

# Statik verstehen lernen

Florian Theilmann

Während einer Mechanik-Epoche im Sommer 1999 beschäftigten wir uns in der Statik intensiv mit Fachwerkstrukturen [1]. Als praktische Aufgabe sollten die Schüler ein möglichst belastbares Brücklein aus genau einem DIN A 4-Blatt Papier bauen. Ich versprach, auch selber teilzunehmen. Meine kleine, mühsam und liebevoll zusammengesetzte Fachwerkbrücke aus Papier schnitt allerdings schlecht ab: Die Siegerkonstruktion – ohne Fachwerk – war etwa zehnmal belastbarer. Offenbar hatte ich irgendetwas Wichtiges vergessen ...

## Druck und Zug

Was passiert beim Drücken und Ziehen eines Gegenstandes? Unter Druck schließt sich der Kontakt an den Berührungsflächen und es treten charakteristische Verformungen auf: Die Druckstellen »drücken sich ein«, der Gegenstand gibt unter Gegendruck an den Angriffsstellen nach; Form und Lage streben dabei gleichsam in der Querebene zwischen den Druckpunkten nach außen, die Gesamtform erscheint gedrungener als der unbelastete Gegenstand. Beim Ziehen an einem Gummiband entsteht der Gegenzug unter Sich-Strecken bei gleichzeitiger Einschnürung. Das Band muss festgehalten werden und es spannt



*Abb. 1: Der Holzstoß »funktioniert« als Konstruktion durch Druck: die Scheite werden mit großen Berührungsflächen aufeinander gestapelt, und das Lasten der oberen Schichten stabilisiert den Aufbau unten. Ähnlich ist es beim Wagenheber, der unter Last auch auf unebenem Untergrund sicher steht und seine Auflageflächen platt auf Unterlage und Autounterseite presst. In beiden Fällen liegt Gefahr im seitlichen Umkippen. Die Spannriemen straffen sich*

*unter Zug »automatisch« von Auflagepunkt zu Auflagepunkt. Der Mast auf dem Dach ist durch Zug in drei verschiedene Richtungen stabilisiert und kann auch ohne Verankerung am Fuß nicht umfallen – ist aber selbst auf Druck belastet!*

sich in der Verbindungslinie zwischen den Angriffspunkten (Abb. 1).

Bei der mathematischen Behandlung von Kräften wird nicht zwischen Druck und Zug unterschieden, die Kräfte sind in den Formeln Buchstaben bzw. Zahlenwerte, in den Diagrammen Pfeile. Für die Mathematik ist es egal, ob gezogen oder gedrückt wird, aber nicht in der Praxis der Statik! Typische Druck-Konstruktionen sehen anders aus als Zug-Konstruktionen: Typisch Druck wäre vielleicht das Stapeln von Elementen (Mauerwerk, griechische Säule), typisch Zug eine Kette oder das Spinnennetz. Insbesondere führt auch die Belastung einer Druckkonstruktion auf Zug (und umgekehrt) ziemlich sicher zu desaströsen Ergebnissen. Damit ist auch beschrieben, was Druck und Zug sind: Situationen, in denen die genannten charakteristischen Erscheinungen auftreten, genauer: Drücken (bzw. Ziehen) verursacht Verformung, etwa Stauchung (Dehnung). Charakteristische Verformung zeigt Druck und Zug an. So wäre eine saubere Sprechweise vielleicht: »Es herrscht« Druck- oder Zug-Spannung. Nicht Kraft bewirkt unter diesem Blickwinkel irgendetwas, sondern dasjenige, was drückt oder zieht.

## Ein Beispiel aus Streichholzschachteln

Mauern sind ein gutes Beispiel für Konstruktionen, die »mit Druck funktionieren«, denn selbst wenn Mörtel beim Bau verwendet wurde, ist dieser unter Zug nicht widerstandsfähig und es entstehen Risse. Den Schülern wurde nun folgende Aufgabe gestellt: »Baut aus einer Anzahl von Streichholzschachteln eine Konstruktion, die möglichst weit überhängt!« Offenbar ist es so, dass sich eine einzelne Schachtel nach vorne schieben lässt, bis etwa die Hälfte der Schachtel »überkragt«. Die nächsten Schachteln lassen sich aber



Abb. 2: Ein gelungenes Beispiel für eine überhängende Streichholzschachtelmauer. Die Konstruktion ist offenbar praktisch ausgereizt: An verschiedenen Stellen öffnen sich Risse, der Überhang neigt sich nach unten. Auf kariertem Papier wird der erreichte Überhang vermessen.

