



---

**Forschungszentrum Karlsruhe**  
in der Helmholtz-Gemeinschaft

---

**Wissenschaftliche Berichte**  
FZKA 7193

# **Optimierung von Klebeverbindungen nach dem Vorbild der Natur**

**M. Munzinger**  
Institut für Materialforschung

Januar 2006



**Forschungszentrum Karlsruhe**

in der Helmholtz-Gemeinschaft

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 7193

# Optimierung von Klebeverbindungen nach dem Vorbild der Natur\*

Matthias Munzinger

Institut für Materialforschung

\*Von der Fakultät für Maschinenbau

der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

2005

Als Manuskript gedruckt  
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH  
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe

Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren (HGF)

ISSN 0947-8620

urn:nbn:de:0005-071937

# Optimierung von Klebeverbindungen nach dem Vorbild der Natur

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

von der Fakultät für Maschinenbau der  
Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Matthias Munzinger

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 09. Dezember 2005  
Hauptreferent: Prof. Dr. Claus Mattheck  
Korreferent: Prof. Dr. Oliver Kraft



# Optimierung von Klebeverbindungen nach dem Vorbild der Natur

## Zusammenfassung

In der Natur laufen über Jahrtausende evolutionäre Prozesse, die den Aufbau und das Reparaturverhalten natürlicher Konstruktionen auf die jeweilige Beanspruchung hin optimieren. Diese Optimierung kann an Bäumen und Knochen auch zur Betriebszeit beobachtet werden. Die beobachteten Wachstumsprinzipien konnten in dieser Arbeit mit Hilfe der Finiten Elemente auf technische Bauteile übertragen werden. Daraus wurde eine iterative Methode entwickelt und zur Optimierung von technischen Klebeverbindungen eingesetzt. Die Methode lässt unterbelastete Bereiche schrumpfen, während überbelastete Bereiche wachsen. Diese Modellmodifikation führt zu angepassten Steifigkeiten der Fügebauteile und einer Homogenisierung des Spannungsverlaufs in der Klebeschicht. Eine erste Verifikation der Methode wurde über ein technisches Modell einer einschnittig überlappenden Klebeverbindung vorgenommen. Die optimierte Form konnte mit einem natürlichen Vorbild verglichen und erfolgreich experimentell bestätigt werden. Als weitere Verifikationsmodelle wurden ein vom Holzstrahl der Bäume inspiriertes Modell und ein Widerlager an einer starren Wand optimiert. Die Verifikationen zeigten Möglichkeiten des Optimierungsverfahrens unter verschiedenen Randbedingungen auf.

## Optimization of Adhesive Joints Modeled on Nature

### Abstract

Over millions of years, natural constructions and their mechanisms of repair have been developed further by evolutionary processes in nature with a view to generate biologically favorable structures with optimal adaptation towards operational demands and loads. These processes of optimization can even be observed during operating times of trees and bones. From the natural growth and repair behavior of bones and trees, mechanically stimulated growth rules of natural constructions were derived and transferred to technical assembly parts using the finite-element method (FEM). Then, an iterative method was developed in order to technically optimize adhesive joints. This method makes underloaded elements shrink, whereas overloaded elements are made grow according to the overload. The result of optimization are adapted parts to be joined with a minimum weight and a largely homogenized stress distribution in the adhesive layer with a minimum use of adhesive. A first verification of the method was carried out using a single lap adhesive joint. The optimized form was compared with the natural archetype and resulted in an experimental confirmation of the method. For further verification, a model inspired by wood rays and a thrust bearing at a solid wall were optimized. These verifications showed further possibilities of this method of optimization to be applied under various general conditions.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Ziel . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1	Spannungen, Dehnungen . . . . .	3
2.2	Anstrengungshypothesen . . . . .	5
2.2.1	Normalspannungshypothese . . . . .	5
2.2.2	Schubspannungshypothese . . . . .	5
2.2.3	Gestaltänderungsenergiehypothese . . . . .	6
2.3	Spannungsvergleich in Klebeschichten . . . . .	7
2.4	Aufbau und Versagen der Klebeschicht . . . . .	11
2.4.1	Kohäsion- und Adhäsionskräfte . . . . .	11
2.4.2	Struktureller Aufbau der Klebeschicht . . . . .	13
2.4.3	Darstellung der Klebeschicht und deren Bruchbilder . . . . .	14
2.5	Spezielle Klebstoffe und deren Aufbau . . . . .	16
2.5.1	Cyanacrylatklebstoffe . . . . .	16
2.5.2	Epoxy-Klebstoffe . . . . .	18
2.5.3	Anaerobe Klebstoffe . . . . .	19
2.6	Die Finiten Elemente . . . . .	20
<b>3</b>	<b>Optimierung nach dem Vorbild der Natur</b>	<b>23</b>
3.1	Wachstumsregeln und Überlebensstrategie der Bäume . . . . .	23
3.2	Die CAO-Methode . . . . .	26
3.3	Die Leichtigkeit des Knochenbaus und deren technische Anwendbarkeit . . . . .	28
3.4	Zusammenfassung der Wachstumsdirektiven . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Optimierung von Klebeverbindungen nach dem Vorbild der Natur</b>	<b>33</b>
4.1	Die technische Umsetzung des Wachstums . . . . .	35
4.2	Zusammenfassung der Optimierungsschritte . . . . .	40
4.3	Die Klebeschichtmodellierung . . . . .	41
4.4	Die Modellierung der Fügeiteile . . . . .	43
4.5	Neuvernetzung . . . . .	44
4.6	Die CA <sup>3</sup> O-Optimierung im Überblick . . . . .	48

<b>5</b>	<b>Validierung der CA<sup>3</sup>O-Methode</b>	<b>51</b>
5.1	Die einschnittig überlappende Klebeverbindung . . . . .	53
5.1.1	Modell und CA <sup>3</sup> O-Optimierung . . . . .	55
5.1.2	Versuchsergebnisse . . . . .	59
5.1.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	62
5.2	Der Holzstrahl als Vorbild . . . . .	63
5.2.1	Modell und CA <sup>3</sup> O-Optimierung . . . . .	65
5.2.2	Versuchsergebnisse . . . . .	72
5.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	75
5.3	Optimierungen mit eingeschränktem Bauraum . . . . .	76
5.3.1	Widerlager an starrer Wand . . . . .	76
5.3.2	Modellmodifikation des Widerlagers . . . . .	80
5.3.3	Vergleich der Modelle mit natürlichen Bauteilen . . . . .	83
5.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	86
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>89</b>

# 1 Einleitung

Mit fortschreitender technischer Entwicklung mechanischer Bauteile und deren Zusammenspiel stößt der Mensch immer wieder an die Grenzen des Machbaren. Durch fehlerbehaftete Konstruktionen wird die stetige Weiterentwicklung vorangetrieben, um am Ende der Entwicklung ein technisch einwandfreies Bauteil zu erhalten. Diese Entwicklung ist langwierig und schwierig, ein Weg mit vielen Stolpersteinen. Das Herantasten an das Optimum der Konstruktion kann viel Geld und Zeit verschlingen. Fehler in den Konstruktionen können bei sicherheitsrelevanten Bauteilen Menschenleben gefährden.

Die Natur hat diesen Weg ebenfalls beschritten und über Jahrmillionen natürliche, zuverlässige Konstruktionen hervorgebracht, die den vorherrschenden Umgebungen angepasst, meist unter minimalem Materialaufwand hergestellt werden. Fehlkonstruktionen haben sich auf diesem Pfad der Evolution selbst aussortiert, da sie meist den Belastungen nicht standgehalten haben. Nur die stärksten natürlichen Konstruktionen haben entweder durch Stabilität und Zuverlässigkeit oder durch Wettbewerbsvorteile im Konkurrenzkampf bis heute überlebt.

Als Ingenieur von den natürlichen Strukturen zu lernen heißt, die Funktions- und Herstellungsmechanismen auf das Wesentliche zu reduzieren und diese auf die Technik zu übertragen. Die rasante Entwicklung der Computertechnik legt dem Ingenieur heutzutage die Werkzeuge in die Hand, um diese Wachstumsprinzipien auf technische Bauteile umzusetzen. Wofür die Natur Jahrmillionen braucht kann heute, auf die Konstruktion übertragen, in Stunden zu optimalen Ergebnissen am Computer führen. Durch die Verknüpfung zwischen der Computertechnik und der Fertigung können diese optimalen Strukturen immer häufiger direkt gefertigt werden. Nach dem Vorbild der Natur *gewachsene* Bauteile, d.h. im Computer generierte, optimierte, simulierte und computergestützt gefertigte Bauteile, weisen einen erheblich verkürzten Entwicklungsprozess auf und sind von Anfang an dem technischen Optimum nahe.

## 1.1 Motivation und Ziel

Optimierungen im herkömmlichen Sinne sind durch intelligentes Ausprobieren verschiedener Designvorschläge gekennzeichnet, wobei die vielversprechendsten Vorschläge intensiv weiterentwickelt werden, um mit geringem Materialeinsatz dauerhafte Bauteile zu schaffen. Dieser Vorgang braucht viel Zeit, um gute Ergebnisse hervor zu bringen. Die Erfahrungen, die mit dem Ausprobieren gewonnen werden, können direkt in neue Designvorschläge eingebracht werden, um schneller zum Ziel zu kommen. Die Natur macht seit Jahrmillionen nichts anderes in der Evolution der Tier- und Pflanzenwelt. Der Blick auf natürliche lebendige Konstruktionen und deren grundlegenden Optimierungsvorgänge ist so die Inspirationsquelle zu neuartigen Optimierungsverfahren für technische Bauteile, deren Ergebnis ein dauerhafter Designvorschlag mit minimalem Materialeinsatz sein kann. Ausgehend vom optimierten Bauteil kann der Ingenieur sein Wissen über Fertigungsmöglichkeiten einfließen lassen, um viel schneller neuartige Produkte entwickeln zu können.

Um diesen Leichtbau realisieren zu können sind Fügeverfahren nötig, die unterschiedliche Materialien miteinander verbinden können. Dies ermöglicht den gezielten Materialeinsatz für jeden Bereich einer Konstruktion. Kleben ist ein Fügeverfahren, das unterschiedliche Materialien miteinander verbinden kann. Das Verfahren unterscheidet sich von den sonst üblichen Fügeverfahren wie z.B. Schweißen, Schrauben oder Nieten unter anderem durch geringe Fügeparteeinflussung und flächige Kraftübertragung. Die Berechnung und Simulation von Klebeverbindungen ist jedoch zeitaufwändig und erfordert viele, meist nicht von den Herstellern der Klebstoffe bereitgestellte Materialkennwerte. Die Folge sind überhöhte Sicherheitszuschläge und Überdimensionierung. An Konstruktionen, die bewegt werden, wie z.B. Automobile oder Flugzeuge, sind solche mitunter übertriebenen Materialzugaben an geklebten Bauteilen mit hohen Treibstoffkosten während des Betriebes verbunden. Eine optimierte Konstruktion kann daher nicht nur Material während der Fertigung einsparen, vielmehr kann eine Optimierung zu einer Energiereduktion während des Betriebes und somit zur Schonung der Umwelt führen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist, eine Methode zur Optimierung von Klebeverbindungen mit Hilfe der Finiten Elemente (FE) bereitzustellen. Ausgehend von Optimierungsvorgängen in der Natur sollen die Grundprinzipien der natürlicher Anpassung als Basis des Verfahrens umgesetzt werden. Die daraus entstehende iterative Optimierungsmethode soll dem Ingenieur ein Werkzeug in die Hand legen, mit dessen Hilfe er ausgehend von einem Grunddesign einer Klebeverbindung einen Designvorschlag erhält, der den eingesetzten Klebstoff optimal ausnutzt. Der Designvorschlag soll, von Überdimensionierung befreit, einen den Randbedingungen entsprechend angepassten, möglichst homogenisierten Spannungsverlauf aufweisen. Anhand von einfachen und bekannten Verifikationsmodellen soll die Optimierung überprüft und im Experiment bestätigt werden.

# 2 Grundlagen

## 2.1 Spannungen, Dehnungen

Jede Belastung, die auf ein Material wirkt, ruft eine Reaktion hervor. In der Strukturmechanik sind dies Verschiebungen und Verdrehungen des Bauteils. Wird das Bauteil entlastet, so können bleibende Verformungen zurückbleiben. Diese *plastischen* Verformungen sind für Bauteile und Baugruppen in der Regel unerwünscht, da die Bauteile in ihrer Funktion möglicherweise beeinträchtigt sind. Gewünscht ist ein Betrieb in einem Bereich, in dem die entstehenden Verformungen nach Entlastung vollständig zurückgehen. In diesem Bereich entstehende Verformungen werden als *elastisch* Verformungen bezeichnet.

Verformungen und Verdrehungen rufen im Material Dehnungen und Spannungen hervor, die im Gleichgewicht mit den aufgetragenen Lasten stehen. Wird aus einem Bauteil unter Last gedanklich ein kleiner Würfel herausgeschnitten, so wirken auf dessen Oberfläche Schubspannungen und senkrecht auf die Würfelflächen Normalspannungen (Abb. 2.1). Diese Spannungen können in einem Tensor zusammengefasst werden, der den Spannungszustand am betrachteten Ort beschreibt.

Im Spannungstensor zeigt der erste Index  $k$  die Normalenrichtung  $(x, y, z)$  der betrachteten Würfelfläche im aktuellen Koordinatensystem an. Der zweite Index  $m$  zeigt die Richtung  $(x, y, z)$  im aktuellen Koordinatensystem, in der die Spannung vorliegt. Ist  $k = m$ , so handelt es sich um die Normalspannung  $(\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz})$  der betrachteten Würfelflächen. Für eine vereinfachende Schreibweise kann hier die Doppelindizierung entfernt werden:  $\sigma_{xx} = \sigma_x$ ;  $\sigma_{yy} = \sigma_y$ ;  $\sigma_{zz} = \sigma_z$ . Bei unterschiedlichen Indizes ( $k \neq m$ ) werden die entsprechenden Schubspannungen  $(\sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yx}, \sigma_{yz}, \sigma_{zx}, \sigma_{zy})$  auf den Würfeloberflächen angegeben.

Auf Grund von Gleichgewichtsbetrachtungen des gedanklich freigeschnittenen Würfels gilt:  $\sigma_{km} = \sigma_{mk}$ . Um den Unterschied zwischen Normalspannung und Schubspannung zu verdeutlichen werden die Schubspannungen mit  $\tau_{km}$  bezeichnet. Aus den oben aufgeführten Schubspannungskomponenten verbleiben daher drei Schubspannungen im Spannungstensor  $(\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz})$ . Gleichung (2.1) zeigt den allgemeinen Spannungstensor und dessen symmetrische Darstellung.

$$\sigma_{km} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \cdot & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \cdot & \cdot & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

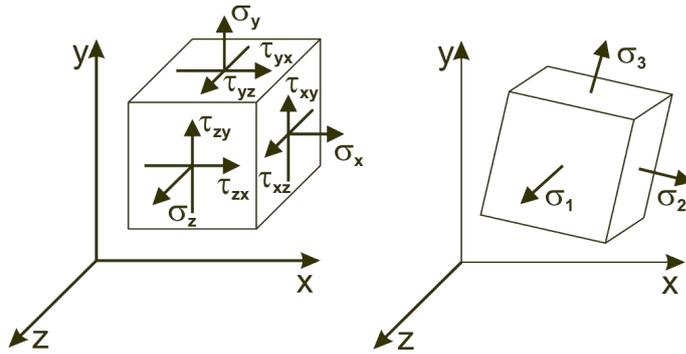


Abbildung 2.1: Darstellung eines freigeschnittenen Volumenelementes und den anliegenden Spannungen; links: allgemeiner Freischnitt mit allen neun Spannungskomponenten des Spannungstensors; rechts : gedrehtes freigeschnittenes Volumenelement mit den Hauptnormalspannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$

Wird das freigeschnittene Volumenelement gedreht, so ändern sich die Orientierung der Berandungsflächen. Dies hat direkt eine Änderung der Komponenten des Spannungstensors zur Folge. Es existiert eine Verdrehung des gedachten freigeschnittenen Würfels, in dem die Schubspannungen zu null werden. In diesem Zustand existieren nur noch die Normalspannungen, die als Hauptnormalspannungen mit  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  bezeichnet werden (2.2). Abbildung 2.1 zeigt das allgemein freigeschnittene Volumenelement und dessen gedrehte Darstellungen mit den Hauptnormalspannungen.

$$\sigma_{km} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

## 2.2 Anstrengungshypothesen

Aufgrund der Einfachheit des Spannungstensors im Hauptnormalspannungssystem wird dieser häufig für die Berechnung von Anstrengungshypothesen verwendet, deren Ziel es ist, einen vergleichbaren skalaren Wert zu errechnen, der die Belastungen oder Anstrengungen des Materials widerspiegelt. Dieser Wert kann für komplexe Spannungszustände berechnet werden, um anschließend verglichen zu werden mit den kritischen Versagensspannungen, die z.B. im Zugversuch bestimmt wurden. Kritische Versagensspannungen können unter anderem die Spannung bei Fließbeginn oder bei Bruch des Materials sein.

### 2.2.1 Normalspannungshypothese

Bei spröden Werkstoffen, wie z.B. Grauguß oder Glas, muss unter Zug mit Versagen senkrecht zur Hauptzugspannung gerechnet werden [2]. Das Versagen tritt praktisch ohne plastische Verformung als Trennbruch ein [38]. Die Auslegung spröder Werkstoffe muss daher nach der maximalen Hauptnormalspannung erfolgen. Mit  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  gilt für die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  die in Gleichung (2.3) dargestellte Beziehung. Diese kann nach [2] für den zweidimensionalen Fall ( $\sigma_3 = 0$ ) explizit, wie in Gleichung (2.4) dargestellt, angegeben werden. Die in Abbildung 2.2 eingerahmte Fläche (1) zeigt den Bereich, in dem ein nach der Normalspannungshypothese ausgelegtes Bauteil für den zweidimensionalen Fall belastet werden kann. Liegt die Betriebsbelastung außerhalb der eingezeichneten Fläche (1), so ist mit Versagen zu rechnen.

$$\sigma_v = \sigma_1 \quad (2.3)$$

$$\sigma_v = \frac{1}{2} \cdot \left[ \sigma_x + \sigma_y + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2} \right] \quad (2.4)$$

### 2.2.2 Schubspannungshypothese

Bei statischer Zug- und Druckbeanspruchung verformbarer Werkstoffe kann Gleitbruch zum Versagen führen [2]. Nach *Mohr* und später nach *Tresca* können Bauteile aus solchen Materialien nach der maximalen Schubspannung ausgelegt werden [38]. Gleichung (2.5) zeigt die Beziehung zwischen der Vergleichsspannung  $\sigma_v$  und den Hauptnormalspannungen  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , wobei  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  gilt. In Abbildung 2.2 werden die Spannungszustände dargestellt (Fläche 2), in der nach der Schubspannungshypothese (Tresca-Kriterium) ausgelegte Bauteile belastet werden können. Gleichung (2.6) zeigt die Schubspannungshypothese für den zweidimensionalen Fall.

$$\sigma_v = 2\tau_{max} = \sigma_1 - \sigma_2 \quad (2.5)$$

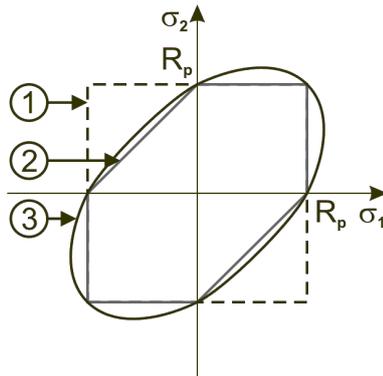
$$\sigma_v = 2\tau_{max} = \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2} \quad (2.6)$$

### 2.2.3 Gestaltänderungsenergiehypothese

Diese Anstrengungshypothese betrachtet nach *v. Mises* die zur Gestaltänderung auf Grund von Gleitungen bei Fließbeginn erforderliche Arbeit [2]. Hierbei werden Volumenänderungen als nicht versagenskritisch betrachtet [38]. Die Hypothese wird für duktile Werkstoffe verwendet, die bei plastischer Verformung versagen. In Gleichung (2.7) und (2.8) ist die Gestaltänderungsenergiehypothese, oder auch v.Mises-Kriterium genannt, für den dreidimensionalen Fall dargestellt. In Abbildung 2.2 ist das v.Mises-Kriterium, analog zum Tresca-Kriterium und der Normalspannungshypothese, durch die Fläche (3) dargestellt.

$$\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (2.7)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - (\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_x\sigma_z) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)} \quad (2.8)$$



- (1) Normalspannungshypothese
- (2) Schubspannungshypothese  
(Tresca-Kriterium)
- (3) Gestaltänderungsenergiehypothese  
(v.Mises-Kriterium)

Abbildung 2.2: Versagenskriterien, dargestellt für den zweidimensionalen Fall ( $\sigma_3 = 0$ )

## 2.3 Spannungsvergleich in Klebeschichten

Für duktile metallische Werkstoffe wird meist das v.Mises-Kriterium (s. Kapitel 2.2.3) herangezogen, um aus dem komplexen Spannungszustand eine zum Vergleich verwendbare skalare Größe zu bestimmen. Diese Größe kann z.B. mit den experimentell bestimmten Werten des Zugversuchs verglichen werden. In der Anwendung des Kriteriums zeigen sich nach [38] gute Übereinstimmungen zwischen Theorie und Praxis.

Das v.Mises-Kriterium beruht auf der Gestaltänderungsenergie bei Fließbeginn, wobei rein volumenändernde Anteile des Spannungszustandes, der hydrostatische Spannungsanteil  $p$  (2.9), keinen Einfluss haben [38].

$$p = \frac{\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z}{3} = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (2.9)$$

Im Gegensatz zu Metallen zeigen Klebstoffe häufig eine Abhängigkeit vom hydrostatischen Spannungsanteil. So konnte nach [33] mit druckvorgespannten Klebeverbindungen im Versuch deutliche Traglaststeigerungen gemessen werden, die nicht allein mit den zusätzlichen Reibungskräften erklärt werden können. Dieses Verhalten wurde auch in [11] anhand dünnwandiger, stumpf verklebter Rohre nachgewiesen. Daher muss der hydrostatische Spannungsanteil in der Anstrengungshypothese Berücksichtigung finden. Nach [34] kann dies mit folgendem nichtlinearen Ansatz (2.10) geschehen:

$$J'_2 = k_0^2 (1 - k_1 J_1 + k_2 J_1^2) \quad (2.10)$$

- $J_1$  lineare Invariante des Spannungstensors
- $J'_2$  quadratische Invariante des Spannungsdeviators
- $k_0, k_1, k_2$  dimensionsbehaftete Ansatzfreiwerte

Die linearen und quadratischen Invarianten können nach [38] angegeben werden zu:

$$J_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \quad (2.11)$$

$$J'_2 = \frac{1}{6} ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2) \quad (2.12)$$

$$= \frac{1}{6} ((\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2 \quad (2.13)$$

Dieser Ansatz geht für den Fall  $k_1/\sqrt{k_2} = 2$  in den nach Drucker und Prager in [10] vorgestellten, und vielfach zur Beurteilung von Plastomeren [34] verwendeten Ansatz über. Für die daraus resultierende Belastungsspannung (2.14) konnte im Experiment bei einigen Kunststoffklebstoffen eine gute Übereinstimmung gezeigt werden [14]. Da dieser Ansatz zu einer Modifikation der von Mises Vergleichsspannung führt, wird im Folgenden diese Spannung nach [14] als erweiterte oder modifizierte von Mises Spannung (2.16)

## 2 Grundlagen

bezeichnet, wobei die Ansatzfreiwerte in Parameter  $c$  zusammengefasst sind. Da die Festigkeit und der strukturelle Aufbau der Klebstoffe unter anderem von der Schichtdicke abhängen [12], ist der Parameter  $c$  als eine schichtdickenabhängige Größe zu sehen.

$$\sigma_v = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} + c(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.14)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1} + c(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.15)$$

$$\sigma_v = \sigma_{v.Mises} + c(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.16)$$

Über den Ansatz (2.10) wird in [35] eine weitere Anstrengungshypothese entwickelt, deren Parametrisierung über die Zug-, Druck- und Torsionsfestigkeiten durchgeführt wird. Bei Metallklebeverbindungen kann unter Zuglast Querkontraktionsbehinderung in der Klebeschicht auftreten, wodurch selbst bei einachsiger Belastung der Fügeiteile eine mehrachsige Belastung in der Klebeschicht hervorrufen wird. Die experimentell zu bestimmenden Festigkeitswerte müssen daher als *fiktive Festigkeiten* definiert werden. Gleichung (2.17) zeigt die Vergleichshypothese, wobei die Verhältnisse zwischen Druck- und Zugfestigkeit, sowie Torsions- und Zugfestigkeit eingehen.

$$\tau_v = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\kappa v - 1}{3}} J_1 + \sqrt{\frac{1}{3} J_1^2 \left[ \frac{\kappa}{4} \left( \frac{v - 1}{v} \right)^2 - \frac{v - \kappa}{v} \right] + J_2'} \quad (2.17)$$

$$\text{mit:} \quad \kappa = \frac{D}{Z} = \frac{\text{fiktive Druckfestigkeit}}{\text{fiktive Zugfestigkeit}}$$

$$\text{und} \quad v = 3 \left( \frac{T}{Z} \right)^2 = 3 \left( \frac{\text{fiktive Torsionsfestigkeit}}{\text{fiktive Zugfestigkeit}} \right)^2$$

In [35] und [36] sind für die Verhältnisse  $\kappa$  und  $v$  experimentell bestimmte Werte angegeben. Für die untersuchten Klebstoffe treten je nach Poissonsahl Werte zwischen  $\kappa \approx v \approx 2$  oder  $\kappa \approx v \approx 5/3$  auf. Für diese Werte ergibt sich aus Gleichung (2.17) die Vergleichshypothesen in Gleichung (2.18) und (2.19).

$$\text{mit } \kappa = v = 2: \tau_v = \sqrt{\frac{1}{24}} J_1 + \sqrt{\frac{1}{24} J_1^2 + J_2'} \quad (2.18)$$

$$\text{mit } \kappa = v = \frac{5}{3}: \tau_v = \sqrt{\frac{1}{45}} J_1 + \sqrt{\frac{1}{45} J_1^2 + J_2'} \quad (2.19)$$

Werden die Invarianten  $J_1$  und  $J_2'$  in Gleichung (2.18) und (2.19) eingesetzt, so ergeben sich die folgenden Vergleichshypothesen:

mit  $\kappa = \nu = 2$ :

$$\begin{aligned}\tau_v &= \sqrt{\frac{1}{24}} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \\ &\quad \sqrt{\frac{1}{24} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{6} ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} \\ &= \sqrt{\frac{1}{24}} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \\ &\quad \sqrt{\frac{1}{24} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{3} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1)}\end{aligned}$$

mit  $\kappa = \nu = \frac{5}{3}$ :

$$\begin{aligned}\tau_v &= \sqrt{\frac{1}{45}} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \\ &\quad \sqrt{\frac{1}{45} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{6} ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2)} \\ &= \sqrt{\frac{1}{45}} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \\ &\quad \sqrt{\frac{1}{45} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + \frac{1}{3} (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1)}\end{aligned}$$

Der in dieser Arbeit verwendete Klebstoff (*Loctite<sup>(R)</sup> 496*) wurde in [15] mit Stahl-Stahl, Stahl-Aluminium und Aluminium-Aluminium Fügeiteilkonstellationen untersucht. Die Versuchsanordnung wurde als steife, drehbare Konstruktion ausgeführt, die mit Hilfe einer Zugprüfmaschine eine ebene, quadratische Klebefläche unter verschiedenen Kraftangriffswinkeln bis zum Bruch belastete. Diese Experimente haben gezeigt, dass die Einführung eines Korrekturfaktors  $A$  zur modifizierten von Mises Spannung nötig ist, um die Belastungsspannung (2.14) an die Messwerte des Zugversuchs anzupassen. Wird der Korrekturfaktor  $A = 1/(1+c)$  eingesetzt, so kann die modifizierte von Mises Spannung als Vergleichsspannung, auch für den einachsigen Spannungszustand, herangezogen werden. In Abbildung 2.3 sind die Messergebnisse zusammen mit den beiden Vergleichsspannungen dargestellt, wobei die Vergleichsspannung nach Gleichung (2.20) in den dargestellten Messungen mit unterschiedlichem Parameter  $c$  dargestellt sind. Dies zeigt den Einfluss der Fügeiteile auf den Parameter  $c$ .

$$\sigma_v = \frac{A}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} + Ac (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (2.20)$$

$$\text{mit: } A = \frac{1}{(1+c)} \quad (2.21)$$

## 2 Grundlagen

Die Grenzkurven beider Spannungshypothesen sind in Abbildung 2.3 gegenübergestellt. Je nach Wahl des Materialparameters  $c$  besteht eine gute Übereinstimmung beider Hypothesen im Zug- Schubbereich. Da die in dieser Arbeit untersuchten Klebeverbindungen in diesem Bereich belastet werden, können beide Hypothesen als Vergleichs- oder Belastungsspannung herangezogen werden. Auf Grund der einfacheren experimentellen Ermittlung des Parameters  $c$  wird in den folgenden Optimierungen die Spannungshypothese nach Gleichung (2.20) eingesetzt.

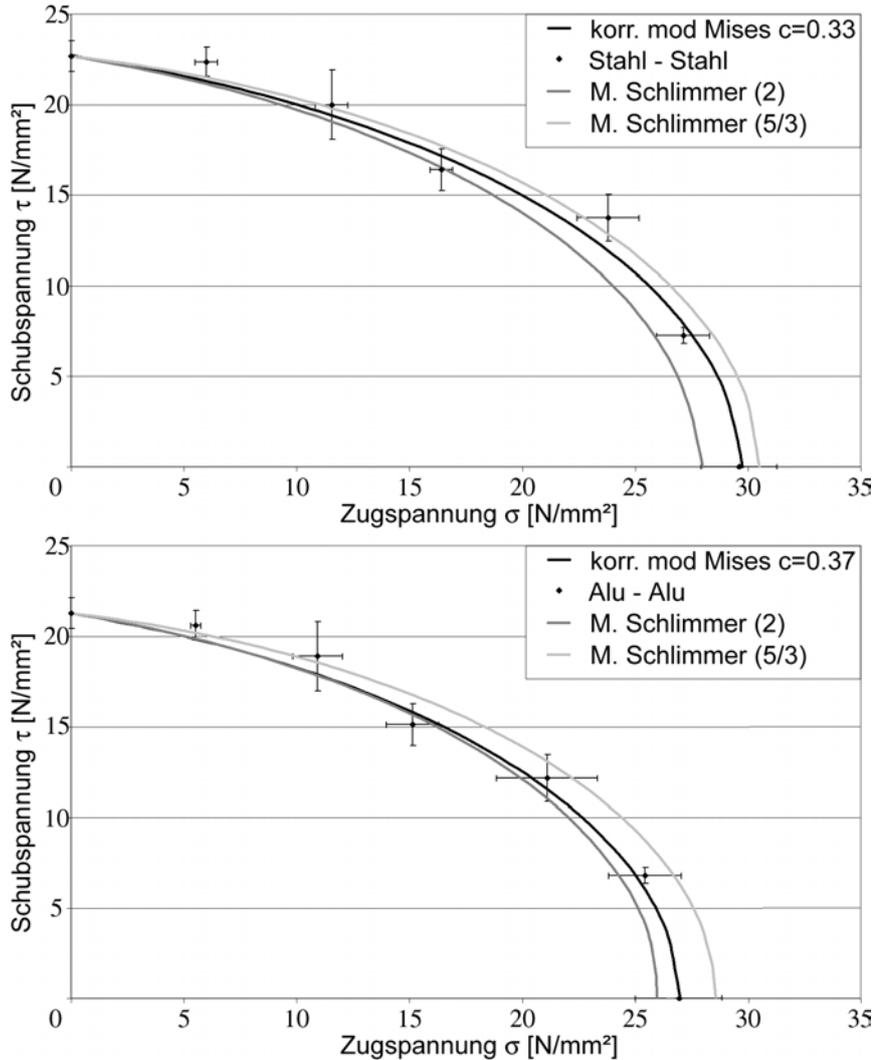


Abbildung 2.3: Messergebnisse nach [15] mit Überlagerung der modifizierten von-Mises Vergleichsspannung und der Vergleichsspannung nach [35] mit Gleichung (2.18) und (2.19); Messungen an Stahl-Stahl und Aluminium-Aluminium Füge­teilen unter Verwendung von *Loctite<sup>(R)</sup> 496*; Proben­geometrie und Verfahren: Stempelform unter verschiedenen Kraftan­griffswinkeln bis zum Bruch; Klebefläche:  $200\text{mm}^2$

## 2.4 Aufbau und Versagen der Klebeschicht

Entscheidend für den praktischen Einsatz eines Klebstoffs ist seine Haftung und Festigkeit. Bei mangelnder Haftung wird das Versagen zwischen Fügepart und Klebstoff einsetzen (Adhäsionsversagen). Ist die Festigkeit geringer als die Haftung des Klebstoffs, so versagt die Klebeverbindung durch die Klebeschicht hindurch (Kohäsionsversagen). Es muss daher seitens der Hersteller eine optimale Einstellung des Klebstoffs gefunden werden, die einerseits eine gute Haftung und andererseits eine gute Festigkeit gewährleistet. Es gibt in der Adhäsions- und Kohäsionsforschung viele verschiedene Ansätze, um die Zusammenhänge im Inneren des Klebstoffs und deren Haftweise an den Fügeparten zu beschreiben. Zum derzeitigen Stand der Forschung kann jedoch noch kein Modell alle Bereiche vollständig erklären. Daher wird in diesem Abschnitt die für die Arbeit relevanten Ansätze und Betrachtungsweisen näher beleuchtet.

### 2.4.1 Kohäsion- und Adhäsionskräfte

Kohäsions- und Adhäsionskräfte im Klebstoff und an dessen Grenzgebiete entstehen durch die gleichen atomaren bzw. molekularen Wechselwirkungen. Innerhalb der Polymere des Klebstoffs wirken die Hauptvalenzkräfte. Diese sind die Folge des Austauschs der Valenzelektronen der beiden Bindungspartner. Bei einem ausgewogenen Elektronenaustausch ist die Bindung nach außen neutral unpolarisiert. Bindet jedoch eines der Atome eines Bindungspaares die Elektronen stärker, so wirkt die Bindung nach außen polarisiert. Je nach Position und Polarisierung in einem Molekül können Molekülteile oder das gesamte Molekül positiv polar, negativ polar oder positiv und negativ polar ausfallen. Dieser Effekt kann auch mit mehrfach wechselndem Vorzeichen über eine Molekülkette verteilt auftreten. Durch die Annäherung polarisierter Bereiche unterschiedlichen Vorzeichens entstehen zwischenmolekulare Bindungskräfte.

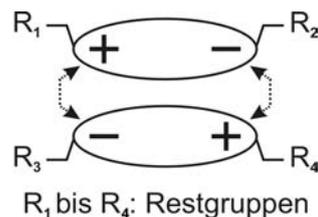


Abbildung 2.4: Anziehungskräfte in einer zwischenmolekulare Dipol-Dipol-Bindung

Die durch die Polarisierung entstehenden Ladungsverschiebungen können z.B. Dipolgruppen erzeugen, deren zwischenmolekulare Kräfte als Dipol-Dipol-Bindung bezeichnet wird. Diese Bindungsart ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Des Weiteren können Bindungskräfte zwischen positiv polarisiertem Wasserstoff und negativ polarisierten Atomen wie (z.B. Sauerstoff) entstehen. Diese Bindung wird als Wasserstoffbrückenbindung bezeichnet und ist in Abbildung 2.5 gezeigt.

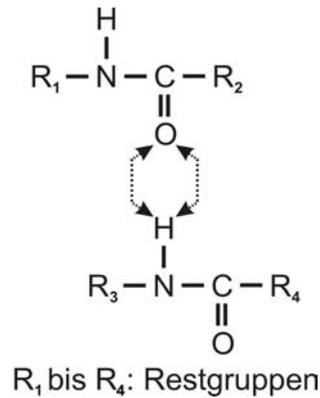


Abbildung 2.5: Wasserstoffbrückenbindung

Die elektrostatischen Anziehungskräfte führen bei der Dipol-Dipol-Bindung zu einer Orientierung zweier Dipolgruppen mit entgegengesetzten Vorzeichen. Die Bindungsenergie für diese Bindungsart liegt bei 50 - 60 kJ/mol [12]. Die bei der Wasserstoffbrückenbindung entstehenden Anziehungskräfte und die daraus resultierende Bindung bewirken keine Orientierung der Molekülkette, da beide Bindungspartner über eine polarisierte Stelle verfügen. Die Bindungsenergie liegt bei dieser Bindungsart bei < 50 kJ/mol [12].

