



*Dr. Iwiza Tesari  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
am Forschungszentrum  
Karlsruhe GmbH*

## **Design in der Natur - der Baum als Lehrmeister\***

\* In Anlehnung an: C. Mattheck, Design in der Natur und nach der Natur, Umweltschonende Hochtechnologien – Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 1995



# Design in der Natur - der Baum als Lehrmeister

## Der Zwang zur Selbstoptimierung biologischer Strukturen

Bekanntlich erfolgt in der Natur die Optimierung der Lebewesen dadurch, dass nicht optimierte Spezies unterliegen. Sie werden vertrieben, gejagt, aufgefressen oder überschattet von besser angepassten, optimierten Konkurrenten. Es ist unmittelbar einleuchtend, dass im Gefolge dieser grausamen, Jahrtausenden andauernden Selektion nicht nur die einzelne biologische Struktur optimal an ihre natürliche Belastung angepasst ist, sondern auch die Mechanismen, mit denen dieses Design geschaffen wird. Der wichtigste Mechanismus dieser Art ist das sogenannte adaptive Wachstum, das vor allem beim Aufbau tragender biologischer Strukturen, wie der Bäume oder der Knochen von Säugetieren wirksam ist. Diese verfügen über bauteilinterne Rezeptoren und können damit lokale Spannungskonzentrationen registrieren und sich adaptiv wachsend reparieren.

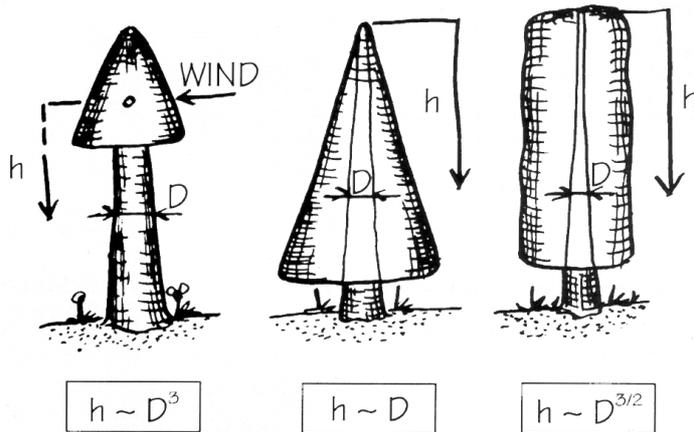
Diese selbstheilenden und somit ständig sich selbst optimierenden Bauteile sind im wahrsten Sinne "smart structures". Das Verständnis dieses Mechanismus der Selbstoptimierung macht es möglich, über Computersimulationen auch technische Bauteile zu entwerfen und zu optimieren.

## Adaptives Wachstum und das Axiom konstanter Spannung

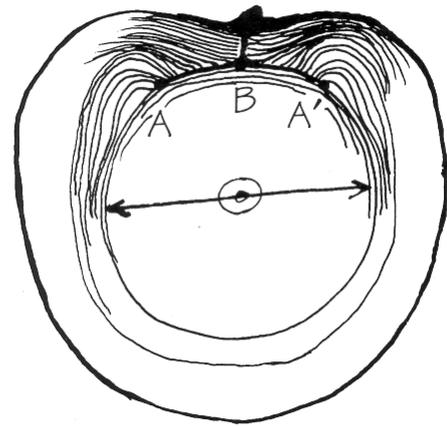
Der deutsche Förster K. Metzger schrieb bereits 1893 vermutlich die erste Arbeit über eine gleichmäßige Spannungsverteilung in biologischen Strukturen<sup>1</sup>. Er konnte zeigen, dass die Biegespannungen in Fichtenstämmen infolge einer lastangepassten Stammverjüngung gleichmäßig über die Länge verteilt sind (Abb. 1). Dieses Prinzip wurde verallgemeinert, dass das Axiom konstanter Spannung eine allgemeingültige Designregel für biologische Bauteile darstellt<sup>2-4</sup>.

Zum besseren Verständnis dieser Wachstumsvorgänge ist es vorteilhaft, zwischen Bäumen und Knochen zu unterscheiden. Wenn ein Baum mit seinem allzeit wachen Kambium - jener Wachstumsschicht zwischen Rinde und Holz - eine lokal erhöhte Spannung registriert, so bildet er dort als Folge dickere Jahresringe aus, um die Bruchgefahr zu bannen und die Spannungen wieder zu Vergleichmässigen (Abb. 2). Entlastete Bereiche mit überflüssigem Material werden vom Baum, der nur wachsen, nicht aber schrumpfen kann, nicht aktiv abgebaut.

Bäume können ihre Lastgeschichte nicht verbergen. Die Baumgestalt ist daher ein offenes Tagebuch, ein Protokoll ihrer eigenen Belastung, geschrieben in der Körpersprache der Bäume.

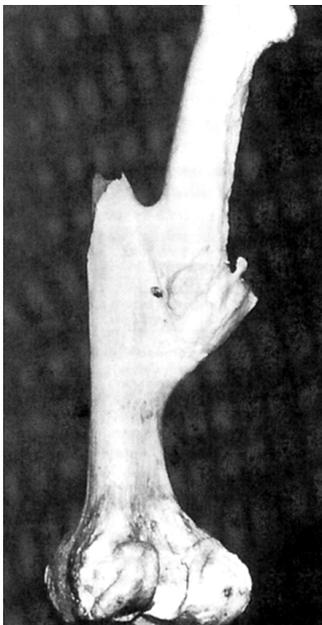


**Abb. 1:** Bäume vergrößern ihren Durchmesser im unteren Stammbereich entsprechend dem windinduzierten Biegemoment, um eine konstante Spannungsverteilung zu erreichen. Damit werden Sollbruchstellen vermieden.