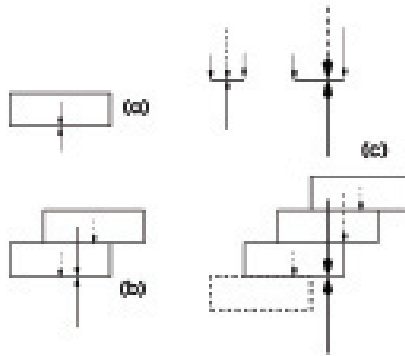


Abb. 3: Konstruktion der Lastpunkte für einen (a), zwei (b) und drei (c) Schachteln.

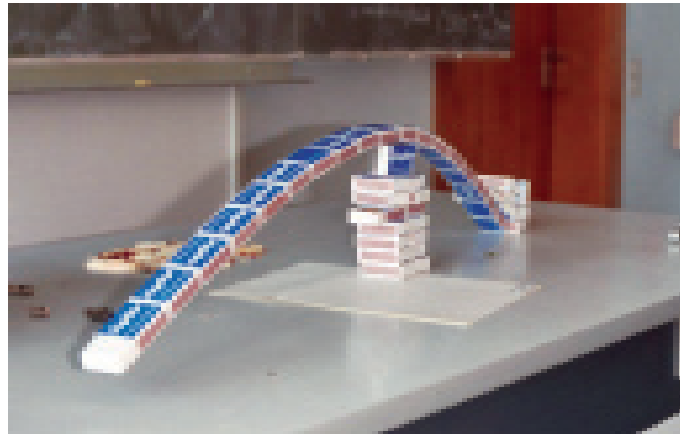
nur dann weiter nach vorne legen, wenn gleichzeitig für zusätzliches Gewicht gesorgt ist, so dass die Angelegenheit nicht nach vorne kippt. Abb. 2 zeigt ein Beispiel.

Was lernt man daraus? Es genügt im Prinzip, eine einzelne Schachtel unterhalb ihres Schwerpunktes zu unterstützen, am »Lastpunkt« (Abb. 3 a). Die Pfeile im Diagramm lassen sich als »Kraftpfeile« lesen, aber auch naiver als »da drückt es« (mit einfachem, zweifachem usw. Gewicht bzw. Gegendruck). Für zwei gegeneinander verschobene Schachteln liegt der gemeinsame Lastpunkt in der Mitte zwischen den Einzelpunkten (Abb. 3 b), die Situation entspricht einer auf beiden Armen gleich belasteten Waage! Eine dritte Schachtel verschiebt den Lastpunkt weiter nach außen (Abb. 3 c), die Waage ist jetzt im Verhältnis 2:1 belastet; ein vierter, gleichmäßig zurückgesetzter Stein kann den entstandenen gemeinsamen Lastpunkt nicht mehr unterstützen, der Stapel kippt. Offenbar kommt es also darauf an, alle auftretenden Lastpunkte auch zu unterstützen. Für den Konstrukteur gibt es dabei verschiedene Strategien, die sich kombinieren lassen: Einerseits kann man die unteren Schichten weniger zurücksetzen als die oberen<sup>1</sup>, andererseits lassen sich durch zusätzliche Last oberhalb der Unterstützungsfläche die Verhältnisse an der Waage günstig beeinflussen. Unter diesem Blickwinkel kann man etwa Eigenschaften und Schwierigkeiten verschiedener Bogenschnitte (Rundbogen, gotischer Bogen etc., vgl. auch [9]) ebenso diskutieren und verstehen wie vielerlei »Warums« anderer gemauerter Bauwerke, etwa bei gotischen Kathedralen oder nur aufgeschütteten Staudämmen und Deichen (sehr empfohlen dazu sei die Lektüre von [10]).