Die zwischenmolekularen Bindungskräfte sind, verglichen mit den Hauptvalenzkräften, relativ gering und können jedoch die äußeren Belastungen zwischen den Molekülketten durchaus übertragen. Die Kräfte sind jedoch vom Abstand der Bindungspartner abhängig. Daraus resultiert eine starke Temperaturabhängigkeit der Festigkeit, da über eine Energiezufuhr die Moleküle angeregt werden und durch Schwingung den Abstand zueinander variieren. Um höhere Festigkeiten zu erreichen sind zwischenmolekulare Hauptvalenzbindungen nötig [12]. Diese verbinden die einzelnen Polymere untereinander und bilden Vernetzungen. Dazu müssen reaktive Gruppen in den Polymeren vorhanden sein, die direkt mit anderen Polymeren oder über Klebstoffadditive reagieren können. Vernetzte Polymere können nicht mehr aufeinander abgleiten und steigern dadurch die Festigkeit des Klebstoffs. Diese Vernetzungen sind temperaturbeständiger, da deren Bindungsenergie deutlich höher liegt.

Die Bindung der Molekülketten an der Fügeiteiloberfläche sind in ähnlicher Weise zu erklären. Da bei reinen Metallen kaum polare Bereiche vorliegen tritt der Effekt der Polarisierung durch induzierte Ladungsverschiebung auf [12]. Polarisierter Bereiche einer Molekülkette, die in die Nähe der metallischen Bindung gebracht werden, verschieben die Elektronenwolke im Metallgitter. Hierbei entstehen induzierte Polarisierungen, die mit ähnlichen Anziehungskräften die Adhäsionskraft bewirken [12]. Die Polarisierungstheorie kann jedoch nicht die Adhäsionsvorgänge am unpolarem Substrat erklären. Des weiteren sind auf der Metalloberfläche an Korngrenzen, Versetzungen und Oberflächendefekten Metallatome in energetisch ungünstiger Lage. Diese sind bestrebt, ihren energetischen Zustand und somit die Oberflächenenergie zu minimieren und Reaktio-

nen mit z.B. Haftvermittlern einzugehen. Diese Verbindungen sind meist asymmetrisch aufgebaut und daher polarisiert [12]. Klebstoffadditive und Haftvermittler können an diesen Stellen entweder über Dipol-Dipol-Bindungen oder über Hauptvalenzbindungen die Haftung verbessern. Um die Anzahl der Oberflächendefekte, und damit die Anzahl der Atome in energetisch ungünstiger Lage zu erhöhen, kann z.B. auf chemischem Wege die Oberfläche geätzt oder auf physikalischem Wege die Oberfläche deformiert werden (sandstrahlen, erodieren, schleifen, etc.). Bei nicht, oder nur schwach polarisierbaren Oberflächen kann eine chemische bzw. physikalisch-chemische Vorbehandlung zur Aktivierung der Oberfläche nötig sein. Da die meisten Kunststoffe polare Gruppen beinhalten bzw. physikalisch oder chemisch polarisierbar oder aktivierbar sind, kann die Haftung ebenso für die Kunststoffe erklärt werden. Zusätzlich kann bei Kunststoffen über Lösungs- und Quellvorgänge eine Diffusion des Fügeiteilmaterials in den Klebstoff und umgekehrt stattfinden.

### 2.4.2 Struktureller Aufbau der Klebeschicht

Durch die Anlagerung von Klebstoffmolekülen an die Oberfläche der Fügeiteile tritt der Effekt der Adsorption auf, der physikalisch durch die Bindungsenergie und chemisch durch mögliche irreversible Bindungen bestimmt ist. Durch Stoffanreicherung an der Oberfläche werden Teile der Molekülketten an die Grenzfläche gebunden [16]. Es tritt an der Oberfläche eine Materialhäufung auf, deren verbleibende Teilsegmente in den noch flüssigen Klebstoff ragen und fadenförmige oder schlaufenförmige Segmentenden bilden. In Abbildung 2.6 ist eine derartige Materialanlagerung am Substrat schematisch gezeigt.



Abbildung 2.6: Adsorption von Polymeren am Substrat nach [16]

Aus dieser theoretisch und praktisch nachgewiesenen Modellvorstellung heraus erklärt sich auch eine Veränderung der strukturellen und mechanischen Eigenschaften der Grenzschicht in Fügeiteilnähe. Die Dicke dieser Grenzschicht hängt unter anderem von der Oberflächenrauigkeit ab. Hierbei ist die Definition der wirksamen Oberfläche hilfreich. Diese Oberfläche ist der Teil der realen Oberfläche, der vom Klebstoff benetzt wird und maßgeblichen Beitrag zur Haftung leistet [12]. Die wirksame Oberfläche ist größer als die geometrisch idealisierte und kleiner als die reale Oberfläche. Von dieser Oberfläche kann die Schichtdicke der Randschicht als konstant betrachtet werden [12]. Durch die verschiedenen Fertigungsverfahren (drehen, fräsen, schleifen, erodieren, strahlen, etc.) kann die Rautiefe der Oberfläche eingestellt werden. Übliche Werte liegen bei  $4\mu\text{m}$  -

160 $\mu\text{m}$  [2]. Durch eine erhöhte Rauigkeit der Oberfläche wird diese vergrößert und der Adsorptionseffekt wirkt ausgeprägter. Wird die Oberfläche jedoch rauer, so nimmt die Benetzungsfähigkeit der Oberfläche ab, wobei kein direkter Zusammenhang zwischen dem Benetzungsvermögen und der Festigkeit der Klebung nachweisbar ist [12]. Um den Einfluss starker Variabilität der Klebeschichtdicke im Bereich der Klebstoffmitte zu minimieren wird nach [12] eine minimale Klebstoffdicke in Höhe der maximalen Rautiefe empfohlen. Wird der Abstand unterschritten, so kann es zum Oberflächenkontakt der Fügeiteile oder zum Verbund beider Grenzschichten kommen. Beide Effekte können negative Einflüsse auf die Endfestigkeit der Klebung haben.

### 2.4.3 Darstellung der Klebeschicht und deren Bruchbilder

Auf Grund der strukturellen Veränderungen im Aufbau der Klebeschicht kann es, wie z.B. in Abbildung 2.7 gezeigt, zu unterschiedlichen Schubmoduli zwischen den Grenzschichten und dem Kohäsionsbereich kommen. Die Übergänge können abrupt oder kontinuierlich verlaufen [12].



Abbildung 2.7: Verschiebung in einer Klebeschicht unter Schubbelastung

Diese Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften können verschiedene Bruchbilder hervorrufen. Gradienten der Materialdaten zwischen den Grenzschichten und dem Kohäsionsbereich können erhöhte Spannungen im Übergangsbereich hervorrufen. Ein Bruch in diesem Bereich wird als substratnaher Kohäsionsbruch bezeichnet. Bei mangelnder Haftung wird ein Bruch durch den Adhäsionsbereich führen und daher als Adhäsionsbruch bezeichnet. Analog dazu wird der Bruch durch die Kohäsionsschicht als Kohäsionsbruch definiert. In der Regel ist die Bruchfläche jedoch eine Mischung aller drei Bruchbilder. Die Bruchbilder sind in Abbildung 2.8 zusammengefasst dargestellt.

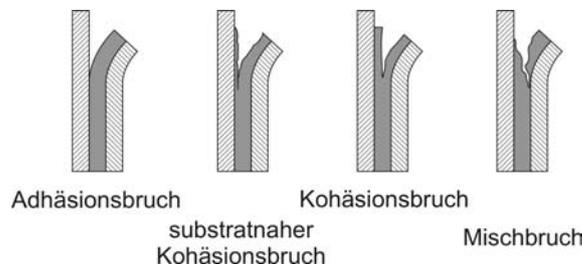


Abbildung 2.8: Verschiedene Bruchbilder bei Klebeverbindungen

Erkennbar ist, dass die Haftung und Festigkeit von Klebstoffen vielen Einflussfaktoren unterliegt, wobei an dieser Stelle nur die wichtigsten aufgeführt sind. Alle Einflüsse spielen direkt oder indirekt zusammen und können derzeit nicht an einem gesamtheitlichen Modell beschrieben werden. Für eine Optimierung der Klebeschichtbelastung müssen daher die Vielzahl der Randbedingungen in einem Parameter zusammengefasst werden, dessen Abhängigkeit in der Oberflächenbeschaffenheit, dem Fertigungs- und Fügeverfahren, den verwendeten Fügeteil- und Klebstoffmaterial zu sehen ist. Bei einer Zusammenfassung der Randbedingungen wird der Parameter jedoch nicht universell verwendbar, sondern muss für jede Variation neu bestimmt werden.

## 2.5 Spezielle Klebstoffe und deren Aufbau

Klebstoffe können in einzelne, deren Aufbau und Funktionsweise beschreibende Gruppen unterteilt werden. Eine große Gruppe sind die chemisch reagierenden Klebstoffe, die ein- oder mehrkomponentig vorliegen können. Diese können kalt- oder warmhärtend ausgelegt sein und binden durch chemische Reaktionen der Monomeren ab. Hierbei entstehen aus den Monomeren durch Polykondensation, Polymerisation oder Polyaddition langkettige Polymere, die miteinander verbunden sein können [12]. Weitere Gruppen sind die reaktiven Schmelzklebstoffe und physikalisch abbindende Klebstoffe [12], denen in dieser Arbeit keine Bedeutung zukommen.

Im Folgenden werden die in den Versuchen verwendeten Klebstoffe näher beleuchtet.

### 2.5.1 Cyanacrylatklebstoffe

Cyanacrylatklebstoffe sind in der Regel Einkomponentenklebstoffe und von der  $\alpha$ -Cyanacrylsäure abgeleitet, wobei sich die Alkylgruppierungen unter anderem als Methyl- bzw. Ethylgruppe darstellen lassen. Die Abbildung 2.9 zeigt die Strukturformeln der  $\alpha$ -Cyanacrylsäure und deren Methyl- bzw. Ethylester.

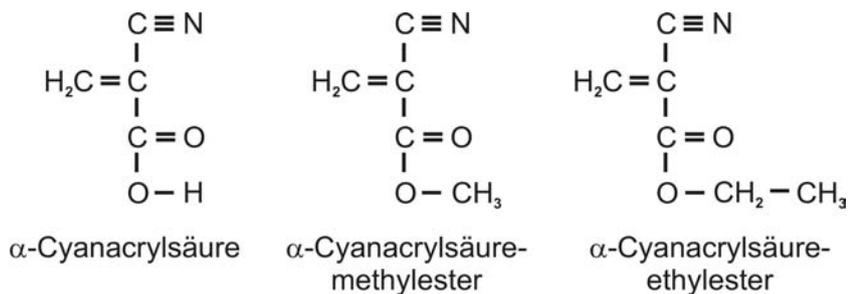


Abbildung 2.9: Strukturformeln der  $\alpha$ -Cyanacrylsäure und deren Methyl- bzw. Ethylester

Durch die Cyangruppe (-CN) bzw. den Sauerstoff an der Estergruppe (-CH<sub>3</sub>, -C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>, etc.) ist das Ladungsgleichgewicht der Kohlenstoffdoppelbindung zu diesen beiden Gruppen hin verschoben. Dies ermöglicht unter anderem die Anlagerung von negativ geladenen Molekülen, Monomeren, Polymeren, Prepolymeren oder Ionen an das positiv polarisierte Kohlenstoffatom des  $\alpha$ -Cyanacrylatesters. Je kleiner der Esterrest des  $\alpha$ -Cyanacrylatesters ist, desto stärker ist die Polarisierung des Moleküls ausgebildet und desto schneller sind die Polymerisierungsgeschwindigkeiten [12]. Als Initiator der Polymerisation dienen meist OH<sup>-</sup>-Ionen, die aufgrund der Eigendissoziation des Wasser in Form der Luftfeuchte vorhanden sind. Dieser Vorgang ist am Beispiel des  $\alpha$ -Cyanacrylatmethylester in Abbildung 2.10 dargestellt.

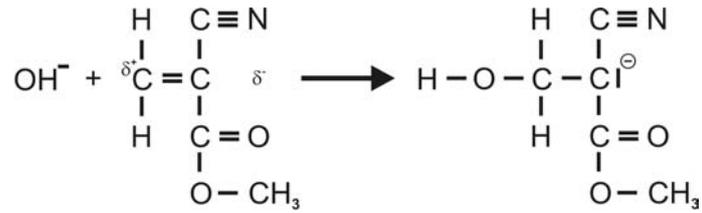


Abbildung 2.10: Anlagerung eines  $\text{OH}^-$ -Ions an ein  $\alpha$ -Cyanacrylatmethylester

Das Produkt dieser Reaktion ist ein Kettenstarter mit ionischem Charakter. Die Polymerisation kann nun durch Anlagerung der monomeren  $\alpha$ -Cyanacrylatesters erfolgen und wird bis zur Aufhebung des ionischen Charakters fortgesetzt [12]. Abbildung 2.11 zeigt die Kettenverlängerung auf Basis des  $\alpha$ -Cyanacrylatesters.

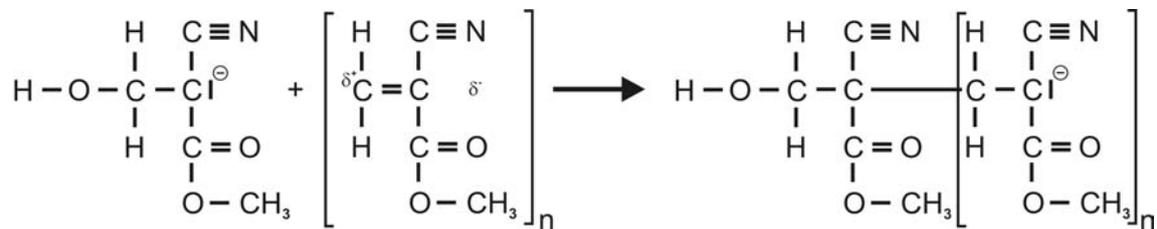


Abbildung 2.11: Polymerisation des  $\alpha$ -Cyanacrylatesters am Beispiel des  $\alpha$ -Cyanacrylatmethylesters

Durch Zusatzstoffe werden unter anderem eine Verbesserung der Lagerbeständigkeit, Einstellung der Viskosität und die Veränderung der mechanischen Eigenschaft erreicht. Diese Stoffe können die Polymerisation, das Start- und das Stopverhalten des Klebstoffs verändern. Des weiteren kann durch das Auftragen von Aktivatoren auf die Fügeteile die Polymerisation auch ohne das Vorhandensein von  $\text{OH}^-$ -Ionen zuverlässig gestartet werden. Die mittlere Moleküllänge beträgt mehrere 100.000 Moleküle [12].

Für den Kettenstart sind die  $\text{OH}^-$ -Ionen aus der umgebenden Luftfeuchtigkeit ausreichend. Typischerweise sollte bei Cyanacrylatklebstoffen die Luftfeuchte während des Fügeprozesses bei 50%-70% liegen [12]. Werte darüber führen möglicherweise zur Schockaushärtung, die mit Eigenspannungen in der Klebeschicht einhergeht. Ist die Luft zu trocken, so ist die Feuchtigkeit auf den Fügeteilen und in der Luft nicht ausreichend, um eine zügige Polymerisation einzuleiten. Lange Aushärtzeiten und evtl. negative Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften sind die Folge.

## 2.5.2 Epoxy-Klebstoffe

Die Epoxy-Klebstoffe sind Polyadditionsklebstoffe deren Aufbau auf der Addition reaktiver Monomere beruht. Hauptsächlich ist die Epoxid-Gruppe an dieser Addition beteiligt. Es gibt verschiedene Basisstoffe der Epoxy-Klebstoffe, die ein oder mehrere Epoxid-Gruppe beinhalten.

Die wichtigsten sind nach [12]:

- Epoxide auf Basis von Bisphenol A
- cycloaliphatische Diepoxide
- aliphatische Epoxide
- epoxidierte Fettsäuren

Für die Addition der Monomere müssen bewegliche Wasserstoffatome verfügbar sein. Diese finden sich z.B. in Aminen, Carbonsäuren bzw. deren Anhydriden und hydroxylhaltigen Harzen wie z.B. Phenolharzen [12]. Wie in Abbildung 2.12 dargestellt, bildet das bewegliche Wasserstoffatom mit dem Sauerstoff der Epoxid-Gruppe eine Hydroxylgruppe aus, wobei die freiwerdenden Valenzkräfte die Addition der Monomere ermöglicht. Die Reaktionsgeschwindigkeit hängt dabei von der Beweglichkeit der Wasserstoffatome ab. Mit der Wahl des zweiten, an der Reaktion beteiligten Monomers kann die Reaktionsgeschwindigkeit und damit auch die Tropfzeit eingestellt werden [12].

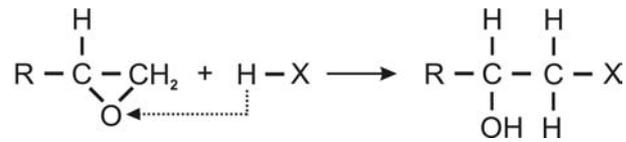


Abbildung 2.12: prinzipielle Reaktion der Epoxid-Gruppe [12]

Die zur Addition der Epoxidharze nötigen Monomere können in mehrere Gruppen aufgeteilt werden, wobei die Auflistung auf Grund der Vielfalt auf die wichtigsten Gruppen beschränkt wird.

- Aminhärtung
- Säurehydridhärtung
- Härtung mit Thioverbindungen

Aufgrund der Vielfältigkeit der einzelnen Abbindeverfahren wird das Abbinden anhand der Aminhärtung näher beleuchtet. Die Aminhärtung folgt dem oben erläuterten Reaktionsschema. Das Amin gibt sein Wasserstoffatom als bewegliches Atom an die Epoxid-Gruppe ab und reagiert mit dieser über die nun freien Valenzkräfte. Über die Anzahl der Amingruppen kann der Vernetzungsgrad eingestellt werden.

Als Reaktionsbeispiel sei auf die Vernetzung von Dicyandiamid mit einem Epoxidharz hingewiesen [12] [8]. Diese Reaktion bildet, wie in Abbildung 2.13 dargestellt, ein komplexes Polymer mit hohem Vernetzungsgrad. Das Beispiel zeigt die Vielfalt und Komplexität allein der Aminhärtung von Epoxidharzen auf, die sich auch in den mechanischen Eigenschaften unterscheiden.

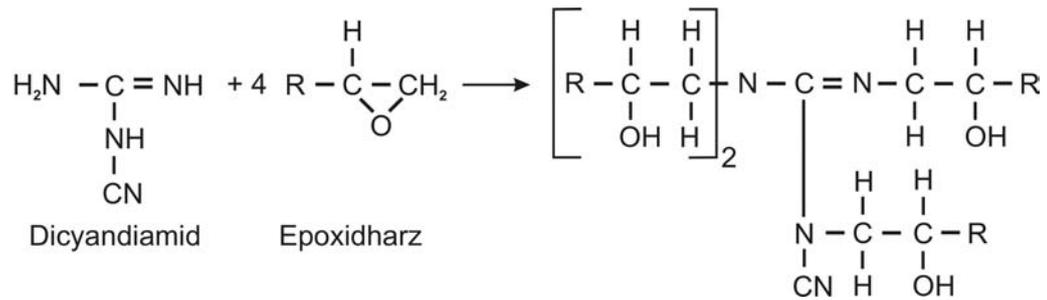


Abbildung 2.13: Vernetzung des Dicyandiamids mit einem Epoxidharz [12] [8]

### 2.5.3 Anaerobe Klebstoffe

Die anaeroben Klebstoffe härten nach Sauerstoffabschluss meist in Verbindung mit dem Vorkommen von Metallionen aus. Da diese Klebstoffsparte eine Vielzahl von verschiedenen Varianten offen hält, ist eine genaue Beschreibung des chemischen Härtevorgangs nicht ohne weitergehende Informationen über die eingesetzten Monomere des verwendeten Klebstoffs möglich. Aus diesem Grund wird an dieser Stelle von einer tieferen Beschreibung abgesehen.

## 2.6 Die Finiten Elemente

In der Strukturmechanik können viele Probleme numerisch gelöst werden, indem die im allgemeinen komplex gestalteten Bauteile mit einfachen geometrischen Bausteinen approximiert werden. Hierbei wird das Bauteil mit bekannten Elementen, wie z.B. Stäben, Dreiecke oder Blöcken ausgefüllt, deren Berechnung aus der Theorie bekannt sind. Jedes Element besteht aus den begrenzenden Eckknoten und, je nach Elementtyp, den Elementseiten, Flächen und Volumen. Manche Elemente haben in ihrer Formulierung zusätzlich Mittelknoten in der Mitte der Elementseiten oder Flächen. Ein einzelnes Element hängt über die Freiheitsgrade mit den Nachbarelementen zusammen.

In der Strukturmechanik können drei Verschiebungen in den Koordinatenrichtungen  $(u_x, u_y, u_z)$  und drei Verdrehwinkel  $(\phi_x, \phi_y, \phi_z)$  als Freiheitsgrade eingehen. Je nach Problemstellung können diese unter einem vertretbaren Genauigkeitsverlust reduziert werden. Über die Ansatzfunktionen der Elemente ergibt sich ein Gleichungssystem mit den noch unbekanntem Verschiebungen und Verdrehungen, das numerisch gelöst werden kann. Meist wird das Prinzip vom Minimum der potentiellen Energie  $\Pi$  zugrundegelegt [27], wobei sich die Gesamtenergie aus den inneren Potentialen  $\Pi_{ie}$  und dem äußeren Potenzial  $\Pi_a$  zusammensetzt (2.22).

$$\Pi = \Pi \{u\} = \sum_{Elem.} \Pi_{ie} + \Pi_a \quad (2.22)$$

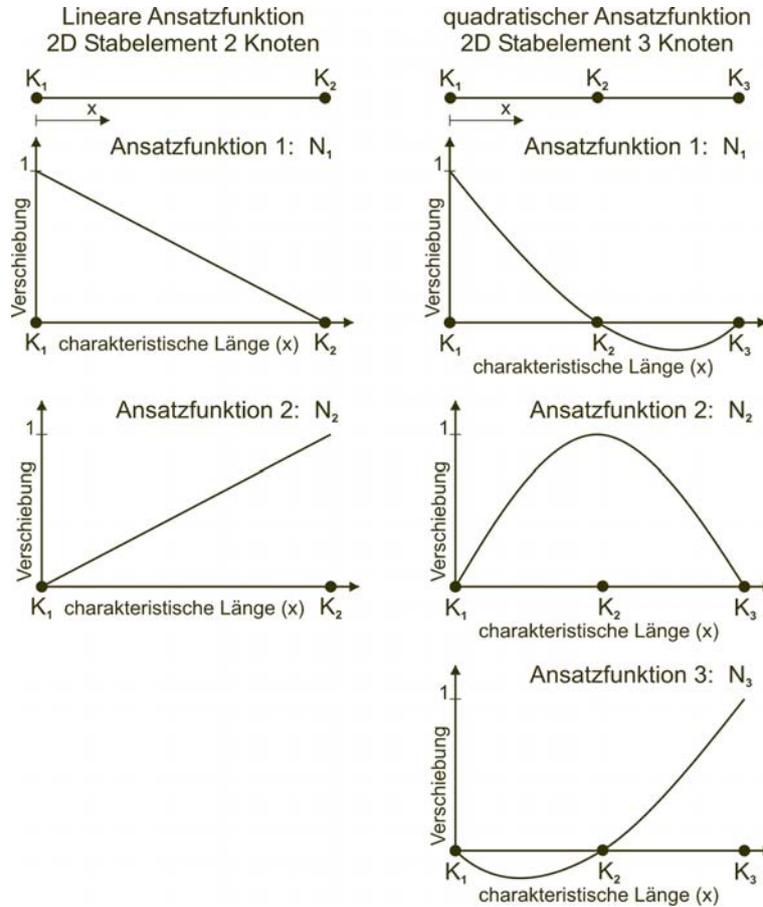
Das Prinzip vom Minimum der potentiellen Energie bedeutet, dass die innere potentielle Energie mit den angreifenden Belastungen, also der äußeren potentiellen Energie, in einem Minimum steht. D.h., es existiert eine Lage, in der die Verschiebung ein Minimum der potentiellen Energie hervorruft und jede Abweichung mehr Energie als nötig beansprucht [27]. Aus der Extrembedingung (2.23) kann daher das Gleichungssystem abgeleitet werden, das z.B. zur Berechnung der unbekanntem Knotenverschiebungen und Verdrehungen herangezogen werden kann.

$$\frac{\partial \Pi \{u\}}{\partial \{u\}} = 0 \quad (2.23)$$

$$[K] \cdot \{u\} = \{F\} \quad (2.24)$$

Gleichung (2.24) zeigt dieses Gleichungssystem in Matrixschreibweise für die Beziehung zwischen dem Lastvektor  $\{F\}$  und dem Verschiebungsvektor  $\{u\}$ , wobei die Koeffizienten des Gleichungssystems in der Matrix  $[K]$  zusammengefasst sind. Für Festigkeitsberechnungen sind in der Matrix  $[K]$  hauptsächlich Material- und Geometriedaten zusammengefasst. Daher wird diese Matrix auch als Steifigkeitsmatrix bezeichnet [27]. Die Steifigkeitsmatrix setzt sich aus den einzelnen Elementsteifigkeitsmatritzen zusammen, für deren Berechnung die Ansatzfunktion der Knotenverschiebung der Elementknoten eingeht.

Abbildung 2.14 zeigt mögliche Ansatzfunktionen für zweidimensionale Stabelemente. Anhand der Ansatzfunktionen kann im Element die Verschiebung nach Gleichung (2.25) angegeben werden, wobei die Matrix  $[N]$  die Ansatzfunktionen beinhaltet.



Lineare Ansatzfunktion:

$$u = a_0 + a_1 \cdot x$$

Quadratische Ansatzfunktion:

$$u = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2$$

Abbildung 2.14: Lineare und quadratische Ansatzfunktionen der Knotenverschiebung eines Stabelementes

Durch die Ableitung der Verschiebungen des Elementes können aus Gleichung (2.25) die Dehnungen im Element bestimmt werden. Die Dehnung lässt sich nach Ableitung allgemein in der Gleichung (2.26) darstellen, wobei  $[B]$  die abgeleitete Matrix  $\partial[N]$  darstellt [27]. Die Spannung ist über die Materialgesetze mit der Dehnung gekoppelt. Im

einfachsten Fall ist dies das *Hookesche Gesetz* mit der skalaren Größe  $E$  für den E-Modul. Im allgemeinen Fall wird die Materialmatrix  $[D]$  angegeben (2.27). Wird die Gleichung (2.26) in die Gleichung der Spannung eingesetzt, so ergibt sich die Abhängigkeit der Spannung vom Verschiebungsvektor  $\{u\}$ .

$$\begin{pmatrix} u_x \\ \vdots \end{pmatrix} = [N] \cdot \{u\} \quad (2.25)$$

$$\{\epsilon\} = [B] \cdot \{u\} \quad (2.26)$$

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\epsilon\} \quad (2.27)$$

$$\{\sigma\} = [D] \cdot [B] \cdot \{u\} \quad (2.28)$$

Wird nun das innere Potential  $\Pi_{ie}$  betrachtet, so kann dies nach [27] über die Gleichung (2.29) berechnet werden. Durch Einsetzen der Gleichungen (2.26, 2.28) in (2.29) ergibt sich die Steifigkeitsmatrix eines Elementes (2.31).

$$\Pi_{ie} = \frac{1}{2} \cdot \int_0^v \{\epsilon\}^T \cdot \{\sigma\} dv \quad (2.29)$$

$$\Pi_{ie} = \frac{1}{2} \{u\}^T \cdot \int_0^v [B]^T \cdot [D] \cdot [B] dv \cdot \{u\} \quad (2.30)$$

$$[K]_e = \int_0^v [B]^T \cdot [D] \cdot [B] dv \quad (2.31)$$

$$[K] = \sum_{Elemente} [K]_e \quad (2.32)$$

Die Gesamtsteifigkeitsmatrix kann über die Summe aller Elementsteifigkeitsmatrizen errechnet werden (2.32). Wird die berechnete Gesamtsteifigkeitsmatrix in der Gleichung (2.24) eingesetzt, so können die unbekanntes Verschiebungen errechnet werden. Die charakteristische Größe dieser Rechnung ist der Knotenverschiebungsvektor  $\{u\}$ , der die Translationsgrößen  $(u_x, u_y, u_z)$  und Rotationsgrößen  $(\phi_x, \phi_y, \phi_z)$  der Knoten zusammenfasst. Mit steigender Elementanzahl steigt die Komplexität der Matrizen und Vektoren schnell an. Daher ist eine Lösung schon mit geringen Elementanzahlen nur noch mit dem Computer sinnvoll möglich.

# 3 Optimierung nach dem Vorbild der Natur

## 3.1 Wachstumsregeln und Überlebensstrategie der Bäume

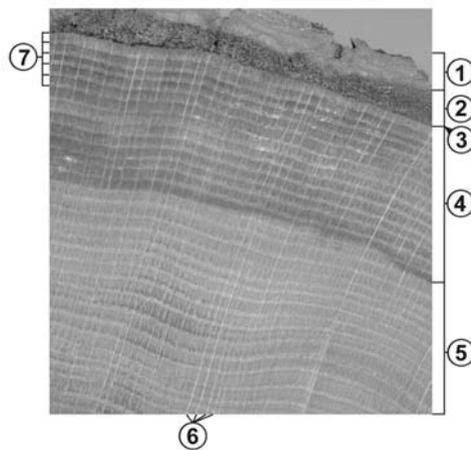
Im Altertum der Erde, vor ca. 400 Millionen Jahren, trat die Pflanzenwelt, aus dem Meer kommend, den Sturm auf das Festland an. In den folgenden 100 Millionen Jahren war die Pflanzenwelt soweit entwickelt, dass sich Wälder gebildet hatten. Schachtelhalm- und Farnbaumwälder überzogen das Festland. In stetigem Konkurrenzkampf um das Licht der Sonne entwickelten sich immer mehr Baumarten. Eines der heute noch lebenden Fossilien aus dem Jura, vor 150 Millionen Jahren, ist der Ginkgo-Baum, der als Tempelbaum in China und Japan, sowie als Park- und Alleenbaum noch heute sehr begehrt ist. Er hat nahezu keine Feinde und kennt keine Krankheiten [4]. Bis heute hat die Evolution eine große Vielfalt an Bäumen hervorgebracht, die weite Bereiche der Erde bevölkern. Die andauernde Konkurrenz um das begehrte Sonnenlicht lässt die Bäume in Richtung der Hauptlichtquelle, nach [19] dem positiven Phototropismus, wachsen. Die Bäume, die schnell ihre Blätter oder Nadeln in einem Wald zum Sonnenlicht bringen können, haben einen Vorteil gegenüber denjenigen, die dann im Schatten liegen. Dieses phototrope Wachstum kann mechanisch auch zum Nachteil werden, wenn der Baum eine asymmetrische Krone ausbildet und die Windkräfte an dieser angreifen. Der Baumstamm unterliegt dann drei Belastungen:

- 1.) Druckbelastung durch das Eigengewicht
- 2.) Biegebelastung durch das flächige Angreifen des Windes an der Krone
- 3.) Torsionsbelastung durch eine asymmetrische Baumkrone und entsprechender Windbelastung

Die immer höher werdenden Bäume mußten sich den stetig steigenden Belastungen im Stamm anpassen. Da das Baumaterial des Baumes nicht nur in die Dicke des Stammes, sondern auch in das Höhenwachstum und den vielen kleinen Ästen und deren Blättern oder Nadeln eingebracht werden muss, ist es eine logische Folge, dass die Konstruktion des Baumaterials sparend geschaffen wird. Es wird nur dort Material angelagert, wo es wirklich gebraucht wird. Innerhalb der letzten 300 Millionen Jahren hat die Evolution daher einen optimierten Bauplan zur Erstellung der Bäume erarbeitet, der stetig weiter angepasst wird.

### 3 Optimierung nach dem Vorbild der Natur

Der Schnitt durch einen Baumstamm zeigt, dass der Aufbau des Stammes in mehreren Funktionsschichten eingeteilt werden kann. Die äußerste Schicht ist die Borke, die vor äußeren Verletzungen schützen soll. Darauf folgt der Bast, dessen Hauptaufgabe der Transport der in den Blättern synthetisierten Nährstoffe, den Assimilaten, ist. Darauf folgt das Kambium, eine Wachstumsschicht, die in den Wachstumsperioden zur Stammseite Holz und zur Bastseite Bast erzeugt. An das Kambium schließt sich das Splintholz an, dessen Funktion teils im Wasser- und Mineralstofftransport, teils in Stützfunktionen liegt. Im Inneren des Stammes liegt das Kernholz, das aus mechanischer Sicht ausschließlich Stützfunktionen übernimmt. Zur radialen Kraftübertragung im Baumstamm liegen Zellreihen vom Stammzentrum ausgehend bis zur kambialen Schicht vor. Diese Zellbündel werden als Holzstrahlen bezeichnet und übertragen radiale Zugspannungen zwischen den einzelnen funktionellen Schichten. Zusätzlich sorgt der Holzstrahl für radialen Stoffaustausch im Holzkörper und fungiert als Stärke- bzw. Nährstoffspeicher. Die Abbildung 3.1 zeigen zusammenfassend den strukturellen Aufbau eines Baumstammes im Querschnitt.



- |                  |   |
|------------------|---|
| 1.) Borke:       | Schutz vor Verletzungen und Austrocknung  |
| 2.) Bast:        | Leitung von Assimilaten i.d.R. von oben nach unten  |
| 3.) Kambium:     | dünne Wachstumsschicht  |
| 4.) Splintholz:  | Leitungsbahnen für den Wasser- und Mineralstofftransport vor allem in der Frühholzschicht; Stützfunktion vor allem in der Spätholzschicht |
| 5.) Kernholz:    | aus mechanischer Sicht reine Stützfunktion  |
| 6.) Holzstrahl:  | aus mechanischer Sicht radiale Zugübertragung   |
| 7.) Jahresringe: | unterteilt in abwechselnde Frühholz- und Spätholzschichten  |

Abbildung 3.1: Aufbau des Baumes anhand eines Sägeschnittes der Stieleiche (*Quercus robur L.*); Bild: K. Weber, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung II

Jedes Jahr gibt es bei den einheimischen Bäumen zwei Wachstumsphasen. Die erste Wachstumsphase im Frühjahr und die zweite im Spätjahr. Im Frühjahr ist das Holz mit erweiterten Gefäßen durchzogen, die dem Wasser- und Mineralstofftransport dienen. Im Spätjahr hingegen wird eine Holzschicht erzeugt, deren Hauptaufgabe in der Stützfunktion des Stammes liegt [28]. Zusätzlich zu diesen Funktionen erfüllen diese Schichten weitere biologische Aufgaben, die jedoch für die weitere Betrachtung vernachlässigt werden können. Wird der Unterschied in den Holzstrukturen betrachtet, so ist es naheliegend, dass die einzelnen Schichten unterschiedliche mechanische Eigenschaften aufweisen. Das Verhältnis der E-Moduli zwischen Früh- und Spätholz bei Kiefer mit einer Feuchte von 8-10% liegt nach [17] bei ca.  $\frac{E_{Spät}}{E_{Früh}} = 5,6$ . Im grünen Baum wird dieses Verhältnis nicht ganz so ausgeprägt auftreten, da mit steigender Feuchte im Holz niedrigere E-Moduli zu erwarten sind [17]. Um unter Last, wie z.B. unter Biegung, eine Delamination zu verhindern, vergurtert der Baum die Früh- und Spätholzschichten mit radial verlaufenden Zellbündeln. Diese Holzstrahlen verlaufen vom Stammzentrum radial, senkrecht auf die Jahrringgrenze. So vergurtert können radial Zugkräfte über den Stammquerschnitt übertragen werden.

Damit der Baum unter optimalem Materialeinsatz seine Gestalt aufbauen und verändern kann, ist er in der Lage, die Dicke neu zu erzeugender Jahrringe zu variieren. Der Baum reagiert auf erhöhte Spannungen, wie z.B. an Rissspitzen, bei Kontakt oder bei Biegung, mit höherem Wachstum an den hochbelasteten Stellen [39]. Niedrigbelastete Bereiche erhalten nur geringe Zuwächse. Dies zeigen die in Abbildung 3.2 dargestellten Wurzelanläufe, die unter Biegebelastung (links) und unter Biege-Zugbelastung (rechts) beansprucht wurden. Nach [19] kann angenommen werden, dass der Baum sein Dickenwachstum so anlegt, dass er auf der Oberfläche eine homogene Spannungsverteilung anstrebt. Diese Annahme ist durch zahlreiche Vergleichsrechnungen in [19] nachgewiesen worden. Die äußere Gestalt des Baumes kann daher durch das *Axiom der konstanten Spannung* vorhergesagt werden [19]. Diese Berechnungsmöglichkeit und das daraus entwickelte Optimierungsverfahren wird im folgenden Kapitel 3.2 näher beleuchtet.

