_i, y_i, \text{ und } z_{1,i} = b ; z_{2,i} = h$$

Zielfunktion:

Die Zielfunktionen werden so definiert, dass die Stäbe keine Momentenbeanspruchung aufweisen und die Querschnittsflächen minimiert werden.

$$Z_1 = M_{y,i}(x_i, y_i) \stackrel{!}{=} 0$$

$$Z_2 = \sum z_{1,i} \cdot z_{2,i} \stackrel{!}{=} \text{Min}$$

Restriktionen:

- Querschnittsminimum:

1. Restriktion: $g_1 = z_1 \geq 60,0 \text{ [mm]}$

2. Restriktion: $g_2 = z_2 \geq 80,0 \text{ [mm]}$

- Tragfähigkeitsnachweise des Bauteiles

3. Restriktion: $g_3 = \frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 0$

4. Restriktion: $g_4 = \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} \cdot f_{m,y,d}} \leq 0$

5. Restriktion: $g_5 = \frac{\tau_d}{f_{v,d}} \leq 0$

5.3.3 Lösung der Optimierungsaufgabe

Die Lösung der Optimierungsaufgabe erfolgt in zwei Schritten die ineinander greifen. Zuerst wird für die eingangs definierten Geometrieparameter die optimierte Anordnung der Knoten und Stäbe gesucht, im nachfolgenden Schritt werden die minimalen Stabquerschnitte nach dem gleichen Verfahren wie in Beispiel 1 berechnet. Auf eine genaue Ausführung wird an dieser Stelle verzichtet.

5.3.4 Ergebnis

Das geometrische Ergebnis der Optimumssuche wird in Abbildung 13 gezeigt. Die eingespannte vertikale Einzelstrebe teilt sich dabei in einer Höhe von 6 m in zwei symmetrische Stäbe, die sich in der Nähe des Daches abermals verzweigen. In Abb. 14 sind die zugehörigen Schnittgrößen ersichtlich. Sämtliche Stützenstäbe weisen keine Biegemomente auf und werden nur auf Druck beansprucht.

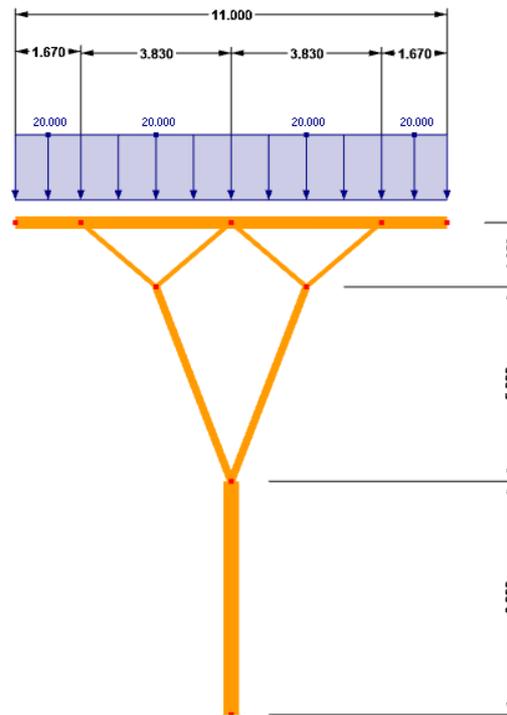


Abb. 13: geometrisches Ergebnis der Optimumssuche

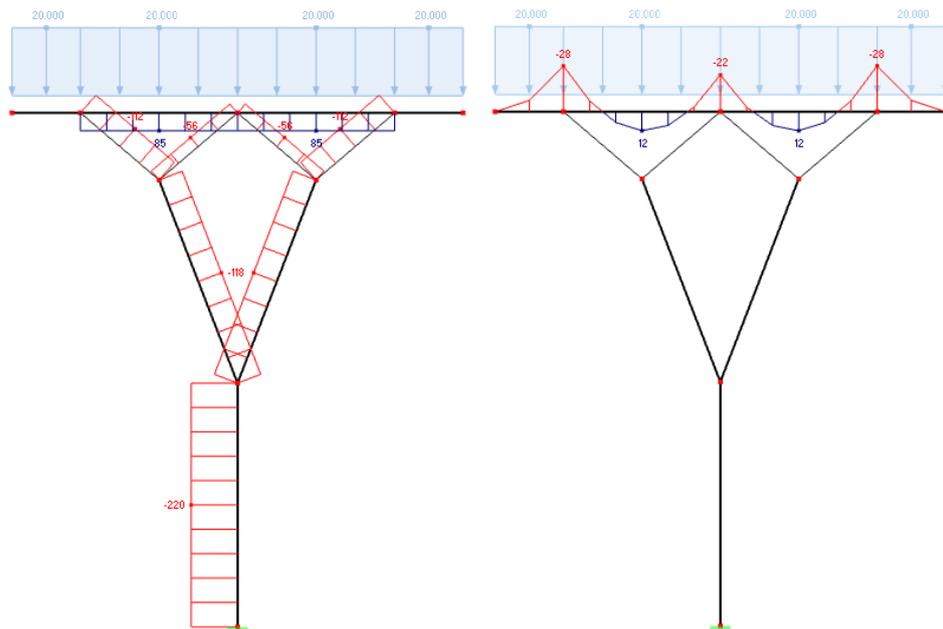


Abb. 14: links: Schnittgrößen Normalkraft [kN], rechts: Schnittgrößen Biegemoment M_y [kNm]

Bei einer genauen Betrachtung der optimierten Querschnitte wird ersichtlich (Abb. 15), dass sich die erforderliche Querschnittsfläche bei jeder 2er Verästelung halbiert. Die Aufrechterhaltung des Kraftflusses ist dabei ähnlich wie die der natürlichen Bäume, eine Verbindung zur natürlichen Selbstoptimierung der Natur ist gegeben.

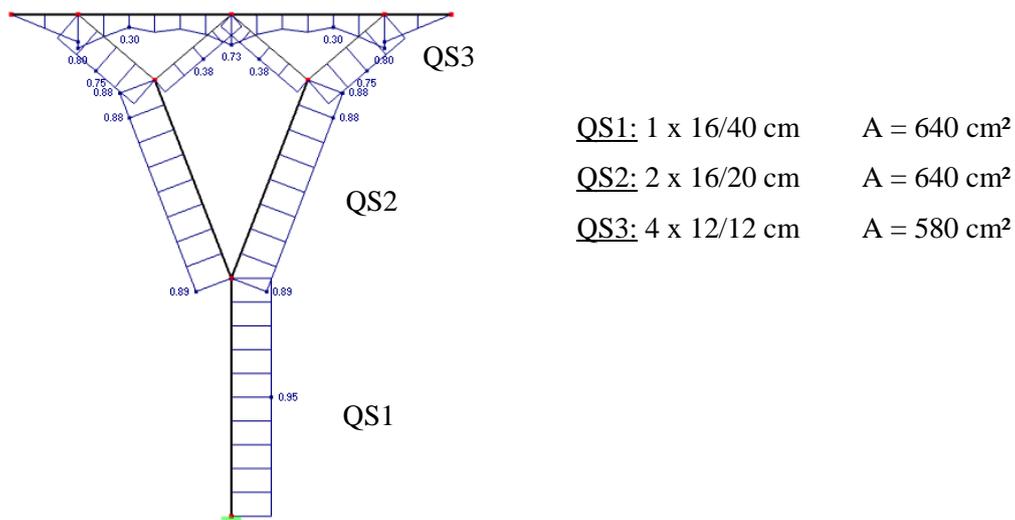


Abb. 15: Ausnutzungsgrad der Querschnitte bezogen auf die definierte Nutzlast

6 Zusammenfassung

Mit dem Beitrag wurde ein kurzer Einblick in die Anwendung von Optimierungsalgorithmen auf Problemstellungen des modernen Ingenieurholzbaus gegeben. Dauern evolutionäre Optimierungen in der Natur Jahrtausende, so wurde dargelegt, dass durch immer leistungsstärkere Computerhardware und effizient geschriebene Software im konstruktiven Holzbau sehr komplexe Optimierungsaufgaben mit vertretbarem Zeitaufwand gelöst werden können.

Es sei aber erwähnt, dass die Bedienung moderner Softwareprogramme den Benutzer jedoch immer wieder vor neue Anforderungen stellt. Werden die geforderten Eingabeparameter falsch gewählt, so führt der meist automatisierte Optimierungsprozess zu einer falschen Lösung. Diese Lösung muss vom Anwender immer auf Plausibilität kontrolliert werden, da es sonst zu falschen Lösungen und Fehlinterpretationen kommen kann.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Zügner D (2013) **Anwendung von Optimierungsalgorithmen auf Problemstellungen des Ingenieurholzbau.** Masterarbeit, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz
- [2] Aigner H (1980) **Lösung von Optimierungsproblemen im Bauwesen mit Hilfe von Zufallsstrategien.** Dissertation, Fakultät für Architektur, TU München
- [3] Baier H, Sesselberg C, Specht B (1994) **Optimierung in der Strukturmechanik.** Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig Wiesbaden
- [4] **ÖNORM EN 1995-1-1:2009** Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Austrian Standards Institut
- [5] **ÖNORM B 1995-1-1:2009** Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Austrian Standards Institut
- [6] Schäfer J (2005) **Evolutionstrategien.** Seminar Evolutionäre Algorithmen, Universität Paderborn
- [7] Schopbach H (2002) **Ansätze zur Kostensenkung in Konstruktion und Baubetrieb durch Einsatz mathematischer Optimierungsmethoden.** Dissertation, Schriftenreihe Bauwirtschaft | Forschung 1, Institut für Bauwirtschaft, Universität Kassel, ISBN 3-933146-81-X
- [8] Schöneburg E, Heizmann F, Feddersen S (1994) **Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien.** Addison-Wesley Verlag, Bonn
- [9] Sesselberg C (1990) **Neue Elemente der Tragwerksoptimierung für frühe Entwurfsphasen am Beispiel von Leichtbaubrücken.** Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Technische Hochschule Aachen
- [10] Wagner J, Mlejnek H. (2012) **Tragwerksoptimierung – Vorlesungsunterlagen.** Institut für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Universität Stuttgart

E Global Scaling – Der Maßstab der Natur

M. Kauderer



Dipl.-Ing. Michael Kauderer

Studium:	Bauingenieurwesen an der TU Graz
Ausbildung:	Zivilingenieur & Baumeister
1980-1992	Bauingenieurtätigkeiten in der Privatwirtschaft
1992-1998	Bauaufsicht u. Sachverständigenamt Land Steiermark
1998	Firmengründung MK-Energies
seit 2005	Technische Büro für Global Scaling

1 **Kurzfassung**

Die Natur verblüfft uns immer wieder durch die schier unendliche Vielfalt ihrer Erscheinungen. Deshalb ist der Mensch seit Jahrhunderten auf der Suche nach dem Prinzip, das “die Welt im Innersten zusammenhält”. Heute sind wir der Lösung dieses Rätsels so nahe wie noch nie zuvor. Seit Galilei und Newton kennen wir Eigenschaften, die allen materiellen Erscheinungen gemeinsam sind: Raum, Zeit und Bewegung (Energie). Es sind physikalische Eigenschaften. Dieser Umstand erklärt die fundamentale Stellung der Physik unter den Naturwissenschaften. Bis Ende des 20. Jahrhunderts beschäftigte sich die Physik mit der Erforschung des quantitativen Zusammenhanges zwischen diesen fundamentalen und den daraus ableitbaren Eigenschaften. Im Fokus ihres erkenntnistheoretischen Paradigmas stand die physikalische Messung, die zum “Sakrament” der naturwissenschaftlichen Produktion überhaupt wurde.

2 **Eine Einführung in die Global Scaling Theorie**

2.1 **Eine wissenschaftliche Goldmine**

Über Jahrzehnte entstand so eine kolossale Datenbank von unschätzbarem Wert. Sie enthält die Spektrallinien der Atome und Moleküle, die Massen der Elementarteilchen und Atomkerne, die Atomradien, die Größen, Entfernungen, Massen und Umlaufzeiten der Planeten, Monde und Asteroiden, die physikalischen Eigenschaften der Sterne und Galaxien. Das Bedürfnis nach Messwerten höchster Präzision förderte die Entwicklung der mathematischen Statistik, die es wiederum ermöglichte, auch morphologische, entwicklungsbiologische und soziologische Daten präzise zu erfassen.

Von den Elementarteilchen bis zu den Galaxiehaufen erstreckt sich diese naturwissenschaftliche Datenbank über mindestens 55 Größenordnungen. Doch ungeachtet ihrer kosmologischen Brisanz wurde diese Datenbank erstmals 1982 zum Objekt einer ganzheitlichen naturwissenschaftlichen Recherche.

2.2 **Scaling in der Biologie**

Der erste Hinweis auf die Existenz dieser wissenschaftlichen Goldmine kam aus der Biologie. Im Ergebnis einer zwölf-jährigen Recherche veröffentlichte Chislenko (1981) seine Arbeit “Die Struktur der Fauna und Flora im Zusammenhang mit den Körpergrößen der Organismen”. Diese Arbeit dokumentiert die wahrscheinlich bedeutendste Entdeckung in der Biologie des 20. Jahrhunderts. Chislenko gelang der Nachweis, dass sich Abschnitte erhöhter Artenpräsenz auf der logarithmischen Geraden der Körpergrößen in gleichen Abständen (ca. 0,5 Einheiten des Zehnerlogarithmus) wiederholen. In diesem Zusammenhang spricht man heute von einer logarithmischen Skaleninvarianz in den Häufigkeitsverteilungen der biologischen Arten in Abhängigkeit von den Körpergrößen und -massen der Organismen.

2.3 **Scaling in der Physik**

Etwa zur gleichen Zeit entdeckten Physiker das Phänomen der logarithmischen Skaleninvarianz (scaling) in den Häufigkeitsverteilungen der Elementarteilchen in Abhängigkeit von ihrer Ruhemasse (Bjorken, 1969; Feynmann, 1969; Müller, 1984). 1982 gelang Müller der Nachweis für alle bekannten Teilchen, Kerne und Atome sowie Asteroiden, Monde, Planeten und Sterne.

Scaling ist ein globales Phänomen, vielleicht sogar der Bauplan des Universums. Müller (1982, 1987, 1989) veröffentlichte erstmals die Grundlagen der Global Scaling Theorie, die heute zu den gesichertsten Erkenntnissen der naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung zählt. Sie stützt sich auf statistische Auswertungen gigantischer Datenmengen und wird in Wissenschaft und Technik erfolgreich angewendet.

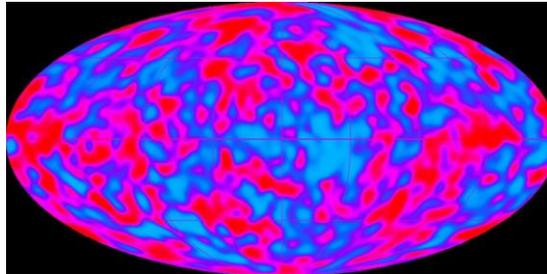


Abb. 1: Die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung ist anisotrop im Weltraum verteilt. Ihr Spektrum ist logarithmisch-hyperbolisch aufgebaut, wie eine Melodie

Tab. 1: Global Scaling: Logarithmisch-hyperbolische Skaleninvarianz in den Häufigkeitsverteilungen

Elementarteilchen (Ruhemasse, Lebensdauer)	Technische Systeme (Größe, Masse, Frequenz)
Atome (Masse, Radius, Spektren)	Populationen (Starke, Arealgröße)
Moleküle (Masse, Größe, Spektren)	Monde (Größe, Masse, Bahnlänge, Umlaufzeit)
Zellorganellen (Größe)	Planeten (Größe, Masse, Bahnlänge, Umlaufzeit)
Zellen (Größe)	Sterne (Masse)
Organe (Größe, Masse Eigenfrequenz)	Galaxien (Größe)
Organismen (Größe, Masse)	–

2.4 Die logarithmische Welt der Maßstäbe

Was sind eigentlich Maßstäbe? Das Ergebnis einer physikalischen Messung ist immer eine Zahl mit Maßeinheit, eine physikalische Größe. Angenommen, wir hätten 12 cm, 33 cm und 90 cm gemessen. Wählt man nun als Eichmaß (Etalon) 1 cm, erhält man die Zahlenfolge 12 – 33 – 90 (ohne Maßeinheit, oder wie der Physiker sagt, mit der Maßeinheit 1), Der Abstand zwischen diesen Zahlen auf der Zahlengerade beträgt $33 - 12 = 21$ bzw. $90 - 33 = 57$. Wählt man nun ein anderes Eichmaß, z.B. die Elle mit 49,5 cm, ergibt sich die Zahlenfolge 0,24 – 0,67 – 1,82. Der Abstand zwischen den Zahlen hat sich geändert. Er beträgt jetzt $0,67 - 0,24 = 0,42$ bzw. $1,82 - 0,67 = 1,16$. Welches Eichmaß wir aber auch immer wählen würden, der Abstand zwischen all diesen Zahlen ändert sich nicht auf der logarithmischen Zahlengerade, dort bleibt er konstant. In unserem Beispiel beträgt er eine Einheit des natürlichen Logarithmus (zur Basis $e = 2,71828\dots$) $\ln 33 - \ln 12 \approx \ln 90 - \ln 33 \approx \ln 0,67 - \ln 0,24 \approx \ln 1,82 - \ln 0,67 \approx 1$. Physikalische Messwerte besitzen folglich die bemerkenswerte Eigenschaft der logarithmischen Invarianz (scaling). In Wirklichkeit ist ein Maßstab also ein Logarithmus.