## Biegung

Einen entscheidenden Fortschritt bei oben gestellter Aufgabe erzielten die Schüler auf eigene Faust: Wenn die Konstruktion auf Biegung belastbar ist, sind deutlich größere und dabei stabilere Überstände möglich (vgl. Abb. 4; für den »Streichholzschachtel-Träger« wurden bei den einzelnen Schachteln die kleinen Schubladen mit den Hölzchen halb herausgeschoben und die Schachteln dann zusammengesteckt). Auch Biegung lässt sich unter dem Gesichtspunkt Druck-Zug genauer verstehen. Offenbar ist es schon aus geometrischen Gründen so (Abb. 5 a), dass auf der Außenseite eines gebogenen Elementes dieses gedehnt und auf der Innenseite gestaucht wird. Wir lesen ab, dass somit außen Zug und innen Druck herrscht. Im Detail sind die Verhältnisse komplizierter: Ein

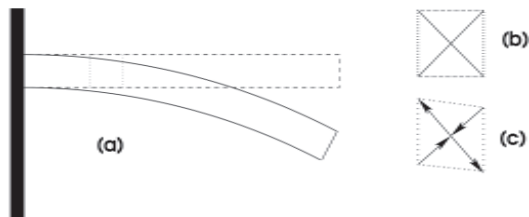
Abb. 4: Eine Lösung der Streichholzschachtel-Aufgabe, an die der Lehrer nicht gedacht hatte ... Aus einzelnen Schachteln ist ein weit auskragender Träger zusammengesetzt worden. Die Last auf der Hinterseite hält nicht mehr die Konstruktion zusammen, sondern hindert das Ganze nur am Vorneüberkippen.



Ausschnitt der unverformten Konstruktion verformt sich unter Biegung so, dass sich die eine Diagonale streckt, die andere staucht. Es gibt also innerhalb des Ausschnitts simultan Druck und Zug, jeweils quer zueinander – es herrscht Scherung (Abb. 5 b und c)! Das Gesamtbild der vorhandenen Druck- und Zugspannungen ist eine Art Durchsetzsein des Elementes mit Zug und Druck. Diese sind jeweils so gerichtet, dass versucht wird, den unverformten Zustand wiederherzustellen.<sup>2</sup> Als Träger einer einigermaßen locker sitzenden Hose kann man dazu folgendes Experiment machen: Man steht vom Stuhl auf und stellt einen Fuß auf die Sitzfläche. Am Oberschenkel des angewinkelten Beines erscheinen diagonale Falten, oben ist der Stoff gespannt, unten ist er (zu) locker oder gar zusammen geschoben ...

Ich stellte den Schülern die Frage, ob sich auch ein sehr kräftiger Betonträger unter einer sehr kleinen Last, vielleicht einer Fliege oder einer Maus, biegen würde. Eine ebenso originelle wie zwingende Antwort war diese: Ja, denn wenn er sich bei *einer* Fliege nicht biegt, dann auch nicht bei zweien, dreien ... beliebig vielen, also überhaupt nicht (was nicht sein kann). In unserem Kontext interessanter ist aber vielleicht ein anderes der genannten Argumente: Ja, denn es wird schließlich (wenn auch schwach) gedrückt! Hier werden Druck bzw. Zug und Verformung als verschiedene Seiten derselben Medaille erkannt und richtig gefolgert, dass jede Belastung auch verformt (vgl. auch [11, 12]).<sup>3</sup>

Abb. 5: Verformung eines Elementes unter Biegung: Das Element als Ganzes wird auf der Außenseite der Rundung gestreckt, auf der Innenseite komprimiert (a). Der markierte quadratische Ausschnitt (b) – und analog jeder andere – verformt sich dabei so, dass sich die eine Diagonale streckt, die andere dehnt (c).