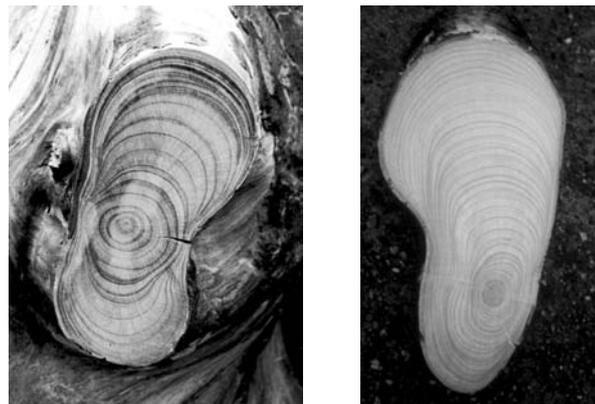


Abbildung 3.2: Schnittbilder von Wurzelanläufen; links: unter Biegebelastung; rechts: unter Biegebelastung mit überlagertem Zug [20]

## 3.2 Die CAO-Methode

Das CAO Berechnungsverfahren (**CAO** = *Computer Aided Optimization*) kopiert das sekundäre Dickenwachstum des Kambiums der Bäume [19]. Der Baum lagert in hochbelasteten Bereichen mehr Material an, als in Bereichen niedriger Belastung. Die CAO-Methode überträgt dieses Wachstumsverhalten auf eine Randschicht eines technischen Bauteils. Treten in der Randschicht erhöhte Spannungen auf, so wird an diesen Stellen, proportional zur Überhöhung der Spannung, Material angelagert. Der Schritt des Wachstums kann für technische Bauteile durch thermische Dehnungsrechnungen mit Hilfe der Finiten Elemente (FE) nachgebildet werden. Hierbei wird die Spannungsverteilung in eine äquivalente Temperaturverteilung umgerechnet. Diese kann als Last auf das Modell aufgebracht werden und über die Steuerung von E-Modul und thermischem Ausdehnungskoeffizienten wird ein Wachstum analog zum natürliche Vorbild möglich. Die meist inhomogenen Spannungsverteilungen an der Bauteiloberfläche werden durch dieses Verfahren homogenisiert und die häufig versagensauslösenden Spannungsspitzen abgebaut.

Am Anfang der CAO-Optimierung wird ein FE-Modell erstellt, eine dünne Schicht an Elementen am zu optimierenden Konturverlauf als Wachstumsschicht definiert und anhand der Materialkennwerte, der Belastungen und der Randbedingungen eine Spannungsanalyse durchgeführt [22]. Aus der Spannungsanalyse wird die für das Material relevante Vergleichsspannung berechnet. In der Regel kann für Metalle mit der Vergleichsspannung nach Mises optimiert werden. Anhand der Vergleichsspannung liegt ein skalarer Spannungswert vor, der die relevante Belastung des Bauteils widerspiegelt. Diese Spannungsverteilung wird in eine äquivalente Temperaturverteilung umgerechnet. Die Berechnung erfolgt für jeden Knoten des FE Netzes, wobei der Vergleichsspannungswert  $\sigma_v$ , die Referenzspannung  $\sigma_{ref}$  und ein Skalierungsfaktor A eingehen (3.1) [24].

$$T = A[\sigma_v - \sigma_{ref}] \quad (3.1)$$

Als Referenzspannung wird der Spannungswert verwendet, der als Vergleichsspannung in der Wachstumsschicht vorliegen soll. Da der Zusammenhang zwischen Spannung und Temperatur linear ist, wird das berechnete Temperaturfeld äquivalent zum Spannungsfeld abgebildet. Dadurch wird die thermische Verschiebung direkt vom Spannungszustand gesteuert und bildet das mechanisch stimulierte Wachstum der Bäume ab.

Während der thermischen Verschiebungsberechnung wird der thermische Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  für die Wachstumsschicht auf einen positiven Wert gesetzt. Zusätzlich wird der E-Modul der Randschicht auf ca. 1/400 des angrenzenden Materials gesetzt [24]. So beschränkt sich die thermische Verschiebung auf die Wachstumsschicht und wächst annähernd senkrecht zur Bauteiloberfläche. Das Modell wird während der thermischen Verschiebungsberechnung von allen Belastungen der Spannungsanalyse befreit, so dass die resultierende Verformung des Modells nur von der Temperaturverteilung und somit von der ursprünglichen Spannungsverteilung abhängig ist.

Zur Speicherung des Optimierungsschrittes wird die Verschiebung auf das FE-Modell aufgeprägt. Durch die Verschiebung können im Modell Netzverzerrungen auftreten, die weitere Berechnungen stören oder verfälschen. Daher müssen derartige Verzerrungen durch eine Netzkorrektur behoben werden. Weitere Optimierungsschritte können nach einer Korrektur der Materialkennwerte und Randbedingungen folgen [39]. Als Abbruchkriterium der Optimierungsschritte kann je nach Modell und Randbedingungen die Verschiebung der Randkontur oder die Reduktion von Spannungsüberhöhungen herangezogen werden. Abbildung 3.3 stellt die CAO-Methode im Überblick dar.

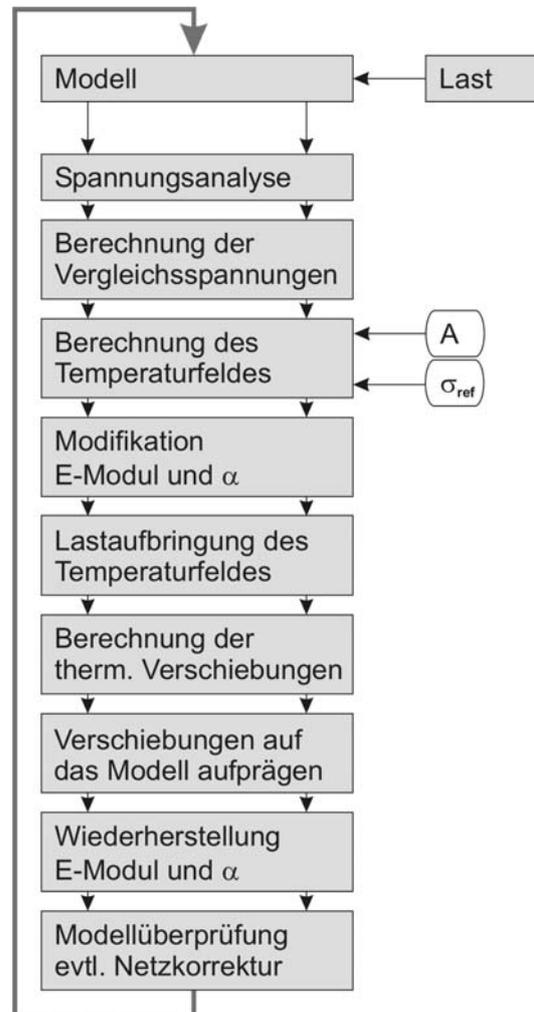


Abbildung 3.3: Die CAO-Methode im Überblick

Die Übereinstimmung der Optimierungsergebnisse mit den natürlichen Vorbildern ist vielfach an Beispielrechnungen unter anderem vom *C. Mattheck*, *M. Teschner*, *U. Vorberg*, *F. Walther* und *A. Baumgartner* durchgeführt worden [22] [23] [24] [25].

### 3.3 Die Leichtigkeit des Knochenbaus und deren technische Anwendbarkeit

Analog zum Wachstum der Bäume kann auch im Knochenaufbau und dessen Reparaturfunktionen nach Design- und Wachstumsregeln gesucht werden. Für den Bewegungsapparat eines jeden Tieres, das auf Geschwindigkeit angewiesen ist, hat sich die Natur über die Jahrtausende geschickte und trickreiche Leichtbaukonstruktionen einfallen lassen. Der Mensch als Laufmaschine hat z.B. einen Oberschenkelknochen mit relativ dünnem Knochenschaft (*Diaphyse*), der teilweise mit einer porösen, schaumartigen Knochenstruktur (*Spongiosa*) gefüllt ist [29]. Abbildung 3.4 zeigt das Schnittbild eines menschlichen Oberschenkelknochens aus [21]. Im Knocheninneren ist die Spongiosa als feines Fachwerk erkennbar, das von einem Schaft mit variabler Dicke umrahmt ist. Wird die Spongiosa näher betrachtet, so fallen strukturierte Anordnungen ins Auge, die teils gewölbeartig und teils strebenartig zwischen dem umrandenden Knochenschaft liegen. Nach *Wolff* [43] zeigen diese Strukturen den trajektorialen Verlauf der Hauptspannungen im Knochen. Vielen Anatomiestudien über den Aufbau der Spongiosa für normal gewachsene und deformierte Knochen (unter anderem in [29], [32], [43]) stellen diese Ordnung für das innere Fachwerk der Knochen fest.



Abbildung 3.4: Menschlicher Oberschenkelknochen im Schnittbild [21]

Im mittleren Bereich des Oberschenkelknochens liegt eine Zone vor, die überwiegend von Druckbelastung geprägt ist. Das Knochengewebe richtet sich nach dieser Belastung aus und bildet einen kompakten Knochenschaft. Nach [32] kann dieser Bereich als *kompakte Spongiosa* interpretiert werden, um die Formgebung zu erklären. Unter reiner Druckbelastung könnte der Knochenschaft auch zu einem Stab verschmelzen. Wird jedoch unterstellt, dass auch Torsions- und Biegebelastungen auftreten können, so

ist bei gleicher radialer Schnittfläche und einem angenommenen Verhältnis von Außen- zu Innendurchmesser von  $\frac{d_a}{d_i} = \frac{9}{5}$  (geometrisch entnommen aus Abbildung 3.4) ein röhrenförmiger Knochen um ca. 60% biege- und torsionssteifer. Das Beispiel des Knochenschaftes zeigt, dass die Natur die Konstruktion des Oberschenkelknochens auf eine Belastungsvielfalt optimiert hat, wobei die Spannung als treibende Kraft der Formgebung im Knochenaufbau angegeben werden kann.

Unter biologischer Betrachtung treten lokale Gesichtspunkte in den Vordergrund. Durch den interzellulären Stoffwechsel kann im Knochen das Wachstum über Botenstoffe gesteuert werden. Im embryonalen Alter ist der Aufbau des Knochens hauptsächlich genetisch bedingt. Erst später treten die Mechanismen der Optimierung zu Tage. Die für den Aufbau maßgeblichen Zellen sind die *Osteoblasten*. Diese Zellen scheiden das *Osteoid* ab, eine weiche Grundsubstanz und kollagene Fibrillen [37], die Interzellulärsbstanz. Sobald die Osteoblasten vollständig vom Osteoid umschlossen sind, werden die Zellen auf Grund der starken Matrixproduktion relativ stoffwechsellinaktiv und wandeln sich zu *Osteozyten* um. Diese eingeschlossenen Zellen halten Kontakt mit den Nachbarzellen über Zellfortsätze und scheiden unter anderem Mineralsalze ab, die zu einer Mineralisierung des Knochens führen. Der Gegenpol dieser Knochenerzeugung sind die für den Knochenabbau zuständigen *Osteoklasten*. Diese Zellen lagern sich am Knochen an und lösen das Knochengewebe auf. Die Resorbierung von Knochengewebe der Osteoklasten steht im Gleichgewicht mit den knochenaufbauenden Mechanismen der Osteoblasten und Osteozyten [6]. Dieses Gleichgewicht wird dem Menschen bei seinen Weltraumflügen leider zum Verhängnis. Aufgrund der fehlenden Gewichtbelastung im Orbit des blauen Planeten werden die osteoblastischen Reaktionen verringert, während die osteoklastischen Resorbtionsvorgänge unvermindert weiterlaufen. Die Folge bei Langzeitaufenthalt im All ist ein spröder, der Osteoporose ähnlicher Knochenaufbau, bei dem die Knochenmasse abnimmt [9].

Anhand des Reparaturverhaltens bei einem Knochenbruch kann weiter verdeutlicht werden, wie der Körper das Knochenwachstum steuert, und welchen Einfluss die Spannung hat. Tritt eine Fraktur auf, so entsteht ein pochender Schmerz an der Bruchstelle. Der Körper reagiert zuerst mit einer besseren Durchblutung der geschädigten Stelle. Nach [3] kann dieser Zeitabschnitt als Entzündungsstadium bezeichnet werden und dauert bis zu 5 Tage an. In dieser Zeit werden feine Adern zur Blutversorgung gebildet. Parallel zum Aufbau der erhöhten Blutversorgung wird Knorpel auf die Bruchstelle abgeschieden. Dieser Vorgang zieht sich weit in das nachfolgende Reparaturstadium hinein. Es entsteht ein Knorpelwulst an der Bruchstelle, in dem trabekuläres Knochenwachstum stab- und flächenförmiges Knochenmaterial bildet. Zusätzlich setzt eine Verknöcherung des Knorpels ein, bis der Knorpelwulst in trabekuläres und verknöchertes Gewebe umgewandelt ist. Dies geschieht im Normalfall in einem Zeitraum von 40 Tagen [3]. Der Knochen kann mit zunehmender Verknöcherung stärker belastet werden. Ist der Wulst vollständig verknöchert, so hat der Knochen seine Funktionalität mit erhöhtem Materialeinsatz zurückgewonnen. Ab der Mitte des Reparaturstadiums setzt die Remodellierung des Knochens ein, dessen Ziel es ist, die ursprüngliche optimierte Form wieder herzustellen. Die osteoklastischen Reaktionen resorbieren das unbelastete Knochenma-

terial und stützen den Knochenwulst langsam ein, während die Osteoplasten bei Bedarf den entstehenden Freiraum mit osteonalem Knochengewebe strukturiert auffüllen. Dieser Vorgang zieht sich über einen sehr langen Zeitraum hin. Im Alter werden die Zeiträume zwischen dem Beginn der Heilung und der Wiederherstellung der ursprünglichen Form immer länger. Bei schweren Frakturen kann sich dieser Vorgang über Jahre und Jahrzehnte hinziehen, wenn die Lebenszeit des Patienten ausreicht. Die Optimierung des Knochens setzt also ein, sobald ausreichend tragendes Knochenmaterial im Knorpelwulst gebildet worden ist. Davor wird eine schmerzhaft Fraktur in der Regeln nicht belastet, womit eine spannungsgesteuerte Stimulanz entfällt. Mit zunehmender Belastbarkeit nimmt auch die mechanische Stimulanz zu und die Optimierungsvorgänge beginnen. Zusammenfassend reagiert der Körper auf eine Fraktur mit überhöhtem Materialeinsatz um die Fraktur, um schnellstmöglich die Funktion wieder herzustellen und optimiert darauffolgend auf optimalen Materialeinsatz.

Ein ähnlicher Mechanismus bildet den trajektoriiellen Aufbau der Spongiosa bei auftretender Belastungsänderung um. Am Beispiel eines kleinen Segmentes der Spongiosa, dem *Trabekel*, kann das spannungsgesteuerte Wachstum näher beleuchtet werden. Wird ein Trabekel mit einer Last beaufschlagt, für den er nicht optimiert ist, entstehen eine ungleichmäßige Spannungsverteilung innerhalb des Trabekels. Durch die mechanische Stimulanz an den höherbelasteten Bereichen treten osteoblastische Reaktionen ein, die ein Knochenwachstum zur Folge haben. An Stellen mit geringer Belastung wird über verstärkte osteoklastische Reaktionen Knochengewebe abgebaut. Das Ergebnis dieses Wachstums ist die Anordnung der Trabekel in die Richtung der Hauptnormalspannungen. Abbildung 3.5 zeigt eine Simulation nach [19] für eine trabekuläre Struktur, die ungünstig belastet wird.

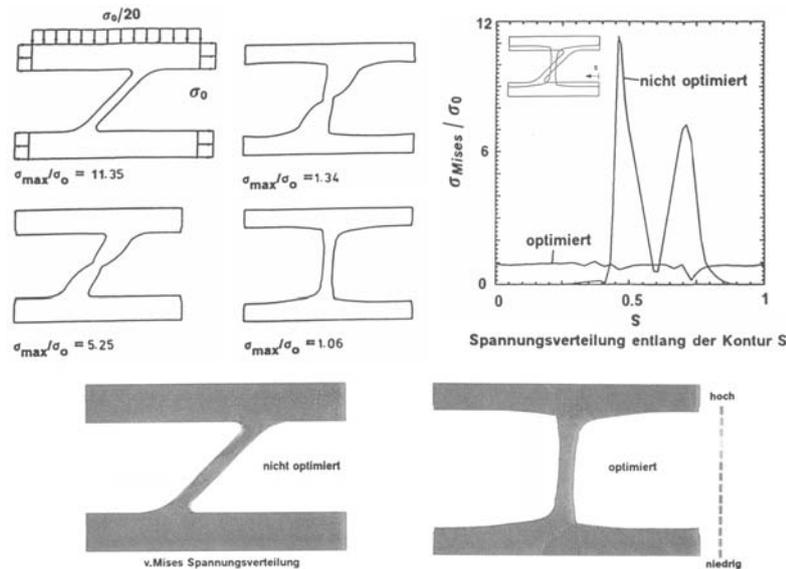
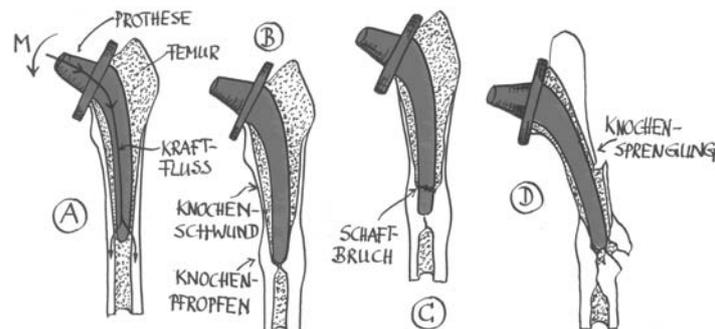


Abbildung 3.5: Trabekuläre Rotation in Richtung einer zur Trabekelachse geneigten Belastung [19]

Der dargestellte Trabekel wird in die Hauptbelastungsrichtung rotiert, wodurch die Biegebelastung eliminiert und die Spannungsverteilung signifikant homogenisiert wird. Durch die Ausrichtung der optimierten Knochenstruktur zur Hauptbelastungsrichtung ist die Belastung hauptsächlich in Zug- und Druckrichtung. Die Optimierung zeigt sich auch an den Knochenstrukturen junger Tiere, bei denen die Spongiosa nach der Geburt zufällig orientiert ist [3]. Erst nach der dynamischen Last des Alltages orientiert sich die Spongiosa nach den angreifenden Belastungen. Des Weiteren hat die Natur das Knochenmaterial anisotrop geschaffen. Die Zugfestigkeiten längs der Hauptbelastungsachse übersteigt nach [6] die Tangential- und Radialzugfestigkeiten um den Faktor zwei und mehr. Die Anisotropie kann derzeit jedoch nicht, oder nur mit sehr hohem Aufwand, technisch umgesetzt werden und wird daher in dieser Arbeit nicht näher betrachtet.

Das Wachstum durch mechanische Stimulanz zeigt sich ebenfalls bei Hüftgelenkprothesen, die in den Femurknochen eingesetzt werden. Die Prothese ist ein Beispiel für ein starres Implantat, das die Spannungsverteilung nach einer Operation signifikant verändern kann. Bei zu steifen Prothesen wird der Knochen entlastet, wodurch die Knochenmasse durch osteoklastische Resorption abgebaut wird [31]. Das mechanisch stimulierte Wachstum kann jedoch auch zu einer Versteifung führen, die zu einem Prothesenbruch führen kann [30]. Abbildung 3.6 zeigt nach [19] schematisch mögliche Schadensverläufe durch falsch dimensionierte Hüftprothesen. Radiologische Untersuchungen in [30] und [31] zeigen ebenfalls dieses Verhalten anhand von Röntgenaufnahmen eines implantierten Hüftgelenks nach einem Bruch und bei Routineuntersuchungen.



- (A) Der Knochen wird teilweise entlastet. Dargestellt ist der Kraftfluss in der Prothese und dem Knochen
- (B) Knochenpropfen am Prothesenauslauf durch lokale Überlastung, sowie Unterbelastung und Knochen-schwund im oberen Bereich des Knochen-schafts
- (C) Prothesenbruch durch zu steife Fixierung im Bereich des Knochenpropfens
- (D) zu starke Entlastung durch eine am Knochenpropfen aufsitzende Prothese. Der Knochen wird so entlastet, dass dieser bis zum Bruch ausdünn

Abbildung 3.6: Mögliche Schadensverläufe durch falsch dimensionierte Hüftprothesen nach [19]

## 3.4 Zusammenfassung der Wachstumsdirektiven

Aus technischer Sicht kann die Optimierung der Knochenstruktur ausreichend genau über die mechanische Stimulanz des Knochenauf- und Abbaus beschrieben werden. Dies wurde anhand der Struktur der Spongiosa, der Rotation und Translation von Trabekeln, der Reparatur von Frakturen und dem Knochenschwund an falsch dimensionierten Hüftprothesen gezeigt. Die Wachstumsregeln oder Wachstumsdirektiven, denen die Optimierung der Knochenstruktur folgt, kann in einfacher Weise formuliert werden.

Wird der Knochen ...

- ... hoch belastet, so wird Material angelagert, um das Belastungsniveau zu minimieren  
⇒ *Direktive 1 für technische Bauteile*: hoch belastete Bereiche eines Bauteils sollen proportional ihrer Überbelastung wachsen
- ... nur gering belastet, so wird dieser resorbiert, wenn keine biologische Gesichtspunkt dem entgegenstehen.  
⇒ *Direktive 2 für technische Bauteile*: niedrig belastete Bereiche eines Bauteils sollen proportional ihrer Unterbelastung schrumpfen
- ... beschädigt, so wird um die Fraktur erst zuviel Material angelagert, das später teilweise wieder resorbiert wird, um die Funktion schnellst möglich wieder herzustellen  
⇒ *Direktive 3 für technische Bauteile*: Wachstumsvorgänge müssen Vorrang vor Schrumpfungsvorgängen haben

Diese mechanische Interpretation der Wachstumsprinzipien im Knochen deckt sich im Wesentlichen mit der Interpretation des Wachstums in Bäumen und führt auf das *Axiom der konstanten Spannung* (Kapitel 3.1) zurück. Da für Bäume das Gewicht eine eher untergeordnete Rolle spielt, treten nur die Wachstumsregeln für den Materialzuwachs (*Direktive 1*) zu Tage. Da für technische Bauteile das Gewicht meist über die Energiebilanz während des Betriebes oder die Materialkosten in die Konstruktion eingeht, sind für deren Optimierung alle drei Direktiven anzuwenden.

Die aufgeführten Wachstumsdirektiven werden im Folgenden in einer Methode implementiert, die unter anderem zur Optimierung von Klebeschichten und deren Fügeiteile angewandt werden kann.

# 4 Optimierung von Klebeverbindungen nach dem Vorbild der Natur

Die dargestellte mechanische Interpretation des Wachstums an Knochen und Bäumen wird im folgenden direkt auf technische Bauteile angewandt, um diese zu optimieren. Ausgehend von einer Designvorlage, die alle technisch relevanten Randbedingungen enthält, kann unter Abarbeitung der Optimierungsdirektiven ein Designvorschlag iterativ errechnet werden. In der folgenden Tabelle sind diese Direktiven nochmals aufgelistet:

- Direktive 1:* Hoch belastete Bereiche eines Bauteils sollen proportional ihrer Überbelastung wachsen
- Direktive 2:* Niedrig belastete Bereiche eines Bauteils sollen proportional ihrer Unterbelastung schrumpfen
- Direktive 3:* Wachstumsvorgänge müssen Vorrang vor Schrumpfungsvorgängen haben

Wird das zu optimierende Bauteil mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente modelliert, so kann für einen bestimmten Belastungsfall eine Spannungsanalyse durchgeführt werden. Als Belastung, die auf ein Modell einwirken soll, wird ein realistisches Abbild der vorliegenden Bauteilbelastungen angenommen. Diese Belastung führt zu einer Spannungsverteilung im Material, die als *mechanische Stimulanz* analog zur Stimulanz im Knochen angesehen werden kann. Werden Wachstum und Schrumpfung der gefundenen Wachstumsregeln der Designvorlage auferlegt, so *wächst* diese angepasst an die auferlegte Last, analog zur Knochenremodellierung nach einem Knochenbruch, in eine optimierte Form.

Die Umsetzung des Bauteilwachstums kann mit Hilfe der thermischen Dehnungsrechnung dem natürlichen Vorbild nachempfunden werden. Das hierzu benötigte Temperaturfeld muss äquivalent zum Spannungsfeld in einer linearen Beziehung errechnet und als Last auf das Modell aufgebracht werden. Über die Angabe der Referenztemperatur, die der gewünschten Referenzspannung entspricht, werden in diesem Berechnungsschritt wachsende und schrumpfende Bereiche definiert, die proportional zur Über- bzw. Unterlast, den gefundenen Wachstumsdirektiven gehorchen. Daher wird im Folgenden dieser Berechnungsschritt als Wachstumsschritt bezeichnet. Die errechnete Verschiebung aus der thermischen Dehnungsrechnung wird nach Abschluss des Wachstumsschrittes auf das Modell als permanente Deformation aufbracht. Das verformte Modell steht

nachfolgend als Startmodell für den nächsten Optimierungsschritt bereit. Das Optimierungsverfahren ist daher als iteratives Verfahren umgesetzt, dessen Iterationsende über die Randkonturverschiebung der zu optimierenden Struktur ermittelt werden kann. In Abbildung 4.1 wird die technische Umsetzung der Optimierung geklebter Verbindungen im Überblick dargestellt.

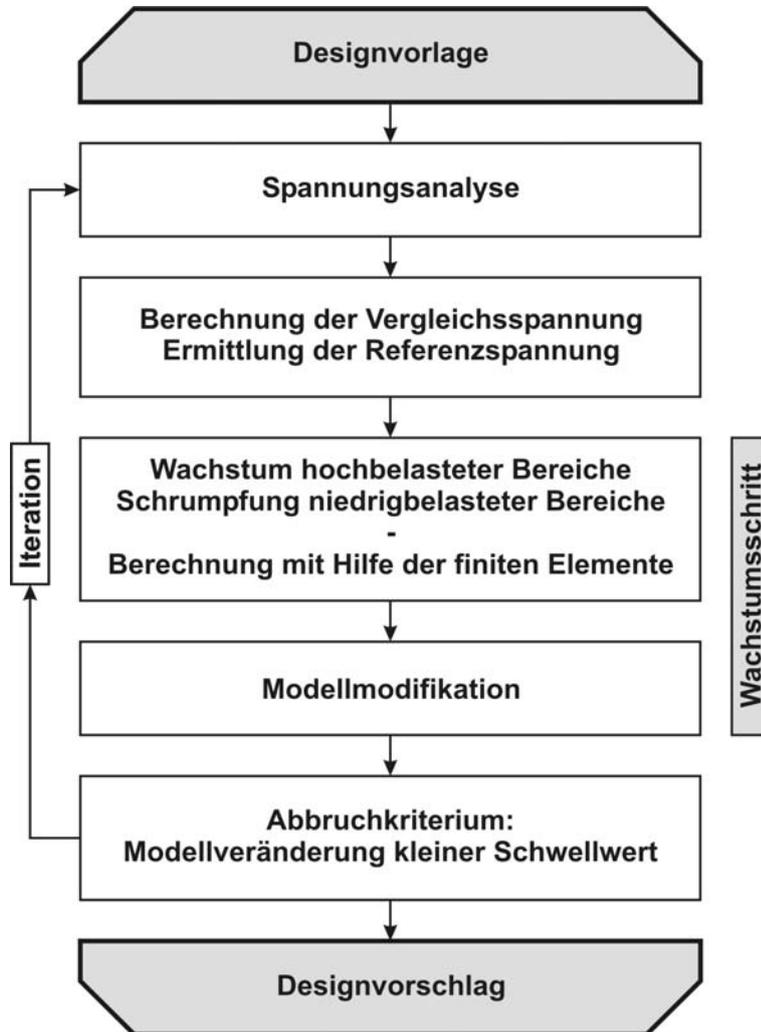


Abbildung 4.1: Designfindung durch Anwendung der gefundenen natürlichen Wachstumsregeln

Die folgenden Abschnitte dieses Kapitels werden die einzelnen Teilschritte näher beleuchten und die Umsetzung der Optimierung mit Hilfe der Finiten Elemente aufgezeigt. Die bei der Umsetzung entstehenden Randprobleme, wie z.B. die Netzverzerrung des FE Netzes, werden analysiert und auf Basis des FE-Programms *Ansys* gelöst. Da die Erläuterungen programmunspezifisch dargelegt werden, kann die Optimierung mit jedem FE Programm berechnet werden, das einerseits eine Spannungsanalyse und andererseits die thermische Dehnung berechnen kann.

## 4.1 Die technische Umsetzung des Wachstums

Werden die Wachstumsdirektiven auf Klebeverbindungen bezogen, so muss bei einem beliebigen Designvorschlag der Einfluss der Fügeteile auf die Spannungsverteilung in der angrenzenden Klebeschicht beachtet werden. Da bei der Berechnung der Spannungen in verklebten Bauteilen Spannungsinhomogenitäten schon bei kleinen Belastungen auftreten, kann die Spannungsanalyse mit linear elastischem Materialverhalten berechnet werden. Zeigt die Spannungsanalyse z.B. dass ein Fügeteil hoch belastet wird, während das gegenüberliegende Fügeteil kaum Belastung erfährt, so entsteht je nach Steifigkeit der Fügeteile eine lokale Spannungsüberhöhung in der Klebeschicht, da diese den Dehnungsunterschied übertragen muss. Bei einem Designvorschlag verklebter Bauteile sind daher Abhängigkeiten zwischen den Fügeteilen und der Klebeschicht vorhanden, die in eine Optimierung einfließen müssen. Bei Metallklebeverbindungen ist das schwächste Glied in der Kette der Kraftübertragung meist die Klebeschicht. Daraus folgt, dass bei einer Optimierung einer Klebeverbindung das Augenmerk mehr auf die Spannungsverteilung in der Klebeschicht gerichtet werden muss.

Klebeverbindungen bestehen in der Regel aus mindestens zwei Fügeteilen und mindestens einer Klebeschicht mit unterschiedlichen Materialkennwerten zwischen den Fügeteilen und der Klebeschicht. Da mit der Methode der Finiten Elemente meist Verschiebungen als Basis berechnet werden, sind die resultierenden Knotenspannungen in einem Element von den entsprechenden Materialkennwerten des zugehörigen Elementes abhängig. Sind diese unterschiedlich, wie z.B. für den Übergang zwischen Klebeschicht und Fügeteil, führt dies zu Sprüngen in den berechneten Knotenspannungsverteilungen, die bei gesamtheitlicher Betrachtung meist vom FE-Programm gemittelt werden. Dies hat zur Folge, dass bei der Übertragung der Wachstumsregeln auf ein FE-Modell einer Klebeverbindung eine Teilung der Wachstumsschritte an den Materialgrenzen erfolgen muss. Bei z.B. einer einfachen einschnittig überlappenden Klebeverbindung sind daher zwei getrennte Wachstumsschritte nötig, die nachfolgend wieder vereint werden. Abbildung 4.2 zeigt diese Trennung schematisch an einer Materialgrenze mit den unterschiedlichen E-Moduli  $E_1$  und  $E_2$ . Die Vereinigung der Wachstumsschritte errechnet eine Verschiebung der einzelnen Knoten im FE-Modell und bildet somit das Ausgangsmodell für eine nachfolgende Berechnung. Das Optimierungsverfahren ist daher als iterative Methode umzusetzen.

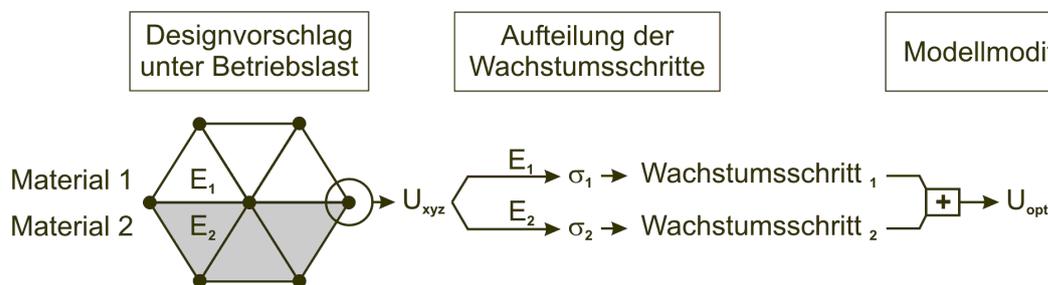


Abbildung 4.2: Materialbedingte Aufteilung des Wachstumsschritts

Für die Umsetzung der *Direktive 3*, also Wachstum vor Schrumpfung, muss die Materialzunahme an hochbelasteten Bereichen stärker gefördert werden als die Materialabnahme in Bereichen geringer Belastung. Die Stärke der Modellmodifikation muss daher, ausgehend von der gewünschten Belastung, abhängig vom Belastungszustand gewählt werden. In Abbildung 4.3 ist dies als Funktion zwischen Belastung und Modellmodifikation dargestellt, während die gewünschte Belastung als Referenzbelastung angegeben wird. Der Zusammenhang zwischen Belastung und Modifikation kann als innere Gewichtung des Wachstumsschrittes aufgefasst werden.

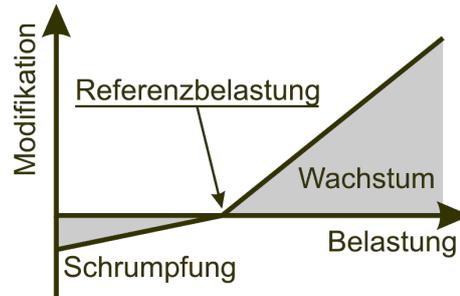


Abbildung 4.3: Umsetzung der Wachstumsdirektiven als Modellmodifikation über der Belastung

Zusätzlich zur Gewichtung innerhalb eines Wachstumsschrittes müssen auch die getrennt berechneten Wachstumsschritte zwischen den einzelnen Materialien gewichtet werden, da das Interesse hauptsächlich an der Optimierung des Spannungszustandes innerhalb der Klebeschicht liegt. Dazu muss der Wachstumsschritt der Klebeschicht höher gewertet werden, als der parallel berechnete Wachstumsschritt in den Fügeteilen. In der Anwendung hat sich ein empirisch bestimmter Faktor von 10 zwischen dem Wachstumsschritt der Klebeschicht und der Fügeteile als vorteilhaft erwiesen. Bei Gewichtungen mit größeren Faktoren wurden zu hohe Netzverzerrungen des FE-Netztes insbesondere bei spitz auslaufenden Fügeteilen festgestellt. Bei niedrigerer Gewichtung sind die Einflüsse der Fügeteile auf Grund der Massenverhältnisse zu ausgeprägt. Im Idealfall, d.h. bei vollständiger Spannungshomogenisierung, spielt der Gewichtungsfaktor keine Rolle, da beim Betrieb eines Bauteils unter Referenzbelastung keine Modifikationen nötig sind. Eine vollständige Homogenisierung der Spannungsverteilung ist auf Grund der Randbedingungen der Modelle meist nicht möglich. Das bedeutet, dass die Gewichtung nur in Bereichen erzwungener Inhomogenität zur Geltung kommt. In Gleichung (4.1) ist die Vereinigung einzeln berechneter Wachstumsschritte in den Fügeteilen und der Klebeschicht dargestellt, wobei von einer beliebigen Anzahl von Klebeschichten und Fügeteilen ausgegangen wird. Hierbei werden die errechneten Verschiebungen  $U$  der Einzelschritte gewichtet aufaddiert.

$$U_{Gesamt} = \frac{\sum U_{Klebeschicht}}{\text{Anzahl der Klebeschichten}} + \frac{1}{10} \cdot \frac{\sum U_{Fügeteile}}{\text{Anzahl der unabhängigen Fügeteile}} \quad (4.1)$$

Mit dieser Gewichtung der Wachstumsschritte hat die Klebeschicht für die Formgebung der Verbindung höhere Priorität, als die Fügeteile, die dennoch bei ungünstigen Spannungsverteilungen einen Einfluß auf die Lage der Klebeschicht erhalten.