**Abb. 2:** Lokal verdickte Jahresringe reduzieren die Kerbspannungen an einer Wunde im Baumstamm.

Tiere dagegen können in ihren Knochen unterbelastetes Material abbauen. Der Knochen kann damit seine mechanische Vergangenheit - zumindest im kindlichen Alter - völlig verwischen, da Fresszellen (Osteoclasten) diese Zeichen seiner Lastgeschichte gleichsam "wegknabbern" (Abb. 3).



**Abb. 3:** Die tatsächliche Ausgangsgestalt eines Knochens und die Art des Bruches werden durch belastungsbedingtes Hinzufügen und Wegnehmen von Material zunehmend verwischt.

Diese qualitativen Vorbetrachtungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Biologische Lastträger optimieren sich entsprechend dem Axiom konstanter Spannung.
2. Bäume wachsen an überbelasteten Bereichen verstärkt und bilden dort lokal verdickte Jahresringe.
3. Knochen wachsen an überlasteten Bereichen und schrumpfen in unterbelasteten Bereichen.
4. Im so gewonnenen Zustand gleichmäßiger Lastverteilung existieren weder lokal hohe Spannungen (=Sollbruchstellen) noch Bereiche mit lokal niederen Spannungswerten (=Materialverschwendung). Das Axiom konstanter Spannung

charakterisiert damit das optimale mechanische Design für den Lastfall, an den es angepasst ist.

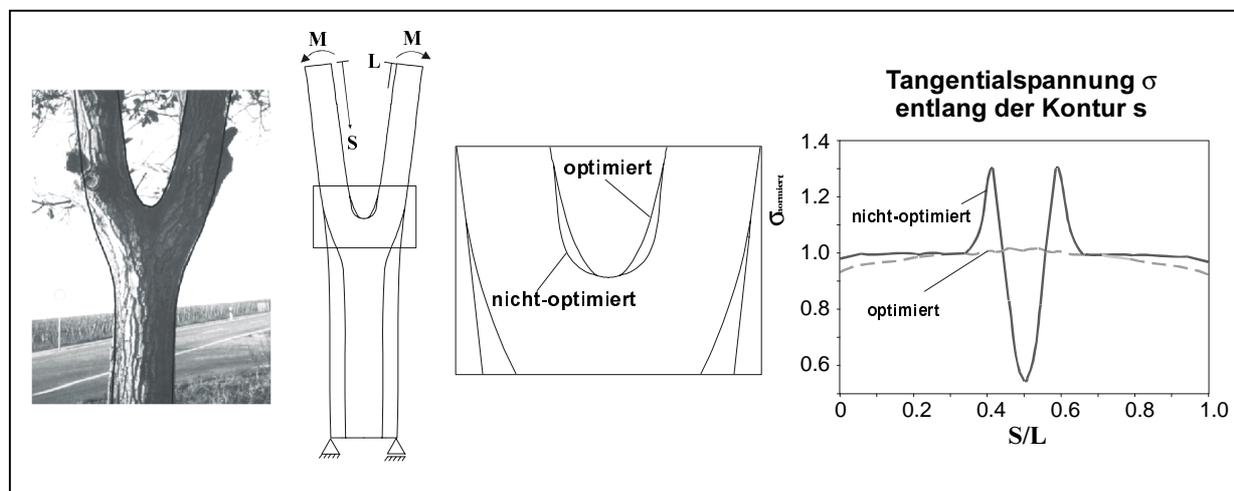
Auf Basis des Axioms konstanter Spannung wurden am Forschungszentrum Karlsruhe drei Computermethoden entwickelt, die es ermöglichen, adaptives Wachstum zu simulieren und damit Maschinenbauteile zu optimieren: SKO, CAO und CAIO.

## CAO - Computer Aided Optimization

Die CAO-Methode simuliert adaptives Wachstum durch spannungsgesteuerte thermische Ausdehnung. Dazu wird ein beliebiges kommerzielles Finite-Elemente-Programm benötigt, mit dem sich Thermospannungen berechnen lassen. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein Standardverfahren, das auf Minimalenergieprinzipien beruht und in Bereichen der Strukturanalyse angewendet wird.

In einem beliebig zu wählenden Designvorschlag werden für die später gewünschten Last- und Lagerungsbedingungen des Bauteils die mechanischen Spannungen berechnet. Die so ermittelte Spannungsverteilung wird dann formal einer fiktiven Temperaturverteilung gleichgesetzt. Die zuvor höchstbelasteten Bereiche sind nun die heißesten und dehnen sich daher am stärksten aus. Sie "wachsen" am meisten und bilden - in Analogie zu den Bäumen - die lokal dicksten "Jahresringe" aus. Wie beim Kambium der Bäume ist dieses Wachstum begrenzt auf die äußerste Schicht, die zudem während der Thermoausdehnung "weich" gemacht wird, um innere Verspannungen mit der darunter befindlichen Reststruktur auszu-schließen.

In Abb. 4 ist gezeigt, dass eine Baumgabel in der Natur eine Kerbe ohne Kerbspannungen darstellt. Die kreisförmige Innenkontur der konstruierten Gabel bewirkt dagegen hohe Kerbspannungen. Trotzdem wird die Kreiskerbe nach wie vor noch zum Ausrunden von Übergängen empfohlen. Es ist höchste Zeit, sich darüber klar zu werden, dass kreisförmige Kerben Sabotage am Bauteil bedeuten können. Das Bruchversagen kann in solchen Fällen nur durch ein Mehr an Material, d.h. Überdimensionierung vermieden werden. In der Natur hätten solche Konstruktionen sicherlich keine Überlebenschance.



**Abb. 4:** Die halbkreisförmige Kontur der „technischen“ Baumgabel bewirkt hohe Kerbspannungen. Die CAO-optimierte Baumgabel ist eine Kerbe ohne Kerbspannungen.