Die logarithmische Gerade der Maßstäbe ist nicht gleichmäßig mit natürlichen Systemen belegt. Es gibt attraktive Abschnitte, die von sehr vielen und völlig verschiedenen natürlichen Systemen belegt werden, und unattraktive Abschnitte, die von vielen natürlichen Systemen gemieden werden. Kristalle, Organismen oder Populationen, die im Laufe ihres Wachstums an die Grenze dieser Abschnitte auf der logarithmischen Gerade der Maßstäbe gelangen, wachsen entweder nicht mehr weiter, oder beginnen zu zerfallen bzw. beschleunigen ihr Wachstum, um diese Abschnitte so schnell wie möglich zu überwinden.

2.5 Melodie der Schöpfung

Die Global Scaling Theorie geht davon aus, dass Materie im energetisch niedrigsten Zustand (Vakuum) harmonisch schwingt. Das Frequenzspektrum dieser Eigenschwingungen umfasst viele Größenordnungen und ist logarithmisch-hyperbolisch fraktal aufgebaut, wie eine Melodie. Diese “Melodie der Schöpfung” ist die Ursache der globalen Skaleninvarianz.

Die Grenzen der attraktiven Abschnitte auf der logarithmischen Geraden der Maßstäbe wiederholen sich regelmäßig im Abstand von drei Einheiten des natürlichen Logarithmus. Dieser Abstand definiert die halbe Wellenlänge einer globalen stehenden Vakuumkompressionswelle.

Mit ihren Schwingungsbäuchen verdrängt sie Materie auf der logarithmischen Geraden der Maßstäbe und konzentriert sie in ihren Knoten. In der Kompressionsphase beim Übergang von einem Wellenbauch zu einem Knoten entsteht eine Fusionstendenz, in der Dekompressionsphase beim Übergang von einem Knoten zu einem Wellenbauch eine Zerfallstendenz. Dieser Prozess verursacht einen globalen logarithmisch-periodischen Strukturwechsel. Komprimierte und dekomprimierte Systeme dominieren auf der logarithmischen Geraden der Maßstäbe abwechselnd im Abstand von $3k$, also 3, 9, 27, 81 bzw. 243 Einheiten des natürlichen Logarithmus.

2.6 Materie und Vakuum

Materie und Vakuum sind zwei Zustandsformen der physikalischen Realität. Deshalb muss man zwischen Materiedichte und Vakuumdichte unterscheiden. Sobald man diesen Schritt tut, gibt es keinen prinzipiellen Unterschied mehr zwischen Materie- und Vakuumwellen. Das heißt, Vakuumwellen verhalten sich im Vakuum genau so wie Materiewellen in Materie: Je dichter das Medium, desto schneller breiten sie sich aus. Deshalb ist für beide Wellenarten die Lichtgeschwindigkeit im (dichtesten) Vakuum ein Grenzwert.

Ähnlich wie man sich Vakuum als “Loch” in stofflicher Materie vorstellen kann, akkumuliert sich stoffliche Materie dort, wo sich ein “Loch” im Vakuum befindet. Stehende Vakuumkompressionswellen erzeugen solche “Löcher” im Vakuum. Deshalb wirken die Knoten dieser Wellen als Materie-Attraktoren. Sobald sich jedoch Materie in einem Vakuumknoten akkumuliert, steigt dort die Materiedichte und die Vakuumdichte fällt. Als Folge fällt auch die Akkumulationsrate. Ist die “Saugfähigkeit” eines Knotens erschöpft, zerfällt die bereits akkumulierte Materie, die Vakuumdichte steigt wieder usw.

Die Materieakkumulation in einem Vakuumknoten ist also ein gedämpfter Schwingungsprozess. Zuerst vollzieht sich der Akkumulationsprozess lawinenartig und sehr intensiv, mit der Zeit verlangsamt er sich jedoch wesentlich, kommt aber niemals zum völligen Stillstand. Vakuumknoten sind primär, Materieakkumulation ist sekundär. Masse ist somit nicht die Ursache der Gravitation, sondern eine Folge der gravitativen Sogwirkung stehender Vakuumknoten.

2.7 Ursache der Gravitation

Die Existenz einer stehenden Kompressionswelle im logarithmischen Raum erklärt erstmals in der Geschichte der Physik die Herkunft der Gravitation. Der globale Materiefluss in Richtung Knotenpunkte stehender Vakuum-Kompressionswellen ist wahrscheinlich die Ursache des physikalischen Phänomens der gravitativen Attraktion. Teilchen, Atome, Moleküle, Himmelskörper usw., deren Maßstäbe sich in Knoten der stehenden Kompressionswelle stabilisieren, werden somit zu gravitativen Attraktoren.

Die Global Scaling Theorie erklärt, wie Teilchen aus dem Vakuum entstehen und erlaubt die exakte Berechnung ihrer Ruhemassen und Zerfallszeiten. Elementarteilchen entstehen in Knotenpunkten (Materie-Attraktoren) stehender Vakuumkompressionswellen. Knoten größerer Maßstäbe saugen so viel Materie an, dass ganze Planeten, Sterne oder Galaxien entstehen können.

Global Scaling Theorie beschreibt nicht nur die räumliche Verteilung der Attraktoren, sondern definiert auch die Menge an Materie, die ein Attraktor akkumulieren kann. So lassen sich alle im Universum physikalisch erlaubten Werte für Entfernungen, Massen, Geschwindigkeiten, Frequenzen, Energien, Temperaturen usw. vorausberechnen. Wir haben Glück, dass Galaxienhaufen zu den komprimierten Strukturen im Universum gehören. Nur diesem Umstand ist es zu verdanken, dass wir von der Existenz anderer Galaxien überhaupt etwas wissen. Wäre der Abstand zwischen den Galaxien verhältnismäßig genau so groß wie der Abstand zwischen den Sternen in unserer Galaxie, hätten wir keine Chance, jemals etwas von der Existenz anderer Galaxien zu erfahren. Unsere Galaxie, die Milchstraße, hat eine Ausdehnung von etwa 100.000 Lichtjahren. Der Abstand zur Nachbargalaxie, dem Andromeda Nebel, beträgt ca. 2.000.000 Lichtjahre, also wiederum das 20-fache. Der Maßstabfaktor $20 \approx e^3$ ist eine Folge des Global Scaling Phänomens.

Die Sonne hat eine Größe von 1.400.000 km. Der Abstand zu benachbarten Sternen beträgt um die 10 Lichtjahre, also ca. das 70.000.000-fache. Der Maßstabfaktor $7 \cdot 10^7 \approx e^{18}$ ist ebenfalls eine Folge des Global Scaling Phänomens. Wäre die Verteilungsdichte der Galaxien mit der Sternendichte in unserer Umgebung vergleichbar, müsste sich die Andromeda Galaxie in einer Entfernung von etwa 7.000 Milliarden Lichtjahren wiederfinden und wäre damit für uns absolut unsichtbar. Allein die Tatsache, dass wir bis zu Entfernungen von knapp 15 Milliarden Lichtjahren überhaupt noch Objekte erkennen können, ist Beweis genug, dass der für uns sichtbare Bereich der Metagalaxie relativ stark komprimiert sein muss.

2.8 Globaler Strukturwechsel

Bedingt durch den globalen logarithmisch-periodischen Wechsel von Kompression und Dekompression, wiederholen sich im Universum auch wesentliche strukturelle Merkmale, ungeachtet dessen, dass es sich um Strukturen völlig verschiedener Maßstäbe handelt. So hat der Aufbau einer Galaxie vieles gemeinsam mit dem Aufbau eines Wirbelsturms. Auf Fotos sehen sich beide Strukturen sehr ähnlich, obwohl sie zu Maßstäben gehören, die sich um den Faktor $10^{18} \text{ km} / 10^3 \text{ km} = 10^{15} \approx e^{36}$ unterscheiden. Im Universum wiederholen sich ähnliche Strukturen im Abstand der maßstäblichen Faktoren e^6 , e^{18} , e^{54} oder e^{162} . Eine Metagalaxie ist um den Faktor e^{27} größer als eine Galaxie. Sie sollte daher eine völlig andere Struktur besitzen als eine Galaxie oder ein Hurrikane.

Wie groß unsere Metagalaxie ist, wissen wir heute noch nicht. Astrophysikalische Messmethoden erlauben es, Objekte (z.B. Quasare) bis zu einer Entfernung von 13,5 Milliarden Lichtjahren zu beobachten. Die in kosmologischer Fachliteratur oft zitierte Größe des sichtbaren Universums von 15 Milliarden Lichtjahren betrifft nur einen komprimierten und daher trotz gigantischer Entfernungen immer noch sichtbaren Teilbereich unserer Metagalaxie, und zwar den Teilbereich, zu dem auch unsere lokale Galaxiengruppe inklusive unserer Galaxie gehört. Diese komprimierten Teilbereiche haben eine Größe von $\lambda_p \cdot e^{96 \pm 1} \approx 4$ bis 30 Milliarden Lichtjahre und besitzen strukturelle Ähnlichkeit mit Gewebe, dass aus einer riesigen Menge dekomprimierter Zellen zusammengesetzt ist. Die nächstgrößere Struktur können wir nicht mehr erkennen, weil sie nicht nur gigantisch, sondern außerdem stark dekomprimiert ist.

2.9 Die “Schallmauer” des Universums

Stehende Wellen können sich nur herausbilden, wenn das Medium begrenzt ist, in dem sie sich ausbreiten. Die Existenz stehender Vakuum-Kompressionswellen im Universum bedeutet also: Das Universum ist maßstäblich begrenzt. Am unteren maßstäblichen Horizont des Universums erreicht die Materiedichte ein Maximum, am oberen Horizont einen Minimalwert. Sie bilden die “Schallmauer” des Universums. Eben an diesem Phasenübergang werden Druckwellen reflektiert, überlagern sich und bilden stehende Wellen. Eine stehende Welle kann auf Dauer nur existieren, wenn das Medium permanent von außen mit Energie versorgt wird. Das bedeutet, unser Universum steht im permanenten Energieaustausch mit anderen Universen.

Stehende Wellen sind in der Natur weit verbreitet, weil in der Regel jedes Medium begrenzt ist, sei es das Wasser der Ozeane, die Luft der Erdatmosphäre oder das Strahlungsfeld der Sonnenatmosphäre. Stehende Wellen regen das Medium zu Eigenschwingungen an, und weil die Amplitude einer stehenden Welle nicht mehr zeit- sondern nur noch ortsabhängig ist, vollziehen sich diese Eigenschwingungen synchron im gesamten Medium. Eine Welle entsteht, wenn ein schwingendes Teilchen eines Mediums benachbarte Teilchen zum Schwingen anregt und sich dieser Prozess fortpflanzt. Bedingt durch die Viskosität bzw. Elastizität des Mediums und die Trägheit der Teilchen sind ihre Schwingungsphasen verschieden und es entsteht der physikalische Effekt einer Phasenverschiebung im Raum, den wir als fortschreitende Welle bezeichnen. Die Geschwindigkeit dieser Phasenverschiebung (Phasengeschwindigkeit) ist stets endlich und Medium abhängig.

Der Phasenunterschied einer stehenden Welle zwischen zwei benachbarten Knotenpunkten ist dagegen gleich Null, denn alle Teilchen schwingen hier in Phase. Daher auch der Eindruck, dass die Welle “steht”. In jedem Knotenpunkt springt hingegen die Phase um 180 – die Phasengeschwindigkeit ist hier also theoretisch unendlich hoch. Und eben dieser Sachverhalt ist es, der eine Kommunikation über stehende Wellen so attraktiv macht.

3 Kommunikation im logarithmischen Raum

Kommunikation bedeutet Energieübertragung. Stehende Wellen übertragen jedoch keine Energie, sondern pumpen sie nur hin und her – und zwar im Rahmen einer halben Wellenlänge. Diese halbe Wellenlänge ist indes völlig ausreichend – sogar für eine interplanetare Kommunikation – wenn es sich um stehende Wellen im logarithmischen Raum handelt.

Die Wellenlängen stehender Dichtewellen im logarithmischen Raum betragen $2 \cdot 3^k$, also 6, 18, 54, 162 bzw. 486 Einheiten des natürlichen Logarithmus. Eine halbe Wellenlänge entspricht demnach 3, 9, 27, 81 bzw. 243 Einheiten, das sind relative Maßstäbe von 1,3 bzw. 3,9 bzw. 11,7 bzw. 35,2 bzw. 105,5 Größenordnungen. Genau in diesen Abständen befinden sich Knotenpunkte. Die Knotenpunkte markieren somit Maßstäbe, die sich wie 1 : 20, 1 : 8103, 1 : $5,32 \cdot 10^{11}$, 1 : $1,5 \cdot 10^{35}$ bzw. 1 : $3,4 \cdot 10^{105}$ verhalten. Im Rahmen dieser Maßstäbe kann man zwischen zwei benachbarten Knotenpunkten kommunizieren.

Da es nur in unmittelbarer Nähe der Knotenpunkte möglich ist, einer stehenden Welle Energie zuzuführen bzw. zu entnehmen, beschränkt sich die Möglichkeit der Modulation einer stehenden Welle auf ihre Knotenpunkte. Handelt es sich dabei um eine stehende Welle im linearen Raum, sind Knotenpunkte einfach nur Orte, in denen die Ankopplung eines externen Schwingungsprozesses möglich ist. Knotenpunkte einer stehenden Welle im logarithmischen Raum dagegen sind bestimmte Maßstäbe, denen u.a. auch verschiedene

Frequenzen zuzuordnen sind. Um diese Frequenzen berechnen zu können, wird es notwendig, die mathematischen Grundlagen der Global Scaling Theorie zu tangieren.

3.1 Die Physik der Zahlengerade

Die Welt der Maßstäbe ist nichts anderes als die logarithmische Zahlengerade, die mindestens seit Napier (1600) bekannt ist. Neu ist jedoch die fundamentale Erkenntnis, dass diese Zahlengerade eine harmonikale Struktur besitzt, deren Ursache eine stehende Dichtewelle ist.

Bereits Leonard Euler (1748) zeigte, dass auch irrationale oder transzendente Zahlen eindeutig als Kettenbrüche darstellbar sind, deren Elemente (Teilzähler und Teilnenner) alle ausnahmslos natürliche Zahlen sind. 1928 gelang Khintchine der allgemeine Beweis. Zahlentheoretisch bedeutet das: Alle Zahlen sind aus natürlichen Zahlen konstruierbar. Das universelle Konstruktionsprinzip heißt Kettenbruch.

Und die natürlichen Zahlen 1, 2, 3, 4, 5, ... wiederum sind aus Primzahlen konstruierbar. Das sind die natürlichen Zahlen, die sich ohne Rest nicht weiter teilen lassen, z.B. 1, 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 29, 31, ... (traditionell wird die 1 nicht zu den Primzahlen gerechnet, obwohl sie alle Kriterien erfüllt). Die Verteilung der Primzahlen auf der Zahlengeraden ist derart unregelmäßig, dass man bislang keine Formel finden konnte, die diese Verteilung vollständig beschreibt. Erst im Rahmen der Global Scaling Theorie konnte dieses Rätsel gelöst werden:

Die Verteilung der Primzahlen ist wirklich sehr unregelmäßig – aber nur auf der linearen Zahlengeraden. Auf der logarithmischen Zahlengeraden wiederholen sich besonders große Primzahllücken in regelmäßigen Abständen. Das bemerkte bereits Gauß (1795). Aus diesem Grund lässt sich die Menge $p(n)$ der Primzahlen bis zur Zahl n annähernd nach der einfachen Formel $p(n) \approx n / \ln n$ berechnen.

Die Ursache dieser Erscheinung ist die Existenz einer stehenden Dichtewelle auf der logarithmischen Zahlengeraden. Die Knotenpunkte dieser Dichtewelle wirken als Zahlen-Attraktoren. Deshalb konzentrieren sich dort die Primzahlen und bilden zusammengesetzte Zahlen, also Nichtprimzahlen, z.B. die sieben Nichtprimzahlen von 401 bis 409. So entsteht an dieser Stelle eine sogenannte “Primzahllücke”.

Genau dort wo sich auf der logarithmischen Zahlengeraden Nichtprimzahlen (also Primzahlen-Cluster) bilden, konzentriert sich auch Materie auf der logarithmischen Geraden der Maßstäbe. Das ist keine Magie, sondern eine Folge dessen, dass Maßstäbe Logarithmen sind, also “nur” Zahlen. Die logarithmische Gerade der Maßstäbe ist also nichts anderes als die logarithmische Zahlengerade. Und weil nun die stehende Dichtewelle eine Eigenschaft der logarithmischen Zahlengerade ist, determiniert sie die Häufigkeitsverteilung der Materie auf allen physikalisch geeichten logarithmischen Geraden – der Größenverhältnisse, der Massen, der Frequenzen, der Temperaturen, der Geschwindigkeiten usw.

Um nun einen Knotenpunkt auf der logarithmischen Gerade zu finden, benötigt man nichts weiter als die allgemein bekannte Zahlengerade und ein natürliches Eichmaß, mit dem man die Zahlengerade multipliziert (eicht). Die Wellenlänge der stehenden Dichtewelle auf der logarithmischen Zahlengerade ist bekannt. Der Abstand zwischen benachbarten Knotenpunkten beträgt drei Einheiten des natürlichen Logarithmus. Nun kann man leicht alle Knotenpunktwerte X_n nach der einfachen Formel $X_n = Y \cdot \exp(n)$ berechnen (Y ist eine physikalische Konstante, $n = 0, -3, -6, -9, \dots$). Knotenpunkt-Frequenzwerte sind z.B. 5 Hz ($n = -54$), 101 Hz ($n = -51$), 2.032 Hz ($n = -48$), 40,8 kHz ($n = -45$), 820 kHz ($n = -42$), 16,5 MHz ($n = -39$), 330,6 MHz ($n = -36$) usw. Die Frequenzbereiche um 5 Hz, 100 Hz,

2 kHz usw. sind für Energieübertragungen in endlichen Medien prädestiniert. Hier befinden sich auch die Trägerfrequenzen für Informationsübertragungen im logarithmischen Raum. Frequenzen, die in Knotenpunktnähe liegen, sind nicht nur in der Natur weit verbreitet, sondern kommen auch in der Technik zur Anwendung.

