

Bäume können ihre Lastgeschichte nicht verbergen. Die Baumgestalt ist daher ein offenes Tagebuch, ein Protokoll ihrer eigenen Belastung, geschrieben in der Körpersprache der Bäume. Das Verständnis von Prinzipien aus der Natur, wie adaptives Wachstum, Selbstheilung oder ständige Selbstoptimierung von biologischen Strukturen, macht es möglich, über Computersimulation auch technische Bauteile zu verbessern.

DESIGN IN DER NATUR UND NACH DER NATUR



CLAUS MATTHECK

Prof. Dr. rer. nat.; geb. 1947 in Dresden; Physikstudium in Dresden; 1973 Promotion: Theoretische Physik; 1985 Habilitation im Fach Schadenskunde an der Universität Karlsruhe; Leiter der Abteilung Biomechanik im Forschungszentrum Karlsruhe; Vorlesungen über Biomechanik als apl. Professor.

DER ZWANG ZUR SELBST-OPTIMIERUNG 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, Jahrmillionen 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 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. Er konnte zeigen, daß die Biegespannungen in Fichtenstämmen infolge einer lastangepaßten Stammverjüngung gleichmäßig über die Länge verteilt sind. Dieses Prinzip wurde verallgemeinert, so daß das Axiom konstanter Spannung eine allgemeingültige Designregel für biologische Bauteile darstellt.

Zum besseren Verständnis dieser Wachstumsvorgänge ist es vorteilhaft, zwischen Bäumen und Knochen zu unterscheiden. Wenn ein Baum mit seinem allzeit wachen Kambium – jener Wachstumschicht 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. 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. Tiere da-



ABB. 1: LASTGESCHICHTE EINES KNOCHENS

gegen 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. 1).

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 (= Materialver-

schwendung). Das Axiom konstanter Spannung charakterisiert damit das optimale mechanische Design für den Lastfall, an den es angepaßt ist.

Mit diesen Voraussetzungen wurden am Forschungszentrum Karlsruhe drei Computermethoden entwickelt, die es ermöglichen, diese Art von angepaßtem Wachstum zu simulieren und damit Maschinenbauteile zu optimieren: SKO, CAO und CAIO.

Die nachfolgenden Kapitel belegen die Effizienz und Einsatzmöglichkeiten dieser Verfahren.

CAO - COMPUTER AIDED OPTIMIZATION

Die CAO-Methode simuliert adaptives Wachstum durch spannungsgesteuerte thermische Ausdehnung. Dazu werden in einem beliebig zu wählenden Designvorschlag 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 auszuschießen.

Ein Beispiel aus der Natur zeigt Abbildung 2. Eine Baumgabel stellt eine Kerbe ohne Kerbspannungen dar und ist damit wesentlich stabiler als eine konstruierte Gabel mit kreisförmiger Innenkontur, die sehr hohe Kerbspannungen bewirkt. 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 oft Sabotage am Bauteil bedeuten. 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.

Die CAO-Methode im Bereich des biologischen Wachstums bietet zahlreiche weitere 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. Ein biegebelasteter Zylinder mit rechteckigem Ausschnitt brach gelegentlich an den Ecken dieses Fensters, was niemanden wundert, denn auch dort waren kreisförmige Kerben plaziert. Nach einer Gestaltoptimierung mit CAO fanden sich keine Kerbspannungen mehr, und die so gefertigten Prototypen wiesen eine 40fach längere Lebensdauer in Biegeschwingversuchen auf. Außerdem wurde vom Hersteller gefordert, daß nur die Fensterkante wachsen durfte und alles andere aus funktionellen Gründen so bleiben sollte, wie es war.

Auch diese Auflagen ließen sich leicht durch Begrenzung des adaptiv wachsenden Bereiches erfüllen.

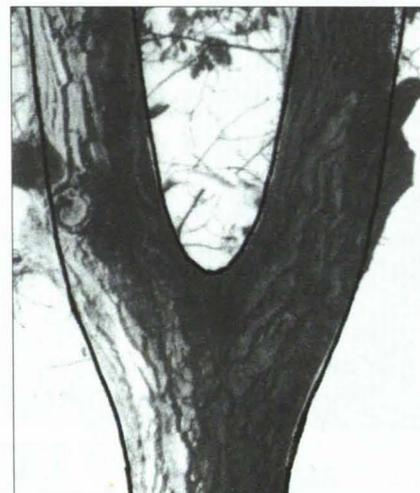


ABB. 2: BAUMGABEL - NATÜRLICHE KERBE OHNE KERBSPANNUNGEN

Die Nachteile oder Grenzen der CAO-Methode? Sie liegen darin, daß CAO zwar liebevoll eine vorhandene Oberfläche optimal ausformen, aber keine neuen Oberflächen erzeugen kann. Es können daher auch keine neuen Löcher ins Bauteil eingebracht werden, um nichttragende Bereiche zu entfernen. Mit dem Ziel, diese nichtarbeitenden Faulpelze im Bauteil zu eliminieren, wurde zunächst die KILL OPTION entworfen, die dann in Form der SKO-Methode zu einem industriereifen Verfahren weiterentwickelt wurde.

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 Breichen 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“ zunehmen, deutlicher von den „Arbeitswilligen“ getrennt und schließlich im letzten Schritt entfernt („gekillt“!).

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.

Die vorgestellte Art der Designfindung erlaubt es, Maschinenbauteile nach den Gestaltgesetzen der Natur zu konstruieren.

Was aber, wenn der Werkstoff nicht homogen und isotrop ist? Holz ist z. B. ein Faserverbundwerkstoff! Es sei vorweggenommen, daß die Berücksichtigung der Orthotropie-Eigenschaften des Holzes die Optimalform nicht wesentlich beeinflusst, da der einachsige Kraft-

fluß stets in Faserrichtung läuft und Quereffekte gering sind. Will man jedoch die kunstvolle Umlenkung der Holzfasern um ein Astloch auch in einem technischen Faserwerkstoff realisieren, so muß zuerst der optimale Faserverlauf bestimmt werden. Dafür wurde die DAIO-Methode entwickelt.

CAIO - COMPUTER AIDED INTERNAL OPTIMIZATION

Diese Methode basiert auf der plausiblen Annahme, daß es vorteilhaft ist, die Fasern so anzuordnen, daß sie in Richtung des vom Bauteil zu übertragenden Kraftflusses liegen. Denn die Linien des Kraftflußverlaufes (die sogenannten Hauptnormalspannungstrajektorien) sind zugleich Linien frei von Schubspannungen.

Bei dem zu berechnenden Bauteil wird der Faserverlauf in iterativer Weise gefunden. Die Abb. 3 belegt, daß man damit sehr gut die Ausrichtung der Holzfasern um eine Astanbindung verifizieren kann. Die Fasern umgehen kunstvoll das Astloch, das damit viel von seiner gefährlichen Kerbwirkung verliert. Auch die radialen Holzstrahlen erfahren diese Faserumlenkung.

Man erwartet, daß technische Probleme bei hochbelasteten Leichtbauteilen, wie das kerbspannungsfreie Einweben von Sensoren in Flugzeugteile aus Faserverbundwerkstoffen oder das lastgerechte Verbinden von Composite-Teilen mit dieser Methode optimiert werden können.

Die Natur hält auch hier ihre Lösungen schon bereit, und es erweist sich auch in diesem Falle als vorteilhaft, vor allem den Mechanismus der Optimierung zu verstehen und nicht so sehr das fertige individuelle Design zu kopieren, zumal es für die gesuchte technische Anwendung nur selten ein exaktes Gegenstück in der Natur gibt. Nicht einmal ein Optimist würde hoffen, eine gewachsene Kurbelwelle zu finden!

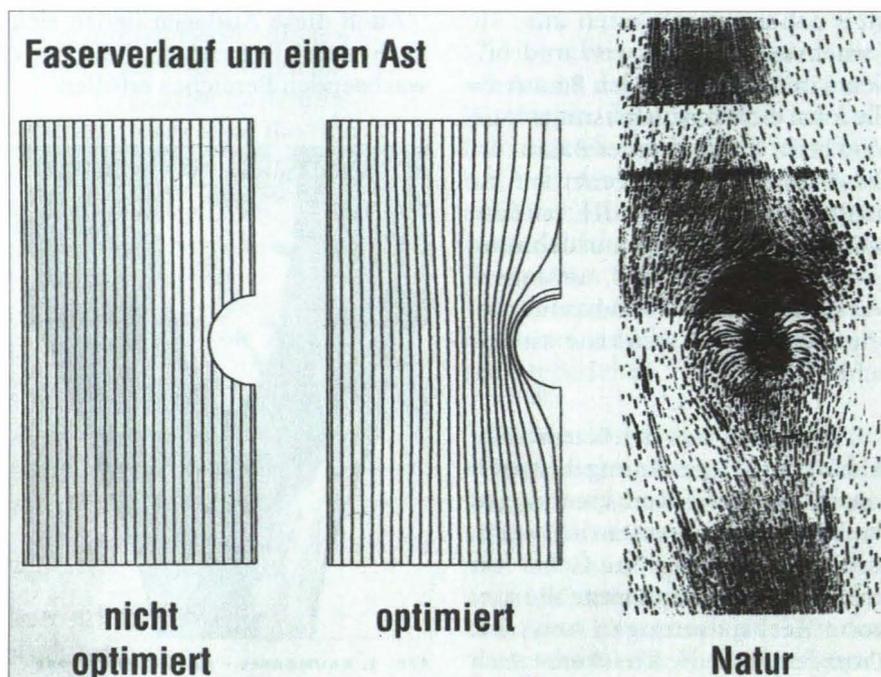


ABB. 3: OPTIMIERUNG DES FASERVERLAUFES



Wir sind ein internationales Unternehmen und einer der weltweit führenden Hersteller von Fahrzeug-Insassenschutzsystemen. Das europäische Entwicklungszentrum für Sicherheitsgurte und Airbags befindet sich in Ulm.

Zur Verstärkung unseres Entwicklungsteams suchen wir baldmöglichst eine/n erfahrene/n

Projektleiter/in

im Sicherheitsgurtbereich

Zunächst ist eine Tätigkeit in der Konstruktion vorgesehen, mit der Möglichkeit die Projektleitung zu übernehmen.

Des weiteren stellen wir ein:

Konstrukteur/in

möglichst mit Erfahrung in CATIA und/oder Unigraphics

sowie

Versuchsingenieur/in

zur Analyse von Schlitten- und Crashtests

Sie verfügen über ein abgeschlossenes TU-Studium der Fachrichtung Maschinenbau/Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau. Sie sind nicht ortsgebunden und haben gute Englischkenntnisse, verfügen über organisatorische Fähigkeiten und wenn möglich Erfahrung innerhalb der Automobilbranche. Dann bieten wir Ihnen einen anspruchsvollen Arbeitsplatz in unserem modernen Unternehmen.

Wenn wir Ihr Interesse geweckt haben, senden Sie bitte Ihre Unterlagen unter Angabe des frühestmöglichen Eintrittstermines und Ihrer Gehaltsvorstellungen an unsere Personalabteilung.

**TAKATA (Europe) Vehicle Safety Technology GmbH,
Personalabteilung, Helmholtzstr. 22, 89081 Ulm
Telefon 0731/95409-83; Telefax 0731/95409-30**

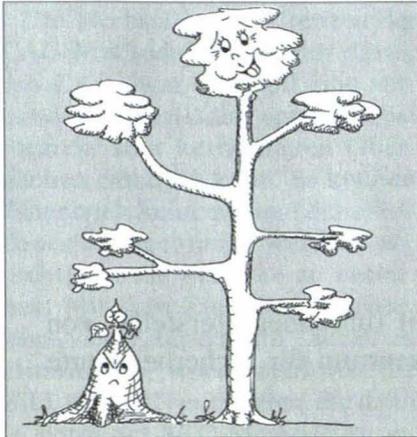


ABB. 4: PRINZIP DES SICHERHEITSAKTORS AM BEISPIEL BAUM

Mit dem vorgestellten Rechenprogrammen SKO, CAO und CAIO läßt sich grundsätzlich jedes Bauteil im Sinne des „Öko-Designs“ ausbilden.

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:

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

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, 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. 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 Voll-

querschnitt berechnet. Der Sicherheitsfaktor der Bäume liegt bei mindestens $S>4,5$. Die so gekerbten Bäume stehen bereits ca. zwei Jahre, ohne zu brechen.

Die natürliche Versagensrate biologischer Strukturen ist die Folge des eher karg bemessenen Sicherheitsfaktors. Dieses Prinzip wird aus Abb. 4 deutlich. Wohl trotz der kleineren, bruch sichere 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.