Die CAO-Methode im Bereich des biologischen Wachstums bietet zahlreiche technische Anwendungsmöglichkeiten. Der wesentliche Vorteil der CAO-Methode ist hierbei, daß auch dreidimensionale Bauteile optimiert werden können, ohne den komplizierten Weg der mathematischen Optimierung zu gehen.

In Abbildung 5 ist eine orthopädische Schraube gezeigt, mit der Plattenimplantate an der Wirbelsäule festgeschraubt werden. Diese Schrauben dürfen einen gewissen Durchmesser nicht überschreiten, da sie sonst nicht mehr durch die sogenannten Pedikel, das sind enge Knochenstege des Wirbelkörpers, hindurchgeführt werden können. Andererseits sind die physiologischen Belastungen der Wirbelsäule sehr hoch, immerhin ist sie die zentrale Stützstruktur im menschlichen Skelett. Daher kam es gelegentlich zu Brüchen dieser Schrauben, deren Fragmente zudem nur schwer wieder zu entfernen waren.

Die CAO-Optimierung liefert ein Design, das sich hinsichtlich der Dauerfestigkeit kerbspannungsfrei verhält wie ein Nagel und dennoch im Knochen ankert wie eine Schraube. Im klinischen Einsatz zeigten derart optimierte Schrauben bisher eine sehr große Zuverlässigkeit, und es wurden keine weiteren Brüche bekannt. Die Lebensdauer in Biegeschwingversuchen erhöhte sich durch die Optimierung um mehr als das Zwanzigfache.

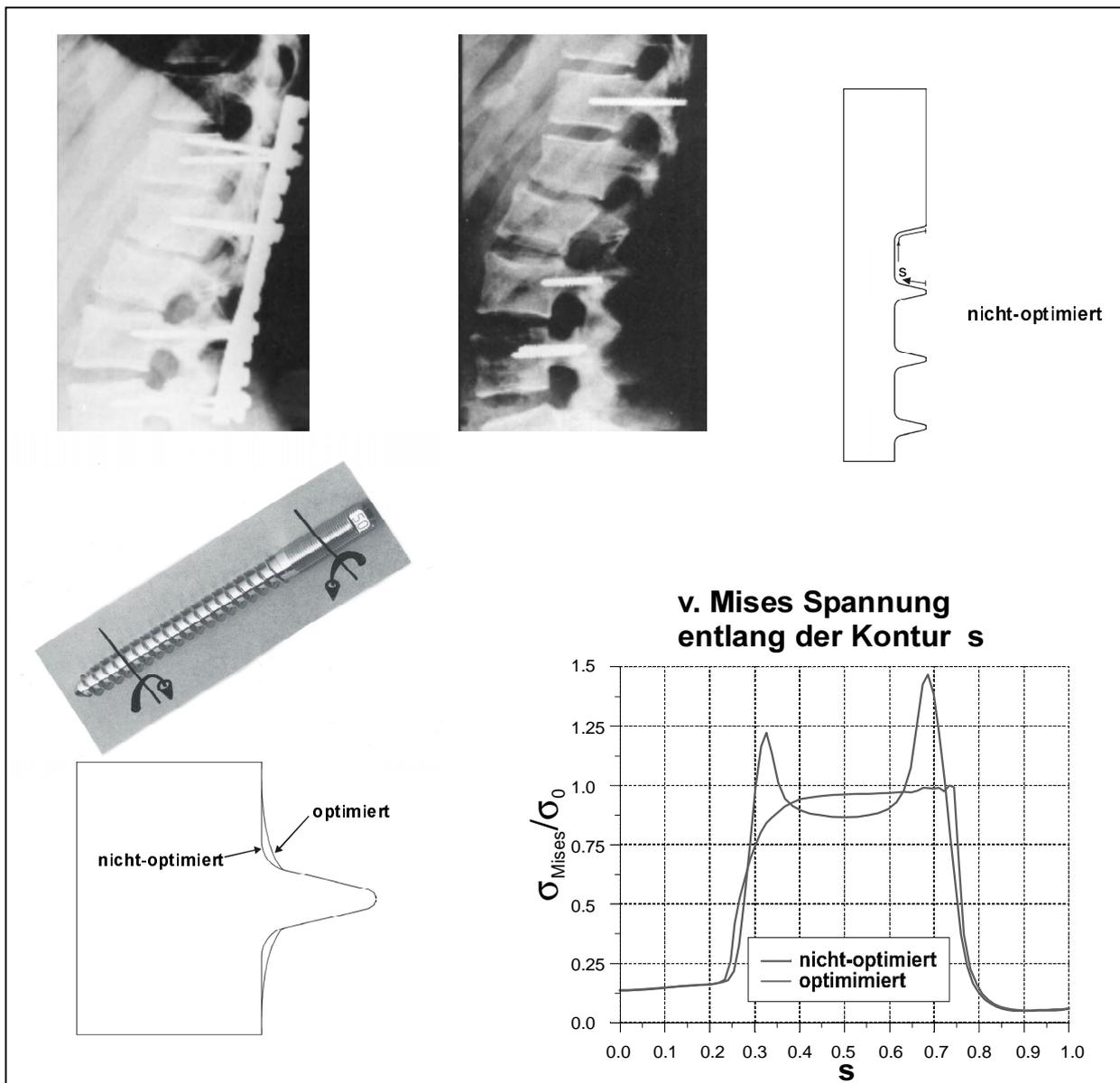
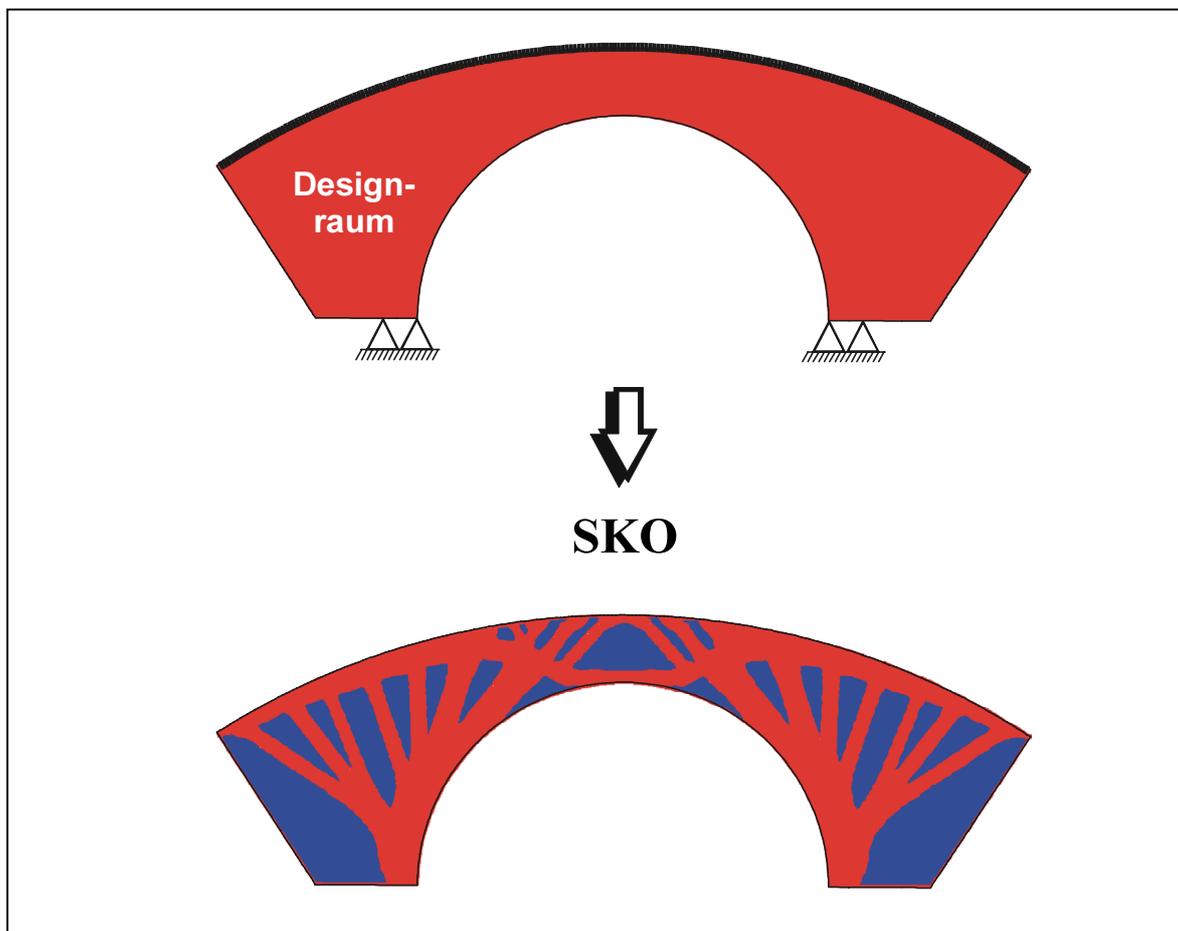