3.2 Logarithmisch hören und sehen

Alle unsere Sinne nehmen den Logarithmus eines Signals wahr, nicht die lineare Intensität des Signals selbst. Deshalb messen wir die Lautstärke in Dezibel, also in logarithmischen Einheiten. Töne, deren Frequenzen sich um das Doppelte, Vier- oder Achtfache unterscheiden, nehmen wir als a , a' oder a'' , als gleiche Töne wahr. Diese Eigenschaft unseres Gehörs ermöglicht es uns, Harmonie von Dissonanz zu unterscheiden.



Abb. 2: Das Ringsystem des Saturns ist ein logarithmisch-hyperbolisches Fraktal. Das bedeutet, die Verteilung der Ringmaterie folgt einem Schwingungsmuster

Die harmonische Tonfolge $1/2$ (Oktave), $2/3$ (Quinte), $3/4$ (Quarte), $4/5$ (Terz) usw. ist logarithmisch-hyperbolisch skaleninvariant.

Besonders im “akustischen” Bereich von 1 Hz bis 20.000 Hz ist gut zu erkennen, dass Vakuumresonanzfrequenzen physiologische Relevanz besitzen. Die Hauptarbeitsfrequenzen der Lunge (15 / min), des Herzens (67 / min), des Gehirns (5 Hz), der Mechano-Rezeptoren und der Arterienkontraktion (23 Hz), der Sehnerven (100 Hz), der Stimmbänder (450 Hz), des Trommelfells (2.000 Hz) sowie Resonanzfrequenzen des Skeletts (9.000 Hz) sind Vakuumresonanzfrequenzen.

Logarithmisch geeicht ist auch unser Geruchssinn, unser Tastsinn und unser Sehvermögen. Die Netzhaut meldet nur den Logarithmus, nicht die Anzahl der auftreffenden Photonen. Deshalb können wir nicht nur bei Sonnenschein, sondern auch nachts sehen. Die Anzahl der auftreffenden Photonen ändert sich dabei um das Milliardenfache, der Logarithmus hingegen nur um das Zwanzigfache ($\ln 1.000.000.000 \approx 20,72$).

Logarithmisch geeicht ist unser Sehvermögen nicht nur in Hinsicht auf die Wahrnehmung der Intensität des Lichtes, sondern auch in Hinsicht auf die Wellenlänge des Lichtes, die wir als Farbe wahrnehmen. Die Unterscheidung einzelner Farbtöne erfolgt in logarithmisch-hyperbolisch skaleninvarianten Frequenzschritten.

Die Wellenlängen des Hämoglobin-Rot und des Retina-Blau sind logarithmisch-hyperbolisch spiegelsymmetrisch zum Chlorophyll-Grün im Sonnenspektrum platziert. Die Wellenlänge des Chlorophyll-grünen Lichts stimmt mit der Wellenlänge einer Eigenschwingung des Vakuums erster Mode überein, die Wellenlängen des Hämoglobin-roten und des Retina-blauen Lichts sind Vakuumwellenlängen zweiter Mode. Grün und Rot

unterscheiden sich voneinander nicht nur als Komplementärfarben, sondern repräsentieren einen Modenwechsel der Eigenschwingungen des Vakuums.



Abb. 3: *Der Aufbau des Sonnensystems ist logarithmisch-hyperbolisch fraktal. Die Planeten und Monde kulminieren im Rhythmus der Melodie der Schöpfung*

Rotes und grünes Licht haben deshalb auch völlig verschiedene biologische Wirkungen. Das Chlorophyll absorbiert Licht aller optischen Wellenlängen, außer dem grünen Anteil. Der grüne Anteil hingegen wird emittiert. Es wird also ein Schwingungsprozess aktiviert, der grünes Licht generiert. Aus Sicht der Global Scaling Theorie ist klar warum: Die Frequenz des grünen Lichtes ist eine Vakuumresonanzfrequenz im logarithmisch-hyperbolischen Zentrum des Sonnenspektrums und ermöglicht dem Chlorophyll, die Sonnenenergie mit maximaler Effizienz zu nutzen.

3.3 Globale Zeitwelle

Die logarithmische Zeitgerade ist das Spiegelbild der logarithmischen Gerade der Frequenzen der Eigenschwingungen des Vakuums. Die globale Zeitwelle komprimiert und dekomprimiert die Ereignisstruktur jedes Prozesses, auch die eines menschlichen Lebens. Deshalb definiert jeder Knoten- oder Subknotenwert die Frequenz eines Schwingungsprozesses, dessen Periode gleich t ist. $t_{76} = t_p \cdot \exp(76) \approx 23$ Jahre ist also gleichzeitig ein Grenzwert für die Periode eines Schwingungsprozesses, z.B. des Zyklus der Sonnenaktivität. Auch $t_{73} \approx t_p \cdot \exp(73) \approx 13$ Monate ist ein Grenzwert, z.B. für die Kulminationsperiode der Erde, $t_{67} = t_p \cdot \exp(67) \approx 25$ Stunden ist ein Grenzwert, z.B. für die Rotationsperiode der Erde usw. Die Periode der Eigenschwingungen des Protons $t_p \approx 7 \cdot 10^{-25}$ s.

Das Überschreiten dieser Grenzwerte hat prognostizierbare Folgen: Der Schwingungsprozess gerät in den Einfluss des nächsten Knotens, was sich durch Fluktuationen bemerkbar macht, deren zeitliche Abfolge und Intensität logarithmisch-hyperbolisch zunimmt.

Überschreitet also die Kulminationsperiode der Erde irgendwann mal dauerhaft den Wert $t_{73} \approx 411$ Tage, wird die Kulminationsbewegung der Erde um die Sonne beginnen, stärker zu fluktuieren. Das gleiche gilt auch für die Rotationsbewegung der Erde, für die Periodizität der Sonnenaktivität und andere Prozesse.

Es ist bezeichnend, dass die Mehrzahl aller in der Natur vorkommenden Zyklen sehr nahe an Grenzwerten liegen, die dem linken oder rechten Rand eines Knotenbereiches entsprechen. Die Ursache liegt darin, dass sich ein Schwingungsprozess nur dann stabilisieren kann, wenn seine Parameterwerte wenig fluktuieren. Die geringsten Fluktuationen, in Hinsicht auf ihre Häufigkeit und Intensität, weist der Randbereich eines Knotens auf. Dieser Randbereich ist aber ein Subknotenbereich, in dessen Randbereich wiederum die Fluktuationen am

geringsten sind usw. So wandert die Schwingungsdauer bzw. die Frequenz eines Zyklus im Verlaufe der Relaxationszeit immer weiter nach außen, an den äußersten Rand eines Knotenbereiches. Die logarithmische Zeitgerade ist keine absolute Zeittafel. Dort gibt es kein Datum und keine Uhrzeit. Das bedeutet, egal wann ein Prozess startet und egal um welchen Prozess es sich handelt, die Wahrscheinlichkeit starker Fluktuationen ist besonders hoch in Knotennähe.

3.4 Physikalische Konstanten – der Schlüssel zu Global Scaling

Die genaue Kenntnis der harmonikalen Struktur des logarithmischen Raumes ist quasi das Tor zu Global Scaling. Um dieses Tor öffnen zu können, benötigt man einen Schlüssel – die physikalischen Konstanten. Physikalische Konstanten sind Knotenpunktwerte. Im Knotenpunkt einer stehenden Welle finden keine Schwingungen statt, es herrscht Ruhe. Deshalb besitzen physikalische Konstanten ein hohes Maß an Stabilität.

Den absoluten Rekord hält die Ruhemasse des Protons. Sie bleibt über mindestens 10^{30} Jahre stabil. Aus demselben Grund ist auch die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ein äußerst stabiler Wert. Die Existenz physikalischer Konstanten ist die physikalische Grundlage einer natürlichen Metrologie, auf der die Global Scaling Theorie aufbaut.

3.5 Kettenbrüche als “Weltformel”

1950 bewiesen Gantmacher und Krein, dass die räumliche Verteilung frei beweglicher Teilchen in linearen schwingenden Kettensystemen durch einen Kettenbruch beschrieben werden kann. Terskich (1955) konnte diese Gesetzmäßigkeit auch in nichtlinearen schwingenden Kettensystemen nachweisen. 1982 zeigte Müller, dass eine stehende Kompressionswelle Materie stets so verteilt, dass eine fraktale Kettenbruchstruktur entsteht. Diese Kettenbruchstruktur sorgt dafür, dass die Konzentration der Materie in Knotenpunktnähe hyperbolisch zunimmt. Die Verteilung der Materie im logarithmischen Raum der Maßstäbe besitzt in erster Näherung die fraktale Dimension des Cantor-Staubs, wird jedoch in Knotennähe hyperbolisch deformiert. Der mathematische Aspekt besteht hier in der Erkenntnis, dass nicht nur jede Zahl als Kettenbruch darstellbar ist, sondern auch die Verteilung der Zahlen auf der logarithmischen Zahlengeraden insgesamt.

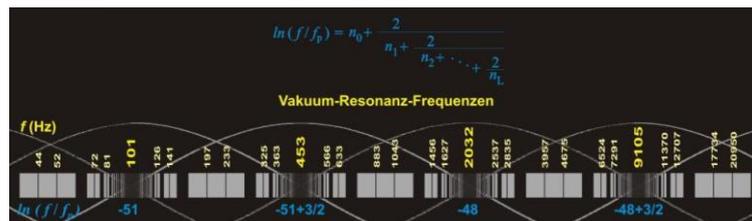


Abb. 4: Das Spektrum der Vakuumresonanz-Frequenzen (dargestellt im akustischen Bereich) ist aufgebaut wie eine Schwingung: Es bildet ein logarithmisch-hyperbolisches Fraktal

Dieser mathematische Aspekt hat unmittelbare physikalische Folgen: Überall dort, wo man mit Zahlen arbeitet – ob in der Naturwissenschaft, Soziologie oder Ökonomie – wird man mit dem Phänomen konfrontiert, dass es bestimmte Attraktorwerte gibt, die von allen Systemen – völlig unabhängig von ihrer Natur – bevorzugt werden, und dass die Verteilung dieser Attraktorwerte auf der logarithmischen Zahlengerade einer (fraktalen) Kettenbruchregel folgt. Diese Kettenbruchregel “enthält” die Physik, Chemie, Biologie und Soziologie – insofern sie mit Maßstäben (reellen Zahlen) arbeiten, d.h. insofern etwas gemessen wird. Viele aufwendig ermittelte Messergebnisse sind deshalb im Rahmen der Global Scaling Theorie relativ leicht berechenbar, z.B. die Temperatur der kosmischen

Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, deren oberer Grenzwert $T_p \cdot \exp(-29) = 2,7696 \text{ K}$ ist, oder die Ruhemasse des Neutrons $m_n = m_p \cdot \exp(1/726) = 939,5652 \text{ MeV}$ sowie anderer Elementarteilchen.

3.6 Urmelodie statt Urknall

Im Rahmen der Global Scaling Theorie erscheint auch die Urknall-Hypothese in einem neuen Licht. Nicht eine fortschreitende Druckwelle im linearen Raum (das Echo der hypothetischen Urexplosion) ist die Ursache der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung, sondern eine stehende Welle, die Eigenschwingung des Vakuums. Sie ist gleichzeitig verantwortlich für die fraktale logarithmisch skaleninvariante Verteilung der Materie im gesamten Universum. Sie hat das Universum, so wie wir es kennen, erschaffen und erschafft es immer wieder neu. Sie ist die Ursache aller physikalischen Wechselwirkungen und Kräfte – der Gravitation, des Elektromagnetismus, der Kernfusions- und Kernzerfallskräfte. Sie ist die Ursache der topologischen 3-Dimensionalität des linearen Raumes, der Links-Rechts-Asymmetrie und der Anisotropie der Zeit. All diese Phänomene sind physikalische Effekte, die beim Übergang aus der logarithmischen Raum-Zeit in die lineare entstehen. Diese stehende Welle im logarithmischen Raum bietet uns jetzt auch die Möglichkeit, über astronomische Entfernungen praktisch zeitgleich zu kommunizieren. Wie ist das möglich?

Nachbarn im logarithmischen Raum-System, die im linearen Raum sehr weit voneinander entfernt sind, können im logarithmischen Raum der Maßstäbe ziemlich nahe beieinander liegen. Unsere Sonne und Alpha Centauri sind im linearen Raum über 4 Lichtjahre voneinander entfernt, im logarithmischen Raum der Maßstäbe sind sie jedoch unmittelbare Nachbarn. Wenn man das einmal begriffen hat, ist es auch nicht mehr allzu schwer, physikalische Bedingungen zu schaffen, die eine Kommunikation im logarithmischen Raum ermöglichen. Zwei Elektronen im gleichen Quantenzustand, die tausende Kilometer voneinander entfernt sind, befinden sich im logarithmischen Raum der Maßstäbe praktisch in einem Punkt. Dieser Sachverhalt erklärt nicht nur eine ganze Reihe quantenmechanischer Phänomene, sondern ist auch die Basis einer völlig neuen Technologie der Telekommunikation.



Abb. 5: Die russische Holzpuppe "Matroschka", die innen hohl ist und immer kleinere Matroschkas in sich birgt, veranschaulicht ein Fraktal sehr deutlich. Jede Matroschka ist um einen konstanten Faktor kleiner, die Puppen sind also logarithmisch skaleninvariant

Global Scaling Quanten-Teleportation (GSQT) ermöglicht eine Datenübertragung über die Eigenschwingungen des in aller Materie enthaltenen Vakuums, das kosmische Hintergrundfeld. Entgegen den Vorstellungen der klassischen Physik haben die Eigenschwingungen des Vakuums kein thermisches (chaotisches), sondern ein harmonikales Spektrum. Deshalb kann man diese Schwingungen im Vakuumresonanz-Verfahren modulieren und für Quanten-Teleportation nutzen.

3.7 20 Jahre Forschung und Entwicklung

Das Global Scaling Verfahren der Quanten-Teleportation ist das Ergebnis jahrzehntelanger Forschungsarbeit, die 1982 unter Leitung des Physikers Hartmut Müller an der Akademie der Wissenschaften der UdSSR begann. Ähnliche Forschungen werden heute weltweit durchgeführt, z.B. am California Institute of Technology, an der Universität zu Genf, der Universität Innsbruck und am PEAR Laboratory der Princeton University.

Die Premiere der Global Scaling Communication Technology fand am 27. Oktober 2001 anlässlich der IT Medientage in Bad Tölz statt. Das absolute Highlight des damaligen Standes dieser Technik war eine kurze (ca. 2 Minuten) Sprachübertragung nach St. Petersburg. Damit begann eine neue Ära der Telekommunikation – ohne Sender und ohne Elektrosmog.

Das Bad Tölzer Experiment wurde zum Ausgangspunkt für eine erfolgreiche zehntägige Testübertragung Australien – Deutschland im Januar 2002. Am Dänischen Institut für Ökologische Technik (DIFQT, 19. März 2002) folgte eine „wireless“ Quantenteleportation Kopenhagen – Erfurt. Im damaligen Verfahren kamen G-Elemente zum Einsatz, eine Hardware, die auf der Verwendung von Kettensilikaten (Forsterit-Nanokristallen) und spezieller piezoelektrischer Keramiken basierte.

3.8 Quanten-Teleportation

Ein faszinierendes Szenarium aus der Science-Fiction-Literatur ist das “Beamen”: Objekte oder Personen werden von einem Ort zum anderen teleportiert, ohne dass sie transportiert werden, d.h. ohne dass sie die dazwischenliegende Strecke zurücklegen müssen. Captain Kirk und seine Mannschaft lösen sich auf dem Raumschiff Enterprise in einen flimmernden Dunst auf und materialisieren sich gleichzeitig auf der Oberfläche des zu erforschenden Planeten.

Gene Rodenberry verallgemeinerte in seinem Drehbuch einen physikalischen Effekt, den Albert Einstein, Boris Podolski und Nathan Rosen bereits 1935 prognostizierten und der 1997 erstmals an der Universität Innsbruck und an der Universität Rom experimentell nachgewiesen werden konnte. Der EPR-Effekt erlaubt das Beamen in der subatomaren Welt.

In aktuellen Experimenten werden Zustände von Photonen teleportiert, deren Wellenlänge im optischen Bereich liegt. Als Übertragungsmedium werden optische Kabel verwendet. Die Reichweite der Teleportation ist durch die Länge des Kabels limitiert. Die Teleportation kann durch Kappen des Kabels unterbrochen werden. Beim GS-Verfahren der Teleportation werden Quanten-Zustände im Radiofrequenzbereich einer Rauschdiode teleportiert. Die Quanten-Teleportation erfolgt drahtlos („wireless“). Heute ist die Global Scaling Technology in der Lage, Standard-Komponenten der PC- oder Laptop-Hardware für den Aufbau einer „wireless“ Teleportation zu nutzen. Dabei wird kein Sender aktiviert. Die Eigenschaften und Möglichkeiten des GS-Verfahrens unterscheiden sich wesentlich von denen herkömmlicher Verfahren der Telekommunikation: Die Übertragung ist mit herkömmlichen Methoden nicht abschirmbar, sie erfolgt praktisch verlustfrei auch unter Wasser, aus Höhlen und Bergwerken, sie ist entfernungsunabhängig und physikalisch abhörsicher (Quantenkryptographie).

4 Literaturverzeichnis

- Bjorken JD (1969) **Asymptotic sum rules at infinite momentum.** *Physical Review*, 179:1547–1553
- Chislenko LL (1981) **Structure of fauna and flora as dependent on organismal body size.** Moscow Univ. Press
- Feynman RP (1969) **Very high-energy collisions of hadrons.** *Physical Review Letter*, 23:1415–1417
- Gantmacher FR, Krein MG (1950) **Ostsillyatsionnye Matritsy i Yadra i Malye Kolebaniya Mekhanicheskikh Sistem.** Gosudarstvenoe Izdatel'stvo, Moskva-Leningrad (in Russ.)
- Gantmacher FR, Krein MG (1960) **Oszillationsmatrizen, Oszillationskerne und kleine Schwingungen mechanischer Systeme.** Akademie Verlag Berlin
- Khintchine A (1956) **Kettenbrüche.** Teubner Verlag, Leipzig
- Mandelbrot BB (1991) **Die fraktale Geometrie der Natur.** Birkhäuser Verlag
- Müller H (1982) **Scaling in the distributions of physical properties of stable systems as global law of evolution.** Proceedings Second Soviet Biophysical Congress, Vol. 2, Moscow / Pushchino (in Russ.)
- Müller H (1984) **Evolution of matter and the distribution of metrological properties of stable systems.** VINITI, 3808-84 (in Russ.)
- Müller H (1987) **The General Theory of Stability and Evolutional Trends of Technology.** Evolutional Trends of Technology and CAD Applications, Volgograd Institute of Technology (in Russ.)
- Müller H (1989) **Superstability as evolutional law of technology.** Orders of Technology and their applications, Volgograd-Sofia (in Russ.)
- Müller H (2003) **Global Scaling: Die Basis ganzheitlicher Naturwissenschaft.** *raum&zeit*, special 1, Ehlers Verlag
- Perron O (1913) **Die Lehre von den Kettenbrüchen.** Teubner Verlag, Leipzig
- Strompor R, Abroe M, Ade P et al. (2001) **Cosmological Implications of the MAXIMA-1 High Resolution Cosmic Microwave Background Anisotropy Measurement.** *The Astrophysical Journal*, 561:L7–L10
- Terskich VP (1955) **Metod cepnych drobej (Die Kettenbruchmethode).** Sudpromgis Verlag, Leningrad (in Russ.)

F Bauwerke im 'goldenen Schnitt' – eine Symbiose von Symmetrie und Antimetrie

G. Schickhofer



Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Schickhofer

1990

Abschluss Diplomstudium Bauwesen | TU Graz

1994

Abschluss Doktorat | Bauingenieurwesen | TU Graz

1999

venia docendi | Dr. habil.

Lehrbefugnis für Holzbau und Holztechnologie

2002 – 01/2013

Geschäftsführung und wissenschaftliche Leitung der
holz.bau forschungs gmbh

seit 2004

Professur und Leitung des Instituts für Holzbau und
Holztechnologie | TU Graz

1 Einleitung

Dem Verfasser des vorliegenden Beitrages ist durchaus bewusst, dass man mit dem Befassen mit so genannten 'Goldenen Proportionen' – hinzu zählen der 'Goldene Schnitt', das 'Goldene Rechteck', das 'Goldene Dreieck', der 'Goldene Winkel', die 'Goldene Spirale' und nicht zuletzt die 'Goldene Schnitzzahl' – leicht den Pfad der Wissenschaftlichkeit aus dem Blickfeld verlieren kann. Klar ist allerdings auch, dass der 'Goldene Schnitt' seit jeher eine Vielzahl an namhaften Persönlichkeiten zahlreicher Disziplinen bewegt hat und deren Beobachtungen und Experimente verblüffende Erkenntnisse ans Tageslicht brachten. Erwähnt sei in diesem Zusammenhang ein scheinbar einfaches Experiment von G. T. Fechner. G. T. Fechner bat Personen, auf das Rechteck zu zeigen, das ihnen am angenehmsten erschien. Die folgende Abbildung 1 zeigt das Ergebnis, wonach sich die Mehrheit für eine Proportion 5:8 (1:1,6) respektive für benachbarte Proportionen 2:3 (1:1,5) und 13:23 (1:1,769) entschied.

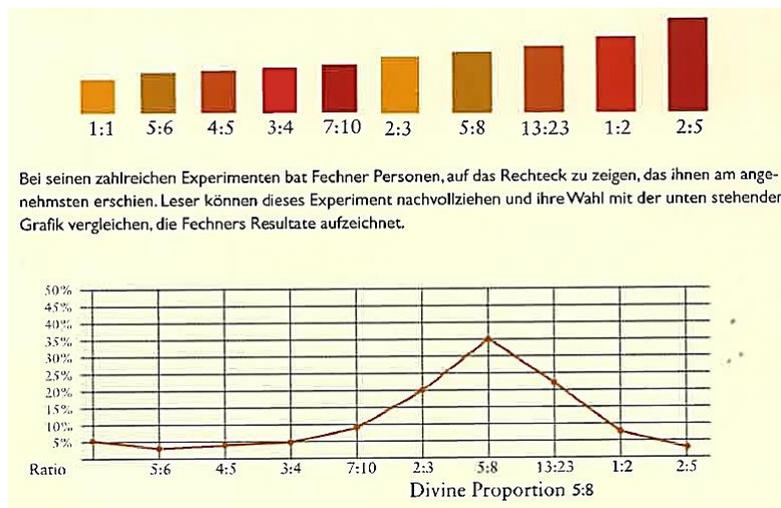


Abb. 1: Ergebnis des Experimentes von Gustav Fechner (Hemenway, 2008)

Im Holzbau tätig, kommt möglicherweise eine Assoziation mit Vollholzquerschnitten verbunden mit der Frage auf, welche Standardquerschnitte wohl für Sparren, Pfetten und Deckenbalken in Verwendung sind. Man findet dort natürlich Querschnitte von 100/160 (1:1,6), 140/240 (1:1,714) und 100/200 (1:1,5), welche durchaus in dieses Schema passen; allerdings sind viele weitere Dimensionen im Einsatz, welche außerhalb dieses Proportionsbereichs liegen.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts erwähnt Le Corbusier im Zusammenhang mit der Standardisierung, dass die Industrie ein System von proportionalen Maßeinheiten – beginnend von Querschnitten, über Stützenraster bis hin zu Baukörperabmessungen – brauchen würde.

Der vorliegende Beitrag setzt sich zum Ziel, das Proportionsmaß des 'Goldenen Schnittes' sowie die Eigenheiten der 'Platonischen Körper' zu analysieren und Umsetzungen – bewusst oder aber auch 'nur' intuitiv genutzt – im Baubereich aufzuzeigen.

2 Der 'Goldene Schnitt'

2.1 Allgemein

Der 'Goldene Schnitt' und die damit verbundene Zahl Φ (= **1,618...**) sind untrennbar mit den Namen Euklid, Fibonacci und L. Pacioli verbunden. In Euklids Werk 'Elemente' findet sich um Buch II | 11 folgende Aufgabenstellung (Byrne, 2013): *“To divide a given straight line in such a manner, that the rectangle contained by the whole line and one of its parts may be equal to the square of the other.”* (in DE: 'Eine gegebene Strecke so zu teilen, dass das Rechteck aus der ganzen Strecke und dem einen Abschnitt dem Quadrat über dem anderen Abschnitt gleich ist.'). Als Ergebnis dieser Aufgabenstellung lässt sich die Gleichung

$$L \cdot (L - 1) = 1^2 \quad (1)$$

anschreiben, woraus die quadratische Gleichung

$$\left(\frac{L}{1}\right)^2 - \frac{L}{1} - 1 = 0 \quad (2)$$

resultiert. Von den beiden Lösungen dieser quadratischen Gleichung ist natürlich nur die positive relevant, so dass gilt:

$$\frac{L}{1} = \left(\frac{1 + 5^{1/2}}{2}\right) = \mathbf{1,618...} \quad (3)$$

Diese Zahl wird auch als 'Goldene Schnittzahl Φ ' bezeichnet und besagt, dass eine Strecke dann nach dem 'Goldenen Schnitt' in zwei Teile geteilt ist, wenn sich die gesamte Strecke zum größeren Teil verhält wie diese zum kleineren. Die Streckenteilung im 'Goldenen Schnitt' findet sich zudem bei Euklid im Buch VI | Def. 3 (*“A straight line is said to be cut in extreme and mean ratio, when the whole is to the greater segment, as the greater segment is to the less.”*). Die Bezeichnung Φ für die 'Goldene Schnittzahl' soll auf den griechischen Bildhauer PHIdias zurückgehen, welcher beim Bau des Parthenon den 'Goldenen Schnitt' angewandt haben soll.

2.2 Konstruktion

2.2.1 Die Konstruktion des 'Goldenen Schnitts' nach Euklid

Gegeben sei die Strecke AB, die nach dem 'Goldenen Schnitt' zu teilen ist. Konstruiere das Quadrat ABDC. Halbiere die Strecke AC im Punkt E. Schlage um E einen Kreis mit dem Radius EB und finde den Punkt F als Schnittpunkt dieses Kreises mit der Verlängerung der Strecke CA über A hinaus. Schlage um A einen Kreis mit dem Radius AF und finde den Punkt P als Schnittpunkt mit der Strecke AB. Im Punkt P wird die Strecke AB nach dem 'Goldenen Schnitt' geteilt. In Abbildung 2 wird diese Konstruktion verdeutlicht.

2.2.2 Die Konstruktion des 'Goldenen Schnitts' nach Heron von Alexandria

Gegeben sei die Strecke AB, die nach dem 'Goldenen Schnitt' zu teilen ist. Errichte in B die Senkrechte und trage darauf eine Strecke der Länge $AB / 2$ ab, erhalte C. D sei Schnittpunkt des Kreises mit dem Radius $CB = AB / 2$ um C und der Strecke AC. P sei Schnittpunkt des Kreises um A mit dem Radius AD und der Strecke AB. Im Punkte P wird die Strecke AB nach dem 'Goldenen Schnitt' geteilt. Diese Konstruktion wird ebenfalls in Abbildung 2 angezeigt.

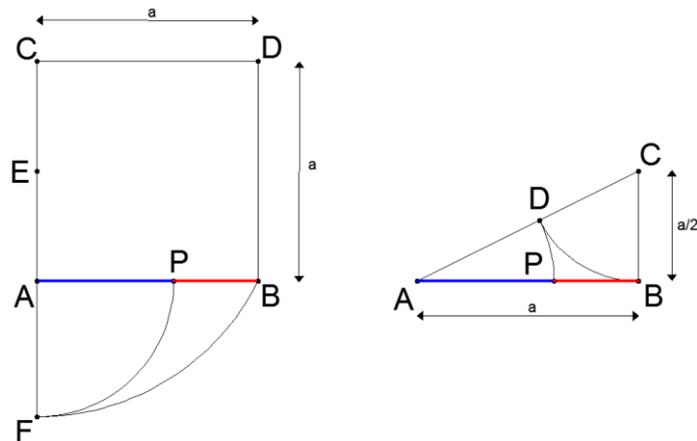


Abb. 2: Die Konstruktion des 'Goldenen Schnitts' nach Euklid (links) und nach Heron von Alexandria (rechts)

2.3 Mathematik

Die proportionale Teilung einer Strecke nach dem 'Goldenen Schnitt' lässt sich in Folge mathematisch in Form einer quadratischen Gleichung anschreiben. Die Lösung dieser quadratischen Gleichung

$$\Phi^2 - \Phi - 1 = 0 \tag{4}$$

ergibt die 'Goldene Schnittzahl' Φ mit 1,618... Multipliziert man diese quadratische Gleichung mit Φ^n , erhält man

$$\Phi^{n+2} = \Phi^{n+1} + \Phi^n \tag{5}$$

Diese Gleichung hat die Struktur einer Rekursionsformel der Fibonacci-Folge. Mit ihrer Hilfe lassen sich beliebige Potenzen von Φ linearisieren:

$$\Phi^0 = 0 \cdot \Phi + 1 \tag{6}$$

$$\Phi^1 = 1 \cdot \Phi + 0 = 1,618... \tag{7}$$

$$\Phi^2 = \Phi^1 + \Phi^0 = 1 \cdot \Phi + 1 = 2,618... \tag{8}$$

$$\Phi^3 = \Phi^2 + \Phi^1 = (\Phi^1 + \Phi^0) + \Phi^1 = 2 \cdot \Phi + 1 \tag{9}$$

...

$$\Phi^4 = 3 \cdot \Phi + 2 \tag{10}$$

$$\Phi^5 = 5 \cdot \Phi + 3 \tag{11}$$

...

Auffallend ist, dass sich jede positive Potenz von Φ in die Komponenten $F_n \cdot \Phi + F_{n-1}$ zerlegen lässt, auch die Nullpotenz, die ja bei allen Zahlen gleich '1' sein muss. Mit 'F' sind die Fibonacci-Zahlen des Leonardo da Pisa gemeint, d. h. 1, 1, 2, 3, 5, 8, ..., wobei die Summe der zwei Vorgänger die nächste Zahl ergibt. Als eine Besonderheit ist auch ersichtlich, dass das Quadrat von Φ die gleichen Dezimalen besitzt, wie die Zahl Φ selbst.

Aus der Bedingung

$$\Phi^2 = \Phi + 1 \tag{12}$$

lassen sich in Folge über

$$\Phi = 1 + \frac{1}{\Phi} \tag{13}$$

die Kettenbruchdarstellung und über

$$\Phi = (1 + \Phi)^{1/2} \tag{14}$$

ein 'geschachtelter Wurzelausdruck' formulieren. Die Kettenbruchdarstellung sieht wie folgt aus:

$$\Phi = 1 + \frac{1}{\Phi} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{\Phi}} = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{\Phi}}} = \dots \tag{15}$$

Die schrittweise Berechnung dieses Kettenbruches ergibt die Ergebnisse 1, 2/1, 3/2, 5/3, 8/5, 13/8, ... und man erkennt, dass die Folge der Quotienten zweier benachbarter Glieder der so genannten 'Fibonacci-Folge' gegen die 'Goldene Schnittzahl Φ ' konvergiert.

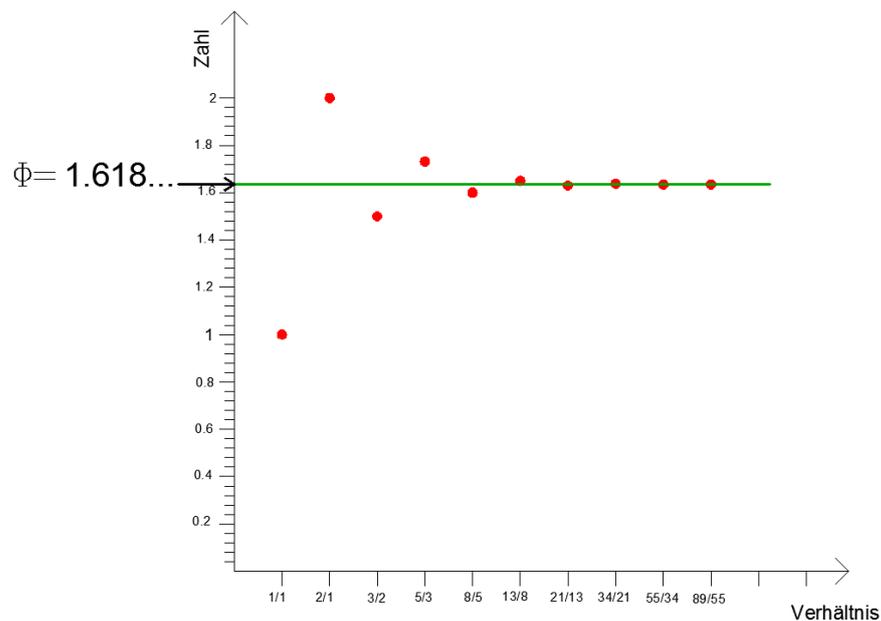


Abb. 3: Quotienten benachbarter Glieder der Fibonacci-Folge konvergieren gegen Φ

2.4 Bauwerk

Im Folgenden werden einige Bauwerke dahingehend analysiert, ob bei den ausgewählten Bauwerken der 'Goldene Schnitt' respektive die 'Goldene Schnittzahl Φ ' Berücksichtigung fand. Es lässt sich erkennen, dass die 'richtigen' Proportionen nicht selten in Grund- und Aufriss, im Stützenraster, in Öffnungsgrößen oder Querschnittsabmessungen von Bauwerken zu finden sind. Die nachfolgende Auswahl soll Zeugnis davon ablegen.

2.4.1 Parthenon, Athen

Der Parthenon ist eines der berühmtesten noch existierenden Baudenkmäler des antiken Griechenland und befindet sich auf der Athener Akropolis. Der unter Perikles im Peripterosstil erbaute Tempel wurde zwischen 447 v. Chr. und 438 v. Chr. errichtet. Viele Elemente des Parthenons sind in exakter Symmetrie angeordnet, Proportionen und Verhältnisse waren bestimmt maßgeblich für die Konstruktion. Die Anwendung des Goldenen Schnittes ist wie in den meisten Bauwerken umstritten. A. Zeising war der Erste, der den Parthenon mit dem Goldenen Schnitt in Verbindung brachte, seine Angaben sind aber weder vollständig noch entsprechen seine Berechnungen genau dem Goldenen Schnitt (*Zeising, 1854*). Viele darauf folgende Arbeiten beschäftigen sich mit dem Parthenon und kommen zu dem Schluss, dass viel mehr das Verhältnis 4:9 eine entscheidende Rolle im Entwurf des Parthenon spielte (Berger, 1980; Salingaros, 2012; Bulckens, 1999). In den meisten Arbeiten, die dem Parthenon einen Goldenen Schnitt nachweisen wollen, wird die leichte Krümmung des Stylobats vernachlässigt, welche die Suche nach dem Goldenen Schnitt wesentlich beeinflusst.

