

DER BAUM – EIN RATGEBER FÜR DEN KONSTRUKTEUR?

>> von Rainer Häberer in Zusammenarbeit mit Jörg Schönemann > Als Konstrukteur steht man häufig vor der Frage, was richtig oder falsch ist. Auch unsere Studenten erwarten im Fach Konstruktionslehre immer wieder die einzige richtige Lösung. Doch oft muss ich sie enttäuschen, da sich je nach eingeschlagenem Weg mehrere Lösungen ergeben können. Diese können genial, richtig oder auch richtig und aufwendig, aber auch falsch sein.

Unter diesem Aspekt beobachtete ich mehrere Jahre die Selbsthilfe einer kleinen Buche, die im Jahre 1999 durch den Sturm Lothar zu Boden gedrückt worden war. Sie benötigte unbedingt eine Strategie, um weiterleben zu können. Ich war überzeugt, dass die Evolution eine geniale Lösung parat hätte, die ich als Ingenieur sicherlich gut heißen würde.

Die etwa 10 Jahre alte Buche musste sich wieder aufrichten und neu orientieren, s. *Abb. 1*.

Die Wurzeln hatten offensichtlich versucht, das Bäumchen wieder etwas aufzurichten, erkennbar an dem senkrechten Stammaustritt aus dem Waldboden. Das Gewicht der geneigten Buche verhinderte jedoch die Wiedererlangung der vertikalen Ausrichtung. Da alle Äste zur optimalen Ausübung der Photosynthese in Richtung des Sonnenlichtes wachsen wollten, nutzte in dieser Position einer der nachfolgenden, nun nach oben zeigenden Äste die Chance, die Spitze zu übernehmen. Die bisherige Spitze verdorrte.



Der Baumstamm bildete einen um 30° zur Vertikalen geneigten rechten Winkel. Die neue Spitze versuchte sich nun mit starkem Wuchs vertikal nach oben zum Licht auszurichten. Da diese Gestalt die Stabilität des Stammes gefährdete, musste der Baum gewissermaßen „handeln“. 2011 fällte ich die mittlerweile etwa 20 Jahre alte Buche, um die natürlichen Überlebensmechanismen rechnerisch analysieren zu können.

Zur Analyse wird der Stamm zunächst mit einem 3-D-Scanner aufgenommen. Es folgt eine Studie mit dem Berechnungsprogramm Pro/MECHANICA. Die Rinde, die bei Buche recht dünn ist, wird in der Berechnung zur Vereinfachung als Holz angenommen. Die nachfolgende Untersuchung hat das Ziel, das evolutionäre Verhalten des Baumes herauszuarbeiten und mit den Gestaltungsrichtlinien eines Konstrukteurs zu vergleichen.

Spannungsanalyse

Im Baumstamm normal gewachsener Bäume liegen aufgrund des Gewichtes der Äste und Blätter überwiegend Druckspannungen vor. Windlasten führen insbesondere am Stammende zu zusätzlichen Biegespannungen. Bei einer unsymmetrischen Baumgestalt können Windlasten überdies zu einer Verdrillung des Stammes führen.

Die Studie zeigt, dass im vorliegenden Fall die Gewichtskraft dominant ist, weshalb die anderen Lastfälle im Folgenden nicht betrachtet werden. Zum besseren Verständnis der Spannungsverteilungen wird in *Abb. 2a* zunächst ein idealisierter Baumstamm mit einem durchgängigen Stammdurchmesser von 78mm zugrunde gelegt. Dieser Durchmesser entspricht dem des realen Baumes zwischen Knie und Erdboden. Aufgrund des Gewichtes von 30Kg wird der abgewinkelte Stamm wie eine Spange zusammengedrückt. Dadurch stellt sich in den beiden Schenkeln jeweils eine Biegespannung ein. Auf Seite der Kniekehle herrschen Druckspannungen, 180° dazu versetzt Zugspannungen. Diese Spannungen sind nahezu symmetrisch und haben in der Kniespitze und in der Kniekehle je nach Verrundung ein ausgeprägtes Maximum. (Im Beispiel: Vergleichsspannung nach Mises: 5,6 N/mm²). Diese Spannungen könnten bei dynamischer Belastung noch etwas ansteigen.

Buchenholz hat eine Druckfestigkeit von 52 – 64 N/mm² und eine Zugfestigkeit von 100 – 135 N/mm². Es zeigt sich, dass der Baum schon weit unterhalb dieser Kennzahlen Maßnahmen zur Spannungsreduzierung ergreift.

Abb. 1

Buche mit abgewinkeltem Stamm

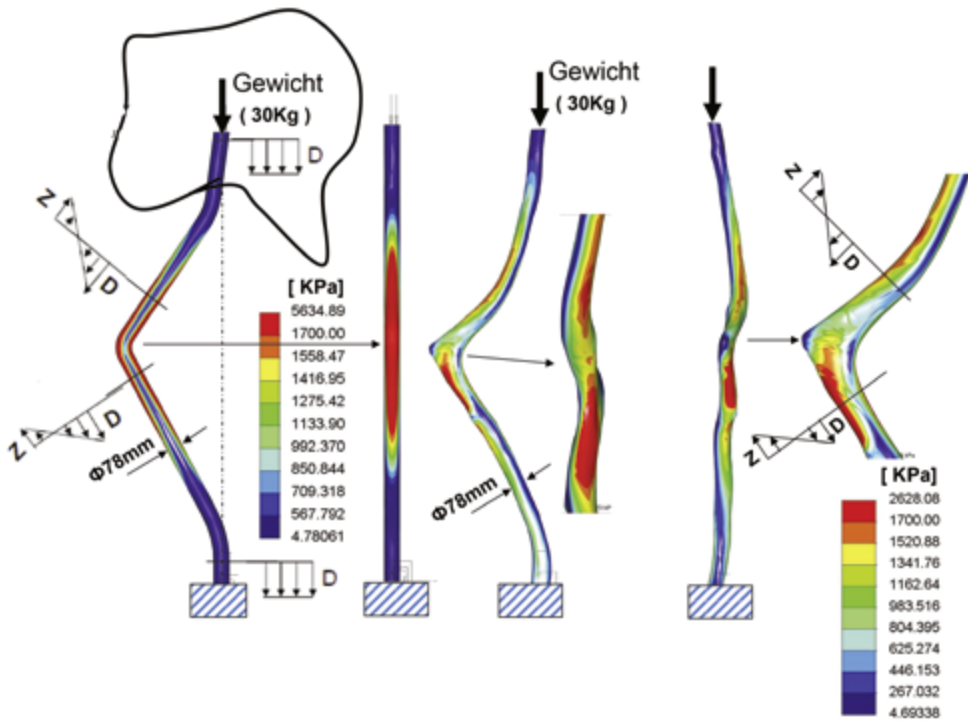


Abb. 2a
Idealer Stamm mit $\varnothing=78\text{mm}$

Abb. 2b
Realer Stamm

Abb. 2b zeigt den realen Baumstamm. Der Baumstamm hat seine Querschnitte derart modifiziert, dass die Spannungsmaxima, verglichen mit dem idealen Baum, halbiert sind und nicht mehr unmittelbar in der Kniekehle liegen (Vergleichsspannung nach Mises: $2,6\text{ N/mm}^2$). Erreicht wurde dies durch einen starken Holzaufbau im Bereich der Kniekehle (Druckholz).

Abb. 3 zeigt die Querschnitte entlang des Stammes. Die abgewinkelte Form führte dazu, dass die Beanspruchung in Form von in Stammrichtung wirkenden Biegespannungen dominant ist und demzufolge über die gesamte Länge des Stammes ein ovaler Querschnitt mit der größten Ausdehnung in Y-Richtung zu beobachten ist. Im Bereich der Kniekehle sorgt ein starker Aufbau von Druckholz für eine Abstützung. Ein ähnlicher, jedoch abgeschwächter Effekt ergibt sich am Fuße des Stammes. Der Baum wollte durch Bildung von zusätzlichem Druckholz das Aufrichten in die Vertikale unterstützen.

Oberhalb des Knies, das heißt im weniger belasteten Bereich, wechselt der Baum seine Strategie und versucht durch Holzaufbau auf der dem Knie zugewandten Zugseite die Spannung zu reduzieren. Er bildet Zugholz.

Ein „normal“ gewachsener Baum hat das Bestreben, im gesamten Baumstamm eine möglichst gleich verteilte Spannung zu erzeugen. Im vorliegenden Fall ist dieses Ziel zur Utopie geworden. Da die Baumkrone immer schwerer wurde, musste die hinsichtlich Festigkeit kritische Kniekehle stets nachgebessert werden, ersichtlich an den Jahresringen. Der Baum unterlag also einem lebenslangen Dauerstress. Er konnte jedoch überleben, da er sein Wachstum auf die geänderten Randbedingungen abgestimmt hatte. >

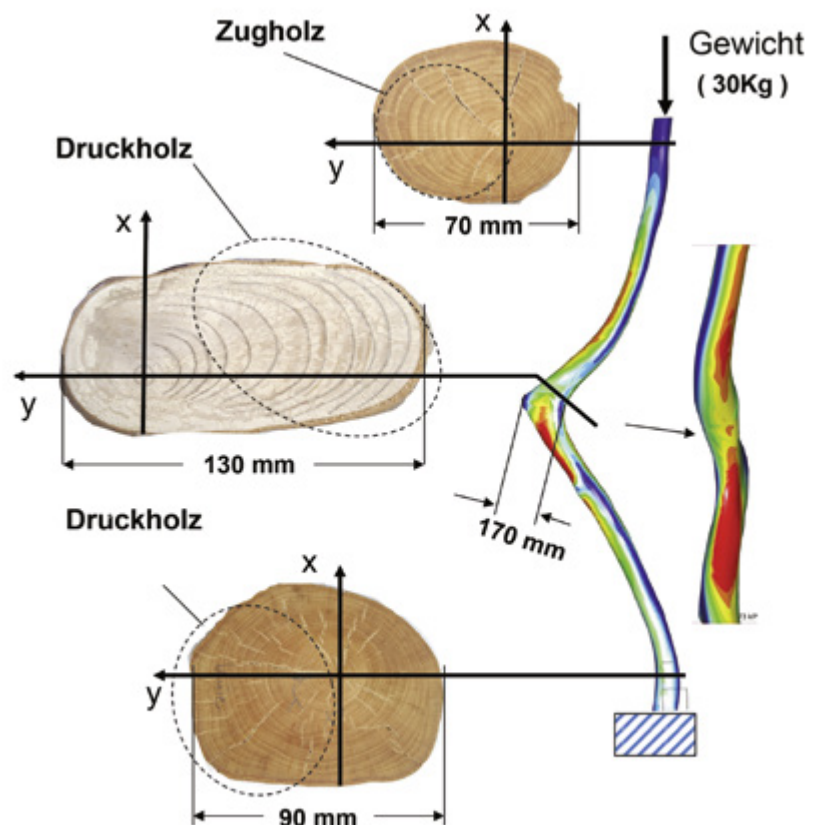


Abb. 3
Holzaufbau am realen Stamm;
Draufsicht auf den Querschnitt

Hat der Konstrukteur daraus gelernt ?

- Der Konstrukteur kennt das Prinzip der direkten Kraftleitung. Aufgrund der ungewollten Kniebildung konnte der Baum dieses nicht mehr realisieren. Dem Baum blieb folglich nur die Chance, die Spannungskonzentration durch eine starke Ausrundung der Kniekehle zu mildern. Der Ingenieur nennt diese Maßnahme Reduzierung der Kerbformzahl.
- Der Ingenieur würde sich im vorliegenden Fall durch eine direkte Verbindungsstrebe helfen. Somit wäre der direkte Kraftfluss wieder gegeben, s. *Abb. 4a*.
- Der Surrealist Salvador Dali hätte zur Demonstration der Zerbrechlichkeit ganz einfach zwei Krücken angebracht, s. *Abb. 4b*.

Man erkennt drei verschiedene Ansätze, die allesamt zu einer möglichen Lösung führen. Der Baum macht deutlich, dass selbst starke Fehlkonstruktionen, wenn auch mit großem Aufwand, durch gezielte Änderungen nachträglich funktionstüchtig gemacht werden können.

Dem interessierten Leser möchte ich als weiterführende Literatur die Veröffentlichungen und Bücher von Professor Dr. Mattheck empfehlen, der bereits zweimal zu Gast im Studium Generale der Hochschule war. Vor 30 Jahren hatte ich das Vergnügen, mit ihm erste biomechanische Analysen durchführen zu dürfen ■

Dr. Rainer Häberer

ist Professor und Studiengangleiter Maschinenbau /Produktentwicklung. Er lehrt Konstruktionslehre, CAD und Bruchmechanik.

Dipl. Ing. Jörg Schönemann

ist Akademischer Mitarbeiter im Studiengang mit den Schwerpunkten CAD, Simulation und Konstruktionslehre.



Abb.: 4a

Abhilfe durch
Ingenieur



Abb.: 4b

Abhilfe
nach Dali