Abb. 5: Optimierung des Gewindes einer orthopädischen Schraube.

## SKO - Soft Kill Option

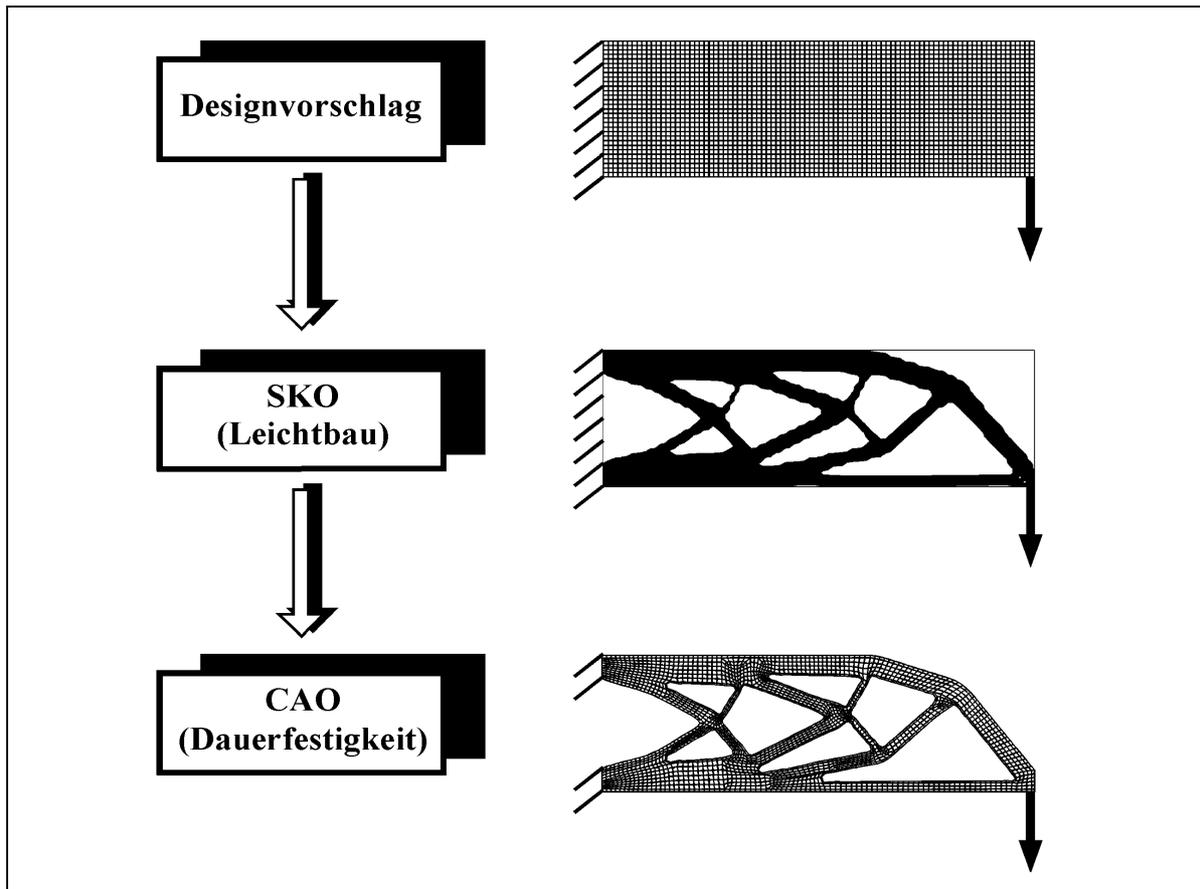
Diese Methode simuliert die adaptiven Mineralisationsvorgänge im Knochen. Höher belastete Bereiche werden ausgesteift, minder belastete Bereiche dagegen erweicht und schließlich ausgemerzt.