Die technische Umsetzung der natürlichen Optimierungsvorgänge kann mit Hilfe der Finiten Elemente über thermische Dehnungen erreicht werden. Hierbei muss die Spannungsverteilung der relevanten Vergleichsspannung  $\sigma_v$  in eine äquivalente Temperaturverteilung umgerechnet werden. Bei metallischen Werkstoffen kann die von-Mises-Vergleichsspannung (Gleichung (4.2)) herangezogen werden. Für die Klebeschicht hingegen kann bei den in dieser Arbeit eingesetzten Klebstoffen die modifizierte von-Mises-Vergleichsspannung (Gleichung (4.3)) verwendet werden.

$$\sigma_{v \text{ von Mises}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{v \text{ mod. Mises}} = \frac{A}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} + Ac(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad (4.3)$$

$$\text{mit: } A = \frac{1}{(1 + c)} \quad (4.4)$$

Zur einfacheren Kontrolle der Optimierung wird das errechnete Temperaturfeld, wie in Gleichung (4.5) dargestellt, auf die maximale relevante Vergleichsspannung  $\sigma_{v \text{ max}}$  normiert, wobei die Maximaltemperatur bei 1000 {°C} festgelegt wird. Die Einheit der Temperatur wird formal in geschweiften Klammern dargestellt, da die Temperaturen zur Umsetzung der Wachstumsvorgänge genutzt werden. Die physikalische Bedeutung der Temperatur während der Wachstumsschritte ist nebensächlich und reduziert sich auf den Zusammenhang mit der thermischen Dehnung.

$$[T] = \frac{1000 \cdot [\sigma_v]}{\sigma_{v \text{ max}}} \{^\circ\text{C}\} \quad (4.5)$$

Um die Referenzbelastung in die Umsetzung des Wachstumsschrittes zu integrieren, wird diese Belastung, analog zu Gleichung (4.5), nach Gleichung (4.6) umgerechnet und in die Referenztemperatur  $T_{ref}$  überführt. Diese Berechnung ist für die Klebeschicht, wie für die Fügeteile gleich, wobei die Normierung auf dem jeweiligen Maximum der relevanten Vergleichsspannung beruht.

$$T_{ref \text{ K/F}} = \frac{1000 \cdot \sigma_{v \text{ ref Klebeschicht/Fügeteil}}}{\sigma_{v \text{ max Klebeschicht/Fügeteil}}} \{^\circ\text{C}\} \quad (4.6)$$

Über den thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  kann die gewünschte Gewichtung zwischen Wachstum und Schrumpfung direkt eingestellt werden, wobei der in Abbildung 4.3 angegebene Zusammenhang je nach Modell vereinfacht werden kann. Liegt

#### 4 Optimierung von Klebeverbindungen nach dem Vorbild der Natur

die Referenzbelastung des Modell bei niedrigen Belastungen, so kann wie in Abbildung 4.4.A gezeigt, ein linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient gewählt werden. Für alle anderen Konstellationen sollte mindestens ein bilinearer Ansatz, wie in Abbildung 4.4.B gezeigt, gewählt werden. Liegt die Referenztemperatur im hochbelasteten Bereich, wie in Abbildung 4.4.C gezeigt, so kann aus Gründen der Elementstabilität der Finiten Elemente ein minimaler thermischer Ausdehnungskoeffizient nötig sein.

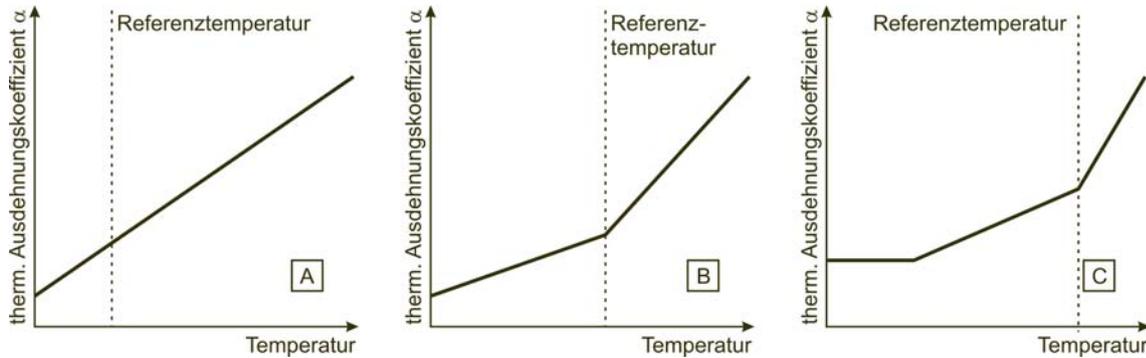


Abbildung 4.4: Variation des thermischen Ausdehnungskoeffizienten durch die Lage der Referenzspannung zur Vereinfachung der thermischen Dehnungsrechnung

Die Trennung der einzelnen Wachstumsschritte erfolgt über die Modifikation des thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Wird in einem Wachstumsschritt die Klebeschicht betrachtet, so wird der Ausdehnungskoeffizient der Klebeschicht, wie in Abbildung 4.4 gezeigt, modifiziert. Bei allen anderen Materialien verbleibt der Koeffizient bei Null. Aus dieser Modifikation folgt, dass ausschließlich die Klebeschicht durch thermisch Dehnung belastet wird, wobei die angrenzenden Fügeteile im Bereich der Klebeschicht mitverformt werden. Analog werden die Verformungen weitere Wachstumsschritte errechnet, wie in Abbildung 4.5 dargestellt, die am Ende der Iteration nach Gleichung (4.1) zusammengefasst werden können. Die so errechnete Gesamtverschiebung wird als bleibende Verformung auf das Modell aufgeprägt, um das Ausgangsmodell des nachfolgenden Iterationsschrittes zu bilden.

	Teilschritt 1	Teilschritt 2
Fügeteil 1	$\alpha = 0$	$\alpha > 0$
Klebeschicht	$\alpha > 0$	$\alpha = 0$
Fügeteil 2	$\alpha = 0$	$\alpha > 0$
	Optimierung der Klebeschicht	Optimierung der Fügeteile

Abbildung 4.5: Modifikation des thermischen Ausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  während der Wachstumsschritte

Um den rechnerischen Aufwand zu minimieren, wird die thermische Dehnungsrechnung unterstützt durch eine Modifikation der E-Moduli. Die Füge­teile und die Klebeschicht erhalten je ein E-Modul, das einerseits die Optimierungsgeschwindigkeit erhöht und andererseits die Gewichtung zwischen Klebeschicht und Füge­teile unterstützt. Experimentell konnten beste Ergebnisse erzielt werden, wenn der E-Modul der Klebeschicht um den Faktor 10 höher liegt, als der E-Modul der Füge­teile. Bei höheren Faktoren kann das Wachstum der Klebeschicht nach wenigen Iterationen starke Netzverzerrungen in den Füge­teilen hervorrufen. Bei geringeren Gewichtungsfaktoren nehmen, bei starken Inhomogenitäten in der Spannungsverteilung, die Füge­teile zu starkem Einfluss auf die Klebeschicht. Bei ungünstiger Lage der Klebeschicht sind wiederum nach wenigen Iterationen starke Verzerrungen der Elemente im Bereich der Klebeschicht zu erwarten, die wiederum zu einer frühzeitigen Neuvernetzung des FE-Modells führen.

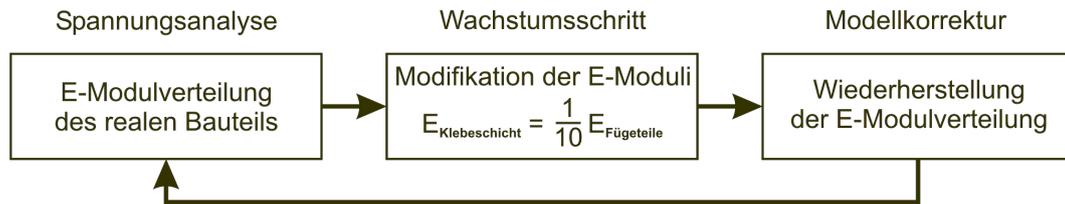


Abbildung 4.6: Variation des E-Moduls während der Wachstumsschritte

Nach dem Abschluss der Wachstumsschritte müssen die originalen E-Moduli für den nachfolgenden Iterationsschritt wieder hergestellt werden. In Abbildung 4.6 ist die Modifikation während eines Iterationsschrittes zusammenfassend dargestellt.

## 4.2 Zusammenfassung der Optimierungsschritte

Zusammenfassend kann die Umsetzung der Wachstumsdirektiven, wie in Abbildung 4.7 mit Hilfe der Finiten Elemente über die thermische Dehnungsrechnung erfolgen. Ausgehend von einem FE-Modell der Klebeverbindung wird unter Betriebslast eine Spannungsanalyse durchgeführt. Anhand der errechneten Spannungen wird die relevante Vergleichsspannung ermittelt und das äquivalente Temperaturfeld berechnet. Durch Auftrennung der Wachstumsberechnungen an den Materialgrenzen und Vereinigung der errechneten thermischen Verschiebungen ist die Abbildung der natürlichen Optimierungsvorgänge möglich.

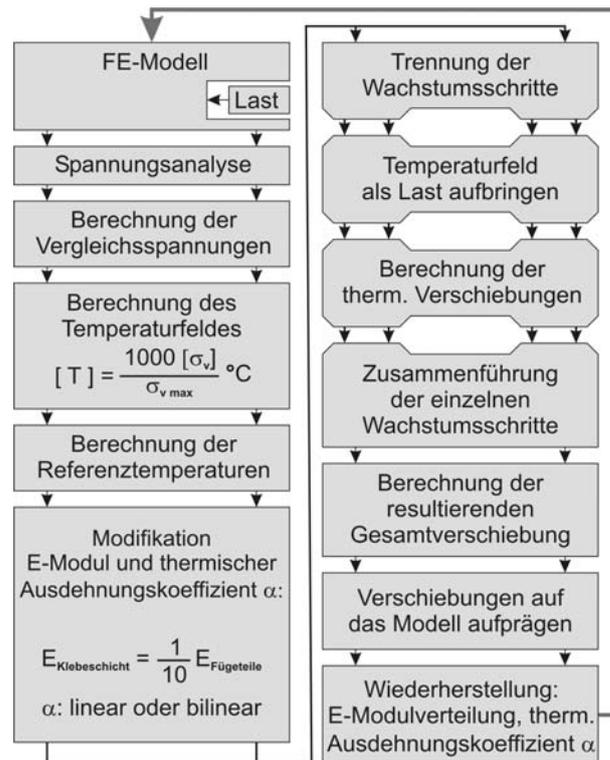


Abbildung 4.7: Überblick über die Optimierung von Klebeverbindungen

Während der Optimierung tritt häufig eine irreguläre Netzverzerrung auf, die einen nachfolgenden Rechenschritt unmöglich macht. Meist sind einzelne Elemente derart verformt, dass die Genauigkeit der Spannungsanalyse in diesen Elementen nicht zufriedenstellend wäre. Eine Neuvernetzung des Modells ist dann zwingend erforderlich, wobei die Modellierung der Klebeschicht einige Besonderheiten aufweisen muss, die im folgenden Kapitel beschrieben wird.

## 4.3 Die Klebeschichtmodellierung

Da sich die mechanischen Eigenschaften der Klebeschicht mit einer Dickenzunahme ändern können, muss für das FE Modell der Klebeschicht die Schichtdicke konstant gehalten werden. Bei konstanter Dicke soll die Klebeschicht in Längsrichtung wachsen und schrumpfen, sowie Biegung erfahren können. Zusätzlich soll verhindert werden, dass starke Verschiebungen der Füge­teile zu Elementverzerrungen in der Klebeschicht führen. Diese geometrischen Forderungen werden mit überlagerten Stabelementen (ANSYS: LINK1) erreicht, die über den Elementen der Klebeschicht angebracht werden. Es werden zwei Anordnungen der Klebeschicht nötig. Die erste Anordnung liegt senkrecht zur Grenzfläche der Klebeschicht und verhindert eine Dickenänderung. Die zweite Anordnung liegt kreuzförmig über den Elementen der Klebeschicht und stabilisiert die erste Anordnung, wie in Abbildung 4.8 ersichtlich.

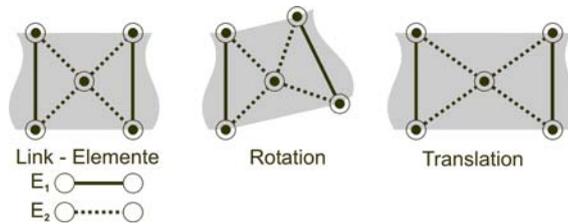


Abbildung 4.8: Versteifende Hilfselemente über den Elementen der Klebeschicht

Für die Spannungsanalyse dürfen die Hilfselemente keinen Einfluss haben. Dies wird über eine Variation des E-Moduls erreicht. Zur Spannungsanalyse wird der E-Modul  $E_1$  (Hilfselement für Dickenkonstanz) und  $E_2$  (Stabilität der Hilfselemente) auf einen verschwindend geringen Wert gesetzt. Dies ist üblicherweise ein E-Modul von  $1 \text{ N/mm}^2$ , wodurch der Einfluss der Stabelemente auf die Spannungsanalyse der Klebeschicht und der Füge­teile vernachlässigbar wird. Während den Optimierungsschritten wird der E-Modul  $E_1$  auf einen extrem hohen Wert gesetzt, um die Dickenkonstanz zu erreichen. Zusätzlich wird der Wert des E-Moduls  $E_2$  auf ein Niveau angehoben, das einerseits ein Längenwachstum ermöglicht und andererseits unzulässige Faltungen der Klebeschicht unterbindet. Die Einheit der E-Moduli sind, analog zu den verwendeten Temperaturen, während der Wachstumsschritten in geschweiften Klammern dargestellt, da diese Werte zur Abbildung der Wachstumsschritte eingesetzt werden. Die folgende Tabelle zeigt die in den Modellrechnungen der Beispielmole verwendeten Werte für die E-Moduli  $E_1$  und  $E_2$ :

$E_1$ und $E_2$ bei der Spannungsanalyse:	1	$\text{N/mm}^2$
$E_1$ während der Optimierungsschritte:	5.000.000	$\{\text{N/mm}^2\}$
$E_2$ während der Optimierungsschritte:	20.000	$\{\text{N/mm}^2\}$

Die in der Tabelle angegebenen Werte sind Erfahrungswerte und können für das einzelne Modell variiert werden. Wird jedoch der E-Modul  $E_2$  für die Optimierungsschritte auf

einen zu hohen Wert gesetzt, so wird die Klebeschicht generell zu steif und von den Füge-  
 teilen möglicherweise umwallt. Dies entspricht der natürlichen Reaktion der Bäume,  
 die so auf Kontaktspannungen angepresster Gegenstände mit einer Vergrößerung der  
 Kontaktfläche reagieren [19]. Dieses Verhalten führt zu stark verzerrten FE Netzen, die  
 folgende Iterationen der Optimierung unmöglich machen können.

Für die Vernetzung freier Formen sind im zweidimensionalen Fall Dreieckselemente mit  
 quadratischem Ansatz ideal, da diese leicht in kurvenreiche Freiformen gelegt werden  
 können. Die Elemente der Klebeschicht erfahren Deformationen während den iterativen  
 Optimierungsschritten, analog zu den Elementen der Füge-  
 teile, die einzelne Elemente derart verformen können, dass weitere Optimierungsschritte nicht mehr möglich sind.  
 Eine Neuvernetzung unter Beibehaltung der Randknotenverteilung kann das Problem  
 lösen und ist mit Dreieckselementen im Allgemeinen einfacher möglich. Die Fläche der  
 Klebeschicht wird daher mit Dreieckselementen (*ANSYS*: PLANE2) vernetzt, die eine  
 quadratische Ansatzfunktion verwenden. Da jedoch die Klebeschicht in ihrer Dicke  
 über Stabelemente konstant gehalten wird, müssen die Mittelknoten der Grenzschicht  
 zwischen den Füge-  
 teilen und der Klebeschicht entfernt werden, damit über die Schwell-  
 und Schrumpfungsvorgänge keine gewölbte Struktur entstehen kann. In Abbildung 4.9  
 ist eine deformierte Struktur mit und ohne Mittelknoten dargestellt. Analog zur Kle-  
 beschicht können auch die Füge-  
 teile vernetzt werden, die jedoch keine überlagerten  
 Hilfelemente benötigen.

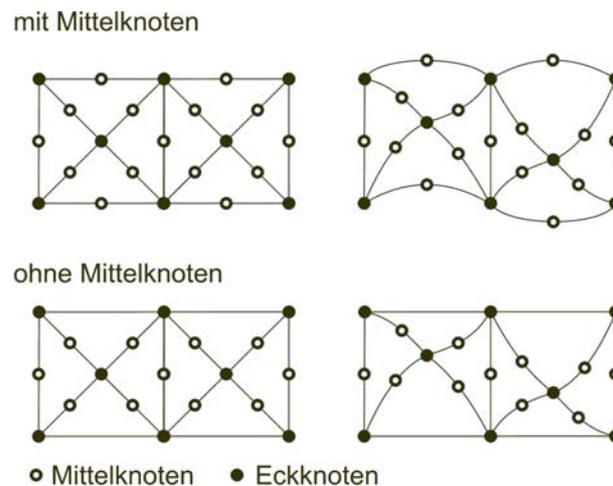


Abbildung 4.9: Entfernung von Mittelknoten an der Grenzschicht zwischen Klebeschicht  
 und Füge-  
 teil

## 4.4 Die Modellierung der Fügeiteile

Analog zur Modellierung der Klebeschicht werden auch die Fügeiteile mit Dreieckselementen vernetzt. Es wird ebenfalls ein Element ausgewählt, das mit einer quadratischen Ansatzfunktion arbeitet. Die Mittelknoten auf der Randkontour sind jedoch ungünstig für die Optimierungsschritte. Die Elemente beulen oftmals aus und führen zu geringen Iterationszahlen zwischen den einzelnen Neuvernetzungen. Das Problem kann mit der Entfernung der Mittelknoten auf der Randstruktur umgangen werden, ohne die höhere Rechengenauigkeit der Elemente allzusehr zu beeinträchtigen.

## 4.5 Neuvernetzung

Durch die Verformung des FE Netzes kann es während den Optimierungsiterationen zu einem Zustand kommen, in dem ein oder mehrere Elemente so stark verformt sind, dass diese nicht mehr für weitere Berechnungen verwendet werden können. Eine Neuvernetzung des Modells ist dann zwingend erforderlich. Da die Optimierung iterativ Verformungen auf das FE Modell aufprägt, verändern sich die Lage und Position der enthaltenen Elemente. Daher muss das FE-Netz von den Geometriedaten getrennt werden. Im zweidimensionalen Fall ist durch die Trennung die logische Verknüpfung zwischen Flächen und Elementen unterbrochen. Für eine Neuvernetzung mit Standardwerkzeugen, die auf Geometriedaten vernetzen können, muss diese Verknüpfung bei jeder Neuvernetzung erneut durchgeführt werden. Hierzu werden die Randknoten einer ausgewählten, zusammenhängenden Elementgruppe ermittelt, ein Linienzug über alle Randknoten erstellt und daraus eine Fläche erzeugt (Abbildung 4.10). Diese Fläche kann dann mit den Standardwerkzeugen neu vernetzt werden. Die ausgewählte Elementgruppe kann nach der Neuvernetzung der Fläche gelöscht werden, wobei die neu erstellten Elemente exakt die einstehende Lücke im FE-Modell auffüllen. Nach einer Verknüpfung der neu erzeugten Elemente mit dem bestehenden FE-Netz kann mit der Optimierung fortgefahren werden.

Da das Modell vielschichtig aufgebaut sein kann, wie z.B. die Elemente in der Klebeschicht, muss die Elementauswahl, die neu erstellt werden soll, so selektiert werden, dass die Randknoten der selektierten Elemente mit den Randknoten überlagerter Elemente (z.B. Stabelemente) übereinstimmt. Ist dies gegeben, so kann unter Beibehaltung der Randknoten die Elementauswahl neu erstellt werden, ohne Verbindungen zu überlagerten Elementen beachten zu müssen. Des Weiteren darf die Elementauswahl keine Löcher beinhalten, da die Erzeugung dieser Flächen mit den Standardwerkzeugen nicht generell möglich ist.

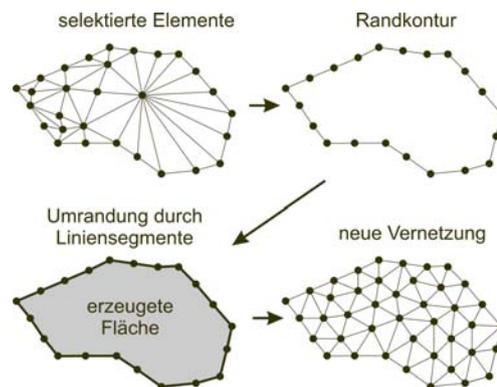


Abbildung 4.10: Schematische Darstellung der Neuvernetzung einer Elementauswahl

Vernetzungsprobleme ergeben sich, wenn die Randknotenverteilung derart ungünstig ist, dass die neu vernetzte Fläche degenerierte Elemente enthält. In diesem Fall ist eine manuelle Korrektur der Knotenverteilung nötig.

Im ersten Schritt werden die Randknoten bestimmt. Diese werden für den späteren Linienzug die Linienstart- und endpunkte bilden. Zur Bestimmung ist die Position im Element wichtig. Unter *ANSYS* kann diese Position eines Knotens im Element ausgelesen werden. Abbildung 4.11 zeigt die Positionsbezeichnungen der Knoten des Elementtyps *Plane2* und deren Bezeichnung.

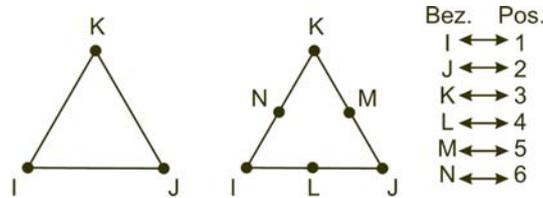


Abbildung 4.11: Knotenposition für den Elementtyp *PLANE2* (*ANSYS 8.0*) [1]

Der Linienzug wird an einem beliebigen Randknoten gestartet. Der Startpunkt des ersten Liniensegmentes wird gespeichert und bildet den Endpunkt des gesamten Linienzuges. Zur Bestimmung des Endpunktes des Liniensegmentes werden alle Elemente der zu vernetzenden Auswahl herausgesucht, die den Startknoten als Eckknoten beinhalten. Eines dieser Elemente beinhaltet den gewünschten Endpunkt. Damit der richtige Endpunkt eindeutig bestimmt werden kann, wird an dieser Stelle definiert, dass der Linienzug mathematisch positiv, also entgegen den Uhrzeigersinn erstellt wird. Diese Definition erlaubt eine klare Aussage über die Position des Endpunktes in einem Element. Ist der Startpunkt auf der Position *eins* ('I'), so muss der Endknoten auf der Position *zwei* ('J') liegen und zusätzlich ein Randknoten sein. Dies gilt reihum, wie in Abbildung 4.12 dargestellt, für alle weiteren Eckpositionen.

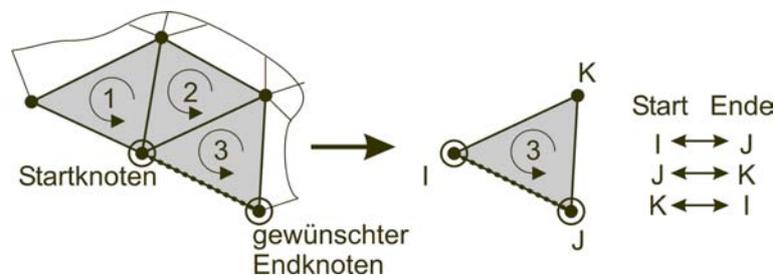


Abbildung 4.12: Elementauswahl zur Endknotenbestimmung

Ist ein potentieller Endknoten gefunden, besteht die Möglichkeit, dass die Struktur einen einreihigen Elementaufbau hat. Dies tritt in spitz zulaufenden Konstruktionen auf. Es besteht dabei die Gefahr, dass der gefundene Eckknoten zwar ein Randknoten ist, die Elementkante jedoch zu zwei Elementen der Elementauswahl gehört (Abbildung 4.13). Dies bedeutet, dass die geplante Linie durch das Material hindurchgeht und einen Teil ausgrenzt. Daher darf die Elementkante ausschließlich zu einem einzigen Element der Elementauswahl gehören.

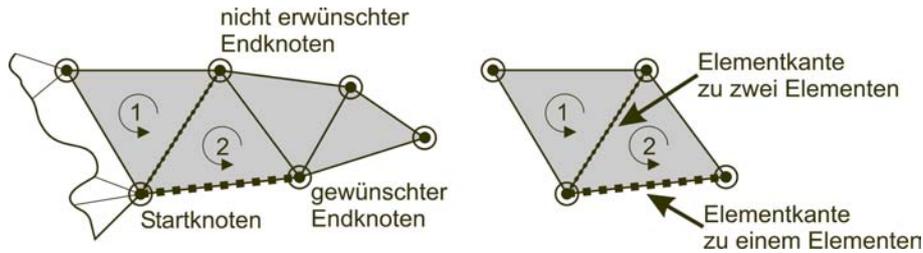


Abbildung 4.13: Elementkantenbedingungen bei spitz zulaufenden einelementigen Konstruktionen

Sind alle Randknoten behandelt, so ist ein geschlossener Linienzug entstanden. Die eingeschlossene Fläche kann jetzt als Fläche definiert werden. Diese Definition beinhaltet die oben erwähnte Bedingung, dass keine Löcher in der Fläche enthalten sein dürfen. Eine Umgehung dieser Einschränkung zeigt die Abbildung 4.14, in der eine schrittweise durchgeführte Neuvernetzung zum Ziel führt. In der ersten beiden Schritten wird die Teilauswahl so gewählt, dass beide Neuvernetzungen die Elemente um das Loch herum behandeln. Im zweiten Schritt müssen die Knoten neu vernetzt werden, die auf der vorherigen Teilungskante lagen. Eine ausreichende Überlappung gewährleistet eine vollständige Neuvernetzung.

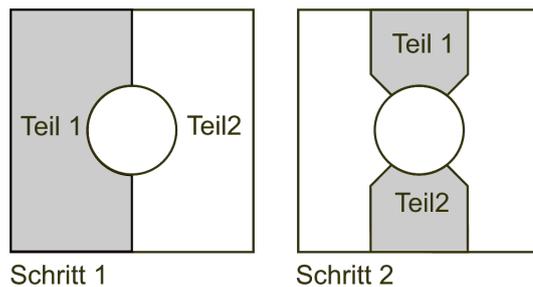


Abbildung 4.14: Neuvernetzung an der Lochplatte in mehreren Schritten

Bei Verwendung von Elementen mit Mittelknoten und reduzierte Elemente ohne Mittelknoten in einem FE Netz können Elemente mit und ohne Mittelknoten den Rand der Elementauswahl bilden (Abbildung 4.15). Daher muss bei der Erstellung des Linienzuges abgefragt werden, ob ein Mittelknoten auf der Elementkante des Ursprungs elements vorhanden ist.

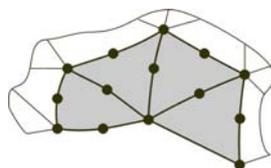


Abbildung 4.15: Elementauswahl mit und ohne Mittelknoten auf den Elementrandkanten

Auf Basis dieser Abfrage kann ein Hilfsnetz (*MESH200 Ansys 8.0*) über den Linienzug gelegt werden, um diese Konfiguration zu speichern. Diese Linienvernetzung wird wahlweise mit und ohne Mittelknoten erzeugt und bei der späteren Flächenvernetzung vom Standardvernetzer berücksichtigt. Das Hilfsnetz kann nach abgeschlossener Flächenvernetzung aus dem FE Netz entfernt werden. Eine Standardvernetzung platziert die Mittelknoten auf die Mitte der Verbindungslinie zwischen zwei Eckknoten. Da die Position eines Mittelknotens auf dem Rand der Elementauswahl in einer verformten Umgebung nicht in der Mitte der Elementkante sein muss, ist eine nachfolgende Korrektur der Mittelknoten nötig. Durch eine Koordinatenmanipulation der Mittelknoten können die neu erzeugten Randmittelknoten auf die ursprüngliche Position verschoben und mit dem bestehenden Netz verbunden werden.

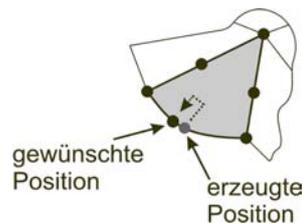


Abbildung 4.16: Verschiebung eines Mittelknotens auf die ursprüngliche Position

Mit dieser Methode lassen sich Flächen ohne Geometriedaten auf Basis einer Elementauswahl neu vernetzen. Das Verfahren kann auch für andere Elementtypen angewandt werden, wobei sich die Positionsreihenfolge der Knoten im Element ändern kann. Dies gilt vor allem für Dreiecksvernetzungen, die aus degenerierten Vierecksvernetzungen aufgebaut sind.

## 4.6 Die CA<sup>3</sup>O-Optimierung im Überblick

Die Methode wird auf Grund der kombinierten Optimierung der Füge­teile und der Klebeschicht im folgenden *CA<sup>3</sup>O - Methode* (Computer Aided Adhesive and Assembly Optimization - Computergestützte Klebeschicht- und Bauteiloptimierung) genannt.

Die Wachstumsdirektiven, die das mechanisch stimulierte Knochenwachstum und das Wachstum der Bäume erklären, können für die Optimierung von Klebeverbindungen umgesetzt werden. Bezogen auf ein FE Modell *wachsen* hochbelastete Bereiche während niedrigbelastete Bereiche *schrumpfen*, wobei dem Wachstum höheres Gewicht zukommt. Die Basis zur Beurteilung der Belastung bildet hierbei die jeweils relevante Vergleichsspannung.

Die Optimierung erfolgt iterativ und beginnt mit einer Spannungsanalyse und der Ermittlung der relevanten Vergleichsspannungen. Da sich Spannungsinhomogenitäten schon bei kleinen Belastungen zeigen, also im elastischen Bereich der Werkstoffe, kann die Spannungsanalyse mit linear elastischen Materialverhalten durchgeführt werden. Die technische Abbildung der Wachstums- und Schrumpfungsvorgänge wird über thermische Dehnungsrechnungen umgesetzt, wobei die jeweils relevante Vergleichsspannung in ein Temperaturfeld umgerechnet wird. Diese Temperaturfelder werden nachfolgend als Last für eine thermische Dehnungsrechnung aufgebracht, wobei die Optimierungsschritte aufgeteilt werden in eine Klebeschichtoptimierung und eine Füge­teiloptimierung. Diese Unterteilung kann weiter vertieft werden, wenn weitere Materialgrenzen innerhalb der einzelnen Optimierungsteilschritte vorhanden sind. Die resultierende Gesamtverschiebung der Optimierung wird aus den Einzelschritten unter Berücksichtigung von Gewichtungsfaktoren berechnet und auf das Modell aufgetragen. Das so deformierte Modell bildet die Ausgangslage für den folgenden Optimierungsschritt, der wiederum mit einer Spannungsanalyse beginnt.

Im Laufe der Optimierung kann das FE-Netz derart verformt werden, dass keine weiteren Rechnungen mehr möglich sind. Eine Neuvernetzung auf Basis der Randknotenverteilung kann diese Netzverzerrungen korrigieren und das FE-Netz für weitere Optimierungsschritte vorbereiten. Ein manueller Eingriff in die Neuvernetzung ist erst nötig, wenn die Randknoten durch die aufgetragenen Knotenverschiebungen für eine flächige Netzerzeugung ungünstig verteilt sind.

Während der gesamten Optimierung wird die Schichtdicke der Klebschicht konstant gehalten, da sich durch Schichtdickenänderungen die Materialkennwerte des Klebstoffs ändern können. Dies wird über Hilfselemente erreicht, die über die Elemente der Klebeschicht überlagert werden und während der Wachstumsschritte mittels einer Modifikation des E-Moduls versteifend wirken. In Abbildung 4.17 ist die gesamte Optimierung als Strukturdiagramm zusammengefasst.

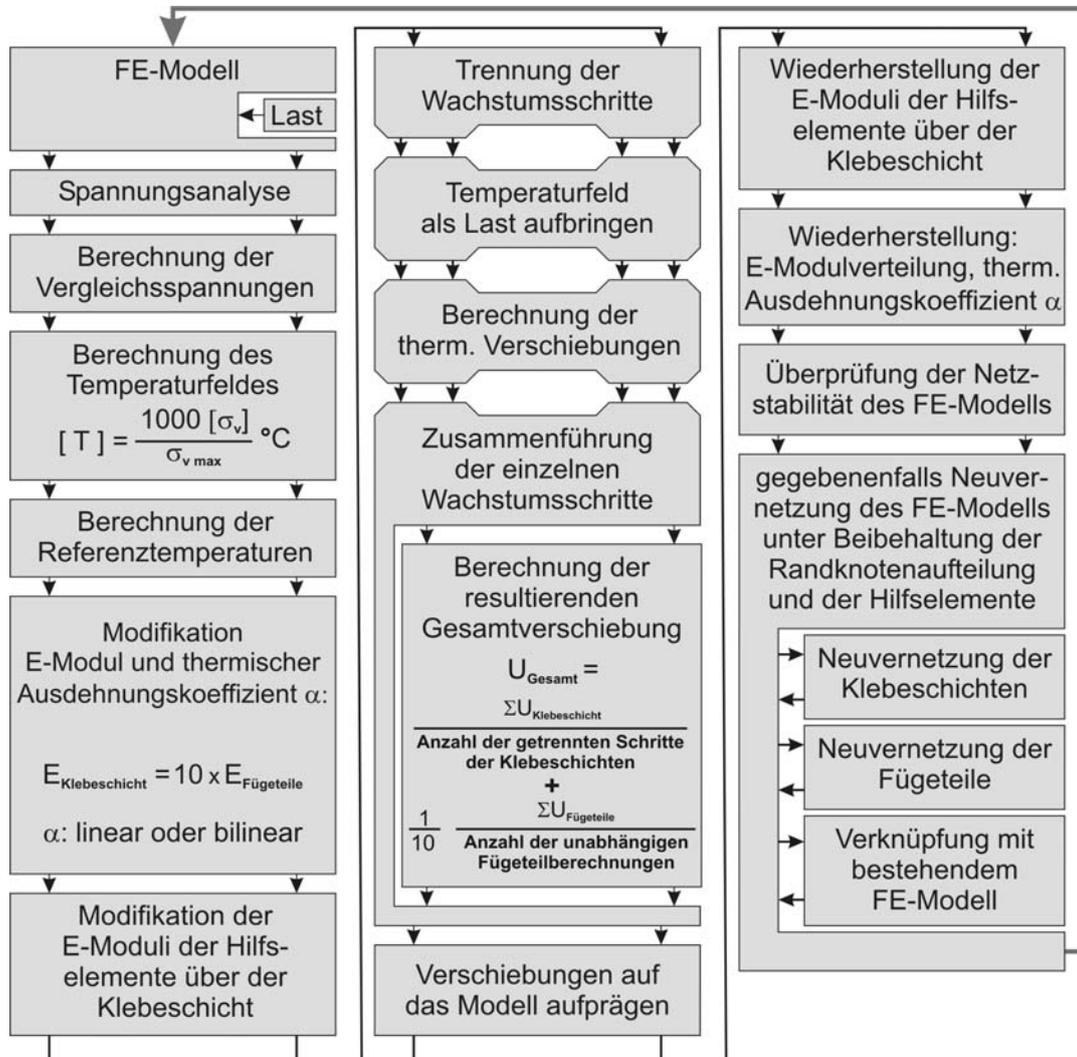


Abbildung 4.17: CA<sup>3</sup>O - Methode im Überblick



# 5 Validierung der CA<sup>3</sup>O-Methode

Anhand der folgenden Beispiele werden, ausgehend von einfachen technischen Grundentwürfen, Designvorschläge mit Hilfe der CA<sup>3</sup>O-Methode errechnet, die zur Validierung der Methode dienen. Auf Grund der linear elastischen Berechnung des Spannungszustandes kann der Optimierungserfolg nicht direkt aus der Rechnung angegeben werden. Vielmehr ist eine solche Aussage nur über eine experimentelle Untersuchung möglich. Hierzu sind zwei der drei Beispiele experimentell untersucht worden, wobei der Optimierungsgrad im Zugversuch, wie im Zug-Schwell-Versuch untersucht wurde. Der Optimierungsgrad  $\phi$  soll im Folgenden nach Gleichung (5.1) definiert werden als Quotient der gemittelten Versagenslasten des optimierten Designvorschlages  $F_{v, \text{gemittelt, optimiert}}$  und der Versagenslast der nicht optimierten Ausgangsprobe  $F_{v, \text{gemittelt, nicht optimiert}}$ .

$$\text{Optimierungsgrad } \phi = \frac{F_{v, \text{gemittelt, optimiert}}}{F_{v, \text{gemittelt, nicht optimiert}}} \quad (5.1)$$

Die Zugversuche wurden ausgehend vom entspannten Zustand bis zum Bruch der Probe auf einer Zugprüfmaschine durchgeführt. Mittels eines Datenschreibers konnte der Kurvenverlauf zwischen Zuglast und Probenverlängerung aufgezeichnet werden. Diesen Graphen kann die Maximallast entnommen und über die Versuchreihe gemittelt werden.