## Theorie ...

Naheliegende und dabei höchst praxisrelevante Fragen an dieser Stelle sind: »Wie groß sind denn nun Druck und Zug bei der Biegung?« und »Wie belastbar ist ein gegebener Träger?«. Um der Antwort auf die Spur zu kommen (Ausführlicheres findet sich in [1]), betrachten wir einen »Kragbalken« unter Biegebelastung und teilen ihn in Gedanken in drei gleiche aufrechte Scheiben (*Abb. 6 a*). Es ist klar, dass jede der drei Scheiben auch in etwa ein Drittel der Last tragen wird, und auch, dass bei vier, fünf usw. Scheiben jeweils ein Viertel, Fünftel usw. zu tragen wäre – die Belastung durch Druck und Zug verteilt sich dann aber auch gleichmäßig auf die Breite. Für die Frage der Belastbarkeit muss man sich die Sache umgekehrt überlegen: Es gibt eine Zug- bzw. Druckspannung im Balken, die nicht überschritten werden soll oder kann. Je mehr solche Scheiben unter maximaler Spannung nebeneinander halten, desto größer kann die Last sein. Für die Belastbarkeit  $B$  gilt also, wenn  $b$  die Breite unseres Balkens ist,  $B \propto b$ .

Wie groß ist dabei Zug oder Druck für eine gegebene Last? Zur Abschätzung kann man statt eines Balkens zwei steife Winkel betrachten, die jeweils die halbe Last gemäß der Hebelgesetze halten müssen (*Abb. 6 b*). Für den oberen Winkel (er entspricht der oberen Hälfte des Balkens, die auf Zug hält), gilt dann mit den Balkenmaßen Höhe  $h$  und Länge  $l$

$$\frac{L/2}{Z} = \frac{h/2}{l}$$

oder  $Z = L l/h$ . Für die Belastbarkeit wäre wieder umgekehrt  $Z$  vorgegeben und  $L (= B)$  auszurechnen. (Für den Druck [grauer Pfeil] in der unteren Hälfte geht die Argumentation ganz analog.) Damit wäre  $B \propto \frac{bh}{l}$

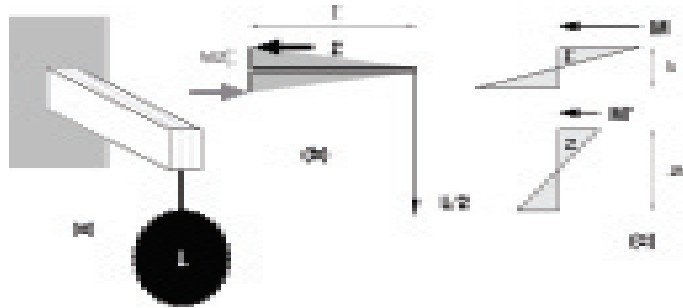
Der Gesamtzug  $Z$  verteilt sich aber im Balken über die gesamte obere Hälfte so wie die Dehnung des Materials, außen wird am meisten und in der Mitte des Balkens gar nicht gezogen (die sog. »neutrale Faser« wird weder gedehnt noch gestaucht, ist also spannungsfrei, vgl. *Abb. 6 c*). Die Maximalspannung  $M$  ergibt sich dann aus der Dreiecksfläche  $Z = Mh/4$ . Für einen gegebenen Gesamtzug  $Z$  ergibt sich die halbe Maximalspannung  $M'$ , wenn sich die Höhe, auf die sich der Zug verteilt, verdoppelt (*Abb. 6 c, unten*)! Mit anderen Worten: Der Gesamtzug  $Z$  im oberen Teil kann für eine bestimmte Materialbelastung  $M$  doppelt so groß werden, wenn  $h$  verdoppelt wird; damit ist dann auch der Balken doppelt so belastbar. Insgesamt haben wir

$$B \propto \frac{bh^2}{l},$$

der Balken ist also

- umso schwächer, je länger er ist, und
- bei gegebener Länge  $l$  und gegebenem Querschnitt  $A = bh$  (d. h. bei gegebener Materialmenge!) gemäß Formel umso belastbarer, je schmaler und dafür höher er geschnitten wird (die Formel heißt dann  $B \propto hA/l$ ).<sup>4</sup>

Abb. 6: Zur Abschätzung der Belastbarkeit: Die Last verteilt sich gleichmäßig auf die Breite des Balkens (a), der maximale Zug bzw. Druck ergibt sich aus Hebelgesetz (b) und einer geometrischen Betrachtung (c)



Diese Einsichten fließen in die technische Praxis bei vielen Gelegenheiten ein (Abb. 7).