Nach Rekonstruktion der Pläne von Berger (1980) ergeben sich dennoch einige Verhältnisse, die dem 'Goldenen Schnitt' nahe kommen.

Tab. 1: Westfassade, Parthenon, Athen

Bezeichnung	Bauteil	Maß [cm]	Verhältnis
a	Gesamtbreite, inkl. Krepis Höhe von OK Krepis bis OK Antefix	3370 2145	1,571
b ₁	Höhe von OK Krepis bis OK Antefix Höhe bis Geisonunterkante	2145 1312,5	1,634
b ₂	Höhe bis Geisonunterkante Höhe des Giebels inkl. Antefix	1312,5 828,2	1,585
c ₁	Höhe bis Tympanonspitze Säulenhöhe	1715,2 1043	1,645
c ₂	Säulenhöhe Höhe von UK Architrav bis OK Tympanon	1043 672,2	1,552
d ₁	Höhe bis Architravunterkante inkl. Krepis Höhe von Architravunterkante bis Giebel	1214,6 754	1,611
d ₂	Höhe bis Giebel inkl. Krepis Höhe bis Architravunterkante inkl. Krepis	1968,6 1214,6	1,621

Tab. 2: Grundriss, Parthenon, Athen

Bezeichnung	Bauteil	Maß [cm]	Verhältnis
e	Lichte Cellatiefe Lichte Cellabreite	2977 1906,5	1,562
f	Stylobatbreite Lichte Cellabreite	3088 1906,5	1,620
g	Stylobattiefe Lichte Tiefe der Innenräume	6950 4300	1,616

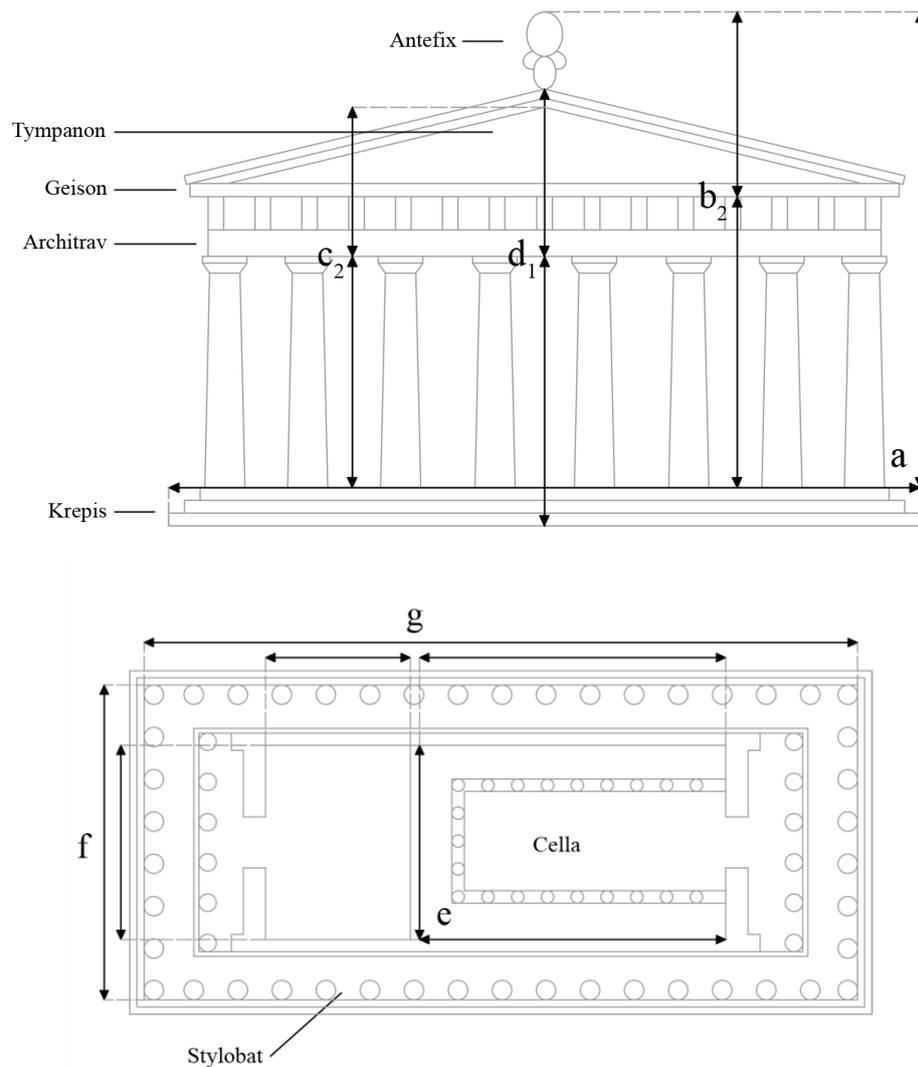


Abb. 4: Westfassade (oben), Grundriss(unten); Parthenon. Athen (<http://www.jstor.org/stable/41320731>)

2.4.2 Notre Dame, Paris

Die Kathedrale Notre-Dame de Paris, Mutterkirche des Erzbistums Paris, wurde in den Jahren 1163 bis 1345 errichtet. Auf Grund der langen Bauzeit ist es schwierig, dem Gebäude einen bestimmten Baustil zuzuweisen. Zu Baubeginn war der vorherrschende Stil die Romanik, ehe in den Jahren der Erbauung allmählich die Gotik in Frankreich begann. Die Kirche wird weitestgehend als frühgotisch bezeichnet, da ihre berühmte Westfassade diesen Stil mitgeprägt hat. Die verschiedenen Bauphasen und Baumeister machen es teilweise auch schwierig, das Gebäude bezüglich des 'Goldenen Schnittes' zu analysieren, lediglich die Westfassade liefert einige Werte, die sich im geforderten Rahmen befinden.

Ähnlich zur Kathedrale von Notre-Dame in Paris sollen auch weitere früh- bis hochgotische Kirchen in Frankreich, wie die Kathedralen von Reims, Laon oder Amiens Bezug auf den 'Goldenen Schnitt' genommen haben.

Tab. 3: Westfassade, Notre Dame, Paris

Bezeichnung	Bauteil	Maß [cm]	Verhältnis
a ₁	Breite der Türme inkl. Zwischenraum Breite eines Turmes + Zwischenraum	4250 2650	1,604
a ₂	Breite eines Turmes + Zwischenraum Breite eines Turmes	2650 1650	1,606
b	Höhe der ersten zwei Geschoße Höhe des ersten Geschoßes inkl. Figuren	3100 1950	1,590
c	Höhe von Figuren bis Unterkante Türme Höhe von Figuren bis Unterkante Blendgeschoß	2220 1375	1,615

Tab. 4: Grundriss, Notre Dame, Paris

Bezeichnung	Bauteil	Maß [cm]	Verhältnis
d ₁	Gesamtlänge (vor Umbau) Länge von Westfassade bis Ende Querschiff	12440 7600	1,637
d ₂	Länge von Westfassade bis Ende Querschiff Länge von Ende Querschiff bis Südfassade	7600 4840	1,570

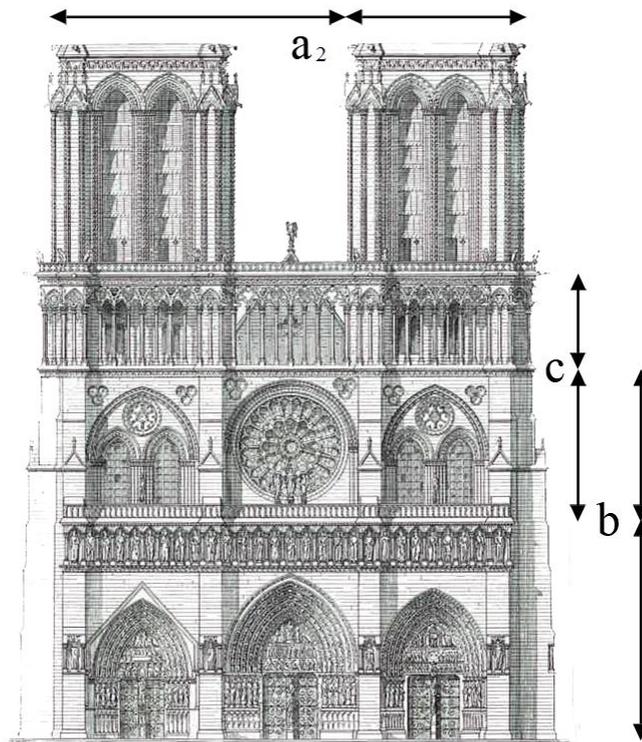


Abb. 5: Westfassade, Notre Dame, Paris (Binding, 2000)

2.4.3 Villa Stein, Garches

Die wohl berühmteste Implementierung von einem Maßsystem auf die Architektur der Moderne war der Modulor von Le Corbusier. Die auf menschliche Dimensionen basierenden Maße seines Systems fanden in vielen seiner Bauwerke Anwendung, die 1927 errichtete Villa Stein, eines seiner ersten Gebäude, dient hier als Beispiel.

In Le Corbusiers Buch „Der Modulor“ von 1951 wird das System genau erklärt und erläutert, schon in früheren Werken benutzt worden zu sein. Ein großer Kritikpunkt des Modulor war, die Maße nicht als absolut zu sehen, sondern sie willkürlich miteinander zu kombinieren, was ganz und gar nicht dem ursprünglichen Gedanken der perfekten Proportion entsprach.

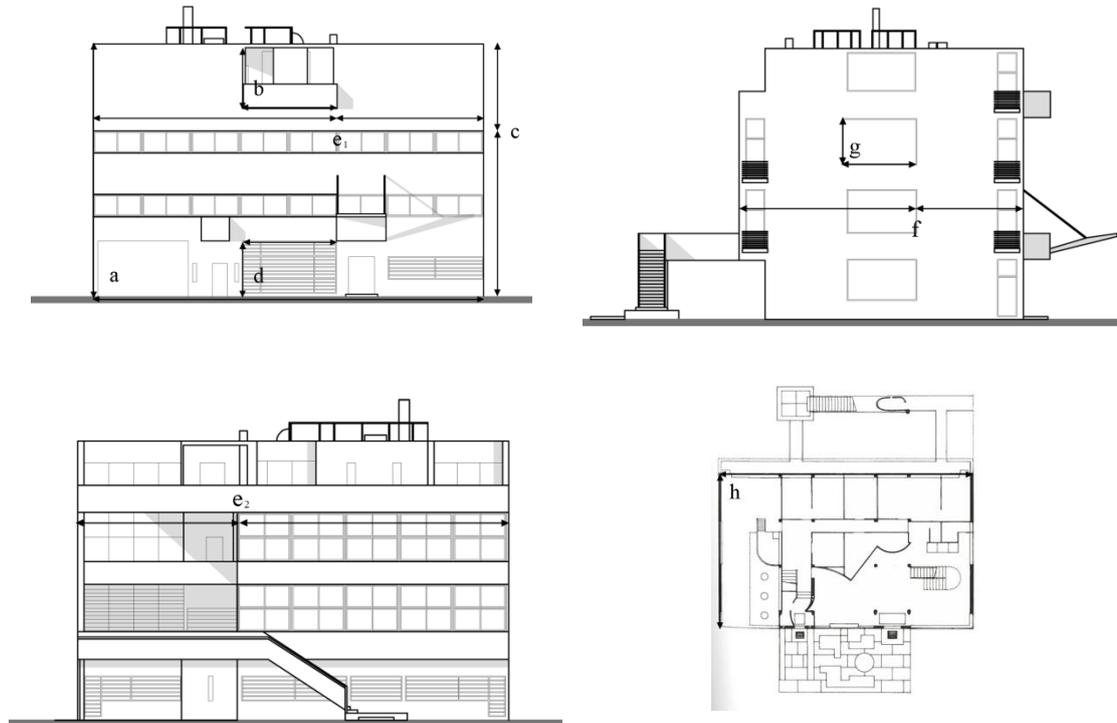


Abb. 6: Nordfassade (links oben), Südfassade (links unten), Ostfassade (rechts oben), Grundriss (rechts unten) (<http://www.timmer.com/files/architecturanalyse.pdf>), (<http://petitcabannon.blogspot.co.at/>); Villa Stein, Garches

Tab. 5: Nordfassade, Villa Stein, Garches

Bezeichnung	Bauteil	Maß [cm]	Verhältnis
a	Gebäudelänge Gebäudehöhe	2080 1350	1,541
b	Terrassenbreite Terrassenhöhe	470 320	1,470
c	Gebäudehöhe Oberkante Fensterreihe	1350 890	1,517
d	Fensterhöhe Fensterbreite	500 300	1,667
e ₁	Gebäudelänge Gebäudelänge bis Außenkante Terrasse	2080 1300	1,667

Tab. 6: Südfassade, Villa Stein, Garches

Bezeichnung	Bauteil	Maß [cm]	Verhältnis
e ₂	Gebäudelänge	2080	1,667
	Gebäudelänge bis Außenkante Terrasse	1300	

Tab. 7: West-/Ostfassade, Villa Stein, Garches

Bezeichnung	Bauteil	Maß [cm]	Verhältnis
f	Gebäudebreite (Obergeschoß)	1420	1,637
	Gebäudebreite bis Außenkante Fenster	880	
g	Fensterbreite	350	1,570
	Fensterhöhe	210	

Tab. 8: Grundriss, Villa Stein, Garches

Bezeichnung	Bauteil	Maß [cm]	Verhältnis
h	Gebäudelänge	2080	1,612
	Gebäudebreite (Erdgeschoß)	1290	

2.4.4 Le Cabanon, Cap Martin

Tab. 9: Le Cabanon, Cap Martin

Bezeichnung	Bauteil	Maß [cm]	Verhältnis
a	Seitenlänge der Hütte	366	1,620
	Höhe des Innenraums	226	
b	höchster Punkt der Hütte	433	1,628
	Höhe bis zur Decke	266	
c	Oberkante Fenster	183	1,620
	Mitte der Wand	113	

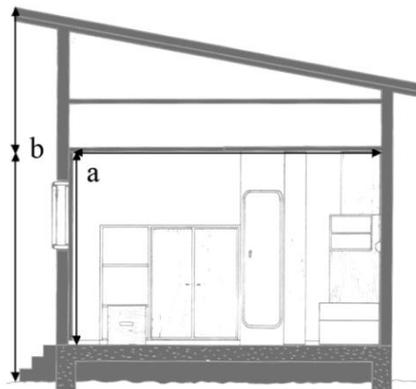


Abb. 7: Schnitt, Le Cabanon, Cap Martin (<http://atlasofinteriors.polimi-cooperation.org/2014/03/20/le-corbuser-cabanon-roquebrune-cap-martin-france-1949/>)

2.4.5 CN Tower, Toronto

Tab. 10: CN Tower, Toronto

Bezeichnung	Bauteil	Maß [cm]	Verhältnis
a	Gesamthöhe	55335	1,618
	Boden Aussichtsplattform	34200	

2.4.6 Louvre, Paris

Tab. 11: Louvre, Paris

Bezeichnung	Bauteil	Maß [cm]	Verhältnis
a	Pyramidenbreite	3542	1,636
	Pyramidenhöhe	2165	

3 Fibonacci – Ausgewähltes und Analogien

3.1 Allgemein

Leonardo da Pisa, auch Leonardo Fibonacci, gilt als der bedeutendste Mathematiker des Mittelalters. Sein Hauptwerk 'liber abaci' – 'Buch der Rechenkunst' – stellte er im Jahre 1202 fertig. Im Kapitel 12 | 7 des 15 Kapitel umfassenden Buches befasst er sich mit der berühmt gewordenen 'Kaninchenaufgabe', woraus letztendlich die heute allseits bekannte und nach ihm benannte 'Fibonacci-Folge' – eine unendliche Folge von Zahlen ($F_0 = 0, F_1 = 1, F_{n+1} = F_n + F_{n-1} | 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, \dots$), bei der die Summe zweier benachbarter Zahlen die unmittelbar folgende Zahl ergibt – hervorging. Der Zusammenhang mit der 'Goldenen Schnittzahl Φ ' lässt sich durch eine Grenzwertbetrachtung $\lim_{n \rightarrow \infty} F_{n+1} / F_n$ feststellen. Betrachtet man die Quotienten zweier aufeinander folgender Fibonacci-Zahlen, so erhält man eine Kettenbruchdarstellung, bestehend aus lauter Einsen.

$$1/1 = 1; \quad 2/1 = 1 + \frac{1}{1} = 2; \quad 3/2 = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1}} = 1,5; \quad 5/3 = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1}}} = 1,666\dots;$$

$$8/5 = 1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1 + \frac{1}{1}}}} = 1,6; \dots$$

Diese Quotienten konvergieren im Grenzwert gegen die 'Goldene Schnittzahl Φ ', weswegen dieser – wie bereits oben erwähnt – als unendlicher Kettenbruch darstellbar ist.

3.2 Spirale

Dieser Abschnitt befasst sich mit der 'Goldenen Spirale' respektive der 'Fibonacci-Spirale' als Annäherung an diese. Beide Spiralen werden in der Literatur als Spezialfall der 'Logarithmischen Spirale' geführt (<http://www.gallin.ch/LogSpiraleBulletinUmbr.pdf>).

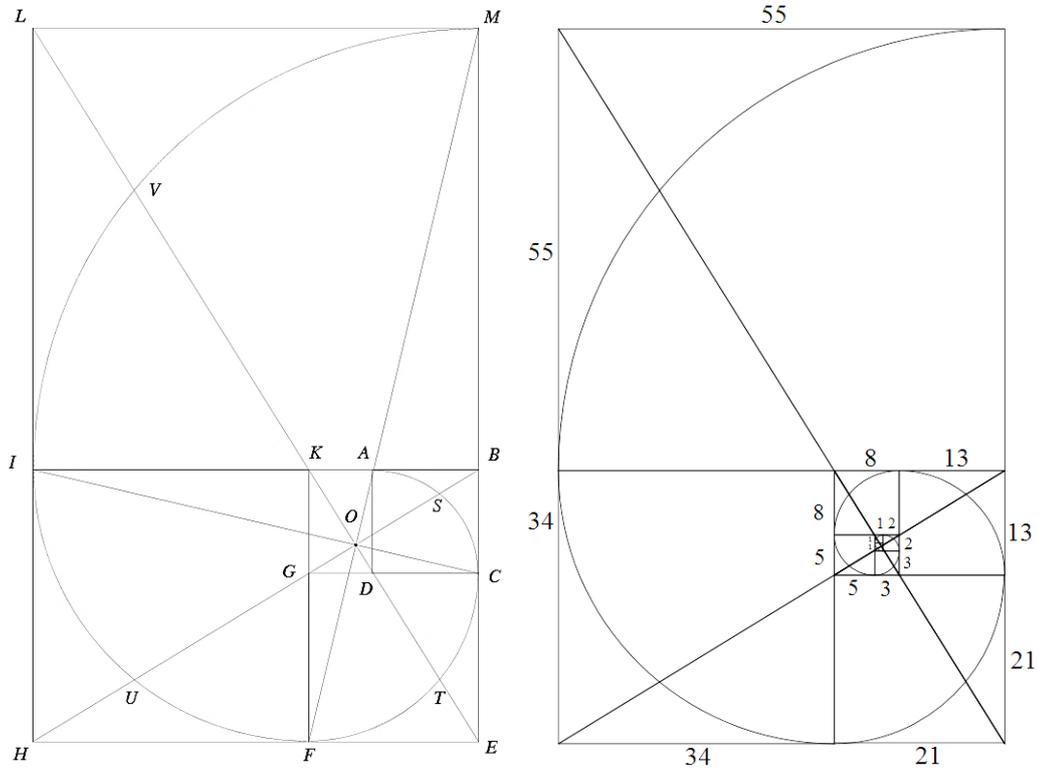


Abb. 8: 'Goldene Rechtecke' dienen zur Approximation der 'Goldenen Spirale' (<http://www.gallin.ch/LogSpiraleBulletinUmbr.pdf>)

„Das Zentrum O der Drehstreckung zum Drehwinkel $\pi / 2$ findet man in diesem Spezialfall durch geeignete Diagonalen der goldenen Rechtecke, welche alle entweder auf LE oder auf BH liegen. Diese stehen senkrecht zueinander, da ja die Drehstreckung von einem Rechteck zum nächsten den Drehwinkel $\pi / 2$ hat. Zeichnet man zusätzlich die Winkelhalbierenden dieser beiden Diagonalrichtungen ein, so gehen sie durch bereits bestehende Eckpunkte von Quadraten. Beispielsweise geht die Winkelhalbierende von $\angle LOH$ durch den Punkt I , denn sie muss ja die Gegenseite LH im Dreieck LOH im Verhältnis der anliegenden Seiten OL und OH , mithin im Verhältnis τ schneiden. Der Punkt I erfüllt aber genau diese Forderung. Damit erhalten wir ein zweites Paar zueinander senkrechter Richtungen IC und MF , welche die Rolle der Koordinatenachsen von Abbildung 6 (Anm.: Nummerierung gemäß Literatur) übernehmen. Zeichnet man schließlich die Viertelkreise in den Quadraten ein, so schneiden sie die Winkelhalbierenden der neuen Achsen in den Punkten S, T, U, V, \dots , welche neben den Stützpunkten A, C, F, I, M, \dots zugleich auch Punkte der exakten goldenen Spirale sein müssen. Sie ist in Abbildung 8 (Anm.: Nummerierung gemäß Literatur) nicht eingezeichnet, weil sie sich nur sehr wenig von den approximierenden Viertelkreisen unterscheidet. Die Tangenten an die goldene Spirale weichen allerdings in den Stützpunkten leicht von den Rechtecksseiten ab. Diese Bemerkung stammt aus dem Buch "Unvergängliche Geometrie" von H. S. M. Coxeter (Birkhäuser Verlag, 1963, Seite 205) und war Anlass für die vorliegende Untersuchung. Konkret ergibt sich für dieses $k = 2 \ln(\tau) / \pi$ gemäß Abbildung 7

(Anm.: Nummerierung gemäß Literatur) ein Winkelunterschied von etwa 3.75° (<http://www.gallin.ch/LogSpiraleBulletinUmbr.pdf>).

3.3 Natur

Logarithmische Spiralen kommen auch gehäuft in der Natur vor. Insbesondere sind in diesem Zusammenhang die alternierende Anordnung der Blätter entlang des Stängels (Anmerkung: Phyllotaxis – Lehre von der Blattstellung) und das mit diesen (Wachstums)Spiralen zusammenhängende Auftreten der Fibonacci-Zahlen in Form der Anzahl von Kernen, Fruchtkörpern, Dornen oder Blätter innerhalb dieser Spiralen zu erwähnen. Dazu L. da Vinci: „Das Blatt wendet seine Oberseite immer dem Himmel zu, sodass es besser in der Lage ist, den Tau auf seiner ganzen Oberfläche aufzufangen; **und diese Blätter sind auf der Pflanze so angeordnet, dass ein Blatt das andere so wenig wie möglich verdeckt.** Diese Abwechslung erzeugt offene Räume, durch die Sonne und Luft besser dringen können. Die Anordnung bewirkt, dass Tropfen, die vom ersten Blatt herabfallen, in einigen Fällen auf dem vierten Blatt, in anderen auf dem sechsten auftreffen.“

Ein wesentliches Merkmal bei Pflanzen ist – wie bereits oben erwähnt – die Anzahl der Blütenblätter. Nicht selten finden wir in der Natur die Fibonacci-Zahlen 3, 5, 8, 13, 21, 34, etc. als Anzahl dieser Blätter. Die drei in der Abbildung 9 dargestellten Pflanzen zeigen eine Glockenblume (5 Blütenblätter), eine Passionsblume (2 · 5 Blütenblätter in versetzter Anordnung) und ein Schmuckkörnchen (8 Blütenblätter).



Abb. 9: Glockenblume – 5 Blätter | Anordnung in Pentagrammform | Fibonacci-Zahl '5' (links); Passionsblume – 2 · 5 Blätter | Anordnung in unterschiedlichen Ebenen und versetzt in Pentagrammform | Fibonacci-Zahl '5' (Mitte); Schmuckkörnchen – 8 Blätter | Fibonacci-Zahl '8' (rechts)

3.4 Inspiration

Die Blütenstellung und -anzahl beim Schmuckkörnchen war auch Inspiration bei der folgenden Fragestellung: Gesucht ist ein systematisierbares Konstruktionsprinzip zur stützenfreien Überdachung einer rundum gelagerten quadratischen und aufbauoptimierten BSP-Platte, einsetzbar als Dach oder Decke, mit Seitenlängen von bis zu 20 m. Diese Aufgabenstellung wurde im Rahmen einer Masterarbeit am Institut für Holzbau und Holztechnologie wie folgt gelöst. Die Abbildungen 10 und 11 zeigen einerseits die Systematik der Unterspannung und andererseits die halbkugelförmige Knotenlösung. Die vier Stahlunterspannungsstäbe verlaufen diagonal und die vier auf Druck beanspruchten Spreizen aus Holz oder Stahl seitenparallel. Alle 8 Stabachsen treffen sich im halbkugelförmigen Knotenpunkt. Die vorgesehene Knotenlösung erlaubt eine Winkelvarianz, sowohl der Zug- als auch der Druckstäbe, wodurch eine größtmögliche Flexibilität gegeben ist.

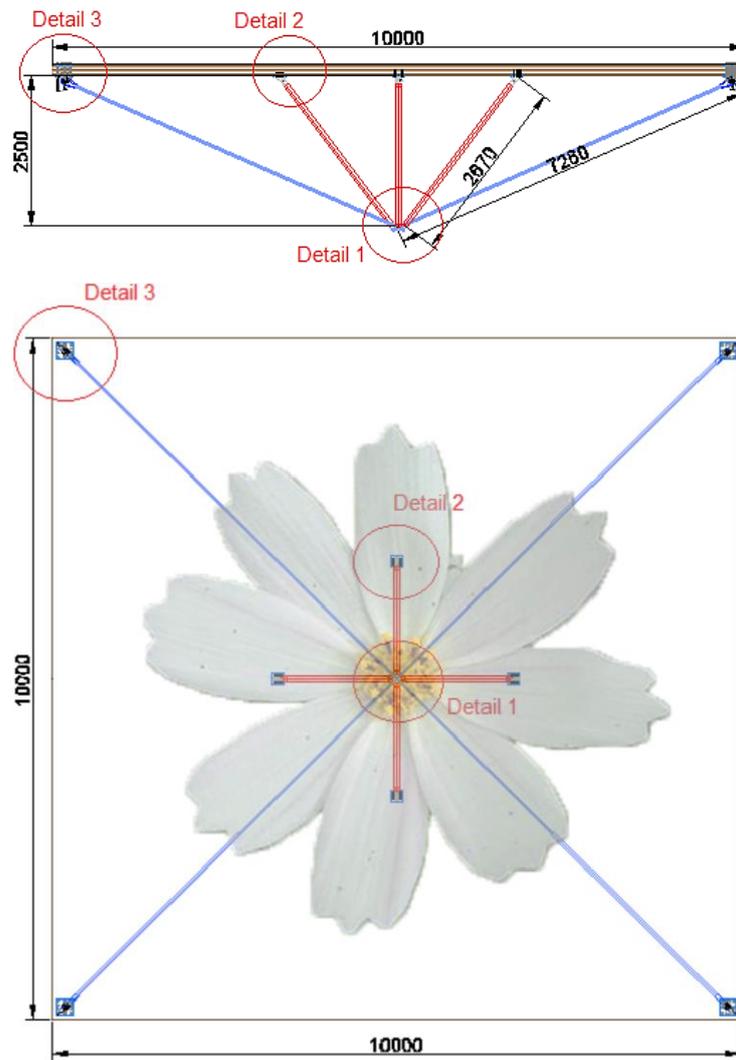


Abb. 10: *Unterspannungskonstruktion in Aufriss (oben) und Grundriss (unten) (Bulajic, 2014)*

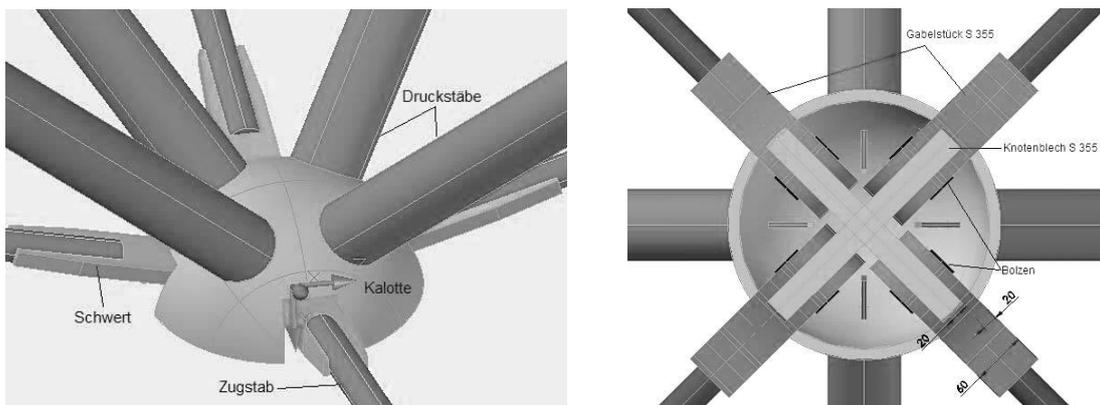


Abb. 11: *Systemknotenlösung (Bulajic, 2014)*

Werfen wir noch einen Blick auf die Blütenstellung und -anzahl bei der Passionsblume. Im ersten Eindruck würde man meinen, die 10 Blütenblätter würden in einer Ebene angeordnet sein. Bei genauerer Betrachtung erkennt man allerdings, dass diese zweireihig und versetzt

angeordnet sind und jede Reihe aus 5 Blütenblättern besteht. Zudem zeigt sie – über die so genannte 'Säule' abgesetzt – 5 so genannte 'Staubblätter' im Kernbereich der Blüte, worauf die dreiteilige so genannte 'Nebenkronen' (Y-förmig) sitzt. Somit lässt sich die Fibonacci-Zahl '5' in Form von in drei unterschiedlichen Ebenen versetzt angeordneten Blüten- respektive Staubblättern erkennen, was geometrisch gesehen der Anordnung von drei Pentagrammen entsprechen würde (siehe Abbildung 12). Zu erkennen ist zudem, dass in den Pentagrammen (respektive im Pentagon) die 'Goldene Schnittzahl Φ ' mehrfach auftritt. Es stellt im vorliegenden Beitrag auch den Übergang zum Kapitel der 'Platonischen Körper' dar. Das Pentagon ist jenes Polygon, welches für die Bildung des **DODEKA**eders verwendet wird.

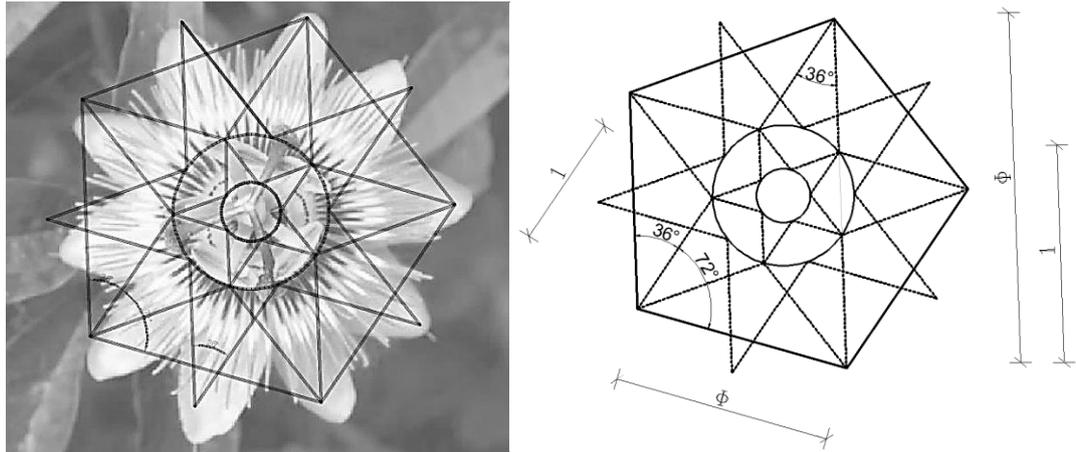


Abb. 12: *Passionsblume – 2 · 5 Blätter und 5 Staubblätter | 3 Pentagramme, in lage- und höhenversetzter Anordnung*

4 Die fünf 'Platonischen Körper'

4.1 Allgemein

Die nach Platon bezeichneten fünf Vielflächner lassen sich – bis auf das **DODEKA**eder – auf rechtwinkelige Grunddreiecke zurückführen. Da sich jedes Dreieck durch rechtwinkelige Dreiecke darstellen lässt, wählt Platon aus jener Menge zwei besondere Dreiecke aus: das gleichschenkelige und das ungleichschenkelige (für ihn 'schönste'), woraus sich als drittes ein gleichseitiges Dreieck bilden lässt. Basierend auf diesem impliziten mathematischen Baugesetz konstruierte Platon aus dem 'schönsten', dem ungleichschenkligen rechtwinkligen Dreieck das **TETRA**eder (24 Grunddreiecke | 4 gleichseitige Dreiecke), das **OKTA**eder (48 Grunddreiecke | 8 gleichseitige Dreiecke) und das **IKOSA**eder (120 Grunddreiecke | 12 gleichseitige Dreiecke). Das **HEXA**eder wird aus 24 gleichschenkeligen rechtwinkligen Dreiecken gebildet. In der folgenden Abbildung 13 sind die zwei Grunddreiecke und die fünf platonischen Körper abgebildet.

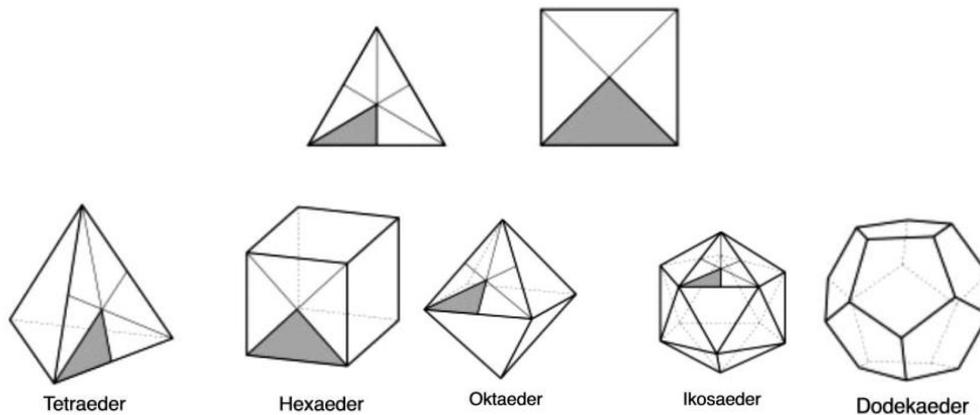


Abb. 13: Die Grunddreiecke (oben) und die fünf platonischen Körper (unten) (Kurrer, 2004)

4.2 Baukunst

Kurrer (2004) befasst sich mit dem Zusammenhang der so genannten 'vier Reiche' Natur, Technik, Kunst und Wissenschaft und nutzt für die Darstellung dieser Zusammenhänge Platons TETRAeder. Technik und Kunst verbinden sich durch Gestaltung, Technik und Wissenschaft durch Modellierung, Kunst ahmt die Natur nach, Wissenschaft begreift Kunst und erkennt die Natur. Das TETRAeder der Baukunst hingegen zeigt das Gleichgewicht zwischen Festigkeit, Anmut, Zweckmäßigkeit und Baukunst. Baukunst bringt im Entwurf Anmut zur Geltung, Baukunst realisiert die Zweckmäßigkeit durch Konstruktion, wohingegen Anmut über die Kunstform mit der Zweckmäßigkeit, diese über die Statik mit der Festigkeit und jene über die Naturform mit der Anmut verbunden ist. In der Abbildung 14 sind das TETRAeder der vier Reiche und das TETRAeder der Baukunst (Kurrer, 2004) dargestellt.

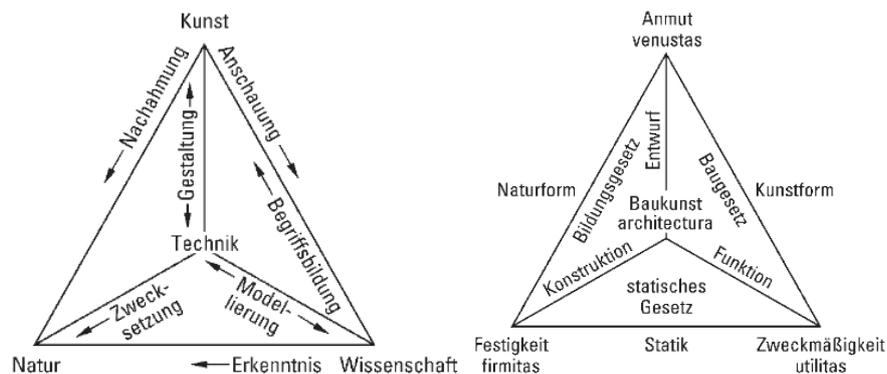


Abb. 14: TETRAeder der 'vier Reiche' (links) und das TETRAeder der Baukunst (rechts) (Kurrer, 2004)

4.3 Komposition

Betrachtet man das TETRAeder der Baukunst nach K.-E. Kurrer so erkennt man, dass das 'statische Gesetz', das 'Bildungsgesetz' und das 'Baugesetz' in einem Zusammenhang stehen. M. Mengerhausen formulierte im Jahre 1940 seine 8 Baugesetze für Raumfachwerke (http://www.db-bauzeitung.de/files/db_essays/db1004_mengerhausen.pdf). Sein erstes Baugesetz daraus lautet: „Regelmäßige Raumfachwerke werden aus gleichseitigen und/oder rechtwinkligen Dreiecken so zusammengesetzt, dass platonische Körper beziehungsweise davon abgeleitete Formen entstehen.“ Mengerhausen (1966) spricht von Strukturgesetzen

von allgemeiner Verbindlichkeit und von der so genannten 'dichtesten räumlichen Kugel-Packung', wobei die Verbindungslinien zwischen den Mittelpunkten von vier sich gleichzeitig berührenden, aber in verschiedenen Ebenen liegenden Kugeln einen TETRAeder bilden, fünf Kugeln ein halbes OKTAeder und sechs Kugeln ein ganzes OKTAeder. Die Mittelpunkte dieser 'dichtesten Kugel-Packung' bilden für ihn das 'natürliche Raum-Raster'. Verbindet man die Rasterpunkte miteinander, so entstehen daraus Raumfachwerke mit bestimmten Stablängen und Winkeln zwischen den Stäben und Flächen. Föppl (1892) beweist zudem die Tatsache, dass diese Elementarkörper des natürlichen Raum-Rasters, nämlich das TETRAeder und OKTAeder, zugleich die kleinsten und einfachsten 'Einstab-Fachwerke mit Eigen-Stabilität' sind.

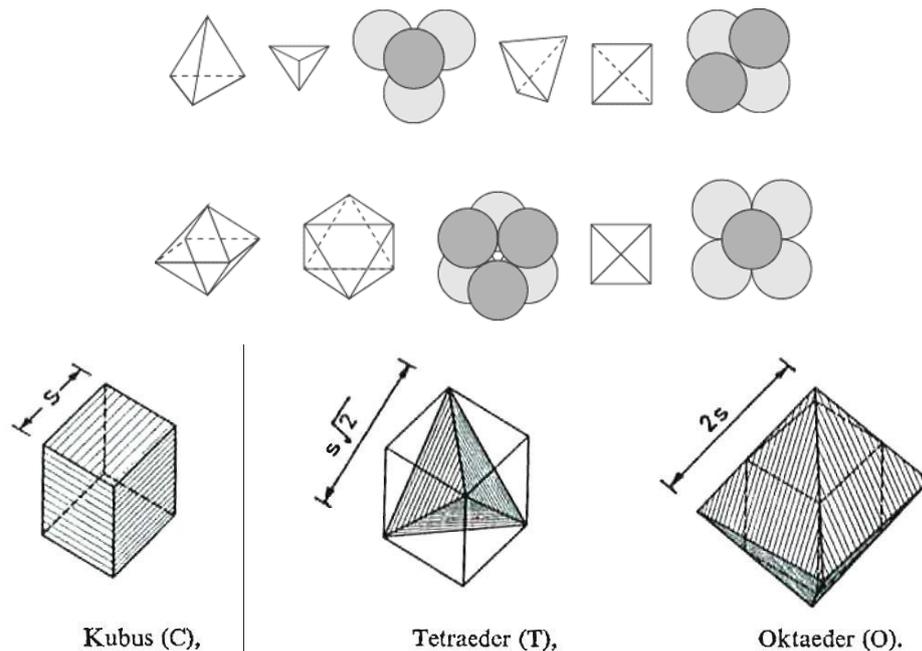


Abb. 15: Kugel-Packung (oben) (http://www.wikichemie.de/web/band2_5-1-1.php) und Elementarkörper (unten) (Mengerinhausen, 1966)

Abbildung 16 zeigt eine der vielen möglichen Kombinationen von Elementarkörpern für Raumfachwerke, nämlich die Kombination von TETRAeder mit OKTAedern. Da der Ausgangspunkt eines jeden Bausystems der Verbindungsknoten ist, ersann M. Mengerinhausen eine Systemknotenlösung und formulierte dazu sein achttes Baugesetz für Raumfachwerke: „Für den Bau regelmäßiger Raumfachwerke genügt der Universalknoten mit achtzehn Anschlüssen in Gestalt des MERO-Normknotens.“

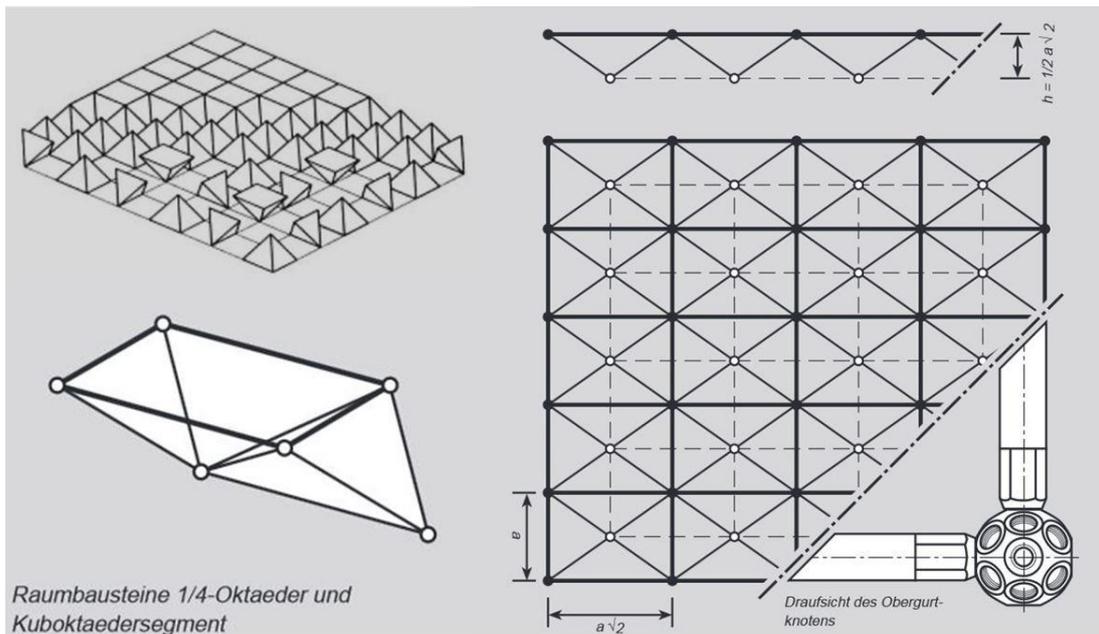


Abb. 16: Kombination von TETRAedern und OKTAedern zu einem plattenförmigen, rechteckigen Raumfachwerk (links oben) (Kurrer, 2004) (rechts und links unten) (http://www.raumsystem.de/Website/Links_files/Mero%20M12%20Funktion.pdf)

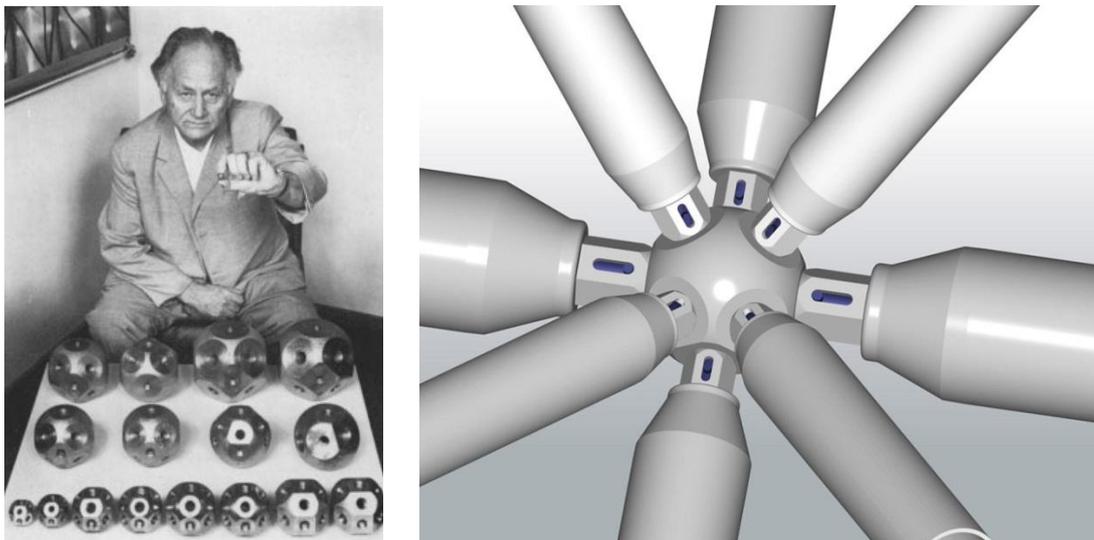


Abb. 17: M. Mengerlinghausen mit seinen MERO – Knotenstücken (links) (Kurrer, 2004); MERO – System (rechts) (<http://www.mero-tsk.de/index.php/bausysteme/knotensysteme/kk-kugelknoten-system-de>)

4.4 Knoten

Dass Raumfachwerke auch für den Holzbau Bedeutung haben können, zeigen im Besonderen die beiden dazu ausgewählten Patente 'Knotenpunktverbindung für Holzstäbe von Fachwerken, insbesondere Raumfachwerke' (<http://www.google.com/patents/EP0044057A1?cl=de>) und 'Vorrichtung zur Bildung einer Knotenpunktverbindung' (<http://www.google.com/patents/EP2369074A1?cl=de>). Mit dem erstgenannten Patent aus dem Jahre 1981 wird die MERO-Systemknotenlösung auf Holzstäbe erweitert. Von Interesse ist dabei die Verbindung des Metall-Haltegliedes mit dem Holzstab, welche stirnseitig über

eine Klebeverbindung zwischen Metall und Holz erfolgt. Die Abbildung 18 zeigt die im Patent angeführten Möglichkeiten.

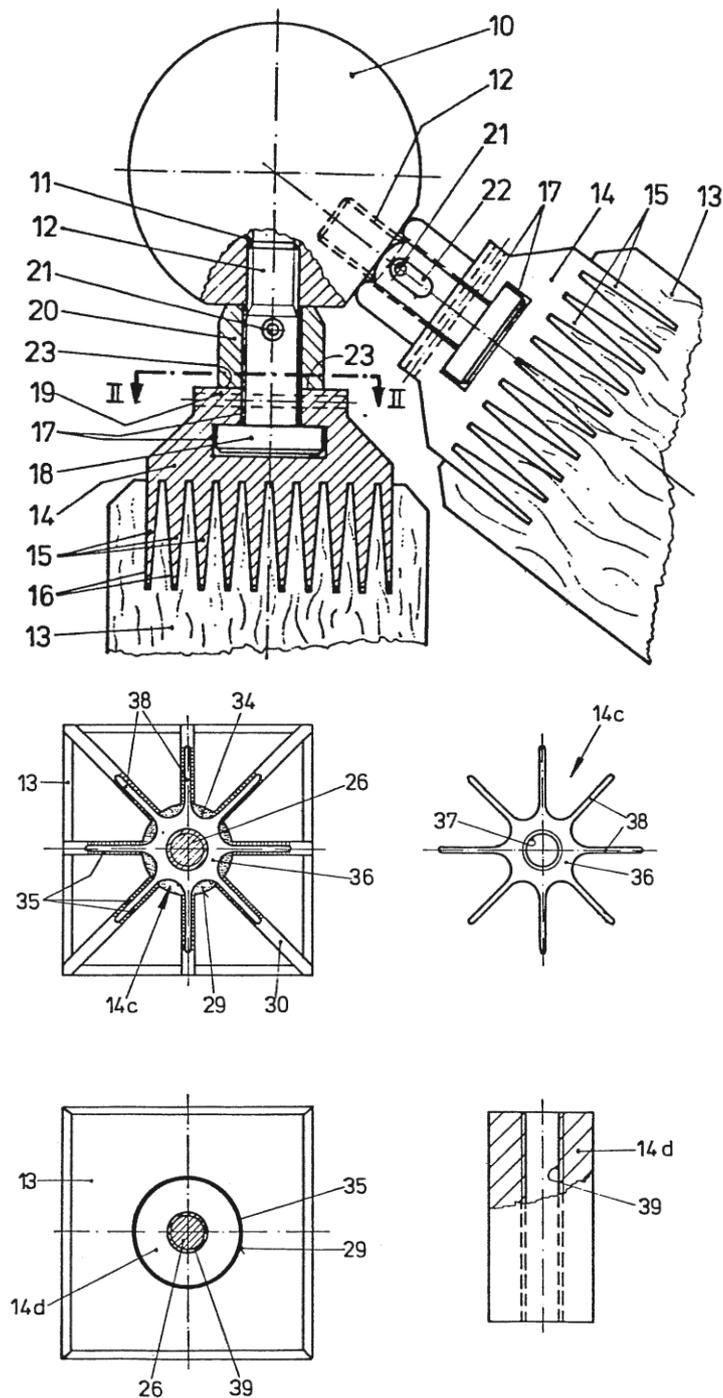


Abb. 18: Knotenpunktverbindungen für Holzstäbe (<http://www.google.com/patents/EP0044057A1?cl=de>)

Für die Überdachung einer Mehrzweckhalle in Arbon (CH) mit einer Fläche von 27 m · 45 m wurde im Jahre 1984 das Prinzip des Raumfachwerkes verwendet. Die Entwicklung – insbesondere der Knotenlösung – erfolgte an der ETH Zürich unter der Leitung von E. Gehri (Bauen mit Holz 1984/9; Gehri, 2014). Unterschiedlich zum oben

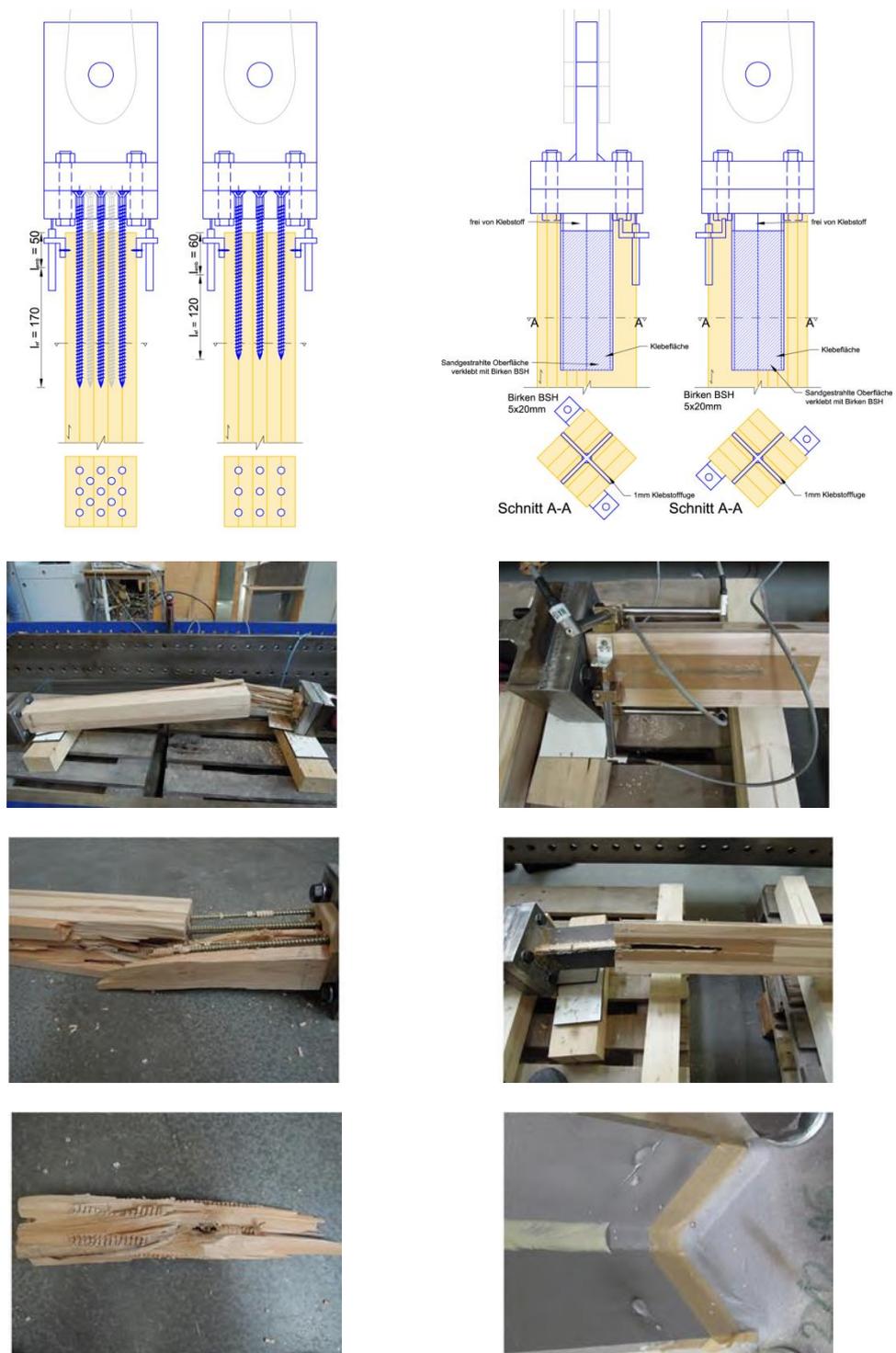


Abb. 21: Schraubverbindung in Faserrichtung und eingeklebte Stahlknoten in Birken-BSH (Obermayr, 2014)

Dass sich Raumfachwerke nicht nur für transparente und leichte Dachkonstruktionen eignen, zeigt das Patent 'Vorrichtung zur Bildung einer Knotenpunktverbindung' (<http://www.google.com/patents/EP2369074A1?cl=de>). Eine Zeichnung in diesem Patent zeigt unter „Fig. 17 eine räumliche Darstellung einer Anwendung der erfindungsgemäßen

Vorrichtung an einem Bauelement, das aus einer Vielzahl zwischen zwei Platten zu Knotenpunkten verbundenen Vorrichtungen besteht.“ Daraus abgeleitet, könnten große Spannweiten respektive Deckenabmessungen in Form einer Kombination von Fläche (= Brettsperrholz) mit Stab (= Brettschichtholz) realisiert werden. Eine aufbau- und querschnittsoptimierte BSP-Platte wirkt im Verbund mit einem feingliedrigen Raumfachwerk aus BSH (Buche, Birke, Esche, etc.) (siehe Abbildung 22).

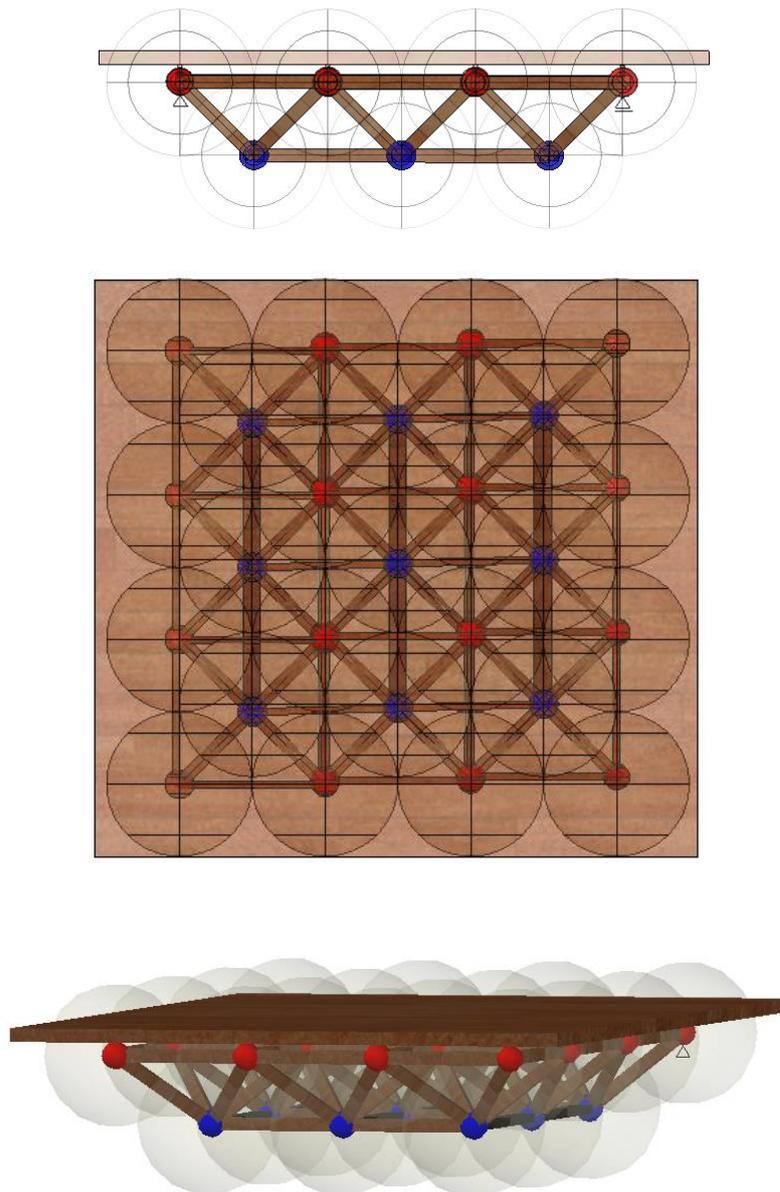


Abb. 22: BSP-Platte im Verbund mit einem BSH-Raumfachwerk

5 Zusammenfassung und Schlussbetrachtung

'Form follows Nature'. Es handelt sich dabei nicht nur um den Titel eines Buches von R. Finsterwald, sondern er kann auch als Leitsatz für diesen Beitrag stehen. Die über die Zeit energetisch und konstruktiv optimierten als auch angepassten und vielfältigen Formen der Natur sind für den achtsamen Menschen Vorbild und Inspiration zugleich. Für M. Mengerlinghaus hieß erfinden: Entdecken des in der Natur Präformierten, war doch alles „... *was wir Menschen entdecken*' (...) *in der Natur immer schon vorhanden* (...). *Alles, was wir erfinden* (...) *schon immer in der Natur als Möglichkeit vorhanden* ...“. Dazu passt der von F. Dessauer definierte Technikbegriff: „*Technik ist reales Sein aus Ideen durch finale Gestaltung und Bearbeitung aus naturgegebenen Beständen*“ (bauzeitung.de/files/db_essays/db1004_mengerling.pdf).

Natur ist Proportion. Eine, hinsichtlich einer bestimmten Beanspruchung, konstruktiv angepasste und optimierte Struktur der Natur wird dieser Beanspruchung entsprechende Materialqualitäten und -verteilungen in einer querschnitts-, längen- und kerboptimierten Tragstruktur entgegenhalten. Damit einher gehen stets auch Proportionen, welche als Resultat aus dieser Strukturbildung für uns erkennbar werden. Für uns bedeutsame und in vielen Bereichen der Natur erkennbare Proportionen stellen die 'Goldene Schnittzahl', der 'Goldene Winkel' und die 'Goldene Spirale' dar. Die Achtsamen unter uns werden in vielen Bauwerken diese besonderen Proportionen finden. Objekte, gebaut unter Berücksichtigung dieser goldenen Proportionen, werden als 'schön' empfunden, auch wenn die dahinter verborgenen Zahlenwerte und Zusammenhänge nicht immer bewusst wahrgenommen werden. Diese zu erkennen bedeutet für den entwerfenden Ingenieur, dass er die Wachstumsprinzipien der Natur für seine Entwürfe bewusst nutzen kann.

In eindrücklicher Weise ist dies M. Mengerlinghaus gelungen. Mit dem Erkennen und Nutzen der Eigenheiten und Proportionen, welche in den fünf platonischen Körpern stecken, entwickelte er ein in Stab und Knoten systematisiertes Raumfachwerk (kurz: System aus Proportion), die so genannte **ME**ngerlinghaus **RO**hrbauweise (da vom Stahlbau kommend), kurz: **MERO**. Der MERO-Normknoten mit 18 Anschlussmöglichkeiten stellt dabei den Kern der Entwicklung dar und bietet eine Vielfalt an Kompositionen von Raumfachwerklösungen. Das in den frühen 80er-Jahren vorhandene Interesse der Holzbaubranche an dieser Konstruktionsform führte zur Weiterentwicklung des MERO-Knotens für Anschlüsse an Holzstäben, wobei der Kraftfluss über verklebte Metall-Hirnholzanschlüsse geführt wird. Die Kombination von Fläche und Stab lässt dieses System für den Holzbau wieder interessant werden und schließt den Kreis zu 'Form follows Nature'.

6 Danksagung

Der Verfasser des Beitrages bedankt sich bei D. Fruhmann, BSc und P. Schickhofer für die umfassende Mitwirkung an der Recherche und Darstellung der Bauwerks-Proportionen sowie bei B. Jeleč, BSc für die Formatierung und Gestaltung des Beitrages.

7 Literaturverzeichnis

7.1 Bücher, Publikationen, Proceedings:

Bauen mit Holz (1984) **Ein Raumbachwerk als Hallendach**. September 1984, BRUDERVERLAG, Karlsruhe

Binding G (2000) **Was ist Gotik?**. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt

Booth LG, Keay BT (1966) **The functional and structural requirements of timber space frames as industrialised components, in: Space Structures – A study of methods and developments in three-dimensional construction resulting from 'The International Conference on Space Structures'**. University of Surrey, September 1966; edited by: R. M. Davies, Blackwell Scientific Publications Oxford and Edinburgh, Chapter 70, 818–826

Bulajic N (2014) **Unterspannte BSP-Konstruktionen für den Einsatzbereich großer Spannweiten im Industrie- und Kommunalbau**. Masterarbeit, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz

Byrne O (2013) **The first six Books of 'The Elements of Euklid'**. London 1847, Taschen GmbH, Köln | Printed in China, ISBN 978-3-8365-4471-9, 268+95 Seiten

Doczi G (1996) **Die Kraft der Grenzen - Harmonische Proportionen in Natur, Kunst und Architektur**. 4. Auflage: Engel & Co., Stuttgart, ISBN 3-927118-12-5, 167 Seiten

Föppl A (1892) **Das Fachwerk im Raume**. Verlag von B. G. Teubner, Leipzig

Gehri E (2014) **30 Jahre Erfahrung mit Laubholz in Ingenieurholzbau – Warum stehen wir trotzdem am Beginn?**. Wiener Leimholz Symposium 2014, Tagungsband 10.–11. April 2014, Holzforschung Austria, Wien, ISBN 978-3-9503707-2-0

Hemenway P (2008) **Der geheime Code - Die rätselhafte Formel, die Kunst, Natur und Wissenschaft bestimmt**. Evergreen GmbH, Köln | Printed in China, ISBN 978-3-8365-0708-0, 203 Seiten

Köster B (2011) **2600 Jahre klassische Architektur – Von der griechischen Ästhetik bis zur klassischen Haltung im 20. Jahrhundert**. Dietrich Reimer Verlag GmbH, Berlin, ISBN 978-3-496-01443-0, 255 Seiten

Kurrer K-E (2004) **Zur Komposition von Raumbachwerken von Föppl bis Mengerlinghausen**. *Stahlbau*, 73(8):603–623

Mengerlinghausen M (1966) **Kompositionslehre räumlicher Stab – Fachwerke. In: Space Structures – A study of methods and developments in three-dimensional construction resulting from 'The International Conference on Space Structures'**. University of Surrey, September 1966, edited by: R. M. Davies, Blackwell Scientific Publications Oxford and Edinburgh, 99:1109–1120

Obermayr I (2014) **Leistungsfähige Hirnholz-Schrauben- und Klebeverbindungen für schlanke Birken-Laubholzkonstruktionen**. Masterarbeit, Institut für Holzbau und Holztechnologie, Technische Universität Graz

7.2 Publikationen via Internet:

Berger E (1980) **Das Basler Parthenon-Modell, Bemerkungen zur Architektur des Tempels**. <http://www.jstor.org/stable/41320731>, 1 Seite, Zugriff: 2014

Bulckens AM (1999) **The Parthenon height measurements: the Parthenon scale with**

roots of 2. Indonesia, <http://etopia.sintlucas.be/3.14/MatOmium.pdf>, Zugriff: 2014

Coolen F, Maier T, Vlaming P; **Proportion and Construction.** <http://www.timmer.com/files/architectuuranalyse.pdf>, Zugriff: 2014

Gallin P (2010) **Das Zeichnen der logarithmischen Spirale mit dem Zirkel.** Bulletin, Universität Zürich, Numero 113, <http://www.gallin.ch/LogSpiraleBulletinUmbr.pdf>, 9 Seiten, Zugriff: 2014

Henning H, Hartfeldt C (2003) **Goldener Schnitt in der Mathematik.** Universität Magdeburg, Fakultät für Mathematik, http://www.math.uni-magdeburg.de/reports/2003/pre_gold_schnitt.pdf, 44 Seiten, Zugriff: 2014

Kuenzle O (1976) **Aspekte der Optimierung beim Entwurf von Raumfachwerken aus Stahl.** Dissertation Nr. 5662, ETH Zürich, <http://e-collection.library.ethz.ch/eserv/eth:21152/eth-21152-01.pdf>, 323 Seiten, Zugriff: 2014

Kurrer K-E, Mengerlinghausen M; **Ein Komponist von Raumfachwerken.** Ingenieurporträt, db 10/04, 88 bis 95, http://www.db-bauzeitung.de/files/db_essays/db1004_mengerling.pdf, Zugriff: 2014

Salingaros NA (2012) **Applications of the golden mean to architecture.** The University of Texas at San Antonio, Belgium, <http://meandering-through-mathematics.blogspot.co.at/2012/02/applications-of-golden-mean-to.html>, Zugriff: 2014

Werner J; **Der goldene Schnitt.** Universität Göttingen, Institut für Numerische und Angewandte Mathematik, <http://num.math.uni-goettingen.de/werner/gold.pdf>, 49 Seiten, Zugriff: 2014

Zeising A (1854) **Neue Lehre von den Proportionen des menschlichen Körpers,** Rudolph Weigel, Leipzig, <https://archive.org/details/neulehrevondenp00zeis>, Zugriff: 2014

7.3 Patente via Internet:

EP 2369074 A1 | **Vorrichtung zur Bildung einer Knotenpunktverbindung.** Erfinder: M. Spörri, Veröffentlichungsdatum: 28. September 2011, <http://www.google.com/patents/EP2369074A1?cl=de>, Zugriff: 2014

EP 0044057 A1 | **Knotenpunktverbindung für Holzstäbe von Fachwerken, insbesondere Raumfachwerken.** Erfinder: H. Eberlein, Veröffentlichungsdatum: 20. Jänner 1982, <http://www.google.com/patents/EP0044057A1?cl=de>, Zugriff: 2014

7.4 Technische Informationen via Internet:

Atlas of Interiors, maquette of architecture masterpieces. <http://atlasofinteriors.polimi-cooperation.org/2014/03/20/le-corbusier-cabanon-roquebrune-cap-martin-france-1949/>, Zugriff: 2014

MERO Ausstellungs-Systeme, meroform M12 System – Modulare Systeme, System und Funktion, Anhang A, Technische Dokumentation: Raumfachwerke, Geometrie, Statik. MERO Systeme GmbH & Co. KG, 1999, http://www.raumsystem.de/Website/Links_files/Mero%20M12%20Funktion.pdf, 33 Seiten, Zugriff: 2014

MERO – TSK; <http://www.mero-tsk.de/index.php/bausysteme/knotensysteme/kk-kugelnknoten-system-de>, Zugriff: 2014

Petit Cabanon Le Corbusier, <http://petitcabannon.blogspot.co.at/>, Zugriff: 2014

Sauermann D, Barke H-D; Wiki Chemie für Quereinsteiger,
http://www.wikichemie.de/web/band2_5-1-1.php, Zugriff: 2014



lignum
study research engineering test center

ISBN 978-3-85125-368-9



9 783851 253689