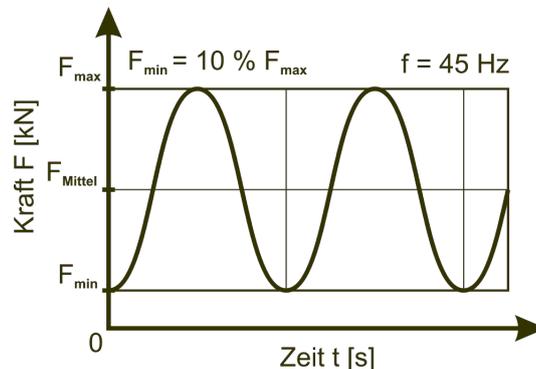


Abbildung 5.1: Kraftverlauf über der Zeit - Belastungszyklus des Zug-Schwellversuchs

Im dynamischen Bereich ist die Bestimmung des Optimierungsgrades durch die Ermittlung einer Wöhlerkurve möglich. Im Vergleich der Dauerfestigkeiten zueinander und gegenüber der mittleren Zugfestigkeit kann der Erfolg der Optimierung bestimmt werden. Als dauerfest sind Durchläufer mit einer Lastspielzahl  $N = 10^7$  festgelegt. Die

Wöhlerkurve wurde im Zug-Schwellversuch bestimmt, wobei die Unterlast  $F_{min}$  10% der Oberlast  $F_{max}$  beträgt. Abbildung 5.1 zeigt den sinusförmigen Kraftverlauf über der Zeit, der als Last aufgebracht wurde.

Das erste Modell ist angelehnt an die Zugprobe zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit nach DIN 53281-T02-79. Ausgehend von der festgelegten Grundgeometrie wird die CA<sup>3</sup>O-Methode für die Klebeschicht und einen Teil der Füge-teile angewandt. Das Modell ist rein technisch orientiert und zeigt einen verständlichen und einfachen Designvorschlag.

Im zweiten Modell wird ein biologisches Vorbild als Basis für einen technischen Grundentwurf herangezogen. Hierbei handelt es sich um den Holzstrahl im Holz eines Baumes. Ausgehend vom biologisch inspirierten Grundmodell wird mit Hilfe der CA<sup>3</sup>O-Methode die Form der Klebeschicht und der Füge-teile optimiert, wobei eines der Füge-teile bewusst unterbelastet ist und nur passiv an der Optimierung teilnimmt. Eine bewußte Unterbelastung eines Füge-teils kommt in technischen, wie biologischen Konstruktionen meist dann vor, wenn zusätzliche Funktionen erfüllt werden sollen. Im Falle des Holzstrahls ist dies die frühe Anbindung an den Baststrahl. Numerisch wie experimentell wird das optimierte Modell mit dem technischen Grundmodell und weiteren technisch relevanten Vergleichsproben gegenübergestellt.

Am dritte Modell wird die Optimierung eines Widerlagers mit starken Bauraumeinschränkungen gezeigt. Das Modell ist an die Geometrie der Rosenstacheln angelehnt, die von der Natur als Defensivwaffe und Haltevorrichtung optimiert sind. Das Ergebnis der Optimierung ist ein technisch äquivalent belastetes Modell, das mit dem natürlichen Vorbild verglichen werden kann. Ohne experimentelle Nachprüfung bezieht sich der Vergleich auf die geometrische Ähnlichkeit zwischen Rosenstachel und optimiertem Endergebnis. Eine Modellmodifikation mit nachgeführter Optimierung zeigt die Möglichkeiten und Grenzen der CA<sup>3</sup>O-Methode auf.

## 5.1 Die einschnittig überlappende Klebeverbindung

Eine häufig verwendete Fügeteilanordnung bei Klebungen ist die einschnittig überlappende Klebeverbindung mit einer parallel zur Zugebene liegenden Klebefläche. Diese Probengeometrie wird ebenfalls zur Bestimmung der Zugscherfestigkeit nach DIN 53281-T02-79-A [7] verwendet. Die Festigkeitsangabe kann als vergleichendes Maß zur Beurteilung einer Klebung herangezogen werden [13]. Bei diesem Versuch werden Proben aus 1,6mm Metallblech mit einer Überlappung von 12mm hergestellt und unter Zugbelastung bis zum Versagen durch Bruch belastet. Der hierbei bestimmte gemittelte Festigkeitswert wird Zugscherfestigkeit genannt. Abbildung 5.2 zeigt die Probengeometrie einer nach DIN 53281-T02-79-A gefertigten Einzelprobe im Schnitt.

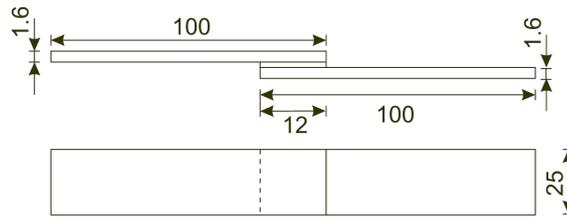


Abbildung 5.2: Probengeometrie einer Einzelprobe DIN 53281-T02-79-A im Schnitt

Unter Last ist bei diesen Proben der Spannungszustand in der Klebeschicht nicht homogen, sondern weist starke Spannungsüberhöhungen an den Klebeschichtausläufen auf. Abbildung 5.3 zeigt den Spannungsverlauf entlang der Klebeschicht unter ideal elastischer Materialannahme.

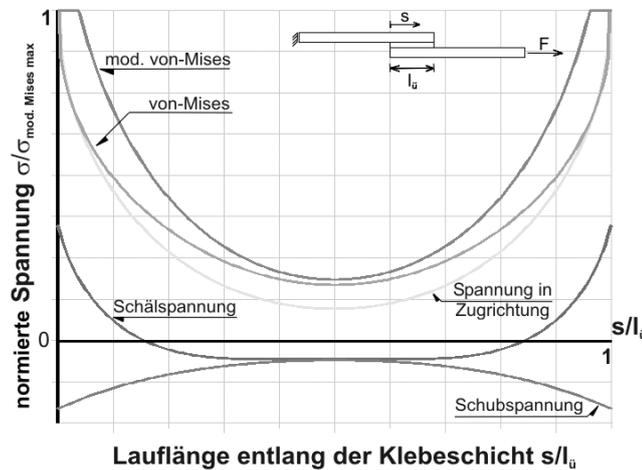


Abbildung 5.3: mit Hilfe der FE-Methode berechnete Spannungsverteilung in der Klebeschicht (Probe nach DIN 53281-T02-79-A), normierte auf das Maximum der mod. von-Mises Vergleichsspannung;  $E_{Fügeteile} = 210000 \text{ N/mm}^2$ ;  $\nu_{Fügeteile} = 0.3$ ;  $E_{Klebeschicht} = 1500 \text{ N/mm}^2$ ;  $\nu_{Klebeschicht} = 0.4$ ;  $c = 0.4$

In Abbildung 5.3 ist die Spannung in Zugrichtung, die Schälspannung senkrecht zur Zugrichtung und die Schubspannung dargestellt. Zusätzlich ist für diese Probe die von-Mises Vergleichsspannung und deren modifizierte Spannung ( $c = 0.4$ ) dargestellt. Aus dem Diagramm ist die Abweichung der modifizierten von-Mises Vergleichsspannung im Bereich der Spannungsüberhöhung deutlich zu erkennen. Der Spannungsverlauf entlang der Klebeschicht kann unter Annahme eines linear-elastischen Materialverhaltens im Klebstoff und den Fügeteilen in drei Komponenten aufgeteilt werden:

- 1.) Eine konstante Schubspannung über der Klebeschichtlänge durch die reine Fügeteilverschiebung. Dieser Schubspannungsanteil muss nicht weiter optimiert werden.
- 2.) Eine durch Spannungsüberhöhung an den Klebeschichtausläufen gekennzeichnete Schubspannung auf Grund der unterschiedlichen Fügeteildehnungen. Dieser Schubspannungsanteil kann durch Anpassung der Fügeteile homogenisiert werden.
- 3.) Schälspannungen mit Spannungsüberhöhungen an den Klebeschichtausläufen durch die unterschiedlichen Verformungen der beiden Fügeteile. Die Schälspannung kann durch eine Verschiebung der Klebeschicht in eine optimale Lage homogenisiert werden.

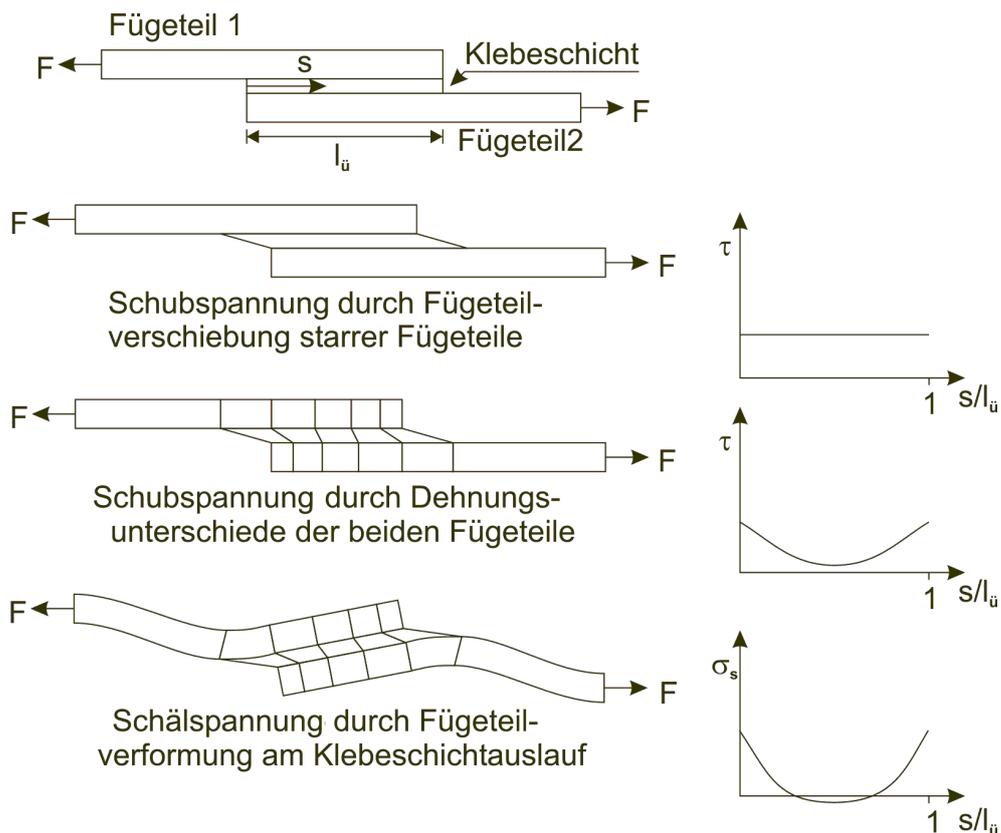


Abbildung 5.4: Aufteilung des Spannungsverlaufs in Einzelkomponenten nach [12] [13]

Die Optimierung nach der CA<sup>3</sup>O-Methode berechnet den Spannungszustand unter Annahme eines ideal elastischen Materialverhaltens für kleine Belastungen. Die auftretenden Spannungsspitzen in der Berechnung liegen im Bereich der Klebeschichtausläufen an singulären Stellen des FE-Netzes. Daher ist die Höhe der Spannung abhängig von der Elementgröße in hochbelasteten Bereichen. Diese Singularität tritt jedoch in der Optimierung und deren Ergebnissen nicht zu Tage, da die Referenzspannungen für die Klebeschicht und die Füge­teile relativ zum Maximum der jeweiligen Referenzspannung angegeben werden und die Elementgröße über die erzwungene Dickenkonstanz der Klebeschicht annähernd gleich groß bleibt. Für das Endergebnis ist eine mögliche singuläre Stelle jedoch relevant. Das Ergebnis muss daher überprüft werden, ob Singularitäten weiterhin im FE Netz vorhanden sind.

Das Ergebnis der Optimierung muss die Schubspannungen durch unterschiedliche, angepasste Bauteil­dehnungen homogenisieren und die Schälspannung durch eine optimierte Lage der Klebeschicht abbauen. Es ist daher zu erwarten, dass die Füge­teile mit einer variablen Dicke im Designvorschlag vorliegen, um den Dehnungs­unterschied zu eliminieren. Des weiteren wird eine Rotation der Klebeschicht zu erwarten sein, um eine homogene Belastung der Schicht zu erreichen.

### 5.1.1 Modell und CA<sup>3</sup>O-Optimierung

Ausgehend von der DIN-Probe nach DIN 53281-T02-79-A wird die Füge­teildicke der Probe zur besseren Fertigbarkeit von 1,6mm auf 3mm angehoben. Dies verringert den Effekt der Spannungsüberhöhungen an den Klebeschichtausläufen leicht. Zusätzlich wird die Probenbreite auf 30mm erweitert, damit die Restwandstärke neben der Bohrung für die Prüfmaschinenaufnahme ausreichend dimensioniert ist. Alle anderen Geometrieparameter werden der DIN-Geometrie entnommen. Die Klebeschichtdicke wird auf 0,05mm festgelegt und entspricht der üblichen Schichtdicke des verwendeten Klebstoffes.

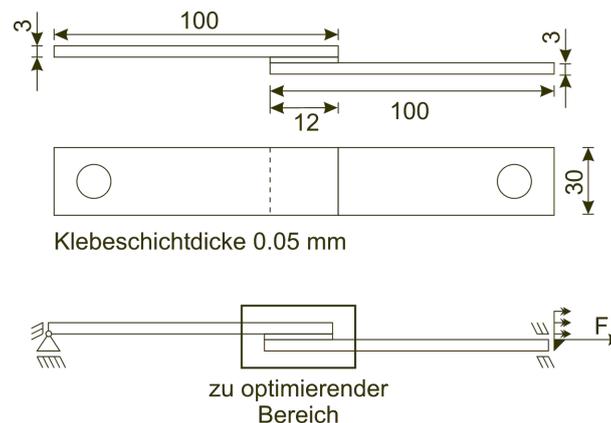


Abbildung 5.5: Ausgangsmodell der Optimierung mit Lasten, Randbedingungen und Optimierungsbereich

Um die Einspannung in der Zugprüfmaschine zu simulieren, wird im Modell das linke Füge­teil am freien Ende fix eingespannt, während das rechte Füge­teil am freien Ende senkrecht zur Zugrichtung in der Bewegungsfreiheit eingeschränkt wird. Auf der Stirnseite des rechten Füge­teils wird die Kraft eingeleitet, wobei die Knotenverschiebung in Zugrichtung gekoppelt wird. Für die Optimierung wird nur ein Teil der Probe freigegeben. Das restliche Füge­teilmaterial wird in den Wachstumsschritten nicht berücksichtigt. Diese Einschränkung reduziert den Berechnungs- und Fertigungsaufwand der optimierten Proben.

Die Materialdaten werden für das Modell wie folgt angenommen:

Berechnung:	linear elastisch
Kraft F:	1000 N
E-Modul der Füge­teile:	210000 N/mm <sup>2</sup>
Poissonzahl $\nu_{Füge­teile}$ :	0.3
E-Modul der Klebeschicht:	1500 N/mm <sup>2</sup>
Poissonzahl $\nu_{Klebeschicht}$ :	0.4

Die zur Optimierung verwendeten Parameter:

Materialparameter Klebstoff c:	0.4
Referenztemperatur Klebeschicht:	296 {°C}
Referenztemperatur Füge­teile:	450 {°C}
maximale Spannung in den Füge­teilen:	1960 {N/mm <sup>2</sup> }
maximale Spannung in der Klebeschicht:	347 {N/mm <sup>2</sup> }
⇒ Referenzspannung in den Füge­teilen:	580 {N/mm <sup>2</sup> }
⇒ Referenzspannung in der Klebeschicht:	156 {N/mm <sup>2</sup> }

An dieser Stelle sei nochmals angemerkt, dass die Einheiten während der Optimierungsschritte nicht ihre normale Bedeutung haben. Die FE-Rechnung wird hierbei verwendet, um Wachstumsschritte nachzubilden, wobei diese Berechnungsschritte auf den üblichen Spannungs- und Temperaturdehnungsberechnungen basieren. Daher werden die entsprechenden Einheiten in Klammern angegeben ({°C}, {N/mm<sup>2</sup>}).

Die Abbildungsfolge 5.6 zeigt den Optimierungsverlauf mit mehreren Zwischenschritten. Deutlich erkennbar ist der Materialschwund der Füge­teile und die Verschiebung der Klebeschicht. Die spitz zulaufenden Füge­teile erreichen eine gegenseitig angepasste Dehnung. Diese Anpassung minimiert die Schubspannungsüberhöhungen an den Klebeschichtausläufen. Die Rotation der Klebeschicht bewirkt eine homogene Belastung der gesamten Klebeschicht. Die Verlängerung der Klebeschicht gegen Ende der Optimierung fußt auf Anpassungen der Belastbarkeit, damit die Überlappungslänge des Ausgangsmodells erreicht wird. D.h., Anfangs- und Endmodell haben die gleiche Klebefläche und können daher im Experiment direkt miteinander verglichen werden. Das letzte Bild der Reihe zeigt die gefertigte Proben­geometrie, die aus Fertigungsvorgaben zum Drahterodieren zusätzlich an eine Minimal­dicke von 0,2 mm angepasst ist.

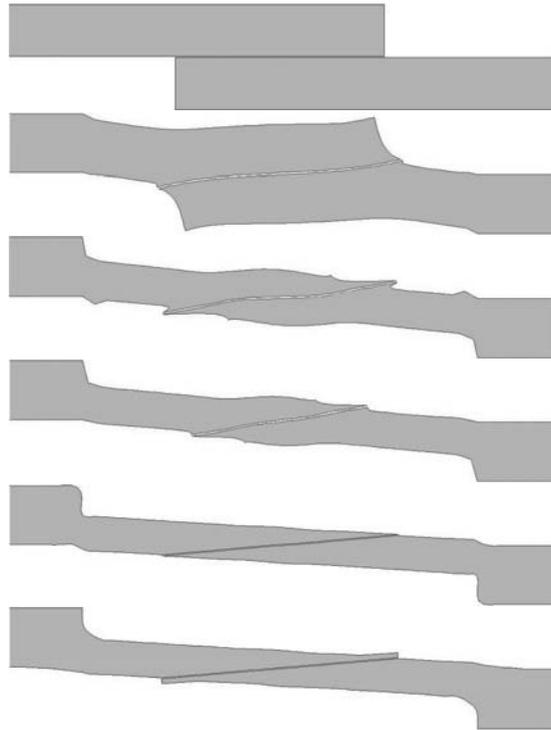


Abbildung 5.6: Optimierung der einschnittig überlappenden Klebeverbindung vom Ausgangsmodell über mehrere Zwischenschritte bis zum Endmodell mit eingearbeiteten Fertigungsvorgaben

Durch die Optimierung ist ein Rückgang der Querschnittsfläche um 30% zu verzeichnen. Der daraus resultierende Masseschwund der optimierten Probe kann auch von den Ausgangsfügeteilen abgeleitet werden, bei denen im Spannungsplot große Bereiche vorliegen, die niedrig belastet sind und somit schrumpfen (Abbildung 5.7).

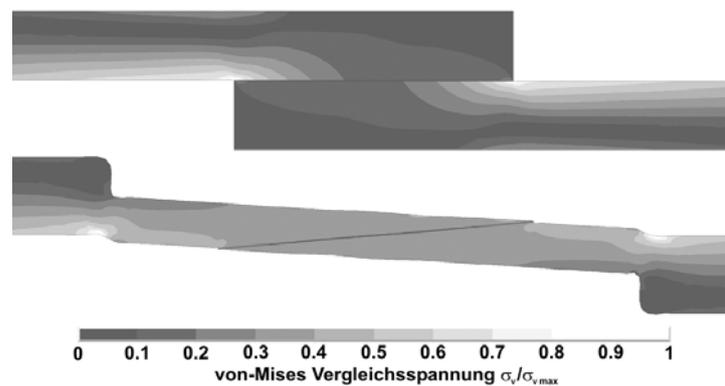


Abbildung 5.7: Spannungsplot der normierten von-Mises Vergleichsspannung für die Ausgangsprobe und die optimierte Struktur

Der Spannungsplot der optimierten Probe zeigt eine gute Homogenisierung der Vergleichsspannung im Bereich der Optimierung. Das Spannungsmaximum des optimierten Designvorschlages liegt an der Grenze zwischen optimiertem und unoptimiertem Bereich, und kann mit einer manuellen Außenkonturglättung leicht behoben werden. Bei gleicher Klebeschichtlänge weist das optimierte Füge­teil eine schräggestellte Klebeschicht auf, deren Verlauf in guter Näherung als Gerade beschrieben werden kann. Die optimierte Geometrie steht im Gleichgewicht mit den Schrumpfungen und dem Wachstum der Füge­teile und der Klebeschicht. Leichte Inhomogenitäten resultieren aus dem eingeschränkten Bereich, der für die Optimierung zur Verfügung steht.

Die optimierte Designgeometrie zeigt sich als geschäftete Verbindung unter komplexer Belastung, da Zug und Biegung aus der weiterhin biaxialen Belastung resultieren. Das die Schäftung als gute, klebegerecht konstruierte Füge­teilgeometrie angesehen werden kann, ist bekannt. In nahezu jedem Leitfaden zur klebegerechten Konstruktion wird diese Füge­teilgeometrie dargestellt, wobei jedoch meist eine koaxiale Belastung zugrunde gelegt wird.

Der Vergleich der modifizierten von-Mises Spannung in der Klebeschichtmitte des Ausgangsmodells mit der optimierten Probe zeigt deutlich den Optimierungserfolg (Abbildung 5.8). Der Spannungsverlauf ist über die gesamte Länge der Klebeschicht annähernd homogen.

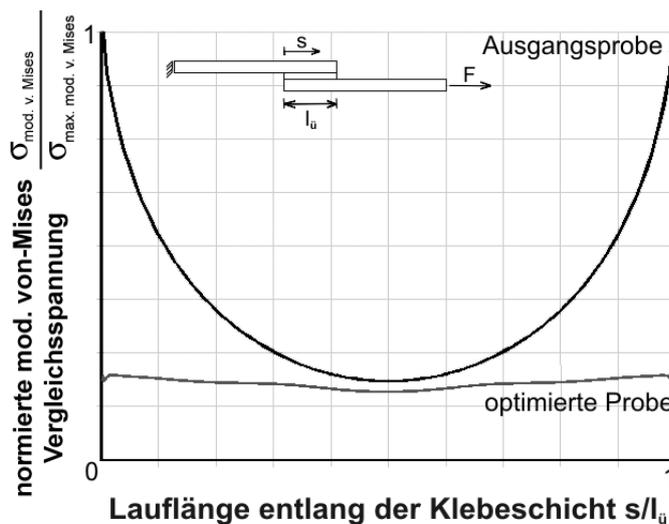
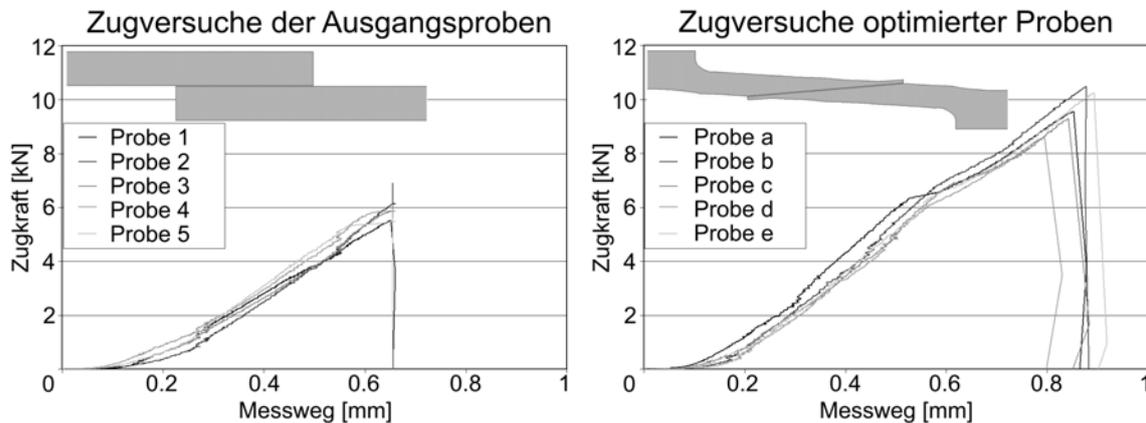


Abbildung 5.8: Vergleich der modifizierten von-Mises Vergleichsspannung in der Klebeschicht der Anfangsprobe und der optimierten Struktur, normiert auf das Maximum der mod. von-Mises Vergleichsspannung der nicht optimierten Anfangsprobe

### 5.1.2 Versuchsergebnisse

Der Optimierungserfolg zeigt sich deutlich im Zugversuch. In Abbildung 5.9 links sind fünf Zugversuche der Ausgangsproben der Optimierung dargestellt. Der Bruch dieser Proben setzt zwischen  $5.5\text{ kN}$  und  $6.9\text{ kN}$  ein. Im Mittel versagen die Proben bei  $6\text{ kN}$  und einer Standardabweichung von  $0.55\text{ kN}$ . Bei den Zugversuchen an optimierten Proben (Abbildung 5.9, rechts) tritt der Bruch erst bei  $8.6\text{ kN}$  bis  $10.5\text{ kN}$  ein. Im Mittel ist eine Steigerung um  $3.6\text{ kN}$  auf  $9.6\text{ kN}$  bei einer Standardabweichung von  $0.76\text{ kN}$  zu verzeichnen. Dies entspricht einem statischen Optimierungsgrad  $\phi_{\text{statisch}} = 1.6$ . Die größere Standardabweichung der optimierten Proben kann auf eine höhere Empfindlichkeit bei höherem Lastniveau gegen Störungen und Fehlern, wie z.B. Blasen oder Fremdkörper in der Klebeschicht zurückgeführt werden. Die Grenzlast der optimierten Proben wird durch eine besser Klebstoffausnutzung viel später erreicht, da in der Klebeschicht ein nahezu homogener Spannungszustand über die Klebeschichtlänge vorliegt. Somit liegt die ganze Klebeschicht unter hoher Belastung, wobei alle Fehlstellen potentiell versagensauslösend sind. In der Ausgangsprobe sind hauptsächlich die Klebeschichtausläufe hoch belastet, weshalb vorzugsweise nur dort existierende Fehler der Klebeschicht zum Versagen führen.

Probenbezeichnung	Anzahl	mittl. Bruchlast	Std. Abweichung	Opt. Grad
Ausgangsprobe	5	$6\text{ kN}$	$0.55\text{ kN}$	1.6
Optimierte Probe	5	$9.6\text{ kN}$	$0.76\text{ kN}$	-



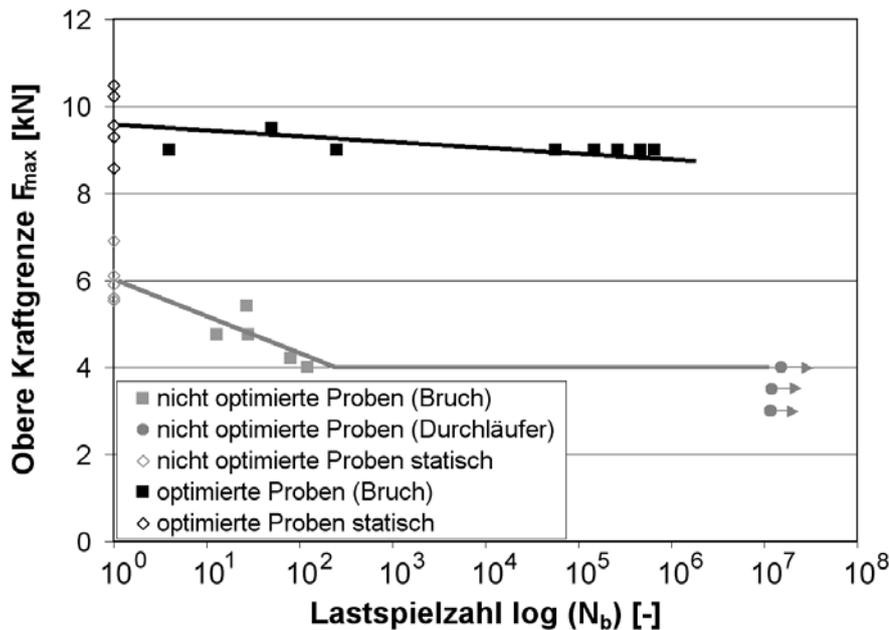
Materialkennwerte und Versuchsbedingungen:

Klebstoff:	Loctite <sup>(R)</sup> 496
Werkstoff Fügeteile:	1.2842 (90 MnCrV 8)
Aushärtezeit:	24h bei Raumtemperatur (25°C)
Vorschub Zugversuch:	$0.015\text{ mm/s}$

Abbildung 5.9: Zugversuche an 5 Anfangsproben und 5 optimierten Proben

Im Kurvenverlauf der Zugversuche an den optimierten Proben liegt bei ca. 6 kN ein Knick im Kurvenverlauf vor. Da das Versagen der Proben erst weit später einsetzt, wurde in diesem Zusammenhang die Verlaufsänderung nicht weiter untersucht.

Der Optimierungserfolg kann ebenfalls im dynamischen Versuch gezeigt werden. Hierzu wurden die Proben unter Zug-Schwellbelastung geprüft. Die Unterlast wurde für diese Versuche auf 10% der Oberlast festgesetzt. Die in Abbildung 5.10 ermittelten Wöhlerkurven wurde mit einer Belastungsfrequenz von 45 Hz aufgezeichnet.



Materialkennwerte und Versuchsbedingungen:

Klebstoff:	Loctite <sup>(R)</sup> 496
Werkstoff Fügeteile:	1.2842 (90 MnCrV 8)
Aushärtezeit:	24h bei Raumtemperatur (25°C)
Anzahl Ausgang / Optimiert:	9 st. / 8 st.
Unterlast Zug-Schwellversuch:	10% der Oberlast
Frequenz:	45 Hz

Abbildung 5.10: Wöhlerkurven für die optimierte Probe und das Ausgangsmodell unter Zug-Schwellbelastung

Das Ausgangsmodell zeigt, ausgehend vom gemittelten statischen Zugversuch bei 6 kN, einen steilen Abfall der ertragbaren Maximalkraft bis ca. 4 kN. Unter 4 kN treten nur Durchläufer auf, d.h. der Bereich in dem Dauerfestigkeit angenommen werden kann, liegt im Mittel bei ca. 60 % der statischen Last. Die optimierten Proben hingegen zeigen bei 60 % der statischen Last reine Durchläufer. In den Versuchen konnte keine klare Abtrennung zwischen Dauerfestigkeit und Bruch erkannt werden. Ab 9 kN (90 % der statischen Last) traten erste Brüche auf. Die Durchläufer dieser Versuchsreihe sind

## 5.1 Die einschnittig überlappende Klebeverbindung

im Wöhlerdiagramm nicht aufgeführt, da diese zur Einstellung der Versuchsumgebung mehrfach verwandt wurden. Diese Proben haben nach 30 Millionen Lastzyklen und stetig angehobenem Lastniveau bis 9.5 kN nicht in der Klebung versagt. Die Ursache für die Mischung zwischen Bruch und Durchläufer der optimierten Proben ist unter anderem in den Schwankungen der Endfestigkeit in Verbindung mit der sehr hohen Belastung zu sehen. Der dynamische Optimierungsgrad steigt daher auf einen Wert von  $\phi_{\text{dynamisch}} \approx 2.25$  im Bereich der Dauerfestigkeit an.

### 5.1.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ausgehend von einer einschnittig überlappenden Klebeverbindung kann mit Hilfe der CA<sup>3</sup>O Methode eine optimierte Fügeteilgeometrie und Klebeschichtgestaltung gefunden werden. Die Fügeteilform ähnelt einer geschäfteten Verbindung, die jedoch durch die biaxiale Belastung weiterhin unter Zug- und Biegebelastung steht. Experimentell ist der Unterschied zwischen der optimierten und der nicht optimierten Probe im Wöhlerdiagramm unter Zug-Schwellbelastung, sowie in den Zugversuchen, deutlich erkennbar.

Da im Ausgangsmodell an den Klebeschichtausläufen eine singuläre Stelle vorliegt, ist der dort ideal elastisch berechnete Spannungsverlauf durch einen hohen Gradienten gekennzeichnet, womit das errechnete Spannungsmaximum von der Dichte des FE-Netzes abhängig ist. Ein Vergleich des Optimierungsgrades der FE-Analyse und damit auch zwischen Rechnung und Versuch ist daher nicht sinnvoll. Die folgende Tabelle zeigt die Versuchsergebnisse zusammengefasst.

Zugversuch	mittl. Bruchlast	Std. Abweichung	Opt. Grad
Ausgangsprobe	6 <i>kN</i>	0.55 <i>kN</i>	1.6
Optimierte Probe	9.6 <i>kN</i>	0.76 <i>kN</i>	-
Zug-Schwellversuch	Dauerfestigkeit		Opt. Grad
Ausgangsprobe	~ 4 <i>kN</i>		~ 2.25
Optimierte Probe	~ 9 <i>kN</i>		-

Die Homogenisierung des Spannungszustandes in der Klebeschicht führt zu einer deutlichen Leistungssteigerung bei geringerem Fügeteilgewicht und gleichem Klebstoffeinsatz. In der Praxis kann bei ähnlicher Fügeteilanordnung mit ähnlichem Optimierungserfolgen gerechnet werden.

In der Natur kann die einschnittig überlappende Klebeverbindung in optimierter Form häufig beobachtet werden. Z.B. ist am Wangenknochen des Schwarzbären *Ursus americanus* eine verknorpelte Wachstumsnaht mit nahezu identischer Geometrie (Abbildung 5.11), die als Klebeschicht zwischen den beiden Knochenpartieen angesehen werden kann.

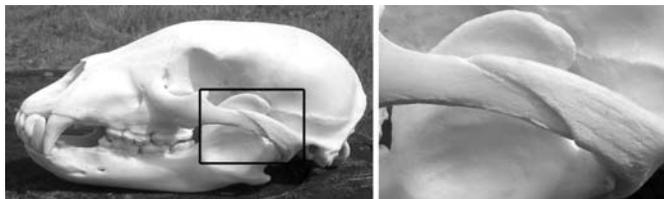


Abbildung 5.11: Schädelknochen eines Schwarzbären *Ursus americanus* mit einer einschnittig überlappenden Knochenverbindung; Foto: C.Mattheck, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung II Abteilung Biomechanik

## 5.2 Der Holzstrahl als Vorbild

Während bei rein technischen Konstruktionen eine Optimierung die Klebeschicht und beide Fügeiteile einbeziehen muss, gibt es in der Natur vielfach Verbindungen, bei denen nur ein Fügeiteil optimiert werden kann. Das andere Fügeiteil hat dann meist eine Vielzahl anderer biologischer Aufgaben, die mit der mechanisch optimalen Form häufig nicht direkt harmonisiert, oder es wird in einem anderen Wachstumsschritt zu einem späteren Zeitpunkt erzeugt. Ein Beispiel dafür ist der Holzstrahl, der im Holz der Bäume für radiale Kraftübertragung sorgt.

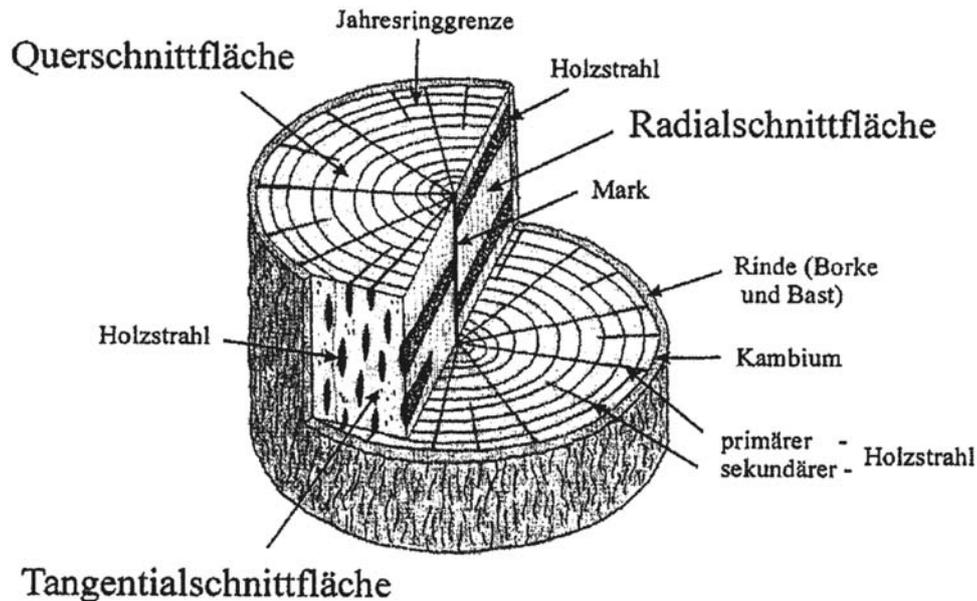


Abbildung 5.12: Schematische Darstellung des makroskopischen Aufbaus von Holz [41]

Der Holzstrahl beginnt im Zentrum des Holzes und wird in radialer Richtung senkrecht auf die Jahresringe angelegt. Während des Dickenwachstums des Baumes wird der Holzstrahl weiter verlängert. Die Stoßstelle zwischen den einzelnen Segmenten des Holzstrahls liegt an der Grenze zwischen der Früh- und der Spätholzschicht des Baumes. Eine der Aufgaben der Frühholzschicht ist der Wassertransport im Baum [28]. Entsprechend ist die Struktur dieser Schicht auf die Aufgabe angepasst und unterscheidet sich von den mechanischen Eigenschaften der Spätholzschicht, deren hauptsächliche Aufgabe die Strukturversteifung ist. Laut *Kollmann* nach *Ylinen* [17] sind die Moduli für Früh- und Spätholz der Kiefer bei einer Restfeuchte von 8-10% wie folgt ermittelt worden:

E-Modul Kiefer Frühholz (Feuchte 8-10%):	6670 $N/mm^2$
E-Modul Kiefer Spätholz (Feuchte 8-10%):	37700 $N/mm^2$
$E_{Spät} / E_{Früh}$ :	5.6

Untersuchungen von *Schlyter* und *Win*, sowie von *Thunell* zeigen, dass Holz mit höherem Feuchtegrad einen niedrigeren E-Modul aufweist [17]. Die Untersuchungen wurden im Biegeversuch parallel zur Faserrichtung durchgeführt. Hierbei wurde jedoch nicht der Unterschied zwischen Früh- und Spätholz herausgearbeitet. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Abnahme des E-Moduls im Frühholz auf Grund der Wasserleitungsfunktionen stärker ist, als im Spätholz. Daher wird der Unterschied der E-Moduli im grünen Baum nicht ganz so stark ausgeprägt sein.

Damit z.B. unter Biegebelastung, zwischen den Früh- und Spätholzschichten eine Delamination verhindern wird, sorgt der Holzstrahl unter anderem für eine radiale Kraftübertragung im Holz des Baumes. Der Unterschied in der Bildung des Holz- bzw. des Holzstrahlparenchyms (Holz-Grundgewebe) liegt hauptsächlich in der Orientierung der Holzparenchymstränge [28]. Während die Holzfasern in axialer Richtung orientiert sind, liegt die Orientierung der Holzstrahlen in radialer Richtung, senkrecht auf die Jahrringgrenze vor. Es ist daher anzunehmen, dass die mechanischen Unterschiede zwischen Früh- und Spätholzschicht auch in den entsprechenden Holzstrahlsegmenten wiederzufinden sind, da sonst die Gefahr der Delamination zwischen Holzstrahl und umgebendem Holz besteht. Die Form der Anbindung der Holzstrahlsegmente zueinander wird maßgeblich bei deren Entstehung in der Wachstumsschicht (Kambium) angelegt. Abbildung 5.13 zeigt den Auslauf eines Holzstrahlsegmentes an der Jahrringgrenze und in das Kambium einer Wurzel einer Buche.

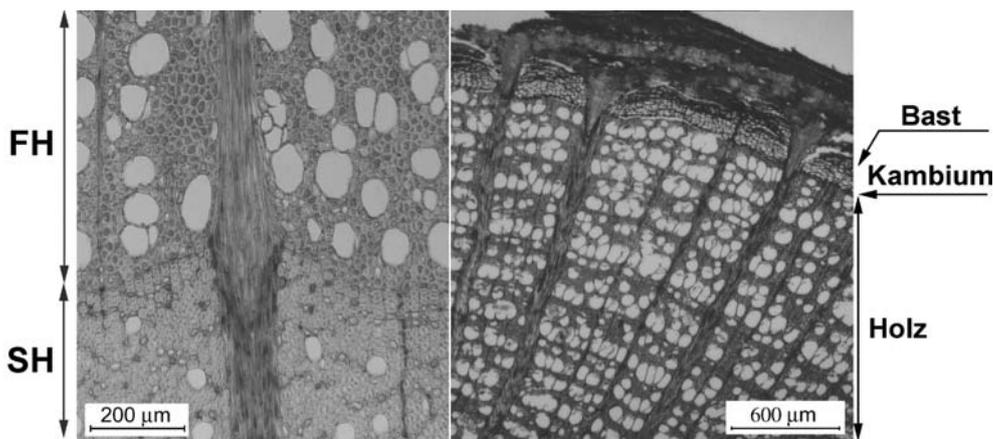


Abbildung 5.13: Buche, links: Holzstrahl zwischen Früh- (*FH*) und Spätholz (*SH*) (Mikroskopievergrößerung: 100x), rechts: Holzstrahlen im Kambium der Buchenwurzel (Mikroskopievergrößerung: 25x) Foto: K. Weber, Forschungszentrum Karlsruhe IMF II

Das Kambium ist eine weiche Schicht, deren hauptsächliche Funktionen die Bildung des Holzes auf der Stammseite und die Bastbildung zur Außenseite sind [28]. Zur Verlängerung des Holzstrahles wird im Kambium das neu zu bildende Holzstrahlsegment mit dem existierenden Holzstrahlende verklebt. Da gewachsenes Holz kaum Gestaltänderungen während der sekundären Zellwandveränderungen wie z.B. der Verholzung durchführt

[28], verbleiben die verklebten Holzstrahlsegmente in ihrer angelegten Form im Holz erhalten. Der natürliche Klebstoff des Baumes ist das Protopektin, das die Hauptmasse der interzellularen Substanz ausmacht [28] und als eine biologische Klebeschicht zwischen den Holzstrahlsegmenten vermehrt angereichert wird. Die Verklebung ist daher, nicht wie in technischen Vergleichsmodellen eine dünne einphasige Klebeschicht, sondern vielmehr ein Bereich mit erhöhtem Protopektinanteil. Je nach Gehölzart können weitere biologische Aspekte zur Formgebung des Holzstrahls, wie z.B. Harzkanäle bei Kiefer [40], hinzukommen. Das technische Vergleichsmodell kann derartige Sekundärfunktionen nicht berücksichtigen. Daher wird die Form der natürlichen Klebeverbindung im folgenden Modell auf einer technisch äquivalenten Basis vergleichend gegenübergestellt.

### 5.2.1 Modell und CA<sup>3</sup>O-Optimierung

Im Folgenden wird die Optimierung eines Modells vorgestellt, das durch den Holzstrahl des Baumes inspirierten wurde, ohne jedoch den Anspruch zu erheben, den Holzstrahl selbst nachzurechnen. Der Holzstrahl liefert die Basis für die Geometrie und die Belastungen eines technischen Vergleichsmodells, das bei ähnlich angenommener Belastung mit dem natürlichen Vorbild verglichen werden kann. Das technische Vergleichsmodell geht von einem dünnen rotationssymmetrischen Fügeteil 1 (Holzstrahl, Spätholzschicht) aus, das auf einem dicken rotationssymmetrischen Fügeteil 3 (Holzstrahl, Frühholzschicht gebildet in kambialer Schicht) mittels der dünnen Klebeschicht 2 stumpf aufgeklebt wird. Dieses Vergleichsmodell dient als Ausgangsmodell zur Optimierung der Klebeschicht und den Fügeteilen. Es wird davon ausgegangen, dass ein E-Modul-Verhältnis zwischen Früh- und Spätholz des grünen Baumes, wie oben beschrieben, bei einem Faktor 3 für Kiefer liegt. Die Materialdaten des technischen Modells sind an die später verwendeten Materialien angepasst. Die folgende Tabelle zeigt die verwendeten mechanischen Kennwerte:

Zugkraft $F$ :	1000 $N$
E-Modul Fügeteil 1:	210000 $N/mm^2$
Poissonzahl $\nu_{Fügeteil\ 1}$ :	0.3
E-Modul Klebeschicht 2:	1500 $N/mm^2$
Poissonzahl $\nu_{Klebeschicht\ 2}$ :	0.4
E-Modul Fügeteil 3:	70000 $N/mm^2$
Poissonzahl $\nu_{Fügeteil\ 3}$ :	0.3
Radius Fügeteil 1 ( $r_1$ ):	5 $mm$
Radius Fügeteil 3 ( $r_3$ ):	20 $mm$
Dicke der Klebeschicht 2:	0.05 $mm$

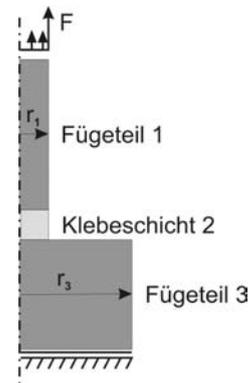


Abbildung 5.14: Materialkennwerte der Ausgangsprobe mit prinzipiellem Aufbau der Probengeometrie

Diese Werte entsprechen proportional einem aus dem grünen Baum herausgetrennten Holzstrahl, der aus seiner Umgebung herausgelöst, unter Zug belastet wird. Druckeigen-  
spannungen des umgebenden Holzes werden nicht berücksichtigt, wodurch der ovalisierte Querschnitt des natürlichen Holzstrahls in diesem Modell unberücksichtigt bleibt. Da der Baum die Form der Klebeschicht während des letzten Wachstumsschrittes anlegt, diese also an der Grenzschicht zwischen der Früh- bzw. Spätholzschicht und dem Kam-  
bium entsteht, ist das Fügeiteil 3 nicht an den Optimierungsschritten aktiv beteiligt, um die Rolle der relativ weichen Kambiumsschicht nachzustellen. Das Fügeiteil 3 wird  
daher während der Optimierung zu einem nachgiebigen Material ohne eigene thermale Ausdehnung. Die Verformungen, die das Fügeiteil 3 erfährt werden von den Verformun-  
gen des Fügeiteils 1 und der Klebeschicht 2 erzwungen. Die geometrischen Abmaße im Bereich der Einspannung werden an die Versuchsumgebung der Zugprüfmaschinen an-  
gepasst.

Die Belastung des Ausgangsmodells sieht eine Festhaltung des Fügeiteils 3 am unteren Ende vor (Abbildung 5.14). Des weiteren wird das obere Ende des Fügeiteils 1 mit einer Zuglast beaufschlagt. Um eine gleichmäßige Belastung zu erreichen wird die Verschiebung der Oberkante des Fügeiteils 1 gekoppelt in Zugrichtung, so dass über die Bauteildicke in der Einspannung eine homogene Belastung erzwungen wird. Diese Belastung spiegelt die radiale Kraftübertragung des Holzstrahls im Holz des Baumes wieder. Abbildung 5.15 zeigt die Belastung in der Mitte der Klebeschicht. Wird die radiale Spannungsverteilung in der Klebeschichtmitte betrachtet, so fallen die Spannungs-  
überhöhungen der Schälspannungen, sowie der Spannungen senkrecht zur Zugachse auf. Diese Belastung bewirkt zusammen mit der Querkontraktionsbehinderung durch die relativ starren Fügeiteile eine hohe Belastung des Klebeschichtauslaufes zum Rand hin. Die Differenz zwischen der modifizierten von-Mises und der von-Mises Vergleichsspannung ist auf den Einfluss des hydrostatischen Spannungsanteils (siehe Kapitel 2.3) unter der zuglastdominierten Belastung zurückzuführen. Vom Ausgangsmodell startend ist an den Klebeschichtausläufen daher mit einem starken Wachstum zu rechnen.

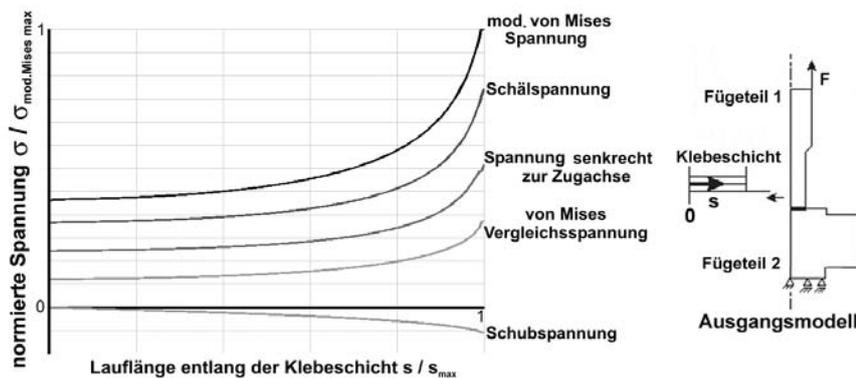


Abbildung 5.15: Spannungskomponenten in der Klebeschichtmitte entlang der Klebeschicht, normiert auf das Maximum der mod. von-Mises Vergleichsspannung

Die folgende Tabelle stellt die Randbedingungen zusammen, die während der Optimierung verwendet wurden. Die Referenzspannungen stellen ein ausgewogenes Maß an Belastung in der Klebeschicht und der Fügeiteile dar. Die Materialkennwerte sind in Abbildung 5.14 dargestellt und werden an dieser Stelle nicht erneut aufgelistet.

Die zur Optimierung verwendeten Parameter:

Berechnung:	linear elastisch
Zugkraft am oberen Fügeiteilende $F$ :	1000 $N$
Materialparameter Klebstoff $c$ :	0.4
Referenztemperatur Klebeschicht:	300 $\{^{\circ}C\}$
Referenztemperatur Fügeiteile:	640 $\{^{\circ}C\}$
maximale Spannung in den Fügeiteilen:	31.2 $\{N/mm^2\}$
maximale Spannung in der Klebeschicht:	30.9 $\{N/mm^2\}$
$\Rightarrow$ Referenzspannung in den Fügeiteilen:	19.8 $\{N/mm^2\}$
$\Rightarrow$ Referenzspannung in der Klebeschicht:	9.4 $\{N/mm^2\}$

Analog zur Modellbeschreibung der einschnittig überlappenden Klebeverbindung werden die Einheiten der Temperatur und der Spannung während der Optimierungsschritte in geschweiften Klammern dargestellt, da diese zur Umsetzung der Wachstumsschritte mit Hilfe der thermischen Dehnungsrechnung verwandt werden.

In Abbildung 5.16 ist die CA<sup>3</sup>O-Optimierung dieser Klebeverbindung in mehreren Schritten dargestellt. Im ersten Schritt ist eine Verbreiterung des oberen Fügeiteils in der Nähe der Klebeschicht erkennbar, die aus der Spannungsüberhöhung am Klebeschichtauslauf herrührt.

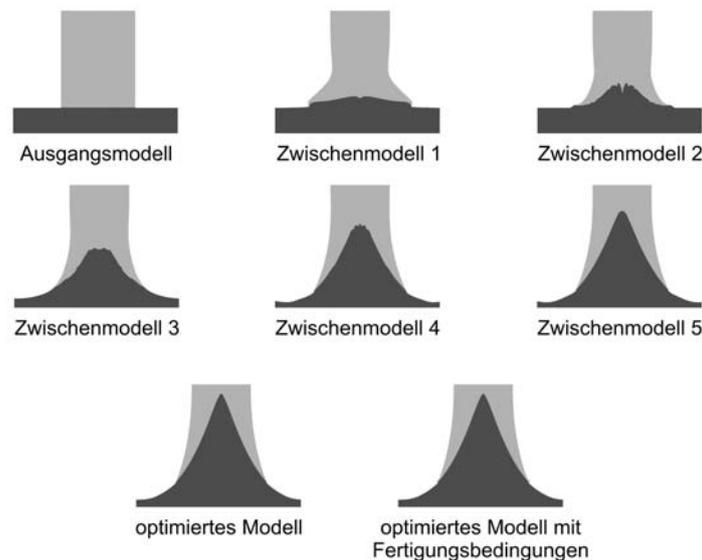


Abbildung 5.16: Verlauf der Optimierung mit verschiedenen Zwischenschritten

Im Inneren der Verbindung tritt in den folgenden Schritten ein Einschrumpfen dieses oberen Fügeteils auf, wobei die Mitte der Klebeverbindung auf Grund der starken Deformationen bizarre Wellenstrukturen hervorbringt. Diese Deformationen der Klebeschicht werden in den späteren Rechenschritten wieder völlig geglättet. Die anfängliche Verbreiterung in der Nähe der Klebeschicht wird im Verlauf der Optimierung stetig flacher, da die Spannungsüberhöhung am Auslauf der Klebeschicht durch die Anpassung der Fügeteildehnungen neutralisiert wird. Dieser spitz auslaufende Bereich ist in dieser Form für die Probenherstellung nicht fertigbar. Gesenkerodieren als Fertigungsverfahren erfordert in diesem Fall eine Mindestdicke von 0.2 mm, die in das Modell einfließen muss. Wird nun der Auslauf des oberen Fügeteils mit dieser Randbedingung beaufschlagt, so ändert sich die Geometrie der Klebeschicht durch weitere Optimierungsschritte in der Größenordnung der Fertigungstoleranzen. Daher ist in der Darstellung (Abbildung 5.16) der Probengeometrie keine Änderung erkennbar zwischen dem optimierten Modell mit und ohne Fertigungsrandbedingungen.

Die optimierte Endform steht im Gleichgewicht zwischen Wachstum und Schrumpfung im Fügeteil und der Klebeschicht. Am Klebstoffauslauf ist eine leichte Spannungsanhebung im Spannungsplot (Abbildung 5.17) erkennbar, die aus dem sehr spitz auslaufenden Fügeteil herrührt.

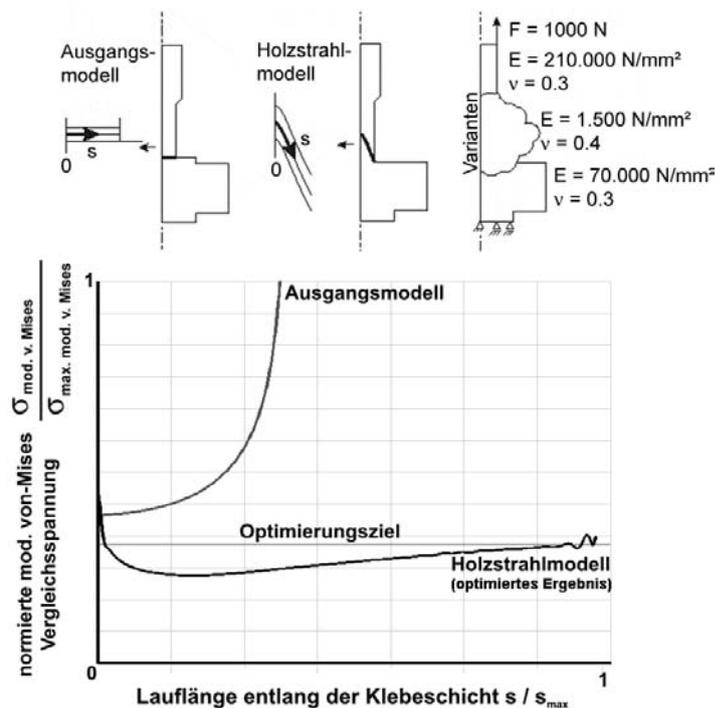


Abbildung 5.17: Spannungsvergleich in der Klebeschichtmitte zwischen Ausgangsmodell und optimierter Form; normiert auf das Maximum der mod. von-Mises Vergleichsspannung des Ausgangsmodells

Eine weitere Abweichung des relativ homogenen Spannungsbildes ist die Mitte der Klebeschicht. Diese Spannungsspitze ist im Bereich weniger Elemente durch die Kontinuität des rotationssymmetrischen Fügeteils erzwungen. Die Spannungsspitze entsteht am Wendepunkt der Fügeiteilform. Da jedoch bei der Fertigung durch Abbrand während des Erodierens die Spitze nicht derartig hergestellt werden kann, verringert sich diese Überhöhung in der real hergestellten Probe. Der mittlere Bereich der Klebeschicht liegt unterhalb des Optimierungsziels. In diesem Bereich steht die Klebeschichtlänge im Gleichgewicht mit den Flanken des Fügeteils. Insgesamt führt die Optimierung zu einer Verlängerung der gesamten Klebeschicht unter erheblicher Reduktion der Spannungen.

Abbildung 5.18 zeigt die optimierte Form detailliert als Spannungsplot der von Mises Vergleichsspannung. Im Spannungsplot ist am Wendepunkt der Klebeschichtkontur im oberen Fügeiteil eine gering belastete Zone erkennbar. Diese Zone steht im Gleichgewicht mit der daran angeschlossenen Klebeschicht. Im Bereich des Wendepunktes ist die Klebeschicht durch den vorliegenden Spannungszustand bestrebt, in die Länge zu wachsen, während das Fügeiteil an dieser Stelle niedrig belastet ist und mit Schrumpfung reagiert.

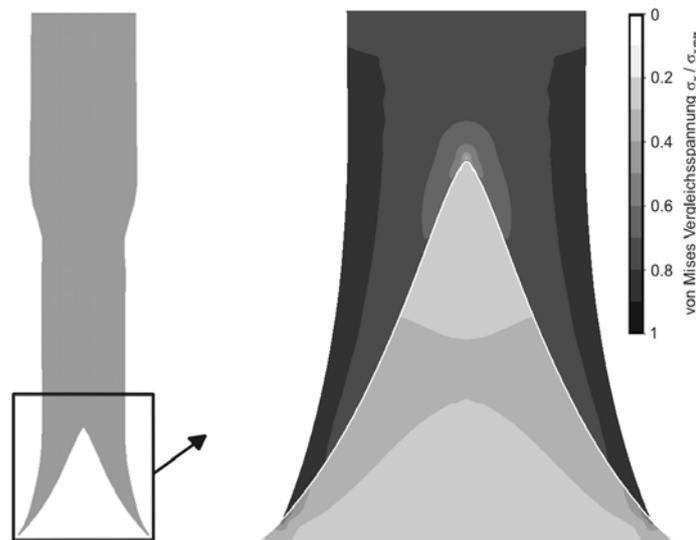


Abbildung 5.18: Spannungsverteilung der von-Mises Vergleichsspannung in den Fügeiteilen der optimierten Probe ohne Fertigungsrandbedingungen

In Abbildung 5.19 ist die Geometrie des natürlichen Vorbildes mit der optimierten technischen Probengeometrie gegenübergestellt. Da beide Konstruktionen mit ähnlicher Belastung beaufschlagt werden und die Wachstumsdirektiven äquivalent zum mechanisch stimulierten Wachstum der Bäume ausgelegt sind, kann als Bestätigung der Optimierung ebenso der Vergleich der Geometrie herangezogen werden. Abbildung 5.19 zeigt, dass die Geometrie der natürlichen Klebeverbindung des Holzstrahls und der rechnerisch optimierten Verbindung ähnlich ist.

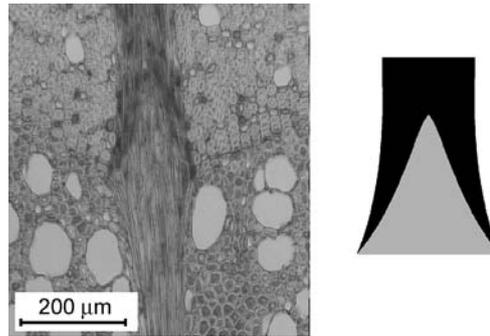


Abbildung 5.19: Vergleich der Geometrie zwischen dem natürlichen Vorbild und der technisch optimierten Probengeometrie; Foto: K.Weber, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung II Abteilung Biomechanik

Da das Ausgangsmodell als verklebter Stumpfstoß auch in der Literatur hinlänglich bekannt ist für seine ungünstige Spannungsverteilung [12], wird in den folgenden Versuchen zu den zwei vorgestellten Probengeometrien eine technisch relevantere Klebeverbindung hinzugezogen. Aus technischer Sicht ist eine zylindrische Zapfenverbindung als Vergleich zur optimierten Probe aussagekräftiger. Die zylindrische Probengeometrie muss hierbei, um eine Vergleichbarkeit herzustellen, auf den gleichen Klebstoffeinsatz ausgelegt werden. Die Zusammenstellung in Abbildung 5.20 und 5.21 zeigt die Probengeometrien und deren Spannungsverteilungen.

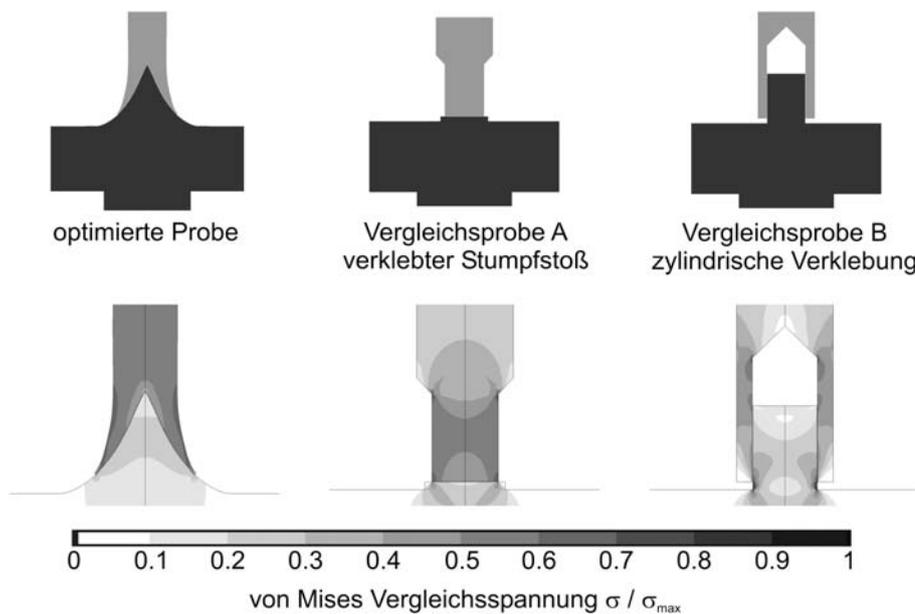


Abbildung 5.20: Probengeometrien und deren Spannungsverteilungen im Vergleich

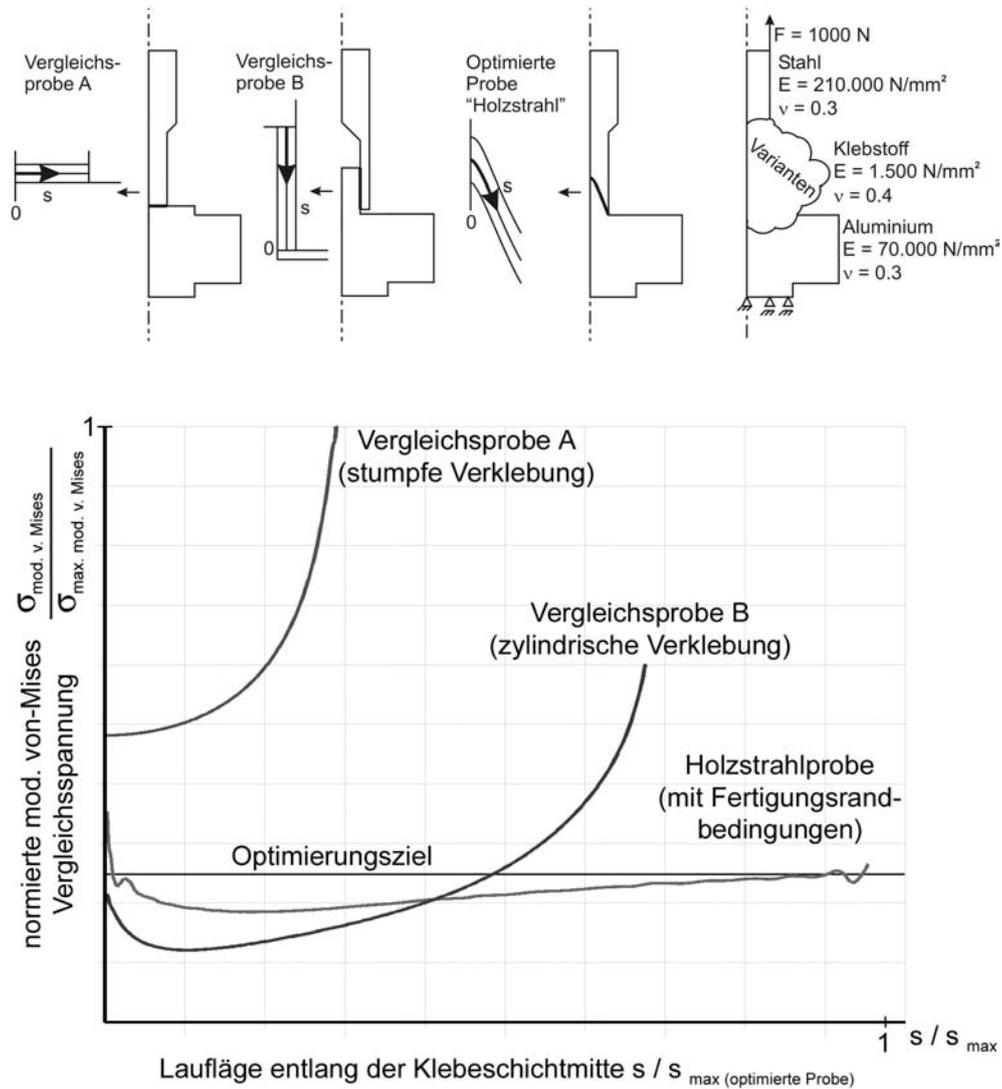
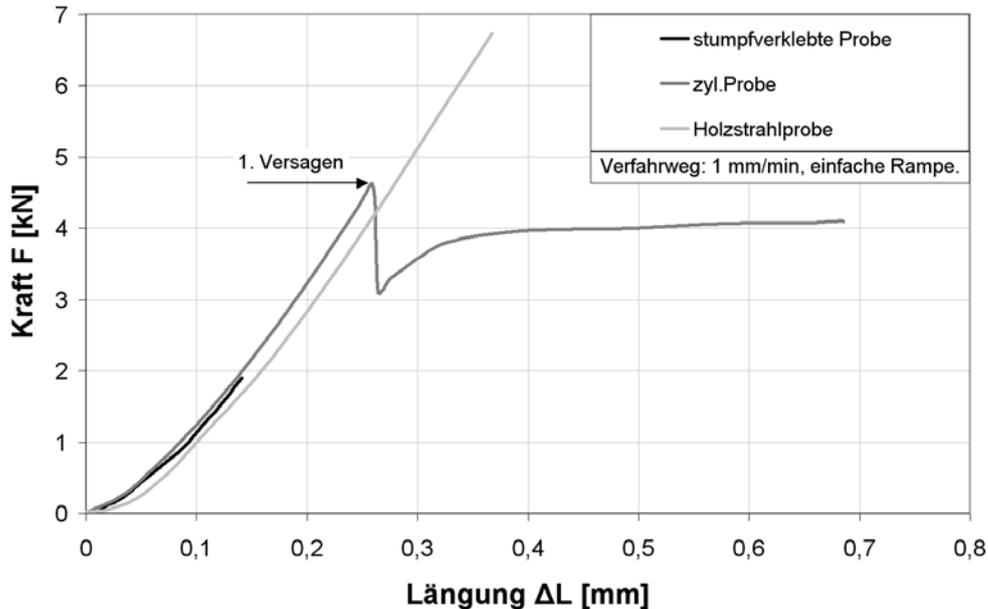


Abbildung 5.21: Spannungsvergleich der modifizierten von-Mises Vergleichsspannung in der Mitte der Klebeschicht der drei Vergleichsproben; normiert auf das Maximum der Vergleichsspannung in Probe A

Die Zapfenverbindung weist, wie in Abbildung 5.21 ersichtlich, am unteren Klebeschichtauslauf eine Spannungsüberhöhung der modifizierten von Mises Spannung durch hohe Zugnormalspannungen in den Füge­teilen und der Klebeschicht auf. Von der Mitte der Klebeschicht bis zum oberen Ende zeigt sich eine sehr niedrige Belastung im Spannungsplot. Diese ist durch Drucknormalspannungen erklärbar, die das äußere Füge­teil unter koaxialer Zuglast auf die Klebeschicht und das innere Füge­teil aufbringt. Die Spannungsverteilung der zylindrischen Zapfenverbindung unterscheidet sich durch diese Druckspannungskomponente von den zugspannungsdominierten Vergleichsproben.

## 5.2.2 Versuchsergebnisse

Der Optimierungserfolg kann wiederum anhand der Zug- und Zugschwellversuche abgelesen werden. Da die zylindrische Zapfenverbindung als technische Lösung schon eine relativ gute Spannungsverteilung aufweist, ist der Optimierungserfolg nicht ganz so ausgeprägt wie bei den einschnittig überlappenden Proben. Abbildung 5.22 zeigt charakteristische Beispiele der einzelnen Probengeometrien im Zugversuch.



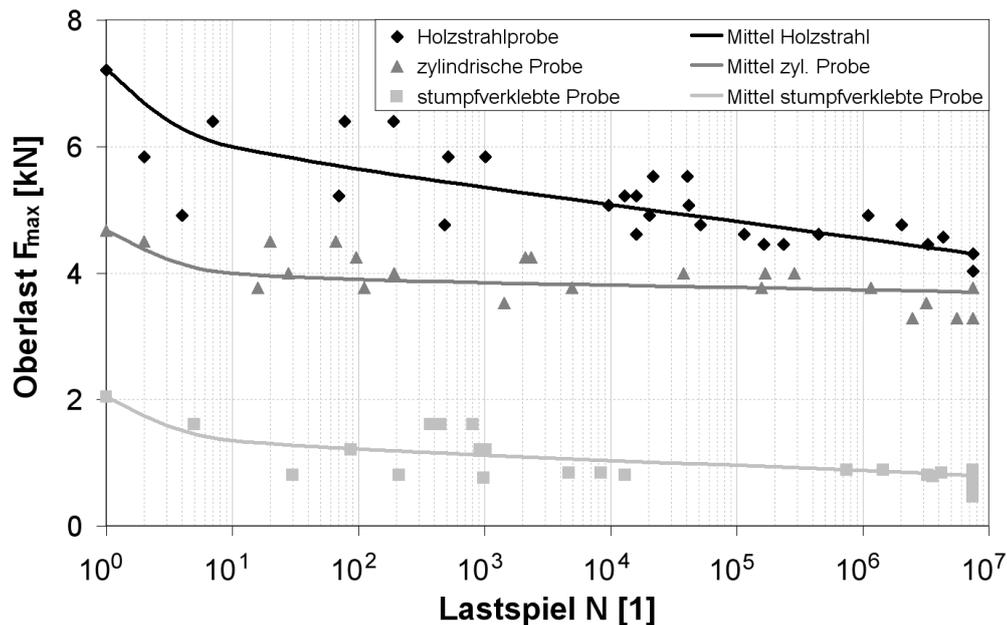
Probenbezeichnung	Anzahl	m. Bruchlast	std. Abweichung	opt. Grad
Stumpf verklebte Vgl.probe	7	2.03 <i>kN</i>	0.19 <i>kN</i>	3.55
Zyl. Vgl.probe 1. Versagen	10	4.13 <i>kN</i>	1.21 <i>kN</i>	1.74
Zyl. Vgl.probe Bruch	-  -	4.37 <i>kN</i>	0.69 <i>kN</i>	1.65
Zyl. Vgl.probe max. Last	-  -	4.67 <i>kN</i>	0.74 <i>kN</i>	1.54
Holzstrahlprobe	8	7.21 <i>kN</i>	0.70 <i>kN</i>	-

Abbildung 5.22: Gegenüberstellung charakteristischer Zugversuche der einzelnen Versuchsproben; Loctite<sup>(R)</sup> 496; 24h Aushärtezeit bei 25°C; Unterlast = 10% der Oberlast; Frequenz 45Hz; Versuchsdurchführung durch [26]

Die stumpf verklebten Vergleichsproben zeigen, wie zu erwarten, sehr geringe Bruchkräfte, die im Mittel bei 2 *kN* mit einer Standardabweichung von 0.2 *kN* liegen. Das Versagen der zylindrischen Vergleichsproben zeigt sich in zwei Stufen. Zuerst tritt ein partieller Bruch ein, der vorraussichtlich um den Bereich der Spannungsüberhöhung an Auslauf der Klebeschicht einsetzt. Nach weiterer Belastung bricht die Probe endgültig, wobei das zweite Versagen bei der Hälfte der Proben höhere Bruchlasten erreichte als das erste Versagen. Im Mittel trat das erste Versagen bei 4.2 *kN* und das zweite Versagen bei 4.4 *kN* ein. Wird die maximale Bruchlast betrachtet, so liegt eine mittlere

Bruchlast von  $4.7 \text{ kN}$  bei einer Standardabweichung von  $0.7 \text{ kN}$  vor. Die Bruchlast der optimierten Proben lag im Mittel bei  $7.2 \text{ kN}$  mit einer Standardabweichung von  $0.7 \text{ kN}$ . Dies entspricht einem mittleren statischen Optimierungsgrad zur zylindrischen Probe von 1.54 bis 1.75 je nach Basis der Berechnung. Der Optimierungsgrad zur stumpf verklebten Vergleichsprobe liegt bei 3.55, wobei dieser sehr hohe Optimierungsgrad von dem stark inhomogenen Spannungszustand in der Klebeschicht und dem geringeren Klebstoffeinsatz dieser Probe abhängt.

Das positive Versuchsergebniss wird ebenfalls im Zug-Schwellversuch bestätigt. Analog zur einschnittig überlappenden Klebeverbindung wurde die Unterlast zu 10% der Oberlast gewählt. Abbildung 5.23 zeigt die dynamischen Ergebnisse in einem Wöhlerdiagramm dargestellt.



Probenbezeichnung	Anzahl	Dauerfestigkeit	Opt. Grad
Stumpf verklebte Vergleichsprobe	33	$0.8 \text{ kN}$	5.38
Zyl. Vergleichsprobe max. Last	22	$3.7 \text{ kN}$	1.16
Holzstrahlprobe	24	$4.3 \text{ kN}$	-

Abbildung 5.23: Vergleichsproben im Zug-Schwell-Versuch [26]; Loctite<sup>(R)</sup> 496; 24h Aushärtezeit bei  $25^\circ\text{C}$ ; Unterlast = 10% der Oberlast; Frequenz 45Hz

Erwartungsgemäß liegt der Kurvenverlauf der stumpf verklebten Vergleichsprobe auf einem niedrigen Niveau. Der Kurvenverlauf der zylindrischen Vergleichsprobe läuft flach auf hohem Niveau im Bereich der Langzeitermüdung. Dies bedeutet, dass schon geringe Änderungen in der Belastung eine große Varianz in der Lebensdauer zur Folge haben. Im Vergleich mit der Holzstrahlprobe ist die Lastabnahme über die Lastspielzahl weniger ausgeprägt und kann unter anderem mit der homogenisierten Spannungsverteilung in

der Klebeschicht der Holzstrahlprobe erklärt werden. Die Klebeschicht der optimierten Probe wird, über den gesamten Bereich gleichmäßig, bei höherem Lastniveau belastet. Mögliche Materialinhomogenitäten oder Anomalieen können daher über der gesamten Klebeschicht, und nicht nur in einem kleinen, hochbelasteten Bereich, zum Ausgangspunkt des Versagens werden. Der Abfall des Lastniveaus der optimierten Probe bei hohen Lastspielzahlen könnte aus der höhere Sensitivität resultieren. Der dynamische Optimierungsgrad reduziert sich von einem anfänglich statisch ermittelten Wert von 1.54 auf 1.16 im Bereich der Dauerfestigkeit.

### 5.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ausgehend von Holzstrahl, einer hauptsächlich unter Zug belasteten, zur radialen Kraftübertragung im Holz des Baumes konzipierten, natürlichen Konstruktion, werden die Belastungen auf ein technisches Grundmodell übertragen. Aus den Ähnlichkeiten der Belastung und der Materialkennwerte, relativ zueinander betrachtet, zeigt das Grundmodell eines stumpf verklebten Stabes, nach Optimierung mit Hilfe der CA<sup>3</sup>O Methode, eine dem Holzstrahl ähnliche Bauteilgeometrie. Da die stumpf verklebte Vergleichsprobe, durch sehr ungünstige Spannungsverteilungen in der Klebeschicht, nur bedingt zur Beurteilung der Optimierung herangezogen werden kann, wird zur Herstellung der Vergleichbarkeit eine technisch relevantere Probengeometrie herangezogen. Die zylindrische Zapfenverbindung, mit deren günstigeren Spannungsverteilung in der Klebeschicht, kann bei gleichem Klebstoffeinsatz zum Vergleich des Optimierungserfolges gegenübergestellt werden.

Die Optimierung erreicht, verglichen mit der zylindrischen Zapfenverbindung, einen mittleren statischen Optimierungsgrad  $\phi_{\text{statisch}}$  von 1.54 bis 1.74, je nach Basis der Berechnung. Diese unterschiedlichen Werte ergeben sich aus den unterschiedlichen Versagensverläufen der Vergleichsproben. Erwartungsgemäß wird mit der stumpf verklebten Vergleichsprobe ein sehr hoher Optimierungsgrad von  $\phi_{\text{statisch}} = 3.55$  erreicht, da die Spannungsverteilung in der Klebeschicht sehr ungünstig ist. Daher kann dieser Vergleich nicht zur Beurteilung des Methodenerfolges herangezogen werden.

Im Dynamischen sinkt der Optimierungsgrad  $\phi_{\text{dynamisch}}$  zwischen der Zapfenverbindung und der optimierten Probe ab, da bei einer Dauerfestigkeit von  $10^7$  Lastspielen im Zug-Schwell-Versuch die optimierten Proben, ausgehend von der statisch gemittelten Bruchlast, einen stärkeren Abfall der Bruchlast bei höherer Lastspielen aufweist, als die zylindrische Zapfenverbindung. Der dynamische Optimierungsgrad  $\phi_{\text{dynamisch}}$  erreicht hierbei einen Wert von 1.16. Analog zu den Zugversuchen ist der Optimierungsgrad des stumpf verklebten Ausgangsmodells mit  $\phi_{\text{dynamisch}} = 5.38$  ebenfalls wenig geeignet zur Beurteilung des Erfolges der Methode.

Trotz der Abnahme des Optimierungsgrades im Zug-Schwellversuch zeigt sich ein positives Bild der Optimierung. Es konnte eine deutliche Traglaststeigerung durch die Optimierung erzielt werden. Über die zusätzliche Einsparung des unterbelasteten Materials wurde eine Gewichtseinsparung durch die taillierte Geometrie erreicht. Das Modell zeigt, dass für eine Optimierung nicht zwingend beide Fügeteile an den Wachstumsschritten aktiv teilnehmen müssen. Vielmehr gibt die technische Variabilität der Fertigung der einzelnen Fügeteile die Randbedingungen für die Wachstumsschritte vor. Gerade bei gewollter partieller mechanischer Unterbelastung eines Fügeteils kann die CA<sup>3</sup>O Methode trotzdem eingesetzt werden.

## 5.3 Optimierungen mit eingeschränktem Bauraum

### 5.3.1 Widerlager an starrer Wand

Das folgende Modell geht von einer Fügeteilanordnung aus, bei der nur ein Fügeteil optimiert werden kann, während das Zweite in seiner ursprünglichen Form erhalten bleibt. Dies tritt z.B. bei einem Widerlager auf, das an einer ebenen Wand befestigt werden muss. Als Annahme dient eine Aluminiumplatte, an die ein Stahlwiderlager angeklebt werden soll. Auf das Widerlager soll eine Kraft einwirken, deren Angriffspunkt von der Klebeschicht entfernt liegt. Abbildung 5.24 zeigt ein solches Widerlager unter Last in zweidimensionaler Darstellung. Die Abmaße sind so gewählt, dass ein Vergleich mit einer natürlichen Konstruktion im Laufe des Kapitels möglich ist.

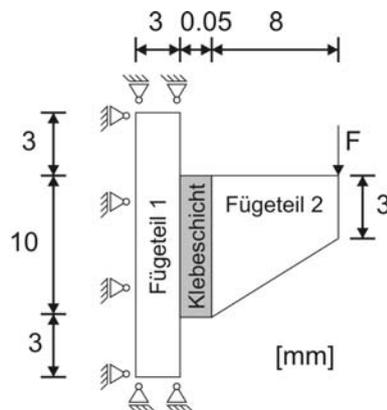


Abbildung 5.24: Ausgangsmodell mit Angabe der Abmessungen und Randbedingungen

Das Fügeteil 1 stellt, mit einer Stärke von  $3 \text{ mm}$ , die Aluminiumwand dar, die während der Optimierung in ihrer äußeren Geometrie nicht verändert werden soll. Die Klebeschichtdicke ist, analog zu den vorherigen Modellen, mit  $0.05 \text{ mm}$  auf eine für viskose Klebstoffe üblichen Dicke dimensioniert. Das aus Stahl gefertigte Fügeteil 2 wird für die Optimierung, bis auf den Kraftangriffspunkt, der  $8 \text{ mm}$  von der Klebeschicht entfernt ist, vollständig freigegeben. Der Angriffspunkt der Belastung wird während der Optimierung festgehalten. Der Optimierungsbaureaum wird daher vom Kraftangriffspunkt und der Aluminiumwand begrenzt.

Die Materialdaten werden für das Modell wie folgt angenommen:

Berechnung:	linear elastisch
Kraft $F$ :	$20 \text{ N}$
E-Modul der Fügeteil 1:	$70000 \text{ N/mm}^2$
E-Modul der Fügeteil 2:	$210000 \text{ N/mm}^2$
Poissonzahl $\nu_{\text{Fügeteile}}$ :	$0.3$
E-Modul der Klebeschicht:	$1500 \text{ N/mm}^2$
Poissonzahl $\nu_{\text{Klebeschicht}}$ :	$0.4$

## Die CA<sup>3</sup>O-Optimierung

Die Festhaltungen während der Wachstumsschritte sind auf Grund der Randbedingungen definiert. Der Kraftangriffspunkt soll an der Ursprungsposition fix verbleiben. Die Festhaltungen der starren Wand sind vielschichtiger. Alle Kanten, die nicht mit dem Klebstoff in Kontakt stehen werden eingespannt, während die verbleibende Kante Bewegungen in ihrer Ebene durchführen kann, damit das Wachstum der Klebeschicht nicht behindert wird. Aus diesen Festhaltungen heraus bleibt die äußere Geometrie erhalten, während sich das FE Netz innerhalb des Fügeteils durchaus verschieben kann. Damit während der Wachstumsschritte keinerlei Behinderung des Wachstums der Klebeschicht durch den Materialwiderstand des Fügeteils 1 entsteht, wird der E-Modul auf einen im Verhältnis sehr geringen Wert von  $1 \{N/mm^2\}$  während der Optimierungsschritte gesetzt.

Die zur Optimierung verwendeten Parameter:

Materialparameter Klebstoff $c$ :	0.4	
Referenztemperatur Fügeteil 2:	290	$\{^{\circ}C\}$
Referenztemperatur Klebeschicht:	226	$\{^{\circ}C\}$
maximale Spannung in den Fügeteilen:	73.8	$\{N/mm^2\}$
maximale Spannung in der Klebeschicht:	24.4	$\{N/mm^2\}$
$\Rightarrow$ Referenzspannung in den Fügeteil 2:	21.4	$\{N/mm^2\}$
$\Rightarrow$ Referenzspannung in der Klebeschicht:	5.5	$\{N/mm^2\}$
$E_{\text{Fügeteil 1}}$ in den Wachstumsschritten:	1	$\{N/mm^2\}$
$E_{\text{Fügeteil 2}}$ in den Wachstumsschritten:	1000	$\{N/mm^2\}$
$E_{\text{Klebeschicht}}$ in den Wachstumsschritten:	10000	$\{N/mm^2\}$

Analog zu den vorherigen Modellbeschreibungen werden die Einheiten während der Wachstumsschritte in geschweiften Klammern dargestellt. Alle Festhaltungen werden in Abbildung 5.25 zusammenfassend dargestellt.

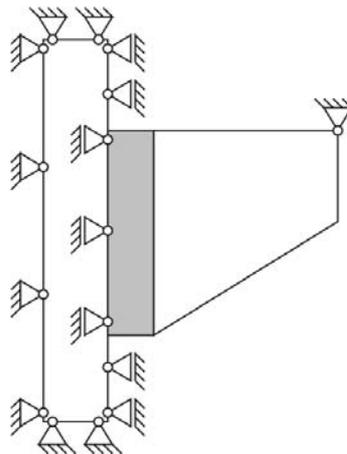


Abbildung 5.25: Festhaltungen während der Wachstumsschritte

Im Spannungsplot der von-Mises Vergleichsspannung in Abbildung 5.26 ist die Ausgangsgeometrie neben dem optimierten Endergebnis dargestellt. Das Ausgangsmodell zeigt im Inneren einen großen Bereich, in dem eine geringe Vergleichsspannung vorliegt, wobei die tragende Randschicht hoch belastet wird. Die Spannungsspitze an der Krafteinleitung kann an dieser Stelle unberücksichtigt bleiben, da der Kraftauftrag punktuell modelliert ist und sich daher zu hohe lokale Spannungen ergeben. Die Krafteinleitung ist jedoch weit genug von der Klebeschicht entfernt, so dass kein Einfluß von der Spannungsüberhöhung am Angriffspunkt der Last auf den zu optimierenden Bereich vorliegt.

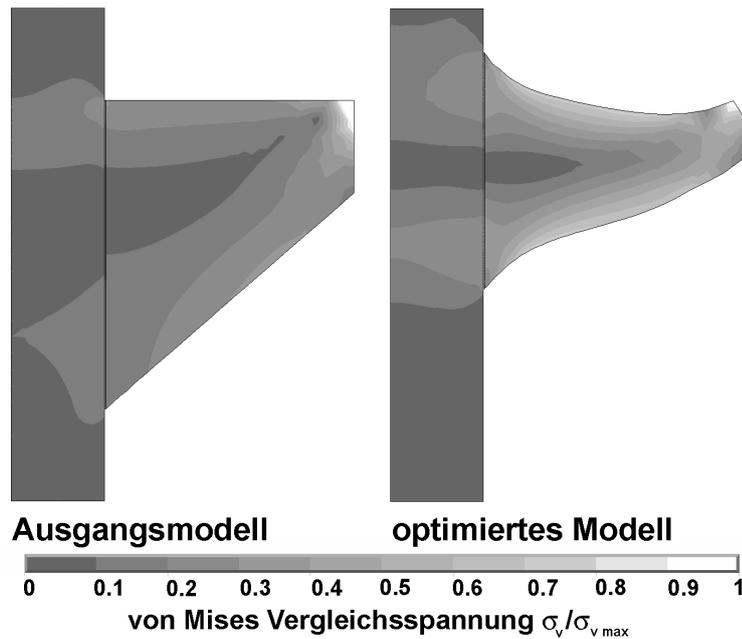


Abbildung 5.26: Normierte von-Mises Vergleichsspannung des Ausgangsmodells und des optimierten Modells

Rechts neben dem Ausgangsmodell ist in Abbildung 5.26 die optimierte Geometrie mit überlagerter von-Mises Vergleichsspannung dargestellt. Im Inneren der Fügeteile herrscht weiterhin ein unbelasteter Bereich vor, der durch die Optimierung nicht eliminiert werden kann. Das Wachstum der Klebeschicht verhindert, auf Grund der Randbedingungen der ebenen Wand, eine vollständige Homogenisierung. Die Ausläufe des Widerlagers im Bereich der Klebeschicht zeigen eine spitz auslaufende Form auf, die an die vorherig vorgestellten Modelle erinnern. Diese ist durch eine angepasste Dehnung im Bereich der Klebeschichtausläufe plausibel erklärbar. Die restliche Formgebung steht im Einklang mit dem Wachstum der höherbelasteten Bereiche und der Schrumpfung niedrigbelasteter Zonen im Inneren des Bauteils. Die Entwicklung der Optimierung, dargestellt in Abbildung 5.27, zeigt die Massenverschiebung der Fügeteile während des Optimierungsprozesses.



Abbildung 5.27: Entwicklung der Optimierung vom Ausgangsmodell über drei Zwischenschritte zum optimierten Modell

Die Verschiebung der Klebeschicht relativ zum Punkt der Krafteinleitung am rechten Fügeteilende wird bei der Betrachtung der Spannungsverteilung der modifizierten von-Mises Vergleichsspannung in Abbildung 5.28 entlang der Klebeschichtmitte deutlich. Am oberen Klebeschichtauslauf des Ausgangsmodells ist eine deutliche Spannungsüberhöhung auf Grund der hohen Schälspannung in Normalenrichtung zu erkennen. Im Bereich des unteren Klebeschichtauslaufes ist die Vergleichsspannung deutlich abgesenkt. Dies ist durch die dort vorherrschende Druckbelastung erklärbar. Die Verschiebung der Klebeschicht des optimierten Modells ist im Spannungsplot über die Kurvenverschiebung der Vergleichsspannung dargestellt. Die Spannungsüberhöhung am oberen Klebeschichtauslauf wird nur gering reduziert, wobei das Maximum vom Auslauf in das Bauteilinnere verschoben ist. Dies ist günstiger, da somit Materialdefekte und Umwelteinflüsse im Bereich der Klebeschichtausläufe auf die Festigkeit der Verbindung weit weniger Einfluß haben.

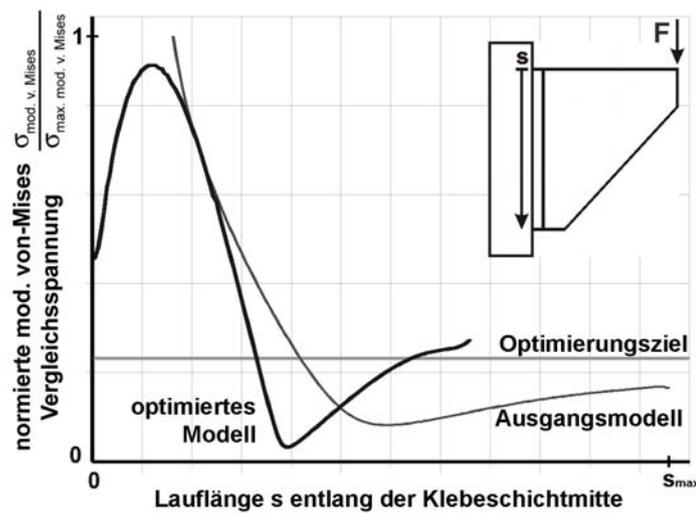


Abbildung 5.28: Modifizierte von-Mises Vergleichsspannung des Ausgangsmodells und des optimierten Modells entlang der Klebeschichtmitte, normiert auf das Maximum des Ausgangsmodells

Im unteren Auslauf der Klebeschicht ist eine Erhöhung der Vergleichsspannung zum Optimierungsziel hin zu erkennen, wobei die Gesamtlänge der Klebeschicht deutlich verringert ist. Insgesamt kann eine geringe Spannungsreduktion bei einer Verkürzung der Klebeschichtlänge und niedrigerer Belastung des oberen Klebeschichtauslaufs aufgezeigt werden.

Die Optimierung des Widerlagers ist stark abhängig von den Randbedingungen der starren Wand. Durch die Festhaltung der Geometrie über das linke Füge­teil kann die Spannungsüberhöhung im Bereich der Zuglastübertragung nicht weiter optimiert werden. Des Weiteren verhindert der schrumpfende Bereich im Bauteilinneren ein Wachstum der zugbelasteten Zone in der Umgebung der Klebeschicht. Die Spannungsüberhöhung kann weiter reduziert werden, wenn die zu übertragenden Zugspannungen in einem flacheren Winkel auf die ebene Wand übertragen werden können. Eine Trennung der zug- und drucklastdominierten Bereiche durch Entfernung der niedrigbelasteten Zone im Bauteilinneren mit nachfolgender Optimierung kann das Problem lösen.

Im folgenden Modell sollen die Randbedingungen derart abgewandelt werden, dass der niedrigbelastete Bereich ausgeschnitten werden kann und somit eine Trennung der zug- und druckspannungsdominierten Bereiche erreicht wird. Beide Zonen können sich dann unabhängig voneinander an die ebene Wand anpassen. Alle sonstigen Randbedingungen, sowie die Belastung des Modells sollen beibehalten werden.

### 5.3.2 Modellmodifikation des Widerlagers

Ausgehend vom vorherig optimierten Modell wird in der Mitte des rechten Füge­teils in direkter Nähe zur Klebeschicht ein Loch mit senkrecht zur Klebeschichtoberfläche verlaufender Kontur ausgeschnitten. Der Ausschnitt deckt den ursprünglich unterbelasteten Bereich ab und ist in Abbildung 5.29 in der Kontur des Ausgangsmodells dargestellt.

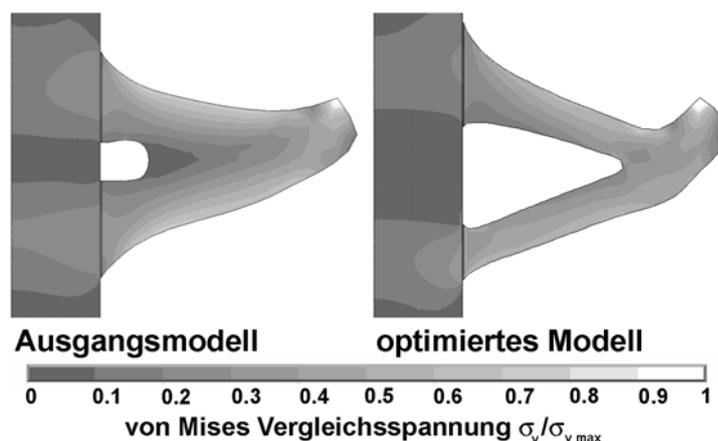


Abbildung 5.29: Normierte von-Mises Vergleichsspannung des Ausgangsmodells und des optimierten Modells

Der Ausschnitt trennt den zugbelasteten Bereich von der hauptsächlich druckbelasteten Zone, so dass sich beide Bereiche getrennt voneinander an die ebene Wand anpassen können. Das freigewordene Teilstück der ebenen Wand muss mit einer Festhaltung in der Ebene während der Optimierungsschritte, analog zu den freien Teilstücken ober- und unterhalb der Klebeschicht, beaufschlagt werden.

In Abbildung 5.29 ist der von-Mises Vergleichsspannungsplot des Ausgangsmodells und der neuen optimierten Geometrie dargestellt. Über dem Ausschnitt zeigt sich ein unterbelasteter Bereich, der mit Schrumpfung reagiert. Der untere Teil des Fügeteils ist hauptsächlich druckbelastet und wird über den Optimierungsprozess deutlich verkleinert. Die obere Zone des Fügeteils wird hauptsächlich unter Zug beansprucht und vergrößert sich auf Grund der hohen Belastung der Klebeschicht. Des Weiteren kann eine Verschiebung der Klebeschicht des oberen Fügeteilfußes nach oben festgestellt werden. Diese Bewegung lässt die Zugbelastung in einem flacheren Winkel angreifen und reduziert daher die Belastung der Klebeschicht. Der Verlauf der Optimierung ist in Abbildung 5.30 dargestellt. Das Einschrumpfen des Fügeteilmaterials im Bauteilinneren kann in der dargestellten Bilderfolge gut beobachtet werden. Des Weiteren ist die Verschiebung und Verbreiterung des oberen Fügeteilfußes deutlich erkennbar.



Abbildung 5.30: Entwicklung der Optimierung vom Ausgangsmodell über drei Zwischenschritte zum optimierten Modell

Im Spannungsplot der modifizierten von-Mises Vergleichsspannung entlang der Klebeschichtmitte, dargestellt in Abbildung 5.31, kann die Leistungssteigerung durch die Optimierung gut abgelesen werden. Das optimierte Modell weist in der Klebeschicht des oberen Fügeteilfußes eine deutliche Spannungsreduktion bei leichter Vergrößerung der Klebeschichtlänge auf, wobei sich die prinzipiellen Kurvenformen kaum unterscheiden. Die Reduktion ist hauptsächlich auf die Belastungsänderung in der Klebeschicht durch eine flachere Krafteinleitung zurückzuführen. Der untere Fügeteilfuß weist eine Belastungserhöhung bei einer deutlichen Verkleinerung der Klebeschichtlänge auf. Insgesamt weist die optimierte Geometrie eine reduzierte Spannungsverteilung bei verkleinerter Klebeschichtlänge auf. Analog zum optimierten Endmodell der vorherigen Optimierung ist die maximale Belastung der Klebeschicht im Bauteilinneren. Dies eliminiert Einflüsse der Randbereiche auf die Festigkeit der gesamten Verbindung.

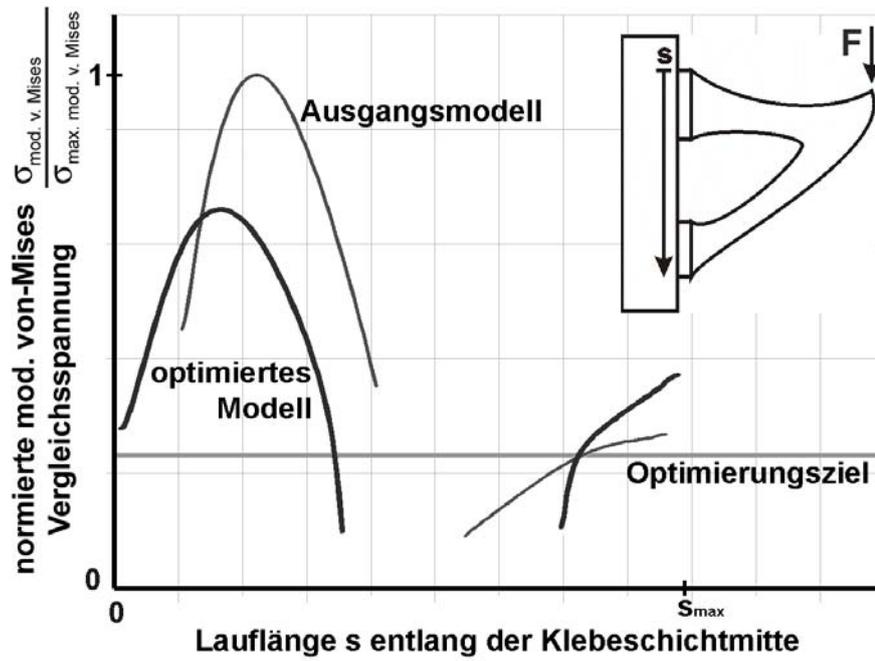


Abbildung 5.31: Modifizierte von-Mises Vergleichsspannung des Ausgangsmodells und des optimierten Modells entlang der Klebeschichtmitte, normiert auf das Maximum des Ausgangsmodells

### 5.3.3 Vergleich der Modelle mit natürlichen Bauteilen

In der Pflanzenwelt gibt es ähnlich belastete, verklebte Konstruktionen. So ist z.B. der Stachel der Rose, als Defensivwaffe und als Haltevorrichtung dimensioniert und auf den Stengel über eine Korkschicht [42] aufgesetzt. Die Korkschicht zwischen Stengel und Stachel kann durchaus als Klebeschicht aufgefasst werden, da die Korkschicht als Trennschicht zwischen dem Gewebe des Stachels und dem Stengel liegt. In diesem Punkt unterscheiden sich nach [28] der Dorn vom Stachel, da der Dorn als Auswuchs der Epidermis (Hautschicht), sowie der darunterliegenden Gewebe vorliegen. Abbildung 5.32 zeigt einen Rosenstachel in makroskopischer Aufnahme am Stengel im ungeschnittenen Zustand und im Schnitt.

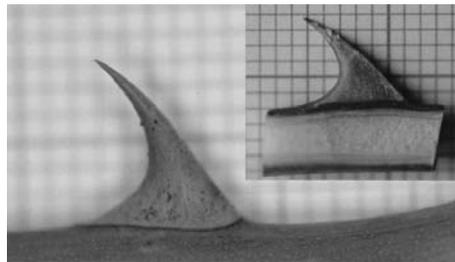


Abbildung 5.32: Makroskopische Aufnahme eines Stachels einer Gartenrose *Rosa ssp.* und deren makroskopischer Schnitt; Klassifizierung nach [18]: gekrümmter Nadelstachel; Foto: K.Weber, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung II Abteilung Biomechanik

Die mikroskopischen Aufnahmen (Abbildung 5.33) zeigen unterschiedliche Gewebearrangungen im Stachel und Stengel. Deutlich ist die Korkschicht als Trennlinie im umliegenden Gewebe im mikroskopischen Schnitt zu erkennen. Im Inneren des Stachels sind vorherrschend großvolumige Zellen angelegt, die unter 25 facher Vergrößerung eine deutliche Vorzugsrichtung entlang dem Konturverlauf aufzeigen.

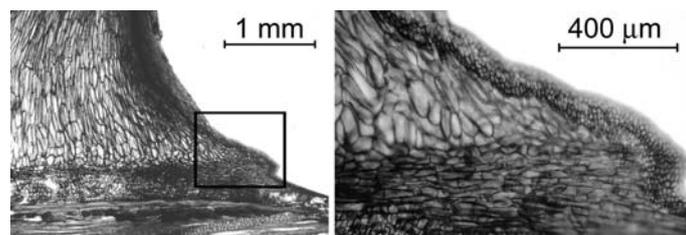


Abbildung 5.33: Mikroskopische Aufnahme (links, Mikroskopievergrößerung: 25x) des Stachelfußes einer Gartenrose *Rosa ssp.* und deren mikroskopischer Nahvergrößerung (rechts, Mikroskopievergrößerung: 100x); Foto: K.Weber, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung II Abteilung Biomechanik

Die Randschicht des Stachels zeigt sehr kleinvolumige, dickwandige Zellen, wobei die Ausdehnung der Randschicht variabel über der Kontur angelegt ist. In der Korkschiebt zwischen Stachel und Stengel liegen Zellen mittleren Volumens, deren Vorzugsrichtung senkrecht zur Stengeloberfläche angelegt sind, während das Zellgewebe im Stengel eine axiale Vorzugsrichtung aufweist. Eine harte Abtrennung ist jedoch nicht möglich, da in einem begrenzten, fließenden Übergang die einzelnen Zellschichten nebeneinander angeordnet sind. In Abbildung 5.34 ist die strukturierte Zellanordnung im Stachel gut erkennbar.

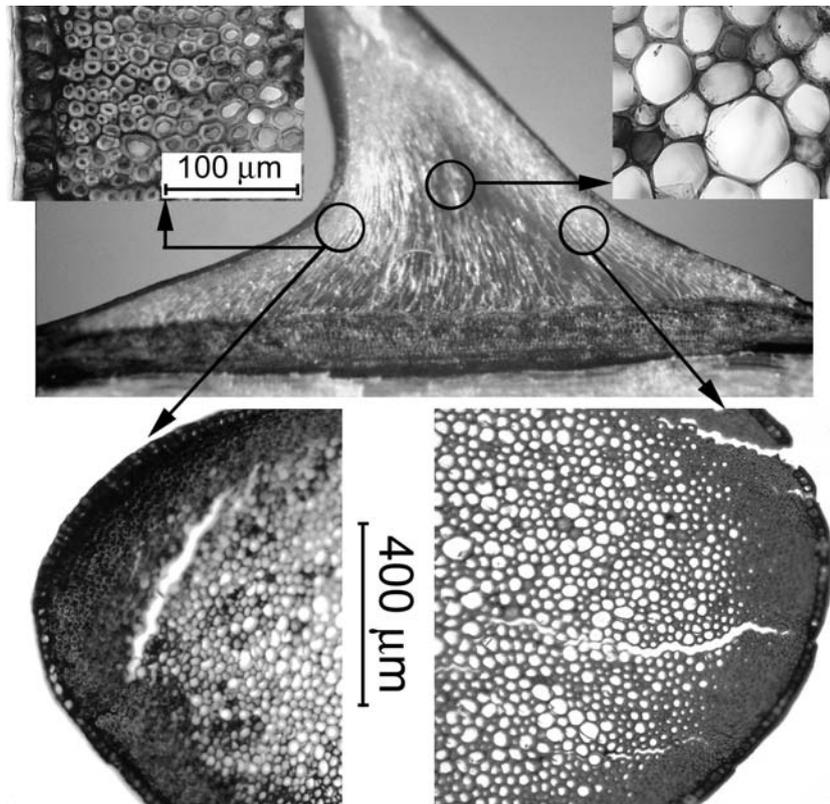


Abbildung 5.34: Makroskopische Aufnahme des Rosenstachels einer Gartenrose *Rosa ssp.* nach Eintrocknung der Schnittfläche mit gut sichtbarer Zellstruktur; im Inneren des Stachels zeigt sich eine stärkere Schumpfung des Gewebes; links oben: 630-fache Mikroskopvergrößerung der Randschicht (links unten 100-fach mikroskopisch); rechts oben: 630-fache Mikroskopvergrößerung der Zellen im mittleren Bereich des Stachels; rechts unten: 100-fache mikroskopische Vergrößerung der rechten Randkontur; Foto: K. Weber, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung II Abteilung Biomechanik

Ausreißversuche einzelner Stacheln, analog zur Belastung der Modellrechnungen, haben im Schnitt bei einer Bruchlast von ca. 20 N zum Versagen entlang der Korkschiebt geführt, wobei eine Unschärfe der Ergebnisse einerseits durch die biologische Variation

und andererseits über die genaue Steuerung der Krafteinleitung festzustellen ist. Der Anriss erfolgt erwartungsgemäß im Bereich der höchsten Belastung, analog zur Modellberechnungen, und setzte sich durch die Korkschicht bis zum vollständigen Bruch durch. Das Versagen ähnelt daher dem zu erwartenden Versagen der optimierten Geometrie.

Die Schnittbilder zeigen im Makroskopischen wie im Mikroskopischen starke Ähnlichkeiten mit den optimierten Modellen. Die *natürlichen Fügeteile* weisen an den Ausläufen der Korkschicht in guter Übereinstimmung eine spitz auslaufende Formgebung auf. Der Rosenstachel ist als Vollmaterial mit unterschiedlich großen Zellen und unterschiedlich großen Zellwänden aufgebaut. Unter der Betrachtung der Zellstrukturen und Wandstärken in Abbildung 5.33 zeigt sich, dass der unterbelastete Bereich im Inneren des Stachels mit großvolumigen, dünnwandigen Zellen ausgestattet ist, während die höherbelasteten Bereiche, d.h. die Randbereiche, mit kleinvolumigen, dickwandigen Zellen aufgebaut sind. Dieser strukturelle Gradient deckt sich mit den Berechnungen der Materialverteilung im Modell des Widerlagers mit Hohlraum. Ein geometrischer Vergleich ist in Abbildung 5.35 zwischen einem Rosenstachel (*Rosa ssp.*) und den optimierten Modellen des Widerlagers gegeben.

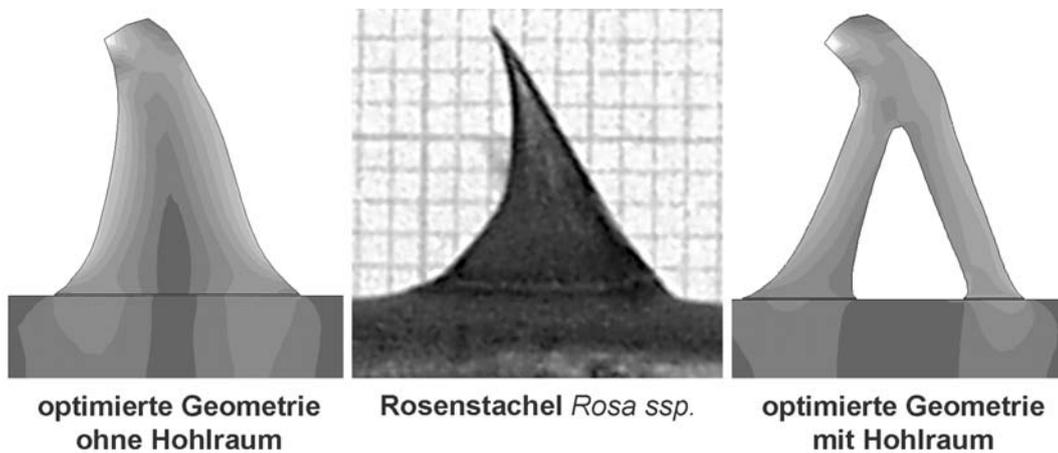


Abbildung 5.35: Vergleich der Geometrie zwischen den optimierten Widerlagern und dem Rosenstachel *Rosa ssp.*

In Stengelnähe liegt eine gute Übereinstimmung mit dem natürlichen Vorbild vor. Abweichungen bestehen im Bereich der Krafteinleitung. Hier zeigt sich, dass der Rosenstachel mit seiner spitz auslaufenden Kontur zusätzlich als Defensivwaffe konzipiert ist. Im technischen Modell wird die Krafteinleitung als Punktlast umgesetzt, wodurch sich hohe Spannungen und daraus folgend hohe Materialzuwächse ableiten lassen. Der prinzipielle Vergleich kann jedoch durchaus gezogen werden.

### 5.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ausgehend von einem Widerlager, das auf eine ebene Wand aufgeklebt werden soll, kann mit Hilfe der CA<sup>3</sup>O-Methode eine optimierte Form gefunden werden, die jedoch, durch die Randbedingungen der ebenen Wand, keine deutliche Spannungsreduktion aufweist. Die Optimierung verschiebt das Spannungsmaximum der modifizierten von-Mises Vergleichsspannung vom Bauteilrand in das Innere der Klebeschicht. Gleichzeitig wird die Klebeschicht verschoben und verkleinert. Während das Ausgangsmodell eine Klebeschichtlänge von 10 *cm* aufweist, liegt das optimierte Endmodell bei einer Schichtlänge der Klebeschicht von 7.6 *cm*. Die Masse des Widerlagers wurde während dieser Optimierung um ca. 37% reduziert. Das optimierte Modell weist im Bauteilinneren weiterhin einen großen unbelasteten Bereich auf. Durch Entfernen dieses Bereiches wurde ein neues Ausgangsmodell zur Optimierung erzeugt, wobei sich der obere, hauptsächlich zugbelastete Fügeteilfuß getrennt vom unteren, hauptsächlich druckbelasteten Fügeteilfuß an die starre Wand anpassen konnte. Im Verlaufe dieser Optimierung konnte eine weitere Massenreduktion um 17% erreicht werden, wobei die gesamte Klebeschichtlänge von 6.4 *cm* auf 5.4 *cm* verkleinert wurde. Das Endmodell weist eine deutliche Spannungsreduktion bei verringerter Klebefläche auf, die hauptsächlich auf eine flachere Krafteinleitung in die Klebeschicht zurückzuführen ist. Durch die Randbedingung der ebenen Wand als Fügeteilpartner kann die Spannungsverteilung nicht weiter reduziert werden und steht im Gleichgewicht zwischen Bauteilwachtum und Schrumpfung.

Das Modell zeigt, dass die CA<sup>3</sup>O-Methode auch bei starker Einschränkung des Optimierungsraumes gute Ergebnisse liefern kann. Da die Methode selbst keine Löcher oder Aussparungen in unterbelastete Bereiche der Fügeteile einsetzen kann, ist dies manuell vorzunehmen, um Materialüberschüsse im Bauteilinneren, von den Bauteiloberflächen ausgehend, zu eliminieren. Die folgende Tabelle stellt die Ergebnisse zusammen, wobei die Angabe der Spannungsreduktion nicht mit dem Optimierungsgrad gleichgesetzt werden darf, da die Berechnung linear elastisch für kleine Lasten erfolgt. Dargestellt ist die Klebeschichtlänge und die prozentuale Massenreduktion der Gesamtkonstruktion.

Modellbezeichnung	Klebeschichtlänge	Masse [%]
Ausgangsmodell	10 <i>cm</i>	100 %
Optimierung ohne Loch	7.6 <i>cm</i>	63 %
Ausgangsmodell mit Loch	6.4 <i>cm</i>	59 %
Optimierung mit Loch	5.4 <i>cm</i>	50 %

### 5.3 Optimierungen mit eingeschränktem Bauraum

Die maximale Vergleichsspannung bezogen auf das Ausgangsmodell im Verlauf der Optimierung ist nur für das zweite Modell mit Loch im unbelasteten Bauteilbereich angegeben, da im Ausgangsmodell in der Zone um den Klebeschichtauslauf eine singuläre Stelle vorliegt. Dort ist das errechnete Spannungsmaximum von der Elementgröße abhängig. Das optimierte Widerlager mit Loch weist im belasteten Bereich keine Singularität auf, sodaß der errechnete Maximalwert einen Vergleich zwischen dem Start- und dem optimierten Modell ermöglicht. Die folgende Tabelle stellt die Berechnungsergebnisse dieses Modells zusammen.

Modellbezeichnung	Klebeschichtlänge	Masse [%]	$\sigma_{v \max}$ [%]
Ausgangsmodell mit Loch	6.4 <i>cm</i>	100 %	100 %
Optimierung mit Loch	5.4 <i>cm</i>	84 %	73 %



## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Klebeverbindungen, die durch angepasste Formgebung eine homogene Belastung über der Klebeschicht erreichen, können leichter konstruiert werden, da unnötige Materialzugaben und konstruktiv erzeugte Spannungsüberhöhungen vermieden werden. Gerade bei immer komplexeren Bauteilen ist eine angepasste Formgebung meist nicht mehr mit einer Standardverbindung zu erreichen. Für die Konstruktion dieser Bauteile werden heute computergestützte Konstruktionshilfen verwendet, die mitunter direkt eine Spannungsanalyse durchführen können. Diese Arbeitsumgebung eröffnet dem Ingenieur die Möglichkeit schon während der Konstruktion automatisierte Optimierungsverfahren einzusetzen, die unter anderem zur Spannungsreduktion oder zur Verbesserung der Gewichtsverteilungen beitragen.

Das Ziel dieser Arbeit war ein Verfahren zur Optimierung von Klebeverbindungen zu erstellen. Ausgehend von der Interpretation der mechanisch stimulierten Wachstumsvorgänge an Bäumen und in Knochen konnten Wachstumsdirektiven gefunden werden, die als Grundlage zur Optimierung von Klebeverbindungen herangezogen werden können. Die gefundenen Direktiven weisen, ausgehend von einer gewünschten Referenzbelastung, höherbelasteten Bereichen eines Bauteils proportional zur Überlast Wachstum zu. Gering belastete Bauteilbereiche sollen proportional zur Unterlast schrumpfen, während dem Wachstum höhere Priorität zugesprochen wird. Dies gewährleistet eine Materialanlagerung an hochbelasteten Stellen, während unbelastetes Material abgetragen wird.

Ausgehend von diesen Direktiven kann die Optimierung auf Klebeverbindungen umgesetzt werden. Hierzu werden weitere Randbedingungen nötig, um die Optimierung der Spannungsverteilung innerhalb der Klebeschicht zu erreichen. Da die Füge­teile Einfluss auf die Spannungsverteilung in der Klebeschicht haben, müssen diese während der Optimierung der Klebeschicht mit einbezogen werden. Bei der Umsetzung der Optimierungsdirektiven wird über Materialgrenzen hinweg eine Interpretation der Spannungsanalyse nötig, um Füge­teile und Klebeschicht mit einzubeziehen. Daher ist eine Trennung der Wachstumsvorgänge zwischen Klebeschicht und Füge­teile zwingend erforderlich, um Interpolationsfehler an der Materialgrenze auszuschließen. In einem folgenden Teilschritt werden die getrennt berechneten Verschiebungen der einzelnen Wachstumsschritte wieder zusammengeführt. Hierbei hat sich ein Gewichtungsfaktor von 10 zwischen den Verschiebungen der Klebeschicht und den Füge­teilen als vorteilhaft erwiesen. Die Füge­teile erhalten einen Einfluss auf die Gestaltung der Klebeschicht, während die Klebeschicht in eine optimierte Form wachsen kann.

Das Wachstum selbst wird mit Hilfe der Finiten Elemente über thermische Dehnungen umgesetzt. Hierzu wird aus dem vorliegenden Spannungsfeld ein äquivalentes Temperaturfeld berechnet, während die relevante Referenztemperatur aus dem gewünschten Optimierungsziel errechnet werden kann. Da sich das Spannungsfeld über die Optimierung hinweg ändert, ist eine normierte Berechnung des Temperaturfeldes nötig. Basis der Normierung ist das Spannungsmaximum in der Klebeschicht und den Füge­teilen des Ausgangsmodells.

Das Optimierungsverfahren wird als iteratives Verfahren umgesetzt. Daraus folgt, dass die Berechnung der vorherigen Iteration das Ausgangsmodell des nachfolgenden Optimierungslaufes liefert. Als Abbruchkriterium der Optimierung kann die Konturverschiebung der Füge­teile und der Klebeschicht herangezogen werden. Abbildung 6.1 zeigt die Optimierung zusammenfassend als Blockdiagramm.

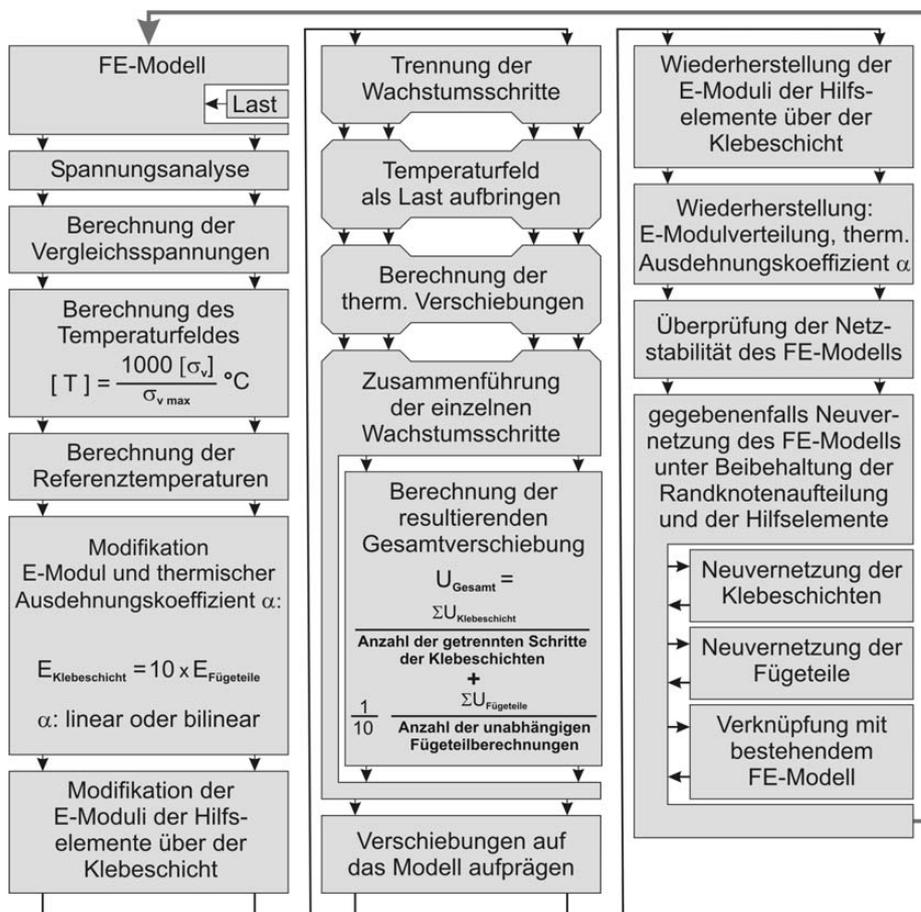


Abbildung 6.1: CA<sup>3</sup>O - Methode im Überblick

Zur Validierung wurden drei Optimierungen durchgeführt, die sich durch unterschiedliche Randbedingungen und Belastungsvarianten auszeichneten. Im ersten Modell lehnt die Geometrie als einschnittig überlappende Klebeverbindung an die Probenform DIN 53281-T02-79-A an, wobei geringe Modifikationen in der Füge­teildicke, als Designraum

für die Optimierung, vorgenommen wurden. Der Optimierungsfreiraum beinhaltet die gesamte Klebeschicht und die Füge­teile im Bereich der Klebung. Die Füge­teilenden wurden aus dem Bauraum ausgeschlossen, um äquivalente Maschinenaufnahmen zwischen Ausgangs- und Endmodell zu erreichen. Das Modell wurde experimentell auf den statischen wie auf den dynamischen Optimierungsgrad hin untersucht. Hierzu wurden Zug- und Zug-Schwellversuche an optimierten und nicht optimierten Proben durchgeführt und verglichen. Im statischen Versuch konnte ein Optimierungsgrad von  $\phi_{statisch} \approx 1.6$  und im Dynamischen von  $\phi_{dynamisch} \approx 2.25$  ermittelt werden.

Im zweiten Validierungsmodell wurde ein Füge­teil bewußt überdimensioniert und nahm nur passiv an der Optimierung teil. Das andere Füge­teil, sowie die Klebeschicht sind analog zum ersten Modell an der Klebeschichtoptimierung beteiligt. Als geometrische Inspiration wurde der Holzstrahl im Holz der Bäume herangezogen. Die Optimierung zeigt bei ähnlicher Materialpaarung und ähnlicher Belastung eine geometrische Ähnlichkeit zwischen Modell und natürlichem Vorbild. Die Optimierungsergebnisse wurden ebenfalls experimentell untersucht, wobei zum Vergleich der Ergebnisse eine zylindrische Zapfenverbindung statt der Ausgangsprobe als technisch relevantere Vergleichsprobe herangezogen wurde. Die Optimierung zeigt im Zugversuch einen Optimierungsgrad von  $\phi_{statisch} \approx 1.54$  bis  $\phi_{statisch} \approx 1.74$ , je nach Basis der Betrachtung, und einen dynamischen Optimierungsgrad aus Zug-Schwellversuchen von  $\phi_{dynamisch} \approx 1.16$ .

Beide Optimierungen zeichnen in der Berechnung, wie im Experiment ein positives Bild der CA<sup>3</sup>O-Methode. Rechnerisch wie experimentell konnten gute Optimierungsergebnisse erzielt werden, die im geometrischen Vergleich mit den natürlichen Vorbildern Übereinstimmungen in der Formgebung aufzeigen.

Das letzte Modell wurde nur rechnerisch bearbeitet und optimiert ein Widerlager an einer starren Wand. Als Optimierungsbauraum wurde ausschließlich die Klebeschicht und das aufgeklebte Füge­teil einbezogen. Die starre Wand wurde als Bauraumbegrenzung festgesetzt. So eingeschränkt konnten im ersten Optimierungslauf nur geringe Optimierungserfolge erreicht werden. Durch das manuelle Entfernen von unbelastetem Material im Inneren des Füge­teils und der Klebeschicht konnte der Optimierung weitere Freiheit geschaffen werden. Die Optimierung hat daraufhin gute Ergebnisse geliefert, die sich in einer Spannungsreduktion um ca. 30% und einer Massenreduktion von ca. 50% widerspiegeln.

Alle Validierungsmodelle zeigen ein Optimierungsergebnis, das sich durch eine Spannungsreduktion in der Klebeschicht und einer Gesamtmassenreduktion auszeichnet. Dies konnte ebenfalls in einer begleitenden Arbeit anhand eines verklebten Stempelmodells und einer Knochen-Sehnen-Verbindung in [5] gezeigt werden. Die Ausläufer der Klebeschicht zeigen bei allen Modellen eine angepasste Dehnung zwischen den Füge­teilen zueinander. Dieses Prinzip läßt sich mit der herkömmlichen, klebegerechten Konstruktionsweise in Einklang bringen. Durch die Anpassung der Dehnungen im Bereich der Klebeschichtausläufe werden Schubspannungen durch Dehnungsunterschiede der Füge­teile abgebaut. Des weiteren wird durch die Optimierung die Lage und Abmessung der Klebeschicht variiert, so dass der Materialeinsatz im Gleichgewicht zwischen Wachstums-

und Schrumpfungsvorgängen steht. Dieses Gleichgewicht stellt einen Kompromiss zwischen der Materialausnutzung auf der einen Seite und der Kontinuität der Klebeschicht auf der anderen Seite dar. Wie das letzte Modell gezeigt hat, kann eine manuelle Aufspaltung der Klebeschicht in zwei getrennte Teile sinnvoll sein, wenn die Klebeschicht in ihrem Wachstum durch Randbedingungen stark eingeschränkt ist. Zusätzlich zum Gleichgewicht innerhalb der Klebeschicht stellt sich ein Gleichgewicht zwischen den Füge-teilen und der Klebeschicht ein. Dieses Gleichgewicht ist geprägt von optimaler Materialausnutzung und Materialeinsparung. Aufgrund der Massenunterschiede zwischen Klebeschicht und Füge-teilen tritt die Gewichtsreduktion in den Füge-teilen viel stärker in den Vordergrund.

Durch das iterative Optimierungsverfahren kann, ausgehend von einem beliebigen Ausgangsmodell, bis zum Endergebnis eine hohe Anzahl an Iterationsläufen nötig sein. Daher ist eine zeitliche Abschätzung bis zum Endergebnis mitunter nicht möglich und hängt von der Nähe des Ausgangsmodells zum Endergebnis ab. Die Zeit pro Iterationsschritt steigt zusätzlich mit der Komplexität des Modells an. Durch die Verschiebungen der Finiten Elemente auf Grund der Wachstumsvorgänge kann es vorkommen, dass die Elementverteilung auf der Randkontur derart ungünstig liegt, dass eine automatische Neuvernetzung nicht mehr möglich ist. Ein manuelles Eingreifen durch Neugenerierung des gesamten Modells ist in dieser Situation nötig.

Die automatische Erzeugung komplexer Modelle auf Basis von Knotenkoordinaten und Elementaufteilungen kann nicht ohne Zusatzinformationen bewerkstelligt werden. Ein automatischer Modellerzeuger benötigt unter anderem die Information, welche Knoten auf der Grenzschicht zwischen Klebeschicht und Füge-teil liegen, und in welcher Reihenfolge diese die gesuchte Trennlinie bilden. Des weiteren können fertigungsrelevante Randbedingungen wie z.B. Minimaldicken oder Minimalradien als Basis einer Modellneuerzeugung herangezogen werden. Diese geometrischen Zusatzinformationen können nicht im FE Netz abgespeichert werden, wodurch eine externe Datenbank zur Speicherung benötigt wird. Zukünftige Arbeiten bezüglich dieses Themas können die Optimierungszeit daher erheblich verringern, wenn die Optimierungsroutine selbst bei stark verzerrten Netzen das Modell vollständig neu aufbaut.

Die Suche nach dem Abbruchkriterium, ab wann eine Randkontur keine weitere Modifikation während der Optimierungsschritte erfährt, kann ebenfalls nur mit einer externer Datenspeicherung bewältigen werden, da die Historie der Optimierung nicht im FE Netz gespeichert werden kann.

Da die Klebeverbindung während der Optimierung auf einen Verbund mehrerer Materialschichten, wie z.B. Füge-teil-Klebeschicht-Füge-teil, reduziert wird, ist es durchaus vorstellbar, die Methode auf weitere Anwendungsgebiete wie z.B. Lötverbindungen zu erweitern. Die CA<sup>3</sup>O-Methode bietet daher auch für zukünftige Arbeiten die Grundlage zur Flexibilisierung und Erweiterung.

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung eines freigeschnittenen Volumenelementes und den anliegenden Spannungen; links: allgemeiner Freischnitt mit allen neun Spannungskomponenten des Spannungstensors; rechts : gedrehtes freigeschnittenes Volumenelement mit den Hauptnormalspannungen $\sigma_1$ , $\sigma_2$ und $\sigma_3$ . . . . .	4
2.2	Versagenkriterien, dargestellt für den zweidimensionalen Fall ( $\sigma_3 = 0$ ) . . . . .	6
2.3	Messergebnisse nach [15] mit Überlagerung der modifizierten von-Mises Vergleichsspannung und der Vergleichsspannung nach [35] mit Gleichung (2.18) und (2.19); Messungen an Stahl-Stahl und Aluminium-Aluminium Füge­teilen unter Verwendung von <i>Loctite<sup>(R)</sup> 496</i> ; Probengeometrie und Verfahren: Stempelform unter verschiedenen Kraftangriffswinkeln bis zum Bruch; Klebefläche: $200\text{mm}^2$ . . . . .	10
2.4	Anziehungskräfte in einer zwischenmolekulare Dipol-Dipol-Bindung . . . . .	11
2.5	Wasserstoffbrückenbindung . . . . .	12
2.6	Adsorption von Polymeren am Substrat nach [16] . . . . .	13
2.7	Verschiebung in einer Klebeschicht unter Schubbelastung . . . . .	14
2.8	Verschiedene Bruchbilder bei Klebeverbindungen . . . . .	14
2.9	Strukturformeln der $\alpha$ -Cyanacrylsäure und deren Methyl- bzw. Ethyl-Ester	16
2.10	Anlagerung eines $\text{OH}^-$ -Ions an ein $\alpha$ -Cyanacrylatmethylester . . . . .	17
2.11	Polymerisation des $\alpha$ -Cyanacrylatesters am Beispiel des $\alpha$ - Cyanacrylatmethylesters . . . . .	17
2.12	prinzipielle Reaktion der Epoxid-Gruppe [12] . . . . .	18
2.13	Vernetzung des Dicyandiamids mit einem Epoxidharz [12] [8] . . . . .	19
2.14	Lineare und quadratische Ansatzfunktion der Knotenverschiebung eines Stabelementes . . . . .	21
3.1	Aufbau des Baumes anhand eines Sägeschnittes der Stieleiche ( <i>Quercus robur L.</i> ); Bild: K. Weber, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung II . . . . .	24
3.2	Schnittbilder von Wurzelanläufen; links: unter Biegebelastung; rechts: unter Biegebelastung mit überlagertem Zug [20] . . . . .	25
3.3	Die CAO-Methode im Überblick . . . . .	27
3.4	Menschlicher Oberschenkelknochen im Schnittbild [21] . . . . .	28
3.5	Trabekuläre Rotation in Richtung einer zur Trabekelachse geneigten Belastung [19] . . . . .	30
3.6	Mögliche Schadensverläufe durch falsch dimensionierte Hüftprothesen nach [19] . . . . .	31

4.1	Designfindung durch Anwendung der gefundenen natürlichen Wachstumsregeln . . . . .	34
4.2	Materialbedingte Aufteilung des Wachstumsschritts . . . . .	35
4.3	Umsetzung der Wachstumsdirektiven als Modellmodifikation über der Belastung . . . . .	36
4.4	Variation des thermischen Ausdehnungskoeffizienten durch die Lage der Referenzspannung zur Vereinfachung der thermischen Dehnungsrechnung	38
4.5	Modifikation des thermischen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha$ während der Wachstumsschritte . . . . .	38
4.6	Variation des E-Moduls während der Wachstumsschritte . . . . .	39
4.7	Überblick über die Optimierung von Klebeverbindungen . . . . .	40
4.8	Versteifende Hilfselemente über den Elementen der Klebeschicht . . . . .	41
4.9	Entfernung von Mittelknoten an der Grenzschicht zwischen Klebeschicht und Füge teil . . . . .	42
4.10	Schematische Darstellung der Neuvernetzung einer Elementauswahl . . . . .	44
4.11	Knotenposition für den Elementtyp <i>PLANE2</i> ( <i>ANSYS 8.0</i> ) [1] . . . . .	45
4.12	Elementauswahl zur Endknotenbestimmung . . . . .	45
4.13	Elementkantenbedingungen bei spitz zulaufenden einelementigen Konstruktionen . . . . .	46
4.14	Neuvernetzung an der Lochplatte in mehreren Schritten . . . . .	46
4.15	Elementauswahl mit und ohne Mittelknoten auf den Elementrandkanten	46
4.16	Verschiebung eines Mittelknotens auf die ursprüngliche Position . . . . .	47
4.17	<i>CA<sup>3</sup>O</i> - Methode im Überblick . . . . .	49
5.1	Kraftverlauf über der Zeit - Belastungszyklus des Zug-Schwellversuchs . . . . .	51
5.2	Probengeometrie einer Einzelprobe DIN 53281-T02-79-A im Schnitt . . . . .	53
5.3	mit Hilfe der FE-Methode berechnete Spannungsverteilung in der Klebeschicht (Probe nach DIN 53281-T02-79-A), normierte auf das Maximum der mod. von-Mises Vergleichsspannung; $E_{Fügeteile} = 210000 \text{ N/mm}^2$ ; $\nu_{Fügeteile} = 0.3$ ; $E_{Klebeschicht} = 1500 \text{ N/mm}^2$ ; $\nu_{Klebeschicht} = 0.4$ ; $c = 0.4$ . . . . .	53
5.4	Aufteilung des Spannungsverlaufs in Einzelkomponenten nach [12] [13] . . . . .	54
5.5	Ausgangsmodell der Optimierung mit Lasten, Randbedingungen und Optimierungsbereich . . . . .	55
5.6	Optimierung der einschnittig überlappenden Klebeverbindung vom Ausgangsmodell über mehrere Zwischenschritte bis zum Endmodell mit eingearbeiteten Fertigungsvorgaben . . . . .	57
5.7	Spannungsplot der normierten von-Mises Vergleichsspannung für die Ausgangsprobe und die optimierte Struktur . . . . .	57
5.8	Vergleich der modifizierten von-Mises Vergleichsspannung in der Klebeschicht der Anfangsprobe und der optimierten Struktur, normiert auf das Maximum der mod. von-Mises Vergleichsspannung der nicht optimierten Anfangsprobe . . . . .	58
5.9	Zugversuche an 5 Anfangsproben und 5 optimierten Proben . . . . .	59

5.10	Wöhlerkurven für die optimierte Probe und das Ausgangsmodell unter Zug-Schwellbelastung . . . . .	60
5.11	Schädelknochen eines Schwarzbären <i>Ursus americanus</i> mit einer einschneidig überlappenden Knochenverbindung; Foto: C.Mattheck, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung II Abteilung Biomechanik . . . . .	62
5.12	Schematische Darstellung des makroskopischen Aufbaus von Holz [41] . .	63
5.13	Buche, links: Holzstrahl zwischen Früh- ( <i>FH</i> ) und Spätholz ( <i>SH</i> ) (Mikroskopievergrößerung: 100x), rechts: Holzstrahlen im Kambium der Buchenwurzel (Mikroskopievergrößerung: 25x) Foto: K. Weber, Forschungszentrum Karlsruhe IMF II . . . . .	64
5.14	Materialkennwerte der Ausgangsprobe mit prinzipiellem Aufbau der Probengeometrie . . . . .	65
5.15	Spannungskomponenten in der Klebeschichtmitte entlang der Klebeschicht, normiert auf das Maximum der mod. von-Mises Vergleichsspannung . . .	66
5.16	Verlauf der Optimierung mit verschiedenen Zwischenschritten . . . . .	67
5.17	Spannungsvergleich in der Klebeschichtmitte zwischen Ausgangsmodell und optimierter Form; normiert auf das Maximum der mod. von-Mises Vergleichsspannung des Ausgangsmodells . . . . .	68
5.18	Spannungsverteilung der von-Mises Vergleichsspannung in den Füge­teilen der optimierten Probe ohne Fertigungsrandbedingungen . . . . .	69
5.19	Vergleich der Geometrie zwischen dem natürlichen Vorbild und der technisch optimierten Probengeometrie; Foto: K.Weber, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung II Abteilung Biomechanik . . .	70
5.20	Probengeometrien und deren Spannungsverteilungen im Vergleich . . . .	70
5.21	Spannungsvergleich der modifizierten von-Mises Vergleichsspannung in der Mitte der Klebeschicht der drei Vergleichsproben; normiert auf das Maximum der Vergleichsspannung in Probe A . . . . .	71
5.22	Gegenüberstellung charakteristischer Zugversuche der einzelnen Versuchsproben; Loctite <sup>(R)</sup> 496; 24h Aushärtezeit bei 25°C; Unterlast = 10% der Oberlast; Frequenz 45Hz; Versuchsdurchführung durch [26] . . . . .	72
5.23	Vergleichsproben im Zug-Schwell-Versuch [26]; Loctite <sup>(R)</sup> 496; 24h Aushärtezeit bei 25°C; Unterlast = 10% der Oberlast; Frequenz 45Hz . . . .	73
5.24	Ausgangsmodell mit Angabe der Abmessungen und Randbedingungen . .	76
5.25	Festhaltungen während der Wachstumsschritte . . . . .	77
5.26	Normierte von-Mises Vergleichsspannung des Ausgangsmodells und des optimierten Modells . . . . .	78
5.27	Entwicklung der Optimierung vom Ausgangsmodell über drei Zwischenschritte zum optimierten Modell . . . . .	79
5.28	Modifizierte von-Mises Vergleichsspannung des Ausgangsmodells und des optimierten Modells entlang der Klebeschichtmitte, normiert auf das Maximum des Ausgangsmodells . . . . .	79
5.29	Normierte von-Mises Vergleichsspannung des Ausgangsmodells und des optimierten Modells . . . . .	80

5.30	Entwicklung der Optimierung vom Ausgangsmodell über drei Zwischenschritte zum optimierten Modell . . . . .	81
5.31	Modifizierte von-Mises Vergleichsspannung des Ausgangsmodells und des optimierten Modells entlang der Klebeschichtmitte, normiert auf das Maximum des Ausgangsmodells . . . . .	82
5.32	Makroskopische Aufnahme eines Stachels einer Gartenrose <i>Rosa ssp.</i> und deren makroskopischer Schnitt; Klassifizierung nach [18]: gekrümmter Nadelstachel; Foto: K.Weber, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung II Abteilung Biomechanik . . . . .	83
5.33	Mikroskopische Aufnahme (links, Mikroskopievergrößerung: 25x) des Stachelfußes einer Gartenrose <i>Rosa ssp.</i> und deren mikroskopischer Nahvergrößerung (rechts, Mikroskopievergrößerung: 100x); Foto: K.Weber, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung II Abteilung Biomechanik . . . . .	83
5.34	Makroskopische Aufnahme des Rosenstachels einer Gartenrose <i>Rosa ssp.</i> nach Eintrocknung der Schnittfläche mit gut sichtbarer Zellstruktur; im Inneren des Stachels zeigt sich eine stärkere Schumpfung des Gewebes; links oben: 630-fache Mikroskopvergrößerung der Randschicht (links unten 100-fach mikroskopisch); rechts oben: 630-fache Mikroskopvergrößerung der Zellen im mittleren Bereich des Stachels; rechts unten: 100-fache mikroskopische Vergrößerung der rechten Randkontur; Foto: K.Weber, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Materialforschung II Abteilung Biomechanik . . . . .	84
5.35	Vergleich der Geometrie zwischen den optimierten Widerlagern und dem Rosenstachel <i>Rosa ssp.</i> . . . . .	85
6.1	<i>CA<sup>3</sup>O</i> - Methode im Überblick . . . . .	90

# Literaturverzeichnis

- [1] ANSYS, Inc.: PLANE2 Element Description. In: *Ansys Release 8.0 Documentation* (2004)
- [2] BEITZ, W. ; GROTE, K. H.: *Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau*. 20. Auflage. Springer Verlag, Heidelberg, 2001. – ISBN 3-540-67777-1
- [3] BRAND, R.A. ; ALBRIGHT, J.A.: *The Scientific Basis of Orthopaedics*. 1. Ausgabe. Appleton & Lange, East Norwalk USA, 1987. – ISBN 0-8385-8504-3
- [4] BRAUN, H. J.: *Bau und Leben der Bäume*. 3. Auflage. Rombach Verlag, Freiburg, 1980. – ISBN 3-7930-9046-9
- [5] COURTY, D.: *Berechnung und Optimierung von natürlichen und technischen Klebeverbindungen mit der CA<sup>3</sup>O-Methode*, Universität Karlsruhe, Institut für Zuverlässigkeit von Bauteilen und Systemen, Diplomarbeit, 2005
- [6] CURRY, J.: *Bones - Structure and Mechanics*. Bd. I. 1. Ausgabe. Princeton University Press, Princeton, 2002. – ISBN 0-691-09096-3
- [7] DEUTSCHE, Norm: *DIN 53281 Teil 2: Prüfung von Metallklebstoffen und Metallklebungen, Proben, Herstellung*. September 1979. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 1979
- [8] DOMININGHAUS, H.: *Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften*. 5. Auflage. Springer Verlag, Heidelberg, 1992. – ISBN 3-540-62659-X
- [9] DOTY, St. B.: Space Flight and Bone Formation. In: *Materialwissenschaften und Werkstofftechnik* 35 (2004), Nr. 12, S. 951-961
- [10] DRUCKER, D. C. ; PRAGER, W.: Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. In: *Quart. Appl. Math.* X (1952), Nr. 2, S. 157-165
- [11] ENGASSER, I. ; PUCK, A.: Untersuchungen zum Bruchverhalten von Klebeverbindungen. In: *Kunststoffe* 70 (1980), Nr. 8, S. 493-500
- [12] HABENICHT, G.: *Kleben*. 4. Auflage. Springer Verlag, Heidelberg, 2002. – ISBN 3-540-43340-6
- [13] HAHN, O.: *Festigkeitsverhalten und ingenieurmäßige Berechnung von einschnittig-überlappten Metallklebeverbindungen*, Rhein.-Westf. TH, Aachen, Dissertation, 1972

- [14] HAHN, O. ; KÜRLEMANN, J.: *Ermittlung von Modellparametern zur Beschreibung und Beurteilung des mechanischen Verhaltens von Kunststoffklebeverbindungen*. 1. Ausgabe. Shaker Verlag, Aachen, 1998
- [15] JARSCH, F., Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Materialforschung II, unveröffentlichte Studienarbeit, 2005
- [16] JENCKEL, E. ; RUMBACH, B.: Über die Adsorption von hochmolekularen Stoffen aus der Lösung. In: *Zeitschrift für Elektrochemie* 55 (1951), S. 40–51
- [17] KOLLMANN, F.: *Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe*. Bd. 1. 2. Auflage. Springer Verlag, Heidelberg, 1982. – ISBN 3–540–11778–4
- [18] KRÜSSMANN, G.: *Rosen Rosen Rosen, Unser Wissen über Rosen*. 2. Auflage. Verlag Paul Parey, Heidelberg, 1986. – ISBN 3–489–53322–4
- [19] MATTHECK, C.: *Design in der Natur*. 3. Auflage. Rombach Verlag, Freiburg, 1997. – ISBN 3–7930–9150–3
- [20] MATTHECK, C.: *Stupsi erklärt den Baum*. 3. Auflage. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1999. – ISBN 3–923704–20–8
- [21] MATTHECK, C.: *Mechanik am Baum*. 1. Auflage. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 2002. – ISBN 3–923704–39–9
- [22] MATTHECK, C. ; BAUMGARTNER, A.: CAO & SKO: Fatigue-resistant engineering design by simulation of biological optimization mechanisms. In: *Experimental Mechanics Technology Transfer between High Tech Engeneering and Biomechanics, Elsevier Science Publishers B. V.* (1992), S. 103–108
- [23] Kap. Bauteiloptimierung durch die Simulation biologischen Wachstums In: MATTHECK, C. ; BAUMGARTNER, A.: *Evolution und Optimierung - Strategien in Natur und Technik*. Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, 1995, S. 107–120
- [24] MATTHECK, C. ; TESCHNER, M.: Struktur- und Formoptimierung mechanischer Bauteile durch Simulation biologischer Designfindung. In: *Sonderausgabe Werkstoffe im Automobilbau, ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift / MTZ - Motor-technische Zeitschrift* 2 (1997), S. 68–74
- [25] MATTHECK, C. ; VOGELBERG, U.: The Biomechanics of Tree Fork Design. In: *Botanica Acta* 104 (1991), Nr. 5, S. 399–404
- [26] MAYER, O., Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Materialforschung II, unveröffentlichte Studienarbeit, 2005
- [27] MÜLLER, G. ; GROTH, C.: *FEM für Praktiker*. Bd. 1. 7. Auflage. Expert Verlag, Renningen, 2002. – ISBN 3–8169–1857–3
- [28] NULTSCH, W.: *Allgemeine Botanik*. 7. Auflage. Thieme Verlag, Stuttgart, 1982. – ISBN 3–13–383307–3

- [29] PALASTANGA, N. ; FIELD, D. ; SOAMES, R.: *Anatomy and Human Movement Structure and Function*. 1. Auflage. Heinemann Professional Publishing Ltd, 1989. – ISBN 0-433-00032-5
- [30] POSTAL, M. ; KERBOUL, M. ; EVRARD, J. ; COURPIED, J.P.: *Total Hip Replacement*. 1. Ausgabe. Springer Verlag, Heidelberg, 1987. – ISBN 3-540-13198-1
- [31] RAHMANZADEH, R. ; FAENSEN, M.: *Hüftgelenksendoprothetik*. 1. Ausgabe. Springer Verlag, Heidelberg, 1984. – ISBN 3-540-13077-2
- [32] RAUBER ; KOPSCH, F.: *Lehrbuch und Atlas der Anatomie des Menschen*. Bd. I. 19. Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, 1955
- [33] SCHLIMMER, M.: Einfluss des hydrostatischen Spannungszustandes auf die Festigkeit von Klebungen. In: *Schweißen und Schneiden* 38 (1980), Nr. 8, S. 380–384
- [34] SCHLIMMER, M.: Anstrengungshypothese für Polymerwerkstoffe. In: *Rheol. Acta* 20 (1981), S. 542–547
- [35] SCHLIMMER, M.: Anstrengungshypothese für Metallklebeverbindungen. In: *Zeitschrift für Werkstofftechnik* 13 (1982), S. 215–221
- [36] SCHLIMMER, M.: Festigkeitsrechnung für Klebeverbindungen. In: *Kunststoffe* 76 (1986), S. 63–67
- [37] SCHWÖRER, M., Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Materialforschung II, unveröffentlichte Studienarbeit, 1993
- [38] SZABO, I.: *Höhere Technische Mechanik*. 6. Auflage. Springer Verlag, Heidelberg, 2001. – ISBN 3-540-67653-8
- [39] TESARI, I. ; SCHÄFER, J.: *Workshop zur Einführung in die FEM- und CAO-Methode*. 1. Ausgabe. Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76247 Eggenstein-Leopoldshafen: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. – Workshop
- [40] WAGENFÜHR, R.: *Holzatlas*. 4. Auflage. Fachbuchverlag Leipzig, Leipzig, 1996. – ISBN 3-446-00900-0
- [41] WEBER, K. ; GÖTZ, K. ; MATTHECK, C.: Die schiefe Buche: Holzanatomie und Festigkeit. In: *5. VTA Tagungsband, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH* (1999)
- [42] WOESSNER, D.: *Das praktische Rosenbuch*. 3. Auflage. Ulmer Verlag, 1996. – ISBN 3-8001-6580-5
- [43] WOLFF, J.: *The Law of Bone Remodelling*. Nachdruck 1986. Springer Verlag, Heidelberg, 1986. – ISBN 3-540-16281-X