### ... und Praxis

Die geschilderte Überlegung ist nun leider nur ein Teil der Wahrheit: Sammeln wir eine Reihe »Probekörper« in Haus und Garten: Müsli- und Schokoriegel, ein Bündel trockene Spaghetti, Streichhölzer, eine leere Klopapierrolle, Trinkhalme aus Plastik, Stroh- oder Grashalme (trocken und frisch), frisch geschnittene Äste und/oder Blattstengel, eine Fahrradspeiche ... und biegen jeweils, bis das Element nachgibt. Wie das Nachgeben passiert, teilt sich grob in dreierlei Varianten:

- Draht oder eine Speiche geben unter Verformung nach, das Material ist »duktil«;
- trockenes Holz oder ein Stangenweißbrot versagen zuerst auf der Zugseite, das Element reißt ein;
- der Trinkhalm oder die Papprolle knicken zuerst auf der Druckseite ein.

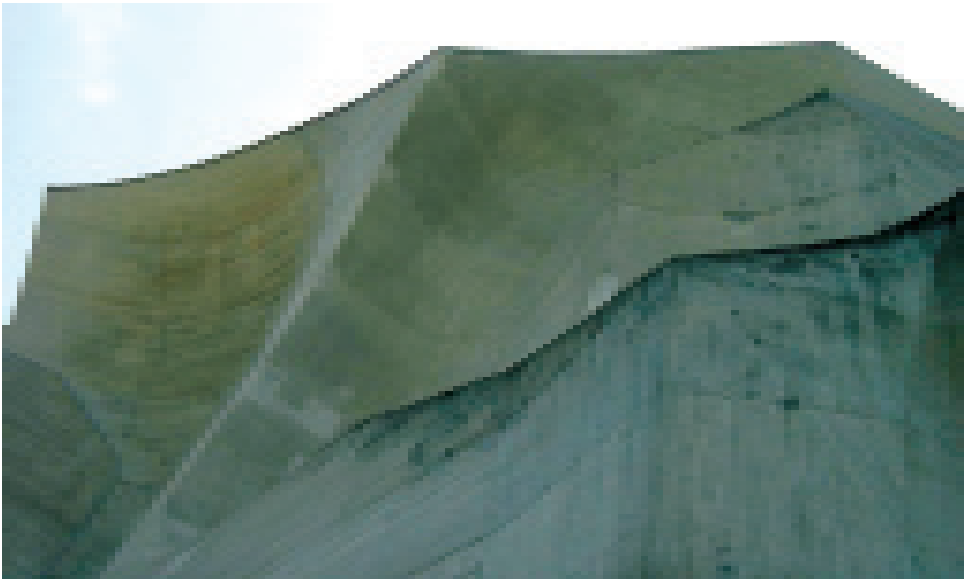
Eine Ausnahme bildet der frisch geschnittene Ast, er ist nicht nur erstaunlich biegsam,

Abb. 7: Stahlträger (unter einem Glasdach) für Biegebela- stung: Material sitzt dort, wo die größten Druck- und Zug- spannungen auftreten, also außen. Das »Hochformat« (oben links und rechts) ist sehr viel stabiler als das »Querformat« (rechts unten: Der Querschnitt des Regalbretts ist ca. halb so groß wie der des Treppenseitenteils, Letzteres trägt aber die zehnfache Last ohne merkliche Biegung!)



sondern versagt auch praktisch simultan auf Druck- und Zugseite.<sup>5</sup>

Oben hatten wir mathematisch überlegt, wie die Stabilität eines Balkens von dessen Geometrie abhängt; der Gedanke wurde für die Zugseite des Balkens entwickelt, und das gilt für die Druckseite ganz analog. Hier zeigt sich nun, dass noch mehr in Betracht gezogen werden muss: Wie widerstandsfähig sind denn die verwendeten Materialien gegen Druck oder Zug? Es eröffnet sich ein weites, alltagsnahes Feld an Fragen und Entdeckungen, also etwa: Beton widersteht Druck gut, Zug aber schlecht. Wo immer Betonteile auf Biegung belastet werden, also in Brücken, Treppen, über Fenstern und Türen usw., muss die Zugseite verstärkt werden. Gut eignen sich dafür Stahldrähte oder Stangen, die wiederum sehr widerstandsfähig gegen Zug (und schwach unter Druck) sind. Allerdings lauert hier eine Falle: Während die Statik nahelegt, die »Armierung« möglichst weit außen einzubauen, erweist die Praxis, dass der Stahl dort der Korrosion ausgesetzt ist. Der Trick mit der Armierung erlaubt freies Gestalten mit Beton (Abb. 8) und das »Vorspannen« von Elementen, so dass eine definierte Vor-Verformung die Verformung unter der eigenen Last kompensiert und die Elemente nicht »durchhängen«.