In einem Designraum, der gerade die Grenzabmessungen einhält, werden die Spannungen berechnet, die aufgrund der Betriebsbelastung auftreten. Entsprechend dieser Spannungsverteilung wird dann der Elastizitätsmodul (E-Modul) in höher belasteten Bereichen erhöht, in gering belasteten Bereichen dagegen verringert. Das führt zu einer Aussteifung der tragenden Bereiche und zur Erweichung und damit weiteren Entlastung der minderbelasteten Strukturelemente. Nach einigen Iterationsschritten werden die "Faulpelze" zunehmend deutlicher von den "Arbeitswilligen" getrennt und schließlich im letzten Schritt entfernt (Abb. 6).



**Abb. 6:** Optimale Abstützung eines gewölbten Hallendaches, gefunden mit Hilfe der SKO-Methode.

Auf diese Weise erhält man einen Leichtbau-Designvorschlag, der schon sehr nahe am wirklichen Optimum liegt. Eine nachfolgende CAO-Optimierung glättet schließlich die noch verbliebenen Kerbspannungen. Die schrittweise Anwendung von SKO und CAO liefert damit ein "ökologisches" Design, das leicht und zugleich dauerhaft ist (Abb. 7).



**Abb. 7:** Eine kombinierte Anwendung von SKO und CAO führt zu einem dauerfesten Leichtbaudesign.

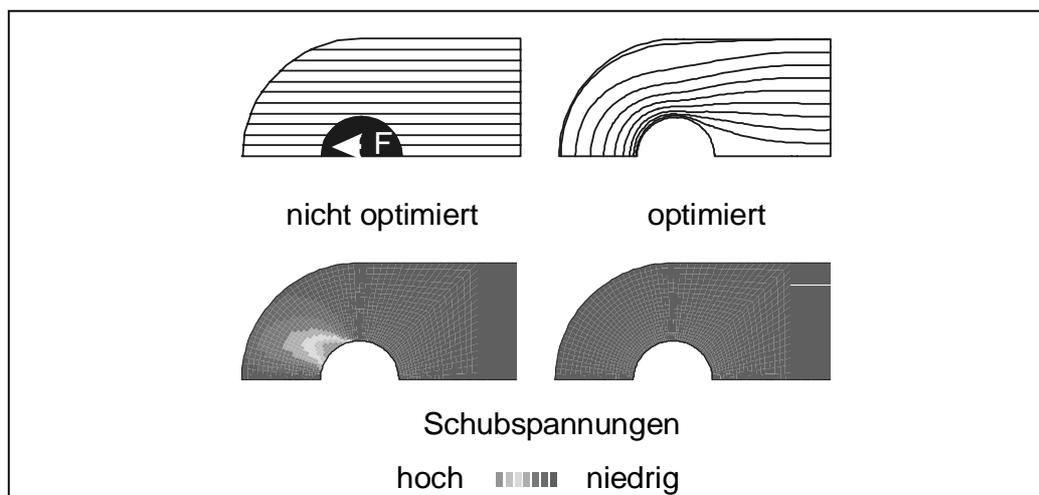
## CAIO - Computer Aided Internal Optimization

Die Vorteile von Faserverbundwerkstoffen sind, dass mit Ihnen Leichtbaustrukturen mit hoher Steifigkeit und großer Festigkeit konstruiert werden können. In konventionellen technischen Strukturen werden Fasern häufig an geometrischen Störungen, wie z. B. Löchern, durchtrennt und der Faserverbund somit erheblich geschwächt. Auch bei der Optimierung von Faserverbundwerkstoffen zeigt uns die Natur als Lehrmeister den richtigen Weg auf.

Um das Potential technischer Faserverbundwerkstoffe auszunutzen, ist es notwendig, auch die Fasern technischer Bauteile entlang des Kraftflusses zu orientieren. CAIO ermöglicht es, den kraftflussgerechten Faserverlauf zu bestimmen und somit die Schubspannungen eines Bauteiles bei gegebener Belastung auf ein Minimum zu reduzieren.

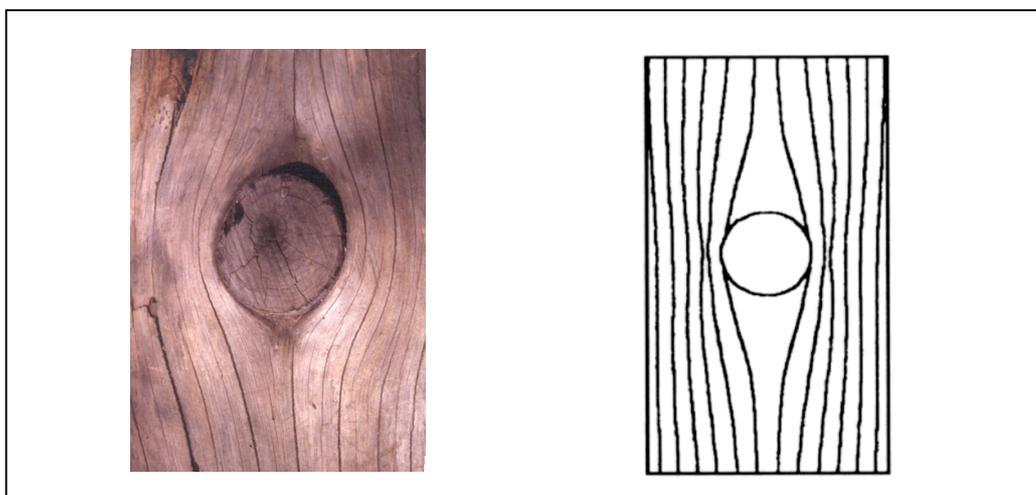
Zunächst wird dem zu optimierenden Modell ein orthotropes Material mit beliebiger Orientierung zugewiesen. Einer Spannungsanalyse folgt die Berechnung der optimierten Materialrichtungen durch die CAIO-Routine. Diese liest die Ergebnisse der Spannungsanalyse ein und berechnet daraus die neue Orientierung der Materialachsen. Mit diesem nunmehr ortsvariabel orthotropen Werkstoff erfolgt eine neue Spannungsanalyse.

Die Schubspannungen sind aufgrund der Umorientierung der Orthotropieachsen des Materials entlang der Hauptspannungstrajektorien in der Regel bereits in der ersten Iteration um bis zu 90% reduziert. Durch Iterationen alternierender CAIO-Berechnungen und Spannungsanalysen können die Schubspannungen um bis zu 99% reduziert werden.



**Abb. 8:** Die umgelenkten Fasern erfahren minimierte Schubbelastung.

Betrachtet man z. B. den Faserverlauf im Baumstamm um einen morschen Ast, so erkennt man, wie der Baum seine Fasern in spindelförmigen Kurven um diesen Ast legt. Die Abbildung 9 belegt, dass man mit CAIO sehr gut die Ausrichtung der Holzfasern um eine Astanbindung verifizieren kann. Die Fasern umgehen kunstvoll den morschen Ast, womit die gefährliche Kerbwirkung reduziert wird. Auch die radialen Holzstrahlen erfahren diese Faserumlenkung.



**Abb. 9:** Der mit CAIO gefundene Faserverlauf um einen morschen Ast stimmt mit der Natur überein.

## Die ethischen Grenzen des Öko-Designs

Die Daseinserfahrung zeigt, dass auch völlig gesunde Bäume oder Teile von ihnen bei einem Sturm brechen können. Auch der gesunde Skifahrer kann sich das Schienbein brechen, ohne einen Vorschaden gehabt zu haben. Diese "natürliche Schadensrate" ist der Preis für den biologischen Leichtbau. Sie hat ihre Ursache im begrenzten Sicherheitsfaktor "S" der Biobauteile, den die Natur aus ökonomischen Gründen erfand:

$S = \text{Bruchspannung} / \text{Betriebsspannung}$

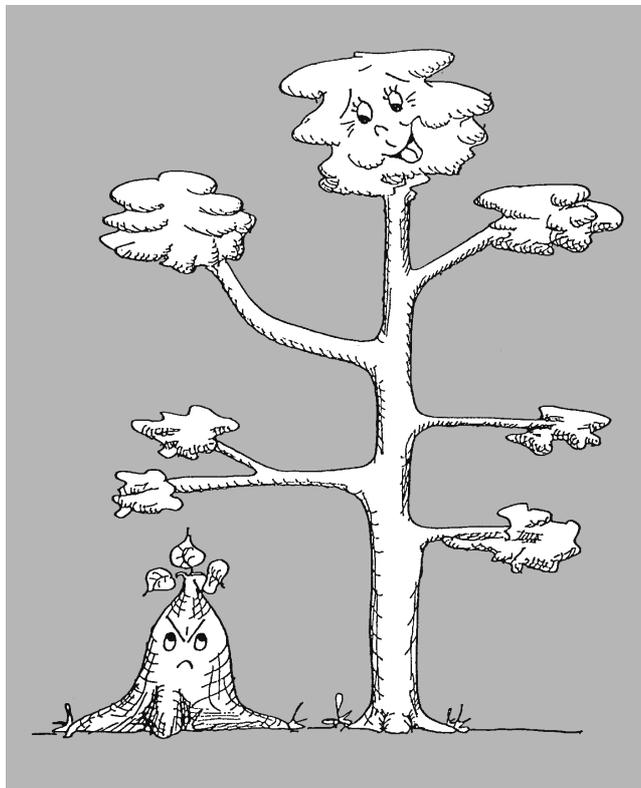
Dabei bedeutet Bruchspannung die maximal vom Material ertragbare Spannung, und die Betriebsspannung ist die normale Alltagsbelastung des Bauteils. Für die Knochen der Säugetiere werden ziemlich einheitliche Werte zwischen  $S=3$  und  $S=4$  angegeben<sup>5-7</sup>, wobei die eindrucksvolle Palette von Hund bis Elefant reicht.

Da Tiere herumlaufen und deshalb noch sparsamer mit dem Material umgehen müssen als Bäume, war ein Wert von  $S>4$  für Bäume zu erwarten. Der Sicherheitsfaktor für Bäume wurde in einer Feldstudie ermittelt<sup>8</sup>. Dabei wurden verschieden große Kerben in die Stämme eingeschlagen, um zu sehen, wann sie versagen. Für die größte Kerbe, die gerade nicht mehr den Stammbruch auslöste, wurde die Spannungsüberhöhung im Vergleich zum Vollquerschnitt berechnet. Der Sicherheitsfaktor der Bäume liegt bei mindestens  $S=4,5$ . Die so gekerbten Bäume stehen bereits mehrere Jahre, ohne zu brechen.

Die natürliche Versagensrate biologischer Strukturen ist die Folge des eher karg bemessenen Sicherheitsfaktors<sup>9</sup>.

Dieses Prinzip wird aus Abb. 10 deutlich. Wohl trotz der kleinere, bruchsihere Baum jedem Orkan, aber seine Krone ist zu klein und damit seine Samenproduktion zu gering, gemessen an seinem dicken Stamm. Gleichzeitig stiehlt ihm sein leichter gebauter Nachbar das so dringend benötigte Licht. Dessen höheres Versagensrisiko wird durch seine größere Fortpflanzungsrate mehr als kompensiert.

Vereinfacht in den menschlichen Bereich übertragen hieße das in grausamer Konsequenz: Konstruiere alle Motorräder mit SKO und CAO nach dem Axiom konstanter Spannung und senke außerdem den Sicherheitsfaktor. Die Ethik verbietet uns das ökologische Design in dieser und nur in dieser letzten grausamen Konsequenz.



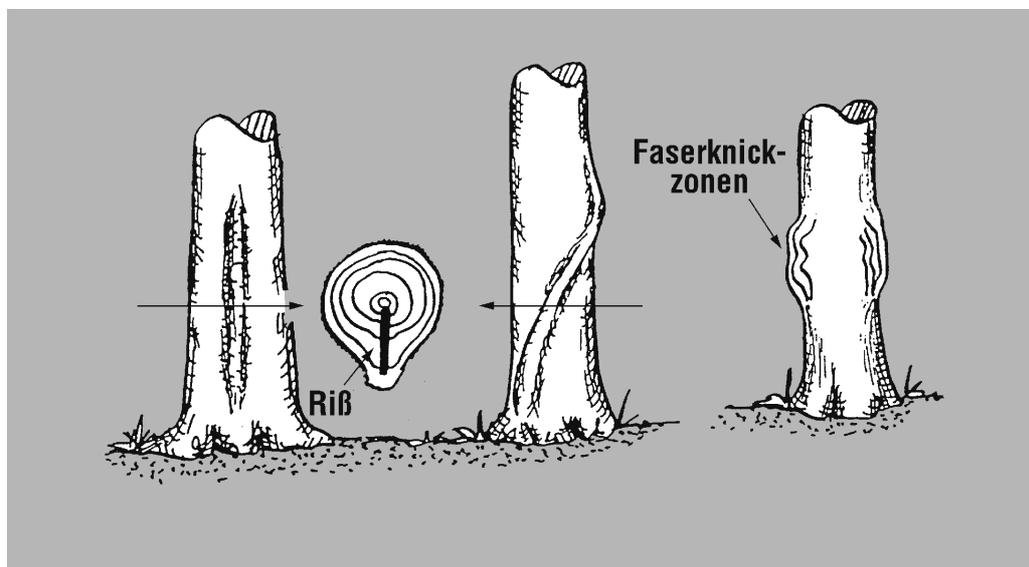
**Abb. 10:** Das richtige Maß zu finden ist gerade beim Sicherheitsfaktor lebensnotwendig.

Sehr deutlich wird das gegen die Designregeln der Natur verstoßende Sicherheitsdenken der Menschen dann, wenn natürliche Leichtbaukonstruktionen (mit ihren natürlichen Versagensraten) neben den überdimensionierten Menschenbauten stehen. Es ist amüsant zu sehen, welche gigantische Technik teilweise aufgeboten wird, um einen Baum für absolut sicher zu erklären. Dass dies wegen der natürlichen Versagensrate gar nicht sein kann, passt nicht in das städtische Sicherheitsdenken. Um diese zum Teil absurden Aktivitäten zu begrenzen, wurde im Forschungszentrum Karlsruhe eine effektive Methode zur Baumkontrolle entwickelt. Diese VTA-Methode (Visual Tree Assessment) basiert ebenfalls auf dem Axiom konstanter Spannung<sup>9</sup>.

## Bäume lehren Ingenieure - Ingenieure bewahren Bäume

Die VTA-Methode ist ein visuelles Bewertungsverfahren im wahrsten Sinne des Wortes. Wenn ein Baum die konstante Spannungsverteilung liebt und erhält, wird er bei Schädigung seiner Baumgestalt (z.B. durch Risse, Fäule etc.) versuchen, die dadurch bewirkten Spannungsüberhöhungen abzubauen. Er lagert also in Defektnähe Reparaturanbauten an, die als Symptome auf eben diese Defekte hinweisen. Sie sind Warnsignale in der Körpersprache der Bäume.

VTA ordnet nun diesen Symptomen ganz bestimmte Defekte zu (Abb. 11), die mit CAO bestätigt wurden und auch im Feldversuch nachgewiesen werden konnten. Es wäre nun ein grober Unsinn, wollte man jeden Baum, der ein Symptom ausbildet, fällen. Denn ein solcher Baum will ja leben und sich reparieren. Um der Sicherheit in den Städten willen muss man jedoch nachweisen, daß die Reparatur erfolgreich war und der Zustand konstanter Spannung wiederhergestellt ist. Ist dies nicht der Fall, kann der Baum zumindest noch etwas von seiner 4,5-fachen Sicherheitsreserve zehren.



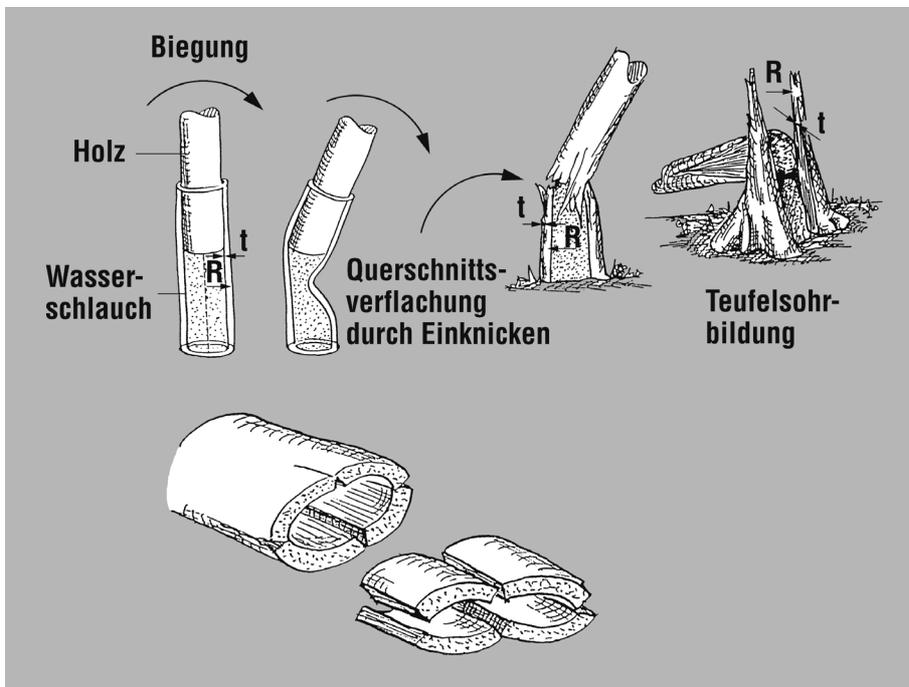
**Abb. 11:** Viele Defekte sind dem Baum bereits äußerlich anzusehen.

Bei hohlen Bäumen reicht dies allerdings nicht aus, denn diese versagen nicht durch Biegebruch, sondern durch Querschnittsverflachung. Sie knicken wie ein gebogener Gartenschlauch. Manchmal bleiben dabei noch sogenannte Teufelsohren stehen (Abb. 12). Ein Versagenskriterium für diesen enorm bedeutsamen Versagensmechanismus, der weit signifikanter ist als der Biegebruch, wurde bei einer Feldstudie gefunden. Danach treten Stammbrüche normalerweise erst auf, wenn die gesunde Restwandstärke weniger als 30% des Stammradius beträgt.

Dieses ohne jegliche Theorie gewonnene Ergebnis wurde rein empirisch aus einer Vielzahl von Baumarten an verschiedensten Standorten ermittelt. Es wurde als Richtlinie zur Bewertung von Schadensfällen auch den deutschen Gerichten empfohlen<sup>9-11</sup>. Die VTA-Methode wurde bereits von der Rechtsprechung auf OLG-Ebene aufgegriffen.

Das Handbuch der Schadenskunde von Bäumen<sup>9</sup> fasst alle bisherigen Erkenntnisse zum Baumversagen und dessen Diagnose zusammen. Die VTA-Methode ist mittlerweile auch im Ausland sehr verbreitet.

In diesem letzten Kapitel sollte gezeigt werden, daß das Studium der Körpersprache der Bäume und ihrer Designregeln nicht nur eine Fundgrube für bessere technische Konstruktionen ist. Die Möglichkeit der quantifizierten Computersimulation eben dieser Körpersprache kann auch die Angst vor dem "tötenden Baum" verringern. Wer die Warnsignale der Bäume versteht, kann auch ihren Gefahren besser begegnen. Die Untersuchungen über die begrenzte Versagenssicherheit des biologischen Individuums zugunsten einer kostengünstigen Arterhaltung sollen zu der Erkenntnis beitragen, daß jeder, der mit Bäumen leben will, auch ein gewisses Risiko akzeptieren muss.



**Abb. 12:** Versagensmechanismus hohler Bäume.

## Literatur

- 1 Metzger K.: Der Wind als maßgebender Faktor für das Wachstum der Bäume. Mündener Forstliche Hefte, 3. Heft, Verlag Julius Springer, Berlin 1893
- 2 Mattheck, C.: Trees – the mechanical design. Springer Verlag, Heidelberg, New York, 1991
- 3 Mattheck, C.: Design in der Natur – Der Baum als Lehrmeister. 3. Auflage, Rombach Verlag, Freiburg, 1997
- 4 Mattheck, C.: Engineering Components grow like trees. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 21, 143 – 168, 1990
- 5 McN. Alexander, Animals, Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
- 6 J. Currey, The mechanical adaptations of bones. Princeton University Press, 1984.
- 7 C. Rubin, L. Lanyon, J. Exp. Biol., 110 (1982) 187-211.
- 8 C. Mattheck, K. Bethge, J. Schäfer, J. Theor. Biol., 165 (1993) 185-189.
- 9 C. Mattheck, H. Breloer, Handbuch der Schadenskunde von Bäumen - der Baumbruch in Mechanik und Rechtsprechung. 2. erweiterte Auflage, Rombach Verlag, Freiburg, 1994.
- 10 C. Mattheck, K. Bethge, D. Erb, Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 164, (1993) 9-12.
- 11 C. Mattheck, H. Kubler, Wood - the internal optimization of trees, Springer Verlag, Heidelberg 1995.