

## **Master-Thesis**

im Studiengang Gestaltung,

Studienrichtung Holzgestaltung/ Möbel- und Produktdesign

### **Thema:**

Flexibilität im Möbelbau: Eine Untersuchung zur Eignung, Implementierung und Akzeptanz holzbasierter flexibler Mechanismen in verschiedenen Anwendungen

vorgelegt von: Jan-Erik Schützhold

Seminargruppe: 222007, Matrikelnummer: 42081

eingereicht am: 03.07.2023

**ANGEWANDTE KUNST SCHNEEBERG**

**Fakultät der Westsächsischen Hochschule Zwickau**

Eingangsvermerke der Prüferinnen/Prüfer:

## Zusammenfassung

Flexible Mechanismen unterscheiden sich von klassisch starren, da sie ihre Beweglichkeit durch elastische Verformung ihrer Komponenten erlangen. In der Natur allgegenwärtig, erlangen sie durch ihre Präzision und Langlebigkeit, sowie durch ihren inhärenten Leichtbau seit zwanzig Jahren verstärkt technische Anwendung.

Wenig Verwendung fanden die Strukturen bisher in Möbeln. Im technischen Einsatz irrelevant waren zudem natürliche Kompositmaterialien wie Massivholz und Bambus. Ähnlich synthetischen faserverstärkten Materialien weisen diese hohe Festigkeiten bei vergleichsweise geringer Steifigkeit auf. Motiviert durch die Ökologie der Werkstoffe und die Leistungsfähigkeit der integrierten Strukturen geht die vorgestellte Arbeit deshalb der Frage nach, welches Einsatzpotential hölzerne, flexible Mechanismen im Möbelbau haben. Insbesondere GestalterInnen soll ein Überblick über die relevanten Potentiale und Herausforderungen verschafft werden. Neben der grundlegenden Funktionsweise werden für den potentiell herausfordernden Entwurf Konstruktions- und Analysemethoden vorgestellt. Die benötigte Expertise und der Fertigungsaufwand wird mit den Gestellbauten des klassischen Holzhandwerkes verglichen. Dabei werden digitale Entwurfs-, Analyse-, und Fertigungsstrategien als Schlüsseltechnologien für die Weiterentwicklung ausgemacht. Zur Bewertung der inhomogenen Materialien wurden die statischen und dynamischen Voraussetzungen für den Einsatz dargestellt. Dabei demonstrierte vor den Holzarten Esche, Buche und Akazie besonders Bambus unter großen Verformungen seine Eignung.

Gestalterische Einsatzpotentiale wurden in der Analyse etablierter Produkte herausgearbeitet. Insbesondere die Integration beweglicher Funktionen in Gestelle von Leuchten, Sitzobjekten und Lagermöglichkeiten wurde analysiert. Die theoretischen Untersuchungen wurden von praktischen Experimenten und der Entwicklung flexibler Hockerprototypen begleitet. Die Erkenntnisse wurden genutzt, um Sachverhalte des Rechercheteils aufzuarbeiten und zu vertiefen.

## **Abstract**

Compliant mechanisms differ from classically rigid ones, in that they acquire their mobility by elastic deformation of their components. Ubiquitous in nature, their precision and longevity, as well as their inherent lightweight construction causes an increasing number of technical applications.

So far, the structures have found little use in furniture. Equally neglected is the use of natural composite materials such as solid wood and bamboo. Similar to synthetic fiber-reinforced materials, they offer a high yield strength with comparatively low stiffness. Motivated by the ecology of the materials and the performance of the integrated structures, the work presented addresses the potential uses of wooden compliant mechanisms in furniture construction. In particular designers are offered an overview of the relevant potentials and challenges.

In addition to the basic mode of operation, methods for construction and analysis will be presented. The required expertise and manufacturing effort will be compared with frame constructions of traditional wood craftsmanship. Digital design, analysis and manufacturing strategies are identified as key technologies for further development. Static and longtime behaviour of the inhomogeneous materials are analysed to evaluate their potential use. In addition to ash, beech and acacia, bamboo in particular proved to be the most suitable material for use under large deformations.

Design potentials were worked out in the analysis of established products. The integration of movable functions in lighting fixtures, seating objects and storage facilities seems particularly promising. The theoretical investigations were complemented by practical experiments and the development of flexible stool prototypes. The findings were used to elaborate and deepen the results of the research.

## Vorwort

Als Ingenieur und Gestalter hatte ich stets Interesse an den Konstruktionen der Biologie, die mir über flexible Mechanismen um ein Vielfaches zugänglicher wurden. Motiviert durch die spannende Verbindung konstruktiver, materieller und gestalterischer Fragen erfolgte eine experimentelle und künstlerische Auseinandersetzung. Da das Projekt stetig anwendungsnäher in den Bereich des Möbeldesigns wanderte, wurden funktionale Fragen immer relevanter. Die eng dem praktischen Projekt zuzuordnende Thesis geht diesen Fragen deshalb mit teils technischem, teils gestalterischem Blick nach.

Für die Umsetzung des Projektes möchte ich mich insbesondere für die fortwährende Unterstützung meines Erstbetreuers Prof. Jacob Strobel bedanken. Die zahlreichen Konsultationen waren eine große Hilfe bei der Navigation des experimentellen Projektes. Den Dank möchte ich auch auf meinen Zweitbetreuer Ilja Oelschlägel ausweiten, der mit technischem Expertise Entwurf und Umsetzung unterstützte.

Danke auch Uwe Bodenschatz, für die Bändigung der CNC-Fräse und die Hilfe, einen nüchternen Blick auf das Projekt zu wahren. Außerdem sei Anja Werner für das Gegenteil gedankt. Ohne ihre Ermutigung, jenseits von Funktionen in gestalterische Experimente zu gehen, wäre diese Arbeit nicht entstanden.

Zuletzt ein Danke an Claudia Schützhold, für die Entwirrung all der langen Sätze.

## Selbstständigkeitserklärung

Zur Thesis mit dem Thema: Flexibilität im Möbelbau: Eine Untersuchung zur Eignung, Implementierung und Akzeptanz holzbasierter flexibler Mechanismen in verschiedenen Anwendungen

Ich, Jan-Erik Schützhold erkläre gegenüber der Fakultät Angewandte Kunst Schneeberg (AKS/WHZ), dass ich die/ das vorliegende Master-Arbeit/ Projekt (,Thesis‘) selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Die vorliegende Arbeit ist frei von Plagiaten. Alle Ausführungen, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen entnommen sind, habe ich als solche eindeutig kenntlich gemacht und nachgewiesen.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form weder von mir noch von jemand anderem als Prüfungsleistung (d.h. weder an der AKS/WHZ noch andernorts) eingereicht und ist auch noch nicht veröffentlicht worden.

Schneeberg, 30.06.2023

---

Ort/Datum



---

Unterschrift

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Flexible Mechanismen</b>	<b>4</b>
2.1	Funktionsweise . . . . .	4
2.2	Material . . . . .	9
2.3	Technologie . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Flexible Objekte</b>	<b>15</b>
3.1	Nachgiebiger Gestellbau . . . . .	15
3.2	Biegsame Produkte . . . . .	17
3.3	Vorzüge instabiler Möbel . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Praktisches Projekt</b>	<b>21</b>
4.1	Experimentelle Mechanismen . . . . .	21
4.2	Biegsame Hocker . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>30</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>32</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>33</b>

# 1 Einleitung

Jedes gestaltete Objekt unserer Umgebung, von einer Pinzette hin zu einem Stuhl, über die Türen eines Zimmers bis zu dem Gebäude selbst, ist in definierter Weise sowohl stabil als auch beweglich. Obwohl Festigkeit und Starrheit in vielen Gegenständen überwiegt, stiftet oft Beweglichkeit die Gesamtfunktion. Werden für die Erfüllung dieser Funktionen Kraft, Bewegung und Energie untereinander umgewandelt, lassen sich die Objekte als Mechanismen bezeichnen.<sup>1</sup>

Betrachtet man auf der Suche nach Beweglichkeit biologische Konstruktionen der Natur, erscheint eine Vielzahl unterschiedlichster Lösungen, die meist gemeinsam haben. Im Gegensatz zu geläufigen Maschinen aus starren Teilen wird Beweglichkeit durch die Biegsamkeit einzelner oder aller Komponenten bereitgestellt. Eine sich öffnende Blüte, oder die nach dem Licht wachsenden Stängel der Pflanze können deshalb beispielsweise als flexibler Mechanismus bezeichnet werden. Auffällig ist zudem, dass die oft komplexen und leistungsfähigen Konstruktionen aus energetisch einfachen Materialien wie Hölzern bestehen und so mit Blick auf Ressourcen- und Energiebedarf, sowie hinsichtlich ihrer Kreislauffähigkeit höchst effizient fungieren.

Angesichts der stetig dringlicheren Notwendigkeit zur Reduktion unseres Ressourcenverbrauchs<sup>2</sup> und des diesbezüglichen Nachholbedarfes in der Möbelindustrie<sup>3</sup> stellt sich die Frage, wieso nicht vielmehr Gegenstände unseres Alltages biegsam funktional und gerade so fest wie nötig sind. Die Arbeit untersucht

---

<sup>1</sup>Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Getriebetechnische Grundlagen, 1993.

<sup>2</sup>CLIMATE CHANGE 2022 IMPACTS, ADAPTATION AND VULNERABILITY. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, unter Mitarb. v. H. O. Pörtner u. a., 1ST ED., CAMBRIDGE 2022.

<sup>3</sup>Alfred Teischinger: ein superleichter Stuhl, in: proHolz Austria (Hrsg.): Zuschnitt 75 2019, Potenzial Holz, S. 24, S. 24.

deshalb die These, dass flexible Mechanismen (FM) aus Holz technisch und gestalterisch für eine breitere Anwendung im Möbelbereich geeignet sind.

Effiziente Konstruktionen aus natürlichen Materialien sind keine Neuheit. Über Jahrhunderte waren etwa Tragwerke aus Holz mit komplexen Verbindungen in Architektur wie Möbelbau unangefochten. Erst mit der einsetzenden Industrialisierung und einhergehender Standardisierung zur Massenproduktion wurde diese Komplexität uneffizient. Idealisierbare technische Materialien und einfachere Formen rückten ins Zentrum ingenieurstechnischer und gestalterischer Auseinandersetzung. Unsere heutige Produktwelt ist davon stark geprägt, wird jedoch zunehmend von den Konsequenzen dieser Idealisierung eingeholt. Angesichts des zunehmend problematischen Rohstoff- und Energiekonsums rücken die vermeintlich überholten konstruktiven Ansätze erneut in den Fokus der Forschung.<sup>4</sup>

Innovationen hinsichtlich Entwurf, Analyse und Fertigung komplexer Formen, resultieren mittlerweile in einer Vielzahl flexibler Mechanismen. In vielen Hinsichten funktionieren diese effizienter als ihre starren Gegenstücke.<sup>5</sup> Dass die wesentlichen Probleme technisch verstanden sind, spiegelt sich auch in einer zunehmenden Systematisierung der Ansätze wider.<sup>6</sup> Anwendungsgebiete sind bisher vor allem hochpräzise, leichte und skalierbare Lösungen für Probleme der Medizin,- Raumfahrt- und Mikrotechnik.

In den Hochleistungsanwendungen bisher außen vor geblieben sind die einfachen Materialien der natürlichen Vorbilder. Hightech-Werkstoffe wie Glasfaserkomposite erleben einen Aufschwung, stellen mit ihren Recyclingproblemen aber trotz Formoptimierung keine Lösung ökologischer Probleme dar. Holzwerkstoffe bieten ebenfalls vielversprechende Eigenschaften hinsichtlich ihrer Bieg-

---

<sup>4</sup>Vgl. aktuelle Forschungsprojekte der Digital Structures Research Group des MIT zur Optimierung von Holzverbindungen und Fabrikation topologieoptimierter Balkenelemente: MIT (Hrsg.): Forschungsprojekte Digital Structures Research Group, URL: <http://digitalstructures.mit.edu/page/research> (besucht am 25.06.2023 23:15).

<sup>5</sup>Larry L. Howell/Spencer P. Magleby/Brian M. Olsen (Hrsg.): Handbook of compliant mechanisms, eng, Howell, Larry L. (Hrsg.) Magleby, Spencer P. (Hrsg.) Olsen, Brian M. (Hrsg.), Chichester 2013, S. 5.

<sup>6</sup>Juan A. Gallego/Just Herder: Classification for Literature on Compliant Mechanisms: A Design Methodology Based Approach, in: Volume 7: 33rd Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B, ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (San Diego, California, USA), 2009, S. 289–297, S. 1-3.

samkeit und Festigkeit. Die Leistungsfähigkeit und Verlässlichkeit tritt zwar hinter technischen Werkstoffen zurück, dafür bieten sich jedoch klare Vorteile bezüglich der Ressourceneffizienz und Kreislauffähigkeit.

Relativ selten ist bisher die Verwendung in Möbeln – dabei sind leichte und bewegliche Konstruktionen auch hier gefragt. Über eventuelle Vorbehalte und Vertrauensfragen hinaus ist interessant, welche Funktionen flexible Mechanismen im Möbelbau erfüllen könnten und wieviel Sinn der angestrebte Leichtbau ergibt.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen in Kapitel 2 die Funktionsweise sowie Potentiale und Herausforderungen flexibler Mechanismen dargestellt werden. Weiterführend werden geeignete Materialien, sowie Entwurfs- und Fertigungsmöglichkeiten dargestellt. Um die Relevanz der Ansätze vor dem heutigen Möbelbau einzuordnen, werden in Kapitel 3 verschiedene etablierte und experimentelle Objekte analysiert. Dabei wird untersucht, auf welche Art Flexibilität implementiert wurde, inwiefern natürliche Materialien genutzt und welche Funktionen bereitgestellt wurden. Im danach vorgestellten praktischen Projekt werden die zuvor dargestellten Sachverhalte zunächst in Experimenten gestalterisch untersucht. Darauffolgend wird die Produktauglichkeit der Mechanismen anhand flexibler Hocker demonstriert und reflektiert. In Kapitel 5 werden die theoretischen und praktischen Untersuchungen zusammengeführt, um die Voraussetzungen für einen verstärkten Einsatz flexibler Mechanismen, sowie die damit einhergehenden Potentiale zu diskutieren. Im letzten Teil erfolgt die Zusammenfassung der Arbeit, sowie ein Ausblick auf weiterführende Fragestellungen.

## 2 Flexible Mechanismen

In diesem Kapitel erfolgt eine technische Betrachtung der Funktionsweise flexibler Mechanismen, geeigneter Materialien und ihren Anforderungen, sowie relevanter digitaler und händischer Herstellungstechnologien.

### 2.1 Funktionsweise

Um flexible Mechanismen betrachten zu können, ist der Zusammenhang zwischen Spannung, Steifigkeit und Dehnung wesentlich. Wird ein Körper belastet, treten im Material Spannungen auf. Unmittelbar mit jeder Spannung ist eine zugehörige Verformung verbunden. Der proportionale Zusammenhang zwischen beiden wird mit dem E-Modul definiert und beschreibt die Steifigkeit, bzw. umgekehrt die Flexibilität.<sup>1</sup> Unabhängig von der Verformung toleriert jedes Material eine Maximalspannung, über der es versagt. Die damit definierte Belastbarkeit hängt jedoch von der Art der Verformung ab, weshalb zwischen Zug-, Biege- und Torsionsfestigkeit unterschieden wird.

**Grundlagen**  
*Spannung,*  
*Steifigkeit*  
*und Dehnung*

Für die Verformung eines Körpers spielen neben der Flexibilität des Materials die Geometrie und Randbedingungen eine Rolle. Letztere beschreiben, welche Kräfte auf den Körper einwirken und wie er mit seiner Umgebung verbunden ist. Da sich das Material untrennbar auf die Beweglichkeit auswirkt,<sup>2</sup> wird es in Kapitel 2.2 näher beschrieben.

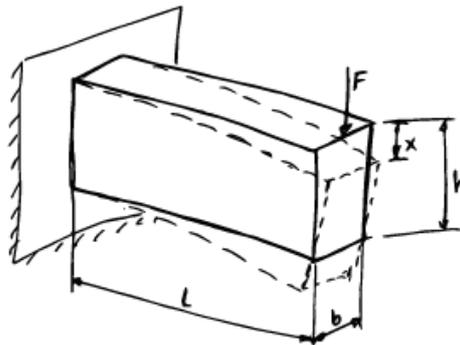
Im Folgenden wird der Einfluss der Geometrie anhand eines einseitig einge-

---

<sup>1</sup>Dietmar Gross u. a.: Statik, ger, 8., erw. Aufl., Bd. Bd.1 (Springer-Lehrbuch), Berlin 2004, S. 165-157.

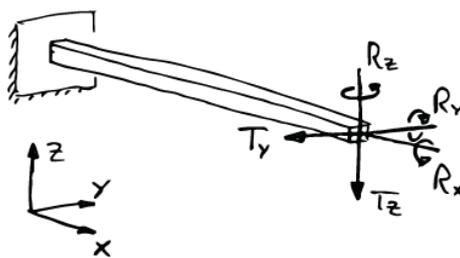
<sup>2</sup>Axel Hannes Körner: Compliant folding, eng, Körner, Axel Hannes (VerfasserIn), Dissertation, URL: 10.18419/opus-11650, S. 2.

spannten und belasteten Balkens betrachtet. In Abbildung 2.1 werden die relevanten Parameter dargestellt. Als Reaktion auf die Kraft  $F$  stellt sich die Verformung  $x$  ein. Vorstellbar ist, dass sich die Verformung bei halbiertem  $b$  verdoppelt. Ebenso ist intuitiv nachvollziehbar, dass  $l$  und  $h$  einen größeren Einfluss haben. Verdoppelt man die Länge bzw. halbiert die Höhe, verachtfacht sich die Verformung in Folge.



**Abb. 2.1:** Einseitig eingespannter Biegebalken mit Kennwerten

Die Geometrie hat folglich einen großen Einfluss auf die Flexibilität eines Körpers. Bemerkenswert ist, dass Festigkeit (Widerstand gegen Versagen) und Steifigkeit (Widerstand gegen Verformung) meist gekoppelt als Stabilität wahrgenommen werden. Flexibilität wird dadurch unverhältnismäßig stark mit Versagen assoziiert. Tatsächlich ergibt sich dagegen in der Verformung ein nutzbarer Spielraum.



**Abb. 2.2:** Rotatorische und translatorische Freiheitsgrade eines dünnen Balkens

Sind eine oder mehrere, voneinander unabhängige Bewegungsmöglichkeiten wesentlich weniger steif und damit beweglicher als andere, spricht man von Freiheitsgraden.<sup>3</sup> Ihr Gegenteil ist die geometrische Zwangsbedingung. Ein dünner,

*Freiheitsgrade*

<sup>3</sup>Kurt Magnus/Hans H. Müller-Slany: Grundlagen der technischen Mechanik, ger, 7., durchge-

wie im vorangegangenen Beispiel befestigter Balken hat nach dieser Idealisierung fünf Freiheitsgrade. Wie Abbildung 2.2 zeigt, könnte sich das freie Ende rotatorisch um die x- y- und z-Achse bewegen ( $R_{x,y,z}$ ) und translatorisch (linear) in y- und z-Richtung verschieben ( $T_{y,z}$ ). Nur die in x-Richtung gelegene Balkenachse ist ungleich steifer und stellt eine Zwangsbedingung dar.

Aus solchen und ähnlichen Grundelementen lassen sich flexible Mechanismen konstruieren. Deren Eigenschaften liegen in ihrer integrierten Konstruktionsweise begründet.<sup>4</sup> Integriert bedeutet hier, dass einzelne Funktionen nicht klassisch axiomatisch einzelnen Komponenten zugeordnet sind, sondern sich aus der Gesamtstruktur ergeben. Selbst lokale Änderungen haben deshalb über komplexe Wechselwirkungen meist Auswirkungen auf mehrere Funktionen.

**Eigenschaften  
flexibler Mechanismen**

Trotz dem bereits erkenntlichen Aufwand bringen flexible Mechanismen einige inhärente Vorteile mit sich. Zum einen reduziert sich meist die Zahl der Einzelteile im Vergleich zu starren Baugruppen und mit ihr die benötigten Herstellungs- und Montageschritte. Vorteilhaft kann auch das Federverhalten der Mechanismen sein. Energie lässt sich wie in Bögen speichern und entladen und Bewegungen können durch Kräfte gehemmt werden. Zudem sind einfache Positionen konstruierbar, in die der Mechanismus stets als neutrale Haltung zurückkehrt. Sehr vorteilhaft kann auch die oft drastische Gewichtsreduktion sein.<sup>5</sup> Durch fehlende reibungs- und spielbehaftete Gelenke sind flexible Mechanismen darüber hinaus sehr wartungsarm und höchst präzise.<sup>6</sup>

**Vorteile**

Letztlich sind flexible Mechanismen in verschiedensten Dimensionen einsetzbar. Ein Origami-inspirierter Mechanismus kann deshalb in seiner Funktion auf ganze Fassaden bezogen werden.<sup>7</sup> Ein ungleich größeres Potential zeigt sich in der Miniaturisierung. Die Kontrolle über mechanisch-elektronische Systeme,

---

sehene und ergänzte Auflage, unveränderter Nachdruck (Studium), Magnus, Kurt (VerfasserIn) Müller-Slany, Hans H. (VerfasserIn) Magnus, Kurt (VerfasserIn) Müller-Slany, Hans H. (VerfasserIn), Wiesbaden 2009, S. 165.

<sup>4</sup>Howell/Magleby/Olsen (Hrsg.) (wie Anm. 5), S. 5.

<sup>5</sup>Larry L. Howell: Compliant mechanisms, eng (A Wiley-Interscience publication), Howell, Larry L. (VerfasserIn), New York u. a. 2001, URL: <http://www.loc.gov/catdir/bios/wiley045/2001026196.html>, S. 4.

<sup>6</sup>Howell/Magleby/Olsen (Hrsg.) (wie Anm. 5), S. 6.

<sup>7</sup>Körner (wie Anm. 2), S. 67.

sogenannte MEMS-Anwendungen, stellt eine langsame und stetige Revolution in Mikrometerdimensionen dar. Winzige flexible Mechanismen revolutionierten bereits Airbags, Handysensoren und diverse medizinische Anwendungen. Ähnlich den großen Varianten schnell, einteilig und in Massen produzierbar, wird durch sie ein größerer Einfluss als durch Mikroelektronik prognostiziert.<sup>8</sup>

Da der Bewegungsspielraum an die Festigkeit des Materials gebunden ist, ergibt sich als größte Einschränkung, dass keine kontinuierlichen Bewegungen realisiert werden können. Nachteilig, aber handhabbar ist außerdem das Problem der Materialermüdung, auf die im Kapitel 2.2 näher eingegangen wird. Konstruktiv herausfordernd ist dagegen der Umgang mit den Komplexitäten, die im Entwurf starrer Mechanismen vereinfacht werden können. Das ist zum einen die Problematik, gleichzeitig Kräfte und Bewegungen analysieren zu müssen, also die federnde Wirkung der Mechanismen zu berücksichtigen. Einige Materialien bauen zudem über die Zeit ihre inneren Spannungen ab und zeigen damit Hystereseverhalten. Mathematisch verkompliziert wird die Analyse zudem durch das nichtlinear zu berechnende Verhalten bei großen Biegungen. Diese sind zusätzlich problematisch, da sie die Geometrie wesentlich verändern. Da die Form jedoch für die weitere Bewegung relevant ist, können iterative Analysen notwendig sein.<sup>9</sup>

*Herausforderungen*

Durch die verstärkte Forschung in den vergangenen 20 Jahren existiert eine Vielzahl flexibler Mechanismen. Kategorisiert werden können sie unter anderem nach ihrem Aufbau, der Entwurfsmethodik oder ihren Bewegungsfunktionen. Hier scheint die Einteilung nach der Entwurfsmethodik sinnvoll, da sie oft eine erkenntliche Formensprache ergibt, die zusätzlich mit Herstellungsmethoden korreliert.<sup>10</sup> Obwohl der Entwurf flexibler Mechanismen herausfordernd bleibt, werden und wurden die Limitationen unter anderem durch die folgend erläuterten Methoden abgebaut.<sup>11</sup>

*Kategorisierung  
und Entwurf*

---

<sup>8</sup>Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering: An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems), hrsg. v. PRIME Faraday Partnership, Loughborough University, 2002, S. 1.

<sup>9</sup>Howell (wie Anm. 5), S. 21.

<sup>10</sup>Gallego/Herder (wie Anm. 6), S. 1–3.

<sup>11</sup>Howell (wie Anm. 5), S. 7.

Eine schon dem Namen nach an klassisch starren Gelenken orientierte Herangehensweise ist die Pseudo Rigid Body Methode. Zwischen steifen Komponenten werden hierfür lokal flexible Gelenke geschaffen, die analog zu gefederten, starren Gelenken berechnet werden können. Dadurch bleiben sowohl die Erfahrung im Umgang mit diesen als auch die Vorteile der flexiblen Varianten nutzbar. Nachteilig ist jedoch meist die Beschränkung auf zweidimensionale Bauteile sowie die starke Belastung der kleinen Gelenke aufgrund der hohen Biegegradienten.<sup>12</sup> Vergleichbar, jedoch flächig funktionieren Origami-inspirierte Mechanismen. Bei sonst ähnlichen Eigenschaften ist vor allem vorteilhaft, dass sie aus kompakten Flächen entfaltet und aus flächigen Materialien hergestellt werden können.

*Pseudo Rigid  
Body Methode*

Grundsätzlich anders können Mechanismen zum Beispiel nach der FACT-Methode entworfen werden. Diese besteht aus einer Bibliothek komplementärer Formen, die verschiedene geometrischen Zwangsbedingungen (Constraint Space) und die zugehörigen Freiheitsgrade (Freedom Space) gegenüberstellen. Eine solche Form wäre beispielsweise der zum Linienelement idealisierte Balken aus Abbildung 2.2 auf Seite 5.

*Freedom and  
Constraint  
Topologies*

Für eine gewünschte Bewegung (Freedom Space) werden so alle möglichen Regionen visualisiert, in denen flexible Elemente platziert werden können (Constraint Space).<sup>13</sup> Aus verschiedenen einfachen Grundelementen wie Stäben und Flächen und vor allem aus ihrer Kombination lassen sich verschiedenste räumliche Mechanismen mit definierten Freiheitsgraden konstruieren.

Vorteilhaft daran ist, dass nicht nur eine konkrete Lösung sondern vielmehr ganze Lösungsräume schnell synthetisiert werden. Aus ihnen können Konstruktionen ausgewählt und mit anderen Methoden weiter optimiert werden. Zudem ist die Methode aus sich heraus für weitläufige und damit spannungsärmere Verformungen geeignet, sowie durch ihre simplen Grundgeometrien prädestiniert

---

<sup>12</sup>Körner (wie Anm. 2), S. 11.

<sup>13</sup>Jonathan Hopkins: Synthesis through Freedom and Constraint Topologies, in: Larry L. Howell/Spencer P. Magleby/Brian M. Olsen (Hrsg.): Handbook of compliant mechanisms, Chichester 2013, S. 79.

für die Verwendung einfacher Halbzeuge. In Anwendung wird die Methode in Kapitel 4.2 ab Seite 23 dargestellt.

Relevant sind weiterhin Verfahren zur Topologieoptimierung. Iterativ werden hier nach geforderten Input- und Outputbewegungen Strukturen algorithmisch errechnet. Optimierungen sind sowohl global bezüglich der Gesamtstruktur, als auch lokal möglich und sinnvoll.<sup>14</sup> So entstehen generativ Strukturen, die in ihrer Komplexität und Effizienz an die Bauwerke der Natur erinnern. Der Leistungsfähigkeit der Methode stehen vor allem Herausforderungen in der Anforderungsdefinition sowie ihr Rechenaufwand entgegen.

*Topologie-  
optimierung*

Eher für die Analyse als zur Synthese kann die Modalanalyse hilfreich sein. In ihr werden rechnerisch oder experimentell die Eigenfrequenzen, bzw. hier interessanter, die Eigenformen der Mechanismen ermittelt. Diese stellen das Schwingungsverhalten der Struktur bei resonanten Frequenzen dar.<sup>15</sup> Ein langes, immer schneller zum Schwingen gebrachtes Seil wird beispielsweise bei bestimmten Eigenfrequenzen immer kleinere, gegenläufig schwingende Abschnitte, die Eigenformen, aufweisen. Für flexible Mechanismen ist die Analyse interessant, da die ersten Eigenformen meist den Freiheitsgraden des Systems entsprechen. Dies ermöglicht eine unkomplizierte Einschätzung der Bewegungsformen.

*Modalanalyse*

## 2.2 Material

Flexible Mechanismen stellen besondere materielle Anforderungen. Für große Verformungen essentiell ist eine hohe Biegefestigkeit  $\sigma_b$  bei geringer Steifigkeit  $E$  in Biegerichtung. Über das Verhältnis der beiden Größen lassen sich verschiedene Materialien vergleichen. In etwa ab einem Verhältnis größer 10 ist das Material für häufig wiederholte Biegungen qualifiziert.<sup>16</sup>

*Grundsätzliche  
Anforderungen  
und Kennzahlen*

<sup>14</sup>Xianming Zhang: Topology optimization of compliant mechanisms, eng, unter Mitarb. v. Benliang Zhu, Zhang, Xianming (VerfasserIn) Zhu, Benliang (MitwirkendeR) Zhang, Xianming (VerfasserIn) Zhu, Benliang (MitwirkendeR), Singapore 2018, URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5379792>, S. 7.

<sup>15</sup>Søren Linnet Gjelstrup: Was ist Modalanalyse: Der ultimative Leitfaden, hrsg. v. DEWEsoft, 2021, URL: <https://dewesoft.com/de/blog/was-ist-modalanalyse#wie-wird-ein-modaltest-durchgefuehrt> (besucht am 24.06.2023 09:01).

<sup>16</sup>Julian Lienhard: Bending-active structures. Form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein. Zugl.: Stuttgart, Univ.,

Eine weitere Kenngröße aus den beiden Eigenschaften ist die Hälfte der quadrierten Biegefestigkeit geteilt durch das E-Modul. Diese beschreibt die Energie, die pro Volumeneinheit Material ohne bleibende Deformation ertragen werden kann<sup>17</sup> und zeigt damit, wie filigran Mechanismen bei gleicher Tragkraft konstruiert sein können. Im Folgenden wird diese als energetische Dichte bezeichnet. Beide Kennwerte sind für verschiedene Materialien in Tabelle 2.1 dargestellt.

**Tabelle 2.1:** Kennwerte aus Biegefestigkeit und E-Modul in Biegerichtung von Metallen und Kunststoffen,<sup>a</sup> Kompositmaterial,<sup>b</sup> Massivhölzern<sup>c</sup> und Bambus.<sup>d</sup>

Material	E /GPa	$\sigma_b$ /MPa	$(\sigma_b/E)$ X 1000	$(0,5 \times (\sigma_b^2/E))$ X 0,001
Aluminium (110 gelüht)	71,7	34	0,48	8,1
Aluminium (7075 wärmebeh.)	71,7	503	7,0	1800
Titan (Ti-13 wärmebehandelt)	114	1170	10	6000
Polyethylen (HDPE)	1,4	28	20	280
Propylene	1,4	34	25	410
GFK (CRFP-HAT)	165	2800	17	23760
Esche	13	130	8,1	424
Bambus	20	250	12,5	1562
Fichte	11	95	7,3	290

<sup>a</sup>Entnommen aus Larry L. Howell/Spencer P. Magleby/Brian M. Olsen (Hrsg.): Handbook of compliant mechanisms, eng, Howell, Larry L. (Hrsg.) Magleby, Spencer P. (Hrsg.) Olsen, Brian M. (Hrsg.), Chichester 2013, S. 12.

<sup>b</sup>Entnommen aus Julian Lienhard: Bending-active structures. Form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014, eng, Bd. 36 (Forschungsberichte aus dem Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart), Stuttgart 2014, S. 28.

<sup>c</sup>Entnommen aus Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): Kennwerte von Holzarten, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003, S. 12.

<sup>d</sup>Entnommen aus Evelin Rottke: Entwerfen mit Bambus. Mechanische Eigenschaften von Bambus, 2.07.2018, URL: <https://bambus.rwth-aachen.de/de/Referate/mecheigBambus/> (besucht am 08.06.2023 13:44), S. 12.

Hervorragend geeignet sind neben speziellen Stählen damit Kunststoffe, die jedoch durch ihre geringere energetische Dichte voluminöser verbaut werden müssen. Die beiden Materialgruppen finden sich in den meisten technischen

Diss., 2014, eng, Bd. 36 (Forschungsberichte aus dem Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart), Stuttgart 2014, S. 31.

<sup>17</sup>Howell/Magleby/Olsen (Hrsg.) (wie Anm. 5), S. 11.

Anwendungen. Wesentlich verstärkt werden die Kunststoffe durch Zugabe von Glas-, Kevlar- oder Carbonfasern. Die leistungsfähigen Kompositmaterialien werden zum Beispiel flexibel in Fassaden verbaut.<sup>18</sup> Ebenfalls geeignet und mit einigen technischen Materialien vergleichbar ist Bambus. Massivhölzer zeigen sich nur bedingt geeignet, was jedoch seltener beanspruchte Anwendungen nicht ausschließt. In Kapitel 5 wird deshalb diskutiert, inwiefern die geringere Festigkeit durch den höheren Energiebedarf und die Recyclingprobleme der künstlichen Komposite aufgewogen wird.

Neben der dargestellten statischen Eignung ist bei anhaltenden wechselnden Belastungen das Dauerfestigkeits- Versagens- und Kriechverhalten relevant. Für Holzwerkstoffe wird die prinzipielle Eignung dargestellt. Rigorose Analysen und Einzelnachweise wären erforderlich, um Aussagen zur Eignung für konkrete Anwendungen zu treffen.

*Natürliche Kompositmaterialien*

Die Anisotropie des Holzes erfordert es, für alle Kennwerte die Ausrichtung des Werkstoffes zu beachten. Im Folgenden werden stets längliche, biegebeanspruchte Probekörper angenommen, deren lange Seite axial dem Faserverlauf folgt. Herausfordernd sind die natürlichen Werkstoffe zudem durch ihre inhärente Inhomogenität. Im Gegensatz zur definierten Anordnung der Glasfasern im Epoxidharz variiert diese bei Hölzern zwischen verschiedenen Wachstumsbereichen und von Probe zu Probe. Verschiedene Holzfehler streuen die Qualität zusätzlich. Obwohl Bambus den Gräsern zuzuordnen ist,<sup>19</sup> wird es hier gemeinsam mit verschiedenen Hölzern erörtert.

Bei wechselnd beanspruchten Konstruktionen sinken die maximal erträglichen Spannungen mit der Anzahl der Wechselspiele. Abhängig von dieser Anzahl ergibt sich deshalb die reduzierte Ermüdungsfestigkeit. Sollen mehr als tausend einzelne Belastungsvorgänge stattfinden, spricht man von High-Cycle Fatigue.<sup>20</sup> Von Dauerfestigkeit wird gesprochen, wenn eine unbegrenzte Anzahl von Wechselspielen ertragen wird.

*Ermüdungsverhalten*

---

<sup>18</sup>Körner (wie Anm. 2), S. 15.

<sup>19</sup>Evelin Rottke: Entwerfen mit Bambus. Mechanische Eigenschaften von Bambus, 2.07.2018, URL: <https://bambus.rwth-aachen.de/de/Referate/mecheigBambus/> (besucht am 08.06.2023 13:44).

<sup>20</sup>Howell (wie Anm. 5), S. 42.

Holzwerkstoffe weisen in Versuchen durch ihre inhomogene Struktur zwar stärkere Streuungen auf, dennoch lässt sich ihre Biegeweichfestigkeit ähnlich der von Stahl abschätzen. Im Vergleich mehrerer Studien ergab sich für Eschenholz, dass durchschnittlich 10.000 Lastwechsel ertragen werden, wenn die Belastung 40 % der Biegefestigkeit beträgt.<sup>21</sup> Übersetzt in die zyklisch zulässige Dehnung lässt sich Eschenholz demnach um 40 % der maximalen Biegung verformen, ohne vorzeitig zu versagen. Zu Bambus ließen sich keine genauen Werte finden. Da jedoch Bambus durch seine vorteilhafte Mikrostruktur als Vorbild dient, um synthetische Kompositwerkstoffe dauerfester zu konzipieren, wird von einer Eignung ausgegangen.

Die Ermüdung des Werkstoffes muss demnach auch bei Hölzern erwogen werden. Der größte Einfluss auf die Dauerfestigkeit ist die Homogenität des Holzes. Kerben, Astlöcher, Harzgallen, sowie schräg zur Längsachse verlaufende Fasern verringern die Dauerfestigkeit erheblich.<sup>22</sup> Großer Wert muss daher auf die Vermeidung von Holzfehlern gelegt werden.

Holz verformt sich nicht rein elastisch, sondern zusätzlich plastisch bzw. viskos. Dadurch ergibt sich eine Zeitabhängigkeit, die auch als Kriechverhalten bezeichnet wird.<sup>23</sup> Verbleibt es längere Zeit im verformten Zustand, werden die Materialspannungen allmählich abgebaut. Wird die verformende Kraft aufgehoben, erfolgt keine vollständige Rückstellung in den Ausgangszustand. Bei Mechanismen mit längeren Haltezeiten muss dies ggf. berücksichtigt werden. So werden Sportbögen beispielsweise im ungebrauchten Zustand stets entspannt.

*Kriech- und Versagensverhalten*

Erwähnenswert ist zudem das Versagensverhalten verschiedener Hölzer. In tragenden Konstruktionen ist für die Nutzungssicherheit oft erheblich, ob Werkstoffe tendenziell spröde oder duktil brechen. Duktile Werkstoffe versagen, indem sie sich zunächst plastisch verformen. Der Mechanismus mag dann zwar unbrauchbar sein, das Versagen tritt jedoch nicht schlagartig ein. Spröde Brüche,

---

<sup>21</sup>H. Kreuzinger/B. Mohr: Holz und Holzverbindungen unter nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen, hrsg. v. Technische Universität München, Institut für Tragwerksbau Fachgebiet Holzbau, 1994, S. 44.

<sup>22</sup>Ebd., S. 27.

<sup>23</sup>Franz Kollmann: Rheologie und Strukturfestigkeit von Holz, in: HOLZ als Roh- und Werkstoff 1961.3 (1961), S. 73–80, S. 77.

wie sie bei Hölzern vermehrt auftreten, passieren dagegen unangekündigt und resultieren oft in scharfkantigen Bruchstücken. Auch hier sei Bambus positiv erwähnt, da Überbelastungen sofort in Faserrichtung abgelenkt werden und die Struktur damit hörbar und allmählicher versagt. Zudem sind die resultierenden Bruchkanten weniger scharf und folglich sicherer.<sup>24</sup>

## 2.3 Technologie

Technische FM profitieren stark von ihrer Kompatibilität mit schnellen und autonomen Herstellungsverfahren wie Injection Moulding, das vor allem größere Serien günstig herstellt, oder 3D-Druckverfahren, die auch differenzierte Formen einfach umsetzen können.

Inbesondere durch den relevanten Faserverlauf sind Holzwerkstoffe dem gegenüber auf subtraktive Bearbeitungsmethoden beschränkt. Am effektivsten herstellbar sind deswegen Halbzeuge mit einfachen Profilen wie Kanthölzer und Flächenwaren. Deren Eignung für flexible Konstruktionen wurde in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt.

Herausfordernd kann die Gewährleistung der benötigten Materialqualitäten sein. In klassischen Herstellungsverfahren kann die manufaktorielle Einzelauswahl und individuelle Bearbeitung notwendig sein. Eine gewisse Skalierbarkeit der Herstellungsprozesse ist dennoch durch qualitativ hochwertiges Halbzeug denkbar. Vor ähnliche Herausforderungen stellt die Fertigung spezieller Verbindungen. Ein klassisches Beispiel wird mit dem Stuhl Superleggera in Kapitel 3.1 ab Seite 16 beschrieben.

Einige der aufwändigen Arbeitsschritte sind jedoch mittlerweile weitestgehend autonom umsetzbar. So kann beispielsweise Holzqualität optisch erfasst und sortiert werden. Ebenso ist die rechnergestützte Fabrikation durch CNC-Fräsen, Wasserstrahlschneiden und ähnliche Verfahren mittlerweile Produktionsstandard in großen Betrieben.<sup>25</sup>

*Digitale Sortier-  
und Fertigungs-  
methoden*

---

<sup>24</sup>Rottke (wie Anm. 19).

<sup>25</sup>Hans B. Kief/Helmut A. Roschiwal/Karsten Schwarz (Hrsg.): CNC-Handbuch. CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Energieeffi-

Durch die Verknüpfung dieser Technologien lässt sich die individuelle Holzstruktur sogar gezielt verwenden. So wurden in einem Projekt der Digital Structures Research Group des MIT die formoptimierten Faserverläufe von Astgabeln genutzt. In Stabtragwerken sollten diese die einzelnen Balken in Knotenpunkten verbinden. Dazu wurden die typischen Abfälle aus der Holzproduktion eingescannt und mit ihrer individuellen Ausrichtung katalogisiert. Automatisiert wurden den Knoten des Tragwerkes Astgabeln aus dem Inventar zugeordnet und individuelle CNC-Bearbeitungsschritte abgeleitet. Auf diese Weise entstanden global und hinsichtlich der Materialstruktur optimierte Tragwerke.<sup>26</sup> Der Prozess ist zwar bisher experimentell, zeigt jedoch deutlich die Potentiale einer Verzahnung von generativen Formen, robotischer Fertigung und natürlichen Materialien.

---

zienz, Werkzeuge, Industrie 4.0, Fertigungstechnik, Richtlinien, Normen, Simulation, Fachwortverzeichnis, ger, 31., überarbeitete Auflage (Hanser eLibrary), Kief, Hans B. (HerausgeberIn) Roschiwal, Helmut A. (HerausgeberIn) Schwarz, Karsten (HerausgeberIn) Kief, Hans B. (HerausgeberIn) Roschiwal, Helmut A. (HerausgeberIn) Schwarz, Karsten (HerausgeberIn), München 2020, URL: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446465244>, S. 33.

<sup>26</sup>Rima Sabina Aouf: MIT engineers build load-bearing structures using tree forks instead of steel joints, hrsg. v. Dezeen, 2022, URL: <https://www.dezeen.com/2022/05/05/tree-forks-mit-digital-structures-architecture/> (besucht am 24.06.2023 19:37).

## 3 Flexible Objekte

Die in Kapitel 2 dargestellten materiellen und funktionalen Möglichkeiten und Herausforderungen flexibler Mechanismen sollen nachfolgend an Produktbeispielen aufgearbeitet werden.

Als größte Schwierigkeit wurde der Entwurf komplexer, flexibler Systeme identifiziert. Sie resultiert aus den gegenseitigen Abhängigkeiten von Komponenten, sowie aus der anspruchsvolleren Mathematik hinter den großen Verformungen. Daraus ergibt sich, dass flexible Objekte oft nur einfache Funktionen erfüllen. Einteilige Plastikscharniere werden beispielsweise massenhaft eingesetzt und zeugen so von ihrer günstigen Herstellung.

*Komplexität und  
effiziente  
Produktion*

### 3.1 Nachgiebiger Gestellbau

Abseits dieser einfachen Beispiele existieren jedoch auch komplexe Anwendungen, die meist auf handwerklichem Können und langjähriger Erfahrung beruhen. Pfeil und Bogen stellen beispielsweise energiespeichernd und -umwandelnd typische flexible Mechanismen dar. Konstruierte Flexibilität findet sich auch oft in Gestellkonstruktionen. So etwa bei Freischwingern, die beim Hineinsetzen federn, oder Lenkschlitten, deren Gestelle zum Steuern verformt werden.

Eine Ikone modernen Designs und ein Meisterwerk in der angerissenen Kategorie des Gestellbaus ist Gio Pontis Superleggera.<sup>1</sup> Die 1957 für Cassina entworfene „Superleichte“ stellt handwerkliches Können und Leichtbau unter Beweis: 1700 Gramm wiegen die geflochtene Sitzfläche und das Gestell aus dünnen Eschenleisten.<sup>2</sup> Wie Abbildung 3.1 zeigt, wird deren orthogonale Anord-

*Nachgiebige  
Stabilität im Su-  
perleggera*

<sup>1</sup>Gio Ponti: Giò Ponti: a world, ita, Milano und London 2003, S. 57.

<sup>2</sup>Stuhl 699 Superleggera von Gio Ponti | Cassina, URL: <https://www.cassina.com/de/de/>



**Abb. 3.1:** Superleggera von Gio Ponti für Cassina<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Bildquelle: Cassina Superleggera, URL: [https://www.cassina.com/de/de/products/superleggera.html?cas\\_rivestimento=Y-Y244#699-superleggera\\_26322](https://www.cassina.com/de/de/products/superleggera.html?cas_rivestimento=Y-Y244#699-superleggera_26322) (besucht am 02.06.2023 10:57).

nung nur durch die nach hinten knickende Rückenlehne unterbrochen. Markant sind zudem die Profile der Beine, die von der Mitte aus zu den Auflagepunkten, sowie zur Sitzfläche und Lehne hin dreieckig verjüngt wurden, um Gewicht zu sparen.

Dass der Stuhl trotzdem stabil ist, wurde von Ponti und Cesare Cassina gerne durch in die Luft und aus hohen Fenstern geworfene Exemplare demonstriert.<sup>3</sup> Wie ein Ball soll der Stuhl federnd aufgekommen sein. Ermöglicht wurde die leichte Stabilität durch die kompakte Konstruktion und ausgeklügelte Verbindungen. Gerillte Zapfen vergrößern die Klebefläche und gewährleisten die feste Verbindung der flexiblen Stäbe. Unter Belastung ist das Gestell so in der Lage, Spannungen im gesamten Gerüst zu verteilen und abzubauen.

Ponti selbst bezeichnete den Stuhl als „echt, natürlich und einfach“, sowie an gleicher Stelle als „Stuhl ohne Adjektive“.<sup>4</sup> Obwohl der Stuhl statisch wahrhaftig minimalistisch ist, erscheint diese Bezeichnung angesichts der differenzierten Form bemerkenswert. Hinter der optimalen Form waren Materialeffizienz und

---

products/superleggera.html?#699-superleggera\_26511 (besucht am 31.05.2023 18:11).

<sup>3</sup>Gio Ponti/Stefano Casciani: Gio Ponti, eng;fre;ger;ita, hrsg. v. Salvatore Licitra/Karl Kolbitz, Famous First edition, Ponti, Gio (ArchitektIn) Licitra, Salvatore (HerausgeberIn) Kolbitz, Karl (HerausgeberIn) Casciani, Stefano (VerfasserIn von ergänzendem Text), Cologne 2021, S. 300.

<sup>4</sup>Ebd., S. 300.

eine handwerklich aufwändige Fertigung offensichtlich Nebensache. Es waren wohl die damit verbundenen Kosten, die diesen Designklassiker davon abhielten, zum anvisierten Massenprodukt zu werden<sup>5</sup>.

Funktionieren effiziente Holzstrukturen deshalb nur zum Selbstzweck und in den Händen vermöglicher Liebhaber? Der Preis von Cassinas Ikonen liegt wohl kaum an einem Mangel günstiger Herstellungsalternativen. Große Teile der handwerklichen Produktion lassen sich mittlerweile wie in Kapitel 2.3 beschrieben hoch technologisch umsetzen und damit günstig skalieren. Ohne den Wert handwerklicher Arbeit oder herausragender Gestaltung zu mindern, könnte die materielle Effizienz der Meisterstücke dadurch breiter angewendet werden. Diese Möglichkeit wird umso relevanter, da die in Kapitel 2.1 dargestellten Methoden den Entwurf komplexer Bewegungs- und Aussteifungsfunktionen ermöglichen.

*Technologie,  
Handwerk und  
Holz*

## 3.2 Biegsame Produkte

Wie Technologie, Handwerk und Design ineinandergreifen können, zeigt beispielhaft ein Workshop des MIT Digital Structures Lab. In ihm wurden aus dünnen Multiplexplatten Leuchten hergestellt, die sich unter ihrem Eigengewicht verbiegen. Kern der Untersuchung war die parallele analytische und experimentelle Untersuchung dieser biegeaktiven Struktur. Die Einflüsse von Geometrieänderungen auf die gebogene Form konnten so prognostiziert und angepasst werden, bevor eine Umsetzung durch digitale Fabrikationsmethoden wie CNC-Fräsen oder Lasern das physische Objekt hervorbrachten.<sup>6</sup>

Dass diese Methode der Formgebung hinter technischen Demonstrationen mehr Potential birgt, zeigt die Lampe AYNÖ des Industriedesigners Stefan Dietz in Abbildung 3.2. Sie stellt den ersten Neuentwurf für den Hersteller Midgaard seit 70 Jahren dar, der sich mit ausrichtbaren Leuchten voller technischer Raffinesse

*Lampe AYNÖ -  
Nachgiebige Reduktion und versteckte Komplexität*

<sup>5</sup>Alfred Teischinger (wie Anm. 3), S. 24.

<sup>6</sup>Pierre Cuvilliers/Paul Mayencourt/Caitlin Mueller: The Arc Lamp workshop at AAG 2018: active bending and digital fabrication, hrsg. v. Digital Structures Lab, MIT, 2018, URL: <http://digitalstructures.mit.edu/page/blog#the-arc-lamp-workshop-at-aag-2018-active-bending-and-digital-fabrication> (besucht am 14. 06. 2023 20:11).

und Eleganz einen Namen gemacht hat.<sup>7</sup>



**Abb. 3.2:** AYNO von Stefan Dietz für Midgaard<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Bildquelle: Midgard Licht: AYNO XL | steh, URL: <https://midgard.com/de/pages/ayno-xl-floor> (besucht am 02.06.2023 14:25).

Die Attribute treffen auch auf AYNO zu, obwohl sie auf klassische Bauteile wie Federzüge oder ausgeklügelte Drehgelenke verzichtet. Stattdessen besteht die Lampe aus einem dünnen Stahlrohr auf einem Sockel, in das ein flexibler Fiberglasstab mit angeschlossenem kegelförmigen Lampenschirm eingesteckt wird. Positioniert wird die Leuchte, indem der Stab über zwei verschiebbare Kunststoffringe und das verbundene Textilkabel gespannt wird. Feinjustierung erfolgt über den schwenkbaren Schirm. Durch die weitläufige Biegung ergibt sich ein großer Verstellraum, der dem von Deckenflutern und positionierbaren Schreibtischlampen entspricht. Alternativ ist die Leuchte auch für Tische, sowie zur Anbringung an der Wand erhältlich.

Die Reduktion auf wenige Einzelteile und die drei Materialien Stahl, Kunststoff und Fiberglas bringt verschiedene Vorteile. Zum einen sorgt sie für eine sehr schlichte, elegante Erscheinung, die sich auch in der Bedienung fortsetzt. Durch die Leichtigkeit der Konstruktion ist des Weiteren die Anbringung auch an schwierigen Untergründen möglich. Lose Steckverbindungen ermöglichen letztlich einen werkzeuglosen Aufbau und in Folge kompakten Versand, eigen-

---

<sup>7</sup>Anna Moldenhauer: Midgard at imm cologne 2020: A new start with the Diez Office | STYLEPARK, en;en, hrsg. v. Stylepark, 13.1.2020, URL: <https://www.stylepark.com/en/news/midgard-diez-office-imm-cologne-2020-ayno> (besucht am 30.05.2023 15:30).

ständige Reparatur, sowie die sortenreine Entsorgung. Durch die damit starke Kompatibilität mit Kriterien der Kreislaufwirtschaft wurde die Leuchte mit dem Deutschen Nachhaltigkeitspreis Design 2021 für ihre „zeitgemäße Form, Funktion und Nachhaltigkeit“ ausgezeichnet.<sup>8</sup>

Trotz der ausgesprochen einfachen Handhabung ist die zugrundeliegende Konstruktion komplexer, als auf den ersten Blick ersichtlich. Äußerlich schlicht sind vor allem im einteiligen Spritzguss der Kunststoffringe viele funktionale Details verborgen. Diese wurden von Diez als „leicht verständlich“, aber in der Entwicklung „sehr komplex“ beschrieben.<sup>9</sup> Auch hierin spiegeln sich die Potentiale und Herausforderungen integrierter Funktionen anschaulich wider. Dennoch zeigt die Produktion AYNOs durch Midgaard, dass flexible Mechanismen auch als seriöse Produkte funktionieren können.

### 3.3 Vorzüge instabiler Möbel



**Abb. 3.3:** ES von Konstantin Gricic für Moormann<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Bildquelle: Moormann (Hrsg.): ES Regal Moormann, URL: [https://www.moormann.de/media/catalog/product/cache/e0b68cf20dc042ab5bfd7cd1c8adca8/1/0/1041000V\\_header\\_1.jpg](https://www.moormann.de/media/catalog/product/cache/e0b68cf20dc042ab5bfd7cd1c8adca8/1/0/1041000V_header_1.jpg) (besucht am 02.06.2023 17:23).

<sup>8</sup>Deutscher Nachhaltigkeitspreis: Sieger | Deutscher Nachhaltigkeitspreis, URL: <https://www.nachhaltigkeitspreis.de/design/preistraeger-design/2020/sieger/> (besucht am 05.06.2023 16:24).

<sup>9</sup>Hannah Freund: Der erste Entwurf nach 70 Jahren. Ein Interview über Ayno von Stefan Diez für Midgard, hrsg. v. Archiproducts, 2021, URL: [https://www.archiproducts.com/de/news/der-erste-entwurf-nach-70-jahren-ein-interview-uber-ayno-von-stefan-diez-fur-midgard\\_80646](https://www.archiproducts.com/de/news/der-erste-entwurf-nach-70-jahren-ein-interview-uber-ayno-von-stefan-diez-fur-midgard_80646) (besucht am 30.05.2023 10:34).

Die spannenden Konsequenzen reduzierter Festigkeit zeigt auch das Regal ES von Konstantin Gricic in Abbildung 3.3. Es verfügt zwar über keinerlei flexible Komponenten, zeigt jedoch in der Einfachheit seiner losen Passungen ein den flexiblen Mechanismen ähnliches Verhalten. Parallele vertikale Holzrundstäbe tragen über aufgeklebte Sicherungsringe durchbohrte Holzplatten. Die über großen, aber genau definierten Bohrungen ermöglichen eine Neigung des Regals bei paralleler Verschiebung der Böden gegeneinander.<sup>10</sup>

*Regal ES  
fehlende Festigkeit als Funktion*

Üblicherweise wird von Lagermöglichkeiten Starrheit erwartet, denn abgestellte Dinge sollen sicher verwahrt und an gleicher Stelle wieder aufgreifbar sein. Trotz seiner Standfestigkeit und den stets parallelen Böden bricht das Regal ES mit diesen Erwartungen. Beweglichkeit wird, dort wo sie toleriert ist, zur Interaktionsmöglichkeit und schafft herausfordernd Charakter. Dabei geschieht dies nicht durch zusätzlichen Aufwand, sondern durch eine Vereinfachung der Struktur.

Angesichts so großer Notwendigkeit zur Reduktion, sind Objekte wie ES vielversprechend. Möbel, die trotz erheblicher Reduktion nicht asketisch einzuschränken, sondern die Nutzung im Gegenteil zu bereichern, werfen die Frage auf, hinter welchen starren Objekten sich Charakter verbirgt.

---

<sup>10</sup>Es | Nils Holger Moormann Möbel GmbH, URL: <https://www.moormann.de/de/es.html> (besucht am 02.06.2023 17:12).



ohne Anwendungsbezug in ihrer Vielfalt zu untersuchen. Der Fokus lag auf passiven Mechanismen, die unkompliziert und handwerklich aus zugänglichen Materialien hergestellt werden können.

Angesichts der enormen Bandbreite verschiedener Materialien, Funktionstypen und Anwendungsmöglichkeiten bot sich die explorative Herangehensweise an. Im Gegensatz zu streng analytischen Untersuchungen basieren die Erkenntnisse folglich auf dem stetig verfeinerten Gefühl für die Belastbarkeit und Eignung verschiedener Materialien und Verbindungen. Die freie Suche nach gestalterischen und funktionalen Potenzialen stand stets in Verbindung mit kritischer Reflektion des Entwurfs- und Fertigungsaufwandes. In Kombination mit den Grundlagen des vorangegangenen Abschnittes, sowie durch die angehängte Dokumentation, wird die Arbeit methodisch dem Research durch Design zugeordnet.<sup>1</sup>

Auf diese Weise wurde eine Vielfalt von Mechanismen, wie sie in Abbildung 4.1 zu sehen ist, entworfen und analysiert. Repräsentiert sind sowohl kontinuierlich verformbare Mechanismen als auch solche mit diskreten Elementen. Unterteilbar sind parallele und seriell kombinierte Einzelelemente, sowie Mechanismen verschiedener Stabilitäten wie bistabile Schalter. Die teils definierten, teils zufälligen Freiheitsgrade resultieren in verschiedensten Bewegungsfunktionen.

Neben Massivholz in stab- und flächigen Formen wurden verschiedene Furnierstärken und Sperrhölzer unterschiedlicher Ausrichtungen untersucht. Als wichtigste Materialien taten sich dabei Eschen- und Nussholz, Buchenfurnier, sowie verholzter Bambus hervor. In kleinen Abmessungen ebenfalls funktional waren Origami-inspirierte Papiergelenke, auf die jedoch nicht genauer eingegangen wird. Herausfordernd war in der Fertigung insbesondere die Verbindung der flexiblen Elemente. Einfache Presspassungen arbeiteten sich meist durch die Beweglichkeit frei, während funktionale Klebeverbindungen mit Montageaufwand und zusätzlichen Verbindungsteilen einhergingen. Verschraubte Klemmungen stellen eine in diesem Maßstab ungeprüfte Variante mit Potential dar.

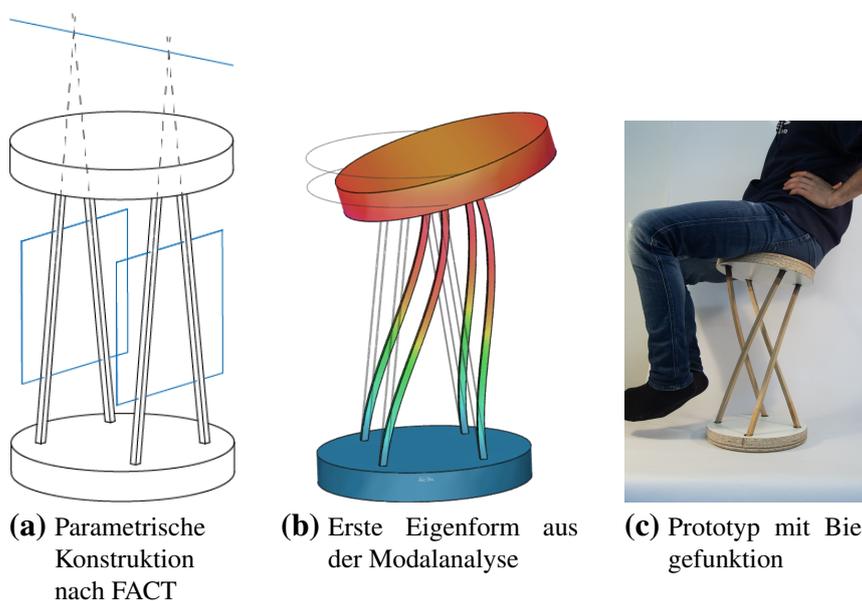
---

<sup>1</sup>Bella Martin/Bruce Hanington: Designmethoden. 100 Recherchemethoden und Analysetechniken für erfolgreiche Gestaltung, ger, München 2013, S. 146.

Als wesentlich geht aus den Experimenten das Verhältnis der Bauteilgröße zur Holzstruktur hervor. Der in Kapitel 2.2 beschriebene Einfluss des inhomogenen Materials nimmt bei abnehmenden Dimensionen zu und verkompliziert den Einsatz kleiner Biegeelemente. Darin liegt ein wesentlicher Grund für den folgenden Übergang in größere Dimensionen hinsichtlich Geometrie und einwirkenden Kräften.

Die experimentelle Herangehensweise lieferte durch Variation und Zufälle eine große Anzahl unterschiedlicher Mechanismen. Deren Wirkprinzipien konnten einfacher analysiert werden als beispielsweise komplexere biologische Konstruktionen. Um verschiedene Topologien und Funktionen zu finden, war die Methode demnach effektiv. Aufwändig ist dagegen die akribische Variation von Parametern, die die Funktion beeinflussen. Dafür wäre die Arbeit mit digitalen parametrischen Modellen in Verknüpfung mit Berechnungs- und Analysetools sinnvoller.

## 4.2 Biegsame Hocker



**Abb. 4.2:** Hockerentwicklung

Bewegtes Sitzen kombiniert Stabilität und Flexibilität unmittelbar. Aufgrund der passenden Minimaldimension von Sitzmöbeln und ihrer aktiven Nutzung

wurde aus flexiblen Mechanismen eine Serie beweglicher Hocker entwickelt. Durch ihre logisch konstruktive Herangehensweise ohne aufwändige Berechnungen wurde die in Kapitel 2.1 eingeführte FACT Methode zur Hilfe gezogen. Zur Erfüllung verschiedener Bewegungsfunktionen wurden dafür dünne Stabelemente angeordnet.

In Abbildung 4.2 wird beispielhaft die Entwicklung eines Modells mit zwei Freiheitsgraden demonstriert. 4.2 (a) zeigt die Entwicklung des translatorischen Freiheitsgrades über die Positionierung aller Streben auf parallelen Ebenen. Der rotatorische Freiheitsgrad resultiert aus der gemeinsamen Schnittgeraden aller Stabelemente. In 4.2 (b) ist die Rotationsmöglichkeit über die zweite Eigenform des Systems aus einer Modalanalyse demonstriert. 4.2 (c) zeigt die gleiche Bewegungsform an einem Prototypen.



**Abb. 4.3:** Hockerserie Freiheitsgrade

Die in Abbildung 4.3 dargestellte, entwickelte Serie umfasst fünf Hocker. Fuß- und Sitzfläche bilden zwei starke, kreisrunde Korkscheiben. Zwischen ihnen befindet sich eine individuelle Anordnung aus vier Escheleisten, die passgenau in gefrästen runden Holzsockeln aufgenommen wird. Diese sind in die Korkplatten eingelassen und mit ihnen verklebt. Die beidseitige Einspannung der Leisten ermöglicht eine Dicke von nur 12 Millimetern, die im Kontrast zu den Korkscheiben und der üblichen Dicke von Stuhlbeinen stehen.

Es ergibt sich eine verspielte Gruppe beidseitig besitzbarer Objekte, die leicht beweglich und richtungslos arrangierbar sind. Jedes von ihnen birgt jedoch in seiner definierten Bewegungsmöglichkeit einen individuellen Charakter.

Trotz des Bedarfs an bewegten, ergonomischen Sitzmöbeln<sup>2</sup> ist die Absicht der Arbeit keine ergonomische. Anstelle der Optimierung von Arbeitsplätzen steht die spielerische Erkundung von Bewegung. Sitzen auf bewegten Untergründen ist zwangsläufig aktiv, und regt damit gleichzeitig die Auseinandersetzung mit dem eigenen Körper, sowie mit dem besessenen Objekt an.

Aus den verschiedenen Hockern mit jeweils komplexen Bewegungsfunktionen ergeben sich vielfältige Interaktionsoptionen. Die Wirkung dieser gestalteten Parameter wurde in Prototypen beobachtet. Dabei war anfangs stets Unsicherheit ersichtlich. Interesse weckten die Strukturen, unaufgefordertes Sitzen geschah jedoch selten und dann meist zögerlich und statisch. In der kurzfristigen Nutzung ließen sich die meisten Probanden allmählich auf die Beweglichkeit ein. Momente des Erschreckens waren dennoch ersichtlich, sobald sie sich der flexiblen Struktur erinnerten. Bewegung, noch dazu in einem üblicherweise starren Material scheint ungewohnt zu sein und wurde mit Versagen assoziiert.

*Erfahrungen aus dem Umgang*

Dem gegenüber stand nur die experimentelle Nutzung. Durch physische Interaktion wurde die individuelle Vorstellung von Stabilität auf die Erfahrung angepasst. Dies zeigte sich in einer zunehmend intensiven Nutzung und damit einhergehendem Vertrauen in die Objekte. In einem Vertriebskonzept wäre die Initiation dieser Erfahrung wesentlich. Auch um dem Gewicht der Nutzenden gerecht zu werden, bräuchte es einen erkenntlichen Gradienten in der Stabilität unterschiedlicher Modelle. Unterschiede könnten hier nicht nur durch die Struktur, sondern auch über Materialstärken geschaffen werden.

---

<sup>2</sup>Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.): Sitzlust statt Sitzfrust. Sitzen bei der Arbeit und anderswo, ger, unter Mitarb. v. Wolfgang Dicke, 2., unveränd. Aufl., Dicke, Wolfgang (Red.), Dortmund 2004, S. 21.

## 5 Diskussion

Eingangs wurde die These aufgestellt, hölzerne flexible Mechanismen seien technisch und gestalterisch für eine breitere Anwendung im Möbelbereich geeignet. Auf Grundlage der technischen Recherche in Kapitel 2, dem Bezug auf Produkte in Kapitel 3 sowie den in Kapitel 4 beschriebenen praktischen Erfahrungen soll dies diskutiert werden.

Wie in Kapitel 2.1 dargestellt, sind flexible Mechanismen in der Lage, abgesehen von kontinuierlichen Bewegungen beinahe beliebige Bewegungsfunktionen zu realisieren. Dabei sind sie meist leichter, bestehen aus weniger Teilen und sind wartungsärmer. Möbel bestehen in der Regel aus starren, unbewegten Komponenten. Dennoch existieren etwa bei Scharnieren und Auszügen eine Vielzahl beweglicher Funktionen, die aktuell meist über komplexe Beschläge realisiert werden. Hier ist die Implementierung flexibler Lösungen sowohl in kleinen Elementen, als auch in größeren Strukturen denkbar.

*Bedarf*

Darüber hinaus wächst der Bedarf nach Flexibilität in vielfältigen Hinsichten. Einrichtungsgegenstände sollen durch Mietmodelle oder häufige Umzüge an verschiedene Umgebungen und Menschen anpassbar und vielfältig nutzbar sein. Nicht wenige dieser Anforderungen gehen mit mechanischer Beweglichkeit einher. Ähnlich der viel beachteten Modularität könnte nachgiebige Flexibilität deshalb in Zukunft relevanter werden. Neben ihrer Leistungsfähigkeit besitzen die integrierten Strukturen ein ästhetisches Potential, dass in ihrer „nicht offensichtlichen, aber plausiblen [Funktion]“ begründet liegen könnte.<sup>1</sup> Wie die ab Seite 18 analysierte Leuchte Ayno, kommunizieren sie ihre Funktion transparent und reduziert aus sich heraus.

---

<sup>1</sup>Körner (wie Anm. 2), S. 1.

Neben der Eignung flexibler Mechanismen für den Möbelbau galt es, die Eignung des Materials Holz zu bewerten. Motiviert durch die Ökologie des Materials wurden verschiedene technische Kriterien aufgestellt. Im Vergleich mit Kunststoffen wie HDPE oder Metallen zeigte sich die ausreichende Festigkeit und Biegsamkeit insbesondere bei Bambus. Massivhölzer sind zwar prinzipiell ebenfalls geeignet, zeigen jedoch frühzeitiges Versagen durch Materialermüdung. Problematisch ist dagegen die Inhomogenität der natürlichen Materialien. Diese kann in Form von Holzfehlern in jeder Größenordnung herausfordernd sein und erfordert intensive Werkstoffprüfung. Besonders wirkt sie sich bei Bauteildicken von wenigen Jahrringen aus. Wie bei hölzernen Sportbögen muss in diesen Dimensionen der individuelle Faserverlauf berücksichtigt werden.

Einigermaßen standardisierbare Biegeteile müssen folglich mehrere Wachstumsschichten breit sein und gleichmäßige Faserverläufe aufweisen. Vorteilhaft ist der Einsatz dicht gewachsener Materialien wie Bambus. Eine andere Herangehensweise ist die Verleimung gleichmäßiger Furnierwerkstoffe zu Halbzeugen, wie sie bei der Herstellung von Lattenrosten erfolgt. Insgesamt erzeugt diese Limitation gemeinsam mit der geringen energetischen Dichte eine Untergrenze in den verwendbaren Durchmessern, die deutlich über technischen flexiblen Anwendungen liegen. Dadurch vergrößern sich die Mechanismen und mit ihnen die Widerstände und Kräfte.

Sind große Verformungen gewünscht, ergibt sich zudem eine Obergrenze der Bauteile. Da bei Biegung die Randschichten stärker beansprucht werden, sinkt bei gleicher Biegefestigkeit und steigender Dicke die mögliche Verformung. Hier hilft vor allem die Länge der Elemente. Die Anwendung im Möbelbereich entspricht damit in etwa dem optimalen Einsatzgebiet der Mechanismen.

Im Produktkontext ist das Ermüdungs- und Versagensverhalten besonders wichtig, wenn der Ausfall nutzende Personen gefährden kann. Dass die Ermüdung prinzipiell abschätzbar ist, wurde in Kapitel 2.2 gezeigt. Einzelne Schwachstellen mit Sicherheit auszuschließen ist jedoch kaum möglich. Deshalb ist die Gewährleistung sicheren Versagens notwendig, was Bambus durch seine Bruchme-

chanik erfüllt.

Holz ist in einfacher Dimensionierung so stark von der jeweiligen Qualität abhängig, dass die Umsetzung intensiver Kontrolle unterliegen muss. Möglich ist die am Stuhl Superleggera ab Seite 16 diskutierte handwerkliche Fertigung. Der Einzelcharakter solcher Produkte resultiert jedoch stets in hohen Preisen. Aktuell ebenfalls aufwändig, dafür jedoch skalierbar, ist die stärker computergestützte Materialauswahl und -bearbeitung. Durch deren Implementation lassen sich zudem auch individuelle Geometrien seriell fertigen. Von einer zunehmenden Rentabilität der Produktionsmethoden ist auszugehen.

*Herausforderungen  
in der  
Herstellung*

Der Entwurf flexibler Mechanismen kann herausfordernd sein. Um den Schwierigkeiten zu begegnen, wurden zahlreiche analytische und generative Tools entwickelt, die die Synthese und Optimierung von Mechanismen ermöglichen. In Kombination mit der zunehmenden Zahl bekannter Mechanismen sinkt die Hemmschwelle zur Implementation stetig. Gerade einfache und weniger präzise Anwendungen wie die in Kapitel 4.2 vorgestellten Hocker lassen sich daraus auch ohne tiefe Fachkenntnisse experimentell entwickeln. An dieser Stelle sei insbesondere auf die Sammlung flexibler Mechanismen in Larry Howells „Handbook of Compliant Mechanisms“, sowie auf die ebenfalls enthaltene FACT-Library von Jonathan Hopkins verwiesen.<sup>2</sup>

Um die Biegekomponenten separat in ihrer Ökologie betrachten zu können, müssen diese einfach trennbar verbaut sein. Die in Kapitel 4.2 vorgestellten Hockerprototypen kommen dieser Anforderung in ihren Klebeverbindungen noch nicht nach. Zwar werden nur organische Materialien verbunden, lösbare Biegeelemente würden jedoch zusätzlich den Transport des Produktes als Flatpack ermöglichen und die Reparatur erleichtern.

*Ökologie*

Sinnvoll ist dennoch der Vergleich verschiedener biegsamer Materialien. Besonders relevant ist bei technischen Materialien ihr energetischer Aufwand zur Bereitstellung, der oft mit der grauen Energie beschrieben wird, sowie ihre Rezyklierbarkeit. Im groben Vergleich der vier Kategorien der Hölzer, Metalle, Kunststoffe und glasfaserverstärkten Kunststoffe (GFK) zeigen sich große Unterschie-

---

<sup>2</sup>Howell/Magleby/Olsen (Hrsg.) (wie Anm. a).

de. Dabei ist wesentlich, die unterschiedliche Leistungsfähigkeit der Materialien, beschrieben mit der energetischen Dichte in Tabelle 2.1, einzubeziehen. Obwohl Sonderstähle wesentlich tragfähiger sind, übersteigt ihr energetischer Aufwand so den von Kunststoffen um eine Größenordnung, die selbst eine weitere Größenordnung über GFK und Hölzern liegen.<sup>3</sup> So vergleichbar die beiden Kompositgruppen damit in ihrer Beschaffung sind, so unterschiedlich ist ihre Entsorgung. Während das Holz einfach kompostierbar ist, kann das Supermaterial GFK, etwa aus der Leuchte AYNÖ, entweder thermisch verwertet oder potentiell zu neuen thermoplastischen Werkstoffen recycelt werden. Da jedoch bisher selbst die thermische Verwertung eine Ausnahme darstellt, ist die Lagerung auf einer Müllhalde wesentlich wahrscheinlicher.<sup>4</sup> Trotz der potentiellen Kreislauffähigkeit technischer Werkstoffe ist ihre Recyclingquote aktuell oft vernachlässigbar. Wenn möglich, sollten Bauteile demnach aus einfacher entsorgbaren Materialien gefertigt werden.

Letztlich bleibt fraglich, ob wir den ungewohnten Mechanismen Vertrauen *Vertrauen* schenken. Biegsamkeit ist in unserer Produktwelt eine versteckte Eigenschaft und wie Kapitel 2.1 herausgestellt, eine mit unterschätzten Qualitäten<sup>5</sup>. Diese nachteilige Ausgangslage wird mit der Verwendung von Holz verstärkt. Steife Holzarten und große Dimensionen mit hohen Sicherheiten stellen die Basis der meisten Produkte dar. Entsprechend verunsichernd ist eine sichtbar verformte Holzstruktur - obwohl man sich jeden Abend einem federnden Lattenrost anvertraut. In der physischen Nutzung steckt letztlich trotzdem die Möglichkeit, die gelernten Annahmen mit der Realität abzugleichen und sich von der ungewohnten Funktionsweise zu überzeugen.

---

<sup>3</sup>Kasser Ueli/Pöll Michael: Graue Energie von Baustoffen, hrsg. v. büro für umweltchemie, Zürich, 1995, S. 40-58.

<sup>4</sup>Nachhaltiges Recycling von glasfaserverstärktem Kunststoff | FHNW, Fachhochschule Nordwestschweiz, URL: <https://www.fhnw.ch/de/die-fhnw/hochschulen/ht/institute/forschungsprojekte/nachhaltiges-recycling-von-glasfaserverstaerktem-kunststoff> (besucht am 09.06.2023 14:38).

<sup>5</sup>Howell/Magleby/Olsen (Hrsg.) (wie Anm. a), S. 7.

# 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Arbeit wurde der Frage nachgegangen, inwiefern flexible Mechanismen aus Holz für die stärkere Verwendung im Möbelbau geeignet sind. Dazu wurden zunächst die technischen Eigenschaften der Mechanismen dargestellt. Mit Ausnahme kontinuierlicher Bewegungen sind die Anwendungen mit denen klassischer Mechanismen vergleichbar. Die typischen Vorteile wie Gewichts- und Teilereduktion kommen auch bei der Verwendung natürlicher Materialien zum Tragen. In weiteren Kapiteln wurde der Bezug zu gestalteten Objekten gesucht und die Herausforderungen bei der Umsetzung diskutiert. Auch die Potentiale experimenteller händischer Untersuchungen wurden an einem praktischen Projekt dargestellt.

Stetig verbesserte Möglichkeiten, komplexe flexible Mechanismen zu generieren, sowie die resultierenden Geometrien autonom umzusetzen, wurden identifiziert. Als wichtigste Technologien wurden dafür generatives Design, nicht-lineare Analysetools, optische Materialsortierung und digitale Fertigungsprozesse herausgestellt. Ein verstärkter Einsatz sowohl stabiler als auch beweglicher Holzstrukturen ähnlich handwerklichen Gestellbauten scheint in Kombination der Werkzeuge vielversprechend.

Flexible Mechanismen sind geeignet, um schlichte, intelligente Möbel herzustellen. Insbesondere in tragende Strukturen bewegliche Funktionen zu integrieren bietet Optimierungspotential. Besonders relevant für die Gestaltung ist die unmittelbare Verknüpfung von Formgebung, Materialauswahl und Funktion. Einzelne Geometrien können meist nicht ohne Auswirkungen auf die Gesamt-

struktur verändert werden. Analog zu dem Optimierungspotential steigt daher der Entwurfsaufwand bei integrierten Lösungen. Die vorgestellte Hockerserie geht mit diesem Potential beispielhaft um. Eine Weiterentwicklung hin zu einer stärker gesundheitsfördernden Nutzung ist deshalb vorstellbar.

Massivhölzer wie Esche, Buche und Akazie sind für derartige Anwendungen theoretisch geeignet, erreichen in großen Biegungen jedoch keine Dauerfestigkeit. Außerdem müssen sie mit finanziellem und zeitlichem Mehraufwand sorgfältig auf Holzfehler kontrolliert werden. Bambus lässt sich dagegen auch im Bereich großer Verformungen einsetzen. Durch seine höhere energetische Dichte und seinen homogenen Aufbau lassen sich Anwendungen zudem besser miniaturisieren und Qualitäten wirtschaftlicher sicherstellen. Im Vergleich zu Kunststoffen ist dabei die graue Energie zur Bereitstellung der organischen Materialien um ein vielfaches geringer. Verglichen mit GFK-Werkstoffen ist diese in etwa gleich, die dort vorhandenen Recyclingprobleme entfallen bei den Hölzern jedoch.

Für eine stärker verbreitete Anwendung fehlen insbesondere leicht handhabbare Werkzeuge. Viele der existierenden Anwendungen sind Ergebnisse privater Forschung und dadurch unzugänglich. Zudem sind die komplexen Lösungswege selten stark genug aufgearbeitet, um direkt von Personen im Designbereich eingesetzt zu werden.

Um dem entgegenzuwirken, sollten in kooperativen Projekten Technik und Gestaltung stark verzahnt werden. Dadurch werden zum einen Designschaffende an fortschrittliche Werkzeuge herangeführt, zum anderen aber auch Forschungsteams stärker mit den Anforderungen im Einsatz konfrontiert.

Schließlich fehlen Erkenntnisse zum Umgang mit flexiblen Produkten. Inwiefern ihre Verwendung vertrauenserweckend wirkt, ist unklar. Potential besteht in dieser Hinsicht, denn durch unser tiefes Verständnis für natürliche Formen sind die Funktionen intuitiv nachvollziehbar. Ob das genügt, um Designstudios, Produzenten und Konsumenten zu überzeugen, bleibt jedoch abzuwarten.

# Abbildungsverzeichnis

3.1	Stuhl Superleggera von Gio Ponti für Cassina <sup>1</sup> . . . . .	16
3.2	Leuchte AYNÖ von Stefan Dietz für Midgaard <sup>2</sup> . . . . .	18
3.3	Regal ES von Konstantin Gricic für Moormann <sup>3</sup> . . . . .	19
4.1	Experimentelle Mechanismen . . . . .	21
4.2	Hockerentwicklung . . . . .	23
4.3	Hockerserie Freiheitsgrade . . . . .	24

---

<sup>1</sup>Cassina Superleggera, URL: [https://www.cassina.com/de/de/products/superleggera.html?cas\\_rivestimento=Y-Y244#699-superleggera\\_26322](https://www.cassina.com/de/de/products/superleggera.html?cas_rivestimento=Y-Y244#699-superleggera_26322) (besucht am 02.06.2023 10:57).

<sup>2</sup>Midgard Licht: AYNÖ XL | steh, URL: <https://midgard.com/de/pages/ayno-xl-floor> (besucht am 02.06.2023 14:25).

<sup>3</sup>Moormann (Hrsg.): ES Regal Moormann, URL: [https://www.moormann.de/media/catalog/product/cache/e0b68cf20dc042ab5bfd7cd1c8adca8/1/0/1041000V\\_header\\_1.jpg](https://www.moormann.de/media/catalog/product/cache/e0b68cf20dc042ab5bfd7cd1c8adca8/1/0/1041000V_header_1.jpg) (besucht am 02.06.2023 17:23).

# Literaturverzeichnis

- Alfred Teischinger: ein superleichter Stuhl, in: proHolz Austria (Hrsg.): Zugschnitt 75 2019, Potenzial Holz, S. 24.
- Anna Moldenhauer: Midgard at imm cologne 2020: A new start with the Diez Office | STYLEPARK, en;en, hrsg. v. Stylepark, 13.1.2020, URL: <https://www.stylepark.com/en/news/midgard-diez-office-imm-cologne-2020-ayno> (besucht am 30.05.2023 15:30).
- Aouf, Rima Sabina: MIT engineers build load-bearing structures using tree forks instead of steel joints, hrsg. v. Dezeen, 2022, URL: <https://www.dezeen.com/2022/05/05/tree-forks-mit-digital-structures-architecture/> (besucht am 24.06.2023 19:37).
- Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (Hrsg.): Sitzlust statt Sitzfrust. Sitzen bei der Arbeit und anderswo, ger, unter Mitarb. v. Wolfgang Dicke, 2., unveränd. Aufl., Dicke, Wolfgang (Red.), Dortmund 2004.
- Cassina Superleggera, URL: [https://www.cassina.com/de/de/products/superleggera.html?cas\\_rivestimento=Y-Y244#699-superleggera\\_26322](https://www.cassina.com/de/de/products/superleggera.html?cas_rivestimento=Y-Y244#699-superleggera_26322) (besucht am 02.06.2023 10:57).
- CLIMATE CHANGE 2022 IMPACTS, ADAPTATION AND VULNERABILITY. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, unter Mitarb. v. H. O. Pörtner u. a., 1ST ED., CAMBRIDGE 2022.
- Cuvilliers, Pierre, Paul Mayencourt und Caitlin Mueller: The Arc Lamp workshop at AAG 2018: active bending and digital fabrication, hrsg. v. Digital Structures Lab, MIT, 2018, URL: <http://digitalstructures.mit.edu/>

page/blog#the-arc-lamp-workshop-at-aag-2018-active-bending-and-digital-fabrication (besucht am 14.06.2023 20:11).

Deutscher Nachhaltigkeitspreis: Sieger | Deutscher Nachhaltigkeitspreis, URL: <https://www.nachhaltigkeitspreis.de/design/preistraeger-design/2020/sieger/> (besucht am 05.06.2023 16:24).

Deutsches Institut für Normung (Hrsg.): Kennwerte von Holzarten, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2003.

Es | Nils Holger Moormann Möbel GmbH, URL: <https://www.moormann.de/de/es.html> (besucht am 02.06.2023 17:12).

Gallego, Juan A. und Just Herder: Classification for Literature on Compliant Mechanisms: A Design Methodology Based Approach, in: Volume 7: 33rd Mechanisms and Robotics Conference, Parts A and B, ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference (San Diego, California, USA), 2009, S. 289–297.

Gjelstrup, Søren Linnet: Was ist Modalanalyse: Der ultimative Leitfaden, hrsg. v. DEWEsoft, 2021, URL: <https://dewesoft.com/de/blog/was-ist-modalanalyse#wie-wird-ein-modaltest-durchgefuehrt> (besucht am 24.06.2023 09:01).

Gross, Dietmar u. a.: Statik, ger, 8., erw. Aufl., Bd. Bd.1 (Springer-Lehrbuch), Berlin 2004.

Hannah Freund: Der erste Entwurf nach 70 Jahren. Ein Interview über Ayno von Stefan Diez für Midgard, hrsg. v. Archiproducts, 2021, URL: [https://www.archiproducts.com/de/news/der-erste-entwurf-nach-70-jahren-ein-interview-uber-ayno-von-stefan-diez-fur-midgard\\_80646](https://www.archiproducts.com/de/news/der-erste-entwurf-nach-70-jahren-ein-interview-uber-ayno-von-stefan-diez-fur-midgard_80646) (besucht am 30.05.2023 10:34).

Howell, Larry L.: Compliant mechanisms, eng (A Wiley-Interscience publication), Howell, Larry L. (VerfasserIn), New York u. a. 2001, URL: <http://www.loc.gov/catdir/bios/wiley045/2001026196.html>.

Howell, Larry L., Spencer P. Magleby und Brian M. Olsen (Hrsg.): Handbook of compliant mechanisms, eng, Howell, Larry L. (Hrsg.) Magleby, Spencer P. (Hrsg.) Olsen, Brian M. (Hrsg.), Chichester 2013.

- Jonathan Hopkins: Synthesis through Freedom and Constraint Topologies, in: Larry L. Howell, Spencer P. Magleby und Brian M. Olsen (Hrsg.): Handbook of compliant mechanisms, Chichester 2013.
- Kief, Hans B., Helmut A. Roschiwal und Karsten Schwarz (Hrsg.): CNC-Handbuch. CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, RPD, LAN, CNC-Maschinen, CNC-Roboter, Antriebe, Energieeffizienz, Werkzeuge, Industrie 4.0, Fertigungstechnik, Richtlinien, Normen, Simulation, Fachwortverzeichnis, ger, 31., überarbeitete Auflage (Hanser eLibrary), Kief, Hans B. (HerausgeberIn) Roschiwal, Helmut A. (HerausgeberIn) Schwarz, Karsten (HerausgeberIn) Kief, Hans B. (HerausgeberIn) Roschiwal, Helmut A. (HerausgeberIn) Schwarz, Karsten (HerausgeberIn), München 2020, URL: <https://www.hanser-elibrary.com/doi/book/10.3139/9783446465244>.
- Kollmann, Franz: Rheologie und Strukturfestigkeit von Holz, in: HOLZ als Roh- und Werkstoff 1961.3 (1961), S. 73–80.
- Körner, Axel Hannes: Compliant folding, eng, Körner, Axel Hannes (VerfasserIn), Dissertation, URL: 10.18419/opus-11650.
- Kreuzinger, H. und B. Mohr: Holz und Holzverbindungen unter nicht vorwiegend ruhenden Einwirkungen, hrsg. v. Technische Universität München, Institut für Tragwerksbau Fachgebiet Holzbau, 1994.
- Lienhard, Julian: Bending-active structures. Form-finding strategies using elastic deformation in static and kinetic systems and the structural potentials therein. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2014, eng, Bd. 36 (Forschungsberichte aus dem Institut für Tragkonstruktionen und Konstruktives Entwerfen, Universität Stuttgart), Stuttgart 2014.
- Magnus, Kurt und Hans H. Müller-Slany: Grundlagen der technischen Mechanik, ger, 7., durchgesehene und ergänzte Auflage, unveränderter Nachdruck (Studium), Magnus, Kurt (VerfasserIn) Müller-Slany, Hans H. (VerfasserIn) Magnus, Kurt (VerfasserIn) Müller-Slany, Hans H. (VerfasserIn), Wiesbaden 2009.
- Martin, Bella und Bruce Hanington: Designmethoden. 100 Recherchemethoden und Analysetechniken für erfolgreiche Gestaltung, ger, München 2013.

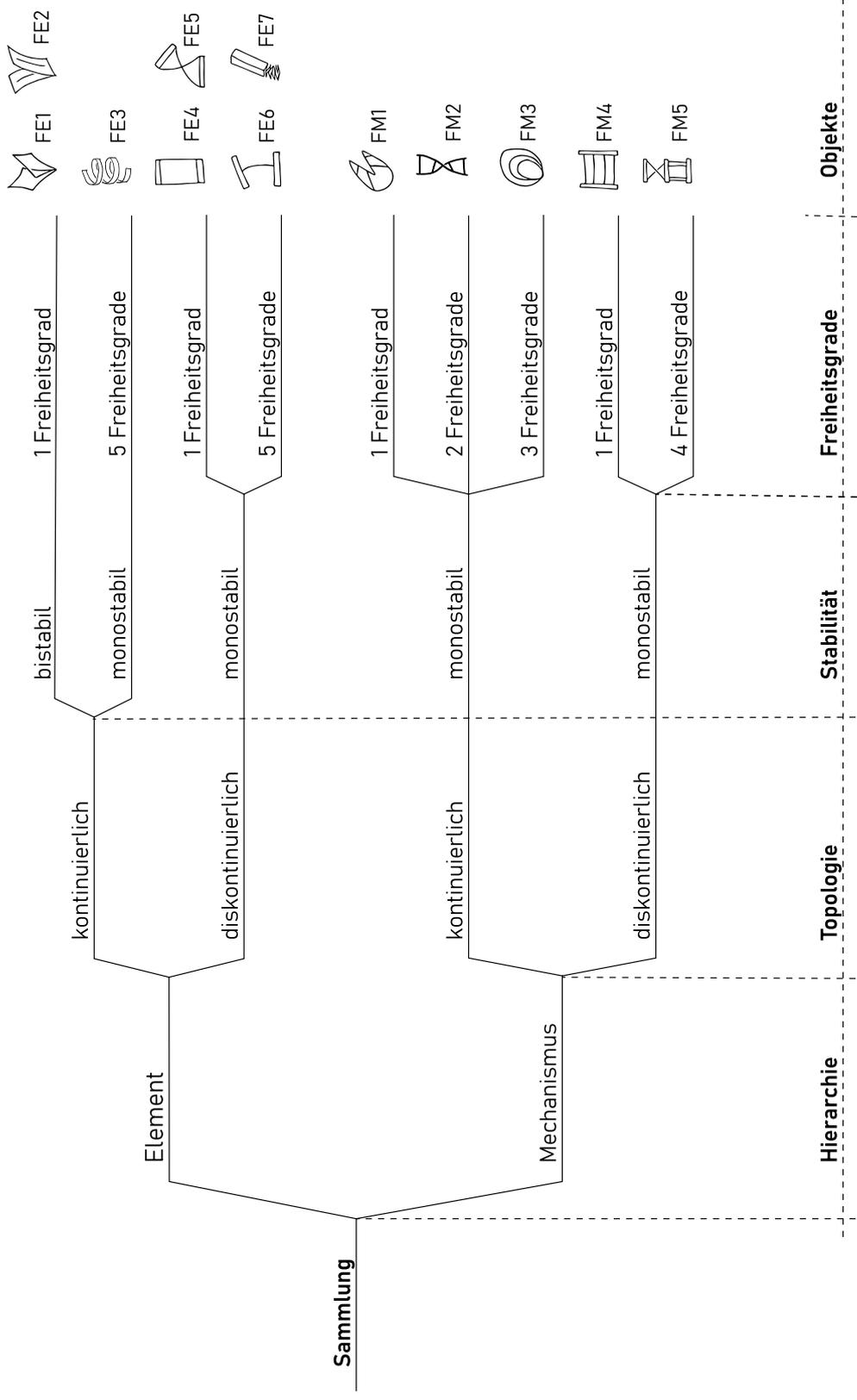
- Midgard Licht: AYNØ XL | steh, URL: <https://midgard.com/de/pages/ayno-xl-floor> (besucht am 02.06.2023 14:25).
- MIT (Hrsg.): Forschungsprojekte Digital Structures Research Group, URL: <http://digitalstructures.mit.edu/page/research> (besucht am 25.06.2023 23:15).
- Moormann (Hrsg.): ES Regal Moormann, URL: [https://www.moormann.de/media/catalog/product/cache/e0b68cf20dc042ab5bfdd7cd1c8adca8/1/0/1041000V\\_header\\_1.jpg](https://www.moormann.de/media/catalog/product/cache/e0b68cf20dc042ab5bfdd7cd1c8adca8/1/0/1041000V_header_1.jpg) (besucht am 02.06.2023 17:23).
- Nachhaltiges Recycling von glasfaserverstärktem Kunststoff | FHNW, Fachhochschule Nordwestschweiz, URL: <https://www.fhnw.ch/de/die-fhnw-hochschulen/ht/institute/forschungsprojekte/nachhaltiges-recycling-von-glasfaserverstaerkt-kunststoff> (besucht am 09.06.2023 14:38).
- Ponti, Gio: *Giò Ponti: a world*, ita, Milano und London 2003.
- Ponti, Gio und Stefano Casciani: *Gio Ponti*, eng;fr;ger;ita, hrsg. v. Salvatore Licitra und Karl Kolbitz, Famous First edition, Ponti, Gio (ArchitektIn) Licitra, Salvatore (HerausgeberIn) Kolbitz, Karl (HerausgeberIn) Casciani, Stefano (VerfasserIn von ergänzendem Text), Cologne 2021.
- Rottke, Evelin: *Entwerfen mit Bambus. Mechanische Eigenschaften von Bambus*, 2.07.2018, URL: <https://bambus.rwth-aachen.de/de/Referate/mecheigBambus/> (besucht am 08.06.2023 13:44).
- Stuhl 699 Superleggera von Gio Ponti | Cassina, URL: [https://www.cassina.com/de/de/products/superleggera.html?#699-superleggera\\_26511](https://www.cassina.com/de/de/products/superleggera.html?#699-superleggera_26511) (besucht am 31.05.2023 18:11).
- Ueli, Kasser und Pöll Michael: *Graue Energie von Baustoffen*, hrsg. v. büro für umweltchemie, Zürich, 1995.
- Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): *Getriebetechnische Grundlagen*, 1993.
- Wolfson School of Mechanical and Manufacturing Engineering: *An Introduction to MEMS (Micro-electromechanical Systems)*, hrsg. v. PRIME Faraday Partnership, Loughborough University, 2002.

Zhang, Xianming: Topology optimization of compliant mechanisms, eng, unter Mitarb. v. Benliang Zhu, Zhang, Xianming (VerfasserIn) Zhu, Benliang (MitwirkendeR) Zhang, Xianming (VerfasserIn) Zhu, Benliang (MitwirkendeR), Singapore 2018, URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5379792>.

# **Anhang**

## **Experimentelle Mechanismen**

Übersicht und Einordnung der in Kapitel 3.1 beschriebenen flexiblen Mechanismen und Elemente





# FE1

Material	Eschenfurnier
Fertigung	Flächige Verleimung
Charakter	Ein Freiheitsgrad. Bistabilität durch Verspannte Verleimung der ebenen Flächen. Umschnappen zwischen den zwei stabilen Zuständen. Kinetisches Verhalten.



# FE2

Material	Biegesperrholz
Fertigung	Flächige Verleimung
Charakter	Ein Freiheitsgrad. Bistabilität durch Verspannte Verleimung der ebenen Flächen. Kinetisches Verhalten.



# FE3

Material	Buchenfurnier
Fertigung	Formverleimung
Charakter	Fünf Freiheitsgrade, klassische Spiralfeder.



# FE4

Material	Eschenfurnier
Fertigung	Verleimung mit Zwischenstücken
Charakter	Ein Freiheitsgrad. translatorische Parallelbewegung mit geringem Bewegungsraum.



# FE5

Material	Bambus
Fertigung	Verleimung mit Zwischenstücken
Charakter	Zwei Freiheitsgrade durch serielle Kopplung zweier Elemente. Großer Bewegungsspielraum. Rotation mit leichter Achsenverschiebung, hohe Steifigkeit in blockierte Richtungen.



# FE6

Material	Eschenstäbe
Fertigung	verleimte Steckverbindung
Charakter	5 Freiheitsgrade. Doppelt eingespanntes Balkenelement, geringer Bewegungsspielraum.



# FE7

Material	Fichte
Fertigung	Sägeschnitte
Charakter	5 Freiheitsgrade durch serielle Struktur. Subtraktive Herstellung. Suboptimaler Faserverlauf, Verstärkung durch Materialkontakt.



# FM1

Material	Eschenfurnier
Fertigung	Papiergelenke
Charakter	Griffbewegung mit einem Freiheitsgrad. Selbsttätiges öffnen. Ausgesteifte Griff- bereiche.



# FM2

Material	Eschenfurnier
Fertigung	Papiergelenke
Charakter	Zwei Freiheitsgrade. Parallelverschiebung und Rotation. Hohe Stabilität durch Vorspannung, kinetische Funktion. Räumliche Struktur durch Ausknicken ebener Elemente.



# FM3

Material	Fichtenfurnier
Fertigung	Flächige Verleimung
Charakter	Drei Freiheitsgrade. Nichtlineare, polsterartige Feder. Von Materialkontakten abhängiges Verhalten



# FM4

Material	Buchenfurnier
Fertigung	verleimte geschlitzte Verbindungen
Charakter	Zwei Freiheitsgrade. Parallelbewegung, Translation. Gekoppelte Bewegung aller Biegelemente, Bewegungsrichtung abhängig von Vorbiegung.



# FM5

Material	Bambus
Fertigung	Verleimung mit Gegenstücken
Charakter	4 Freiheitsgrade durch serielle kombinierte Elemente. Erhöhter Bewegungsspielraum, hohe Steifigkeit in Sperrichtungen.