*Abb. 8: Das Goetheanum in Dornach bei Basel ist eine der ersten großen Stahlbetonbauten. Das damals neue Material erlaubt offenbar eine freie plastische Gestaltung des Baukörpers, so frei, dass die statische Planung damals an ihre Grenzen stieß; nach knapp 80 Jahren saurem Regen sind die Probleme mit Korrosion an der Armierung drängend, aber größtenteils noch immer ungelöst.*

## Noch einmal: Druck und Zug

Das Versagen eines Elementes unter Biegung haben wir schon kennen gelernt. Wie sieht denn ein typisches Versagen unter Druck bzw. Zug aus? Das Versagen unter Biegung war natürlich gerade ein Versagen auf der Druck- oder Zugseite gewesen, und so kennen

wir auch schon typische Beispiele dafür: Knickung (Abb. 9) und Zerreißen. Das Thema ist allerdings ebenso spannend wie groß (und soll hier nur angedeutet werden, vgl. [10]). Für das Versagen unter Druck gibt es im Prinzip zwei verschiedene »Modi«, nämlich Versagen durch »Zerbröseln« des Materials (»crushing«) und durch »Knickung« des Elementes (»buckling«). Speziell Knickung verdient mehr Aufmerksamkeit, denn es gibt wiederum zwei Typen. Zum einen die sogenannte Euler-Knickung, die von der Gesamtgeometrie abhängt: Wenn man ein auf Druck belastetes Element bei sonst gleichen Abmessungen doppelt so lang auslegt, wird es viermal anfälliger gegen diese Art Knickung (»Faktor 12«). Bei dünnwandigen Konstruktionen kommt auch »lokales« buckling vor (»Brazier-Knickung«, etwa nach dem Schlag auf eine stehende Getränkedose). Versagen unter Zug geht im Wesentlichen entweder über Überdehnung von Materialien (»Fließen« von Drähten, Käsefäden ...) oder über Zerreißen. Hier kommen Themen wie die Schwächung durch vorhandene Defekte und Spannungskonzentrationen durch ungünstige Formung von Bauteilen ins Spiel [13].

Was lässt sich aus alledem an Gesichtspunkten für die Statik gewinnen? Ein paar Beispiele: Während die Länge eines Bauteils für die Zugbelastung kaum eine Rolle spielt, ist sie für die Druckbelastung von entscheidender Bedeutung. Ein Druckelement wird für die nötige Knicksteifigkeit im Verhältnis zum Querschnitt nicht zu lang bzw. hoch sein, eben so, wie Backsteine es zeigen. Ein Zugelement kann lang und schlank sein, man wird aber scharfe Kurven oder Knicke, also jede zusätzliche Verformung des Materials vermeiden wollen (jeder Knoten vermindert die Zugfestigkeit eines Seiles um mindestens ein Viertel!) und muss der Befestigung besondere Aufmerksamkeit schenken. Für Biegeelemente ist die Materialwahl ein entscheidender Punkt: Während Holz oder Stahl auf Druck und Zug belastbar sind, gibt es »unsymmetrische« Materialien, so das erwähnte Beispiel Beton – oder auch Papier (Abb. 10).

Werfen wir noch einmal einen Blick zurück: Unter der Fragestellung »Statik« lässt sich offenbar schön Geometrie treiben oder rechnen, doch die Praxis zeigt, dass anderes mit



Abb. 9: Dieser Dachträger einer alten Holzbaracke beginnt unter Druck nachzugeben und knickt nach links ein (Pfeil, vgl. Kasten mit einem intakten Träger). Hier zeigt sich andererseits die Stärke von Holz als Baumaterial: es ist ein außerordentlich »geduldiges Material« ...



Abb. 10: Bilder des jüngsten Papierbrückenwettbewerbs. Der »Abgrund« ist breiter als ein A4-Blatt im Hochformat; gemessen wird durch Zug mit einer Federwaage: Es gilt der letzte Wert, bei dem die Konstruktion hält. Die »Brücke« im großen Bild besteht aus zwei übereinander geklebten Trägern mit quadratischem Querschnitt; die Probleme beginnen, als der Bügel für die Federwaage auf der Oberseite einschneidet (oben rechts) – ein Verteilen der Last hätte hier geholfen. Rechts daneben liegt schon eine gänzlich andere Konstruktion bereit; kann man von den drei Rohren mehr erwarten (unten rechts)? Eine gelungene Konstruktion hält 1,5 kg und mehr aus! Spaß haben hier die Jungs, gewonnen haben allerdings zwei stille Mädchen . . .

in Betracht gezogen werden muss: Welches Material habe ich zur Verfügung, wie greift die Last an, welchen Aufwand kann ich treiben usw.? Zwar lässt sich das Kräftegeflecht in einem Fachwerk mathematisch verstehen, dies ist aber nur wie eine Vorstufe der realistischen Situation; wir lernen, worauf es »im Prinzip« ankommen kann, aber nicht, wie man es wirklich macht. In der Papierbrücken-Aufgabe ist eine straff gerollte Röhre kaum zu schlagen. Der optimale Durchmesser ergibt sich aus dem Abwägen von Querschnittsvergrößerung, die die Spannungen vermindert (siehe oben) und besserer Wandsteifigkeit (Wanddicke). Aber das muss man offenbar ausprobieren.

## Menschenkunde

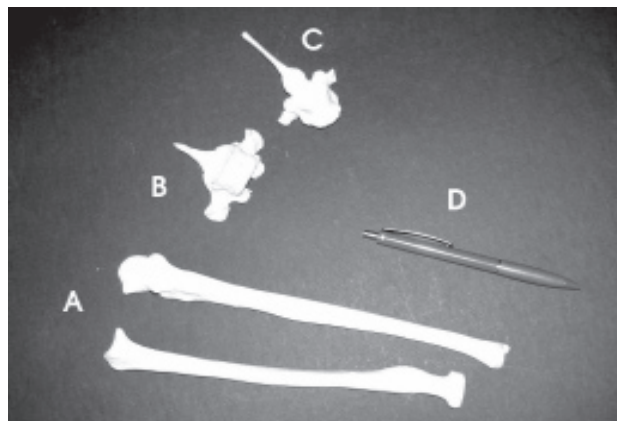
Ganz ohne Technik oder Mathematik findet man Mechanik (und damit auch Statik) in Vollendung am Bewegungsmenschen. Dieses Thema scheint in vielerlei Hinsicht praktisch beliebig vertiefbar (vgl. auch dazu [10, 13]): Man kommt ins Staunen angesichts typischer Knochenformen (Abb. 11) oder etwa der »Ausgeklügeltheit« z. B. der Rückenmuskulatur. Für den Unterricht gibt es hier ein vielfältiges Feld von Beispielen und

einige Berührungsflächen mit anderen Fächern, von der Biologie bis zur Eurythmie. Am lebendigen und »tätigen« menschlichen Leib ist zwar nichts »statisch«, aber an ihm ist nahezu jedes Detail unter dem Blickwinkel »Mechanik« sinnvoll. Die Sache wird dabei im Denken von (uns) Zeitgenossen allerdings schnell zur Karikatur: der Mensch als »gut konstruiertes technisches Objekt«. Der unbefangene Blick zeigt das Umgekehrte, nämlich Kräne, Bagger oder Gerüste gleichsam als »technische Erweiterungen des Leibes«; die Gemeinsamkeit der dahinter stehenden Prinzipien ist nicht die Grundsätzlichkeit der technischen Perspektive, sondern sie ist die Gemeinsamkeit des Sich-auseinandersetzen-Müssens mit den irdischen Verhältnissen; äußerlich als Technik und Statik, als Mensch in der eigenen Leiblichkeit und deren Entwicklung (was eng zusammenhängt, vgl. [15]). Der Bewegungsmensch ist eigentlich ein erstaunliches Kunstwerk und der sich bewegende Mensch ein Künstler!

Die mathematische Behandlung liefert (vgl. oben) eher das schematische, überblicksartige Bild statischer Verhältnisse. Das äußerst spannende und breite Thema der Materialkunde fehlt in dieser Darstellung; weniger noch als Druck und Zug erschließt es sich durch mathematisches Herangehen, denn es ist eine zutiefst praktische Angelegenheit. Die Rolle der Mathematik war hier und an anderer Stelle [6, 7] schon mehrfach Thema, meist mit dem Anliegen, sie nicht als Inhalt physikalischer Verhältnisse aufzufassen, sondern als Sprache für die Struktur der Sache, denn erst wenn die Sache verstanden ist, bekommen die Formeln Sinn. Gerade eine »unmathematische Behandlung« kann anregend und einsichtsvoll sein ...

Nimmt man ernst, dass Mechanik, sofern sie Physik sein soll, kein Thema ist, das sich mathematisch erschließt, so stellt sich die Frage, was daraus an leitenden Gesichtspunkten für den Physikunterricht in der elften Klasse (und letztlich für den ganzen Bogen der Oberstufenphysik) folgt. Mechanik (und insbesondere Statik) bietet einen Weg an, der das eigene Im-Leib-Stecken in eine wach-bewusst-verstehende Beziehung zu den irdischen Verhältnissen setzt. Die Auseinandersetzung mit den Themen der elften Klasse: Elektrizität, Magnetismus, Atomismus usw. könnte sich daraus als weitere Veräußerlichung des Gesichtspunktes entwickeln: Die Phänomene werden äußerlicher, weil technischer und leib-ferner, sind aber der Sache nach nicht mathematischer als Mechanik. Diese Perspek-

*Abb. 11: Die menschlichen Unterarmknochen (A) zeigen im wesentlichen das Aussehen von Zugelementen, der Brustwirbel (B) ist im „Druckteil“ flach und breit (und erstaunlich leicht!), die Dornen für den Muskelansatz zeigen in Zugrichtung längliches Profil. Der Brustwirbel vom Schaf ist weniger »druckhaft« geformt, der Kamm dafür deutlich größer und massiver. Zum Größenvergleich ist ein Kugelschreiber (D) mit abgebildet.*



tive weist auf eine Optik-Epoche, die den Beziehungs- und Zusammenhangscharakter des Lichts zum Thema hat. Optische Phänomene werden wieder direkt sinnlich zugänglich, das Erlebnis des Sich-der-Welt-Gegenüberstellens wird aber gerade dadurch noch einmal gesteigert.

**Zum Autor:** Dr. Florian Theilmann, Jahrgang 1967, Studium und Promotion in Physik, berufsbegeleitendes Lehrerseminar in Kassel. 1998/99 Oberstufenlehrer in Weimar, jetzt wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungsinstitut am Goetheanum in Dornach.

## Anmerkungen:

- 1 Ein solcher Stapel macht dann eine geschwungene Stufenlinie – lässt er sich (perfekte Bausteine etc. vorausgesetzt) beliebig weit nach vorne bauen?
- 2 Die Cremona-Konstruktion [1] für ein herausragendes Fachwerk zeigt übrigens die analoge Situation, aufgelöst in Druck und Zug einzelner Elemente!
- 3 Bei H.-C. Ohlendorf habe ich folgenden, sehr eindrucksvollen Versuch dazu kennengelernt: Man befestigt im Stockwerk unter einem begehbaren Gang oder Zimmer einen Holzstab (z.B. 1 x 1 x 200 cm) stabil an der Decke und stellt einen zweiten Holzstab auf den Fußboden. Mit zwei Gummibändern klemmt man eine Stricknadel o.ä. zwischen die Stäbe und befestigt einen Zeiger. Auch die leichteste Person, die über dem Aufbau umgeht, erzeugt messbaren Ausschlag. Die Decke gibt beim Auftreten kurz nach!
- 4 Diese Überlegung kannten die Schüler offenbar noch nicht, als die Streichholzbrücke aus Abb. 4 konstruiert wurde. Der Träger wäre hochkant bedeutend fester und damit auch steifer gewesen!
- 5 Dies ist offenbar ein Merkmal für eine effiziente Konstruktion: Solange etwa immer die Druckseite nachgibt, lässt sich auf der Zugseite noch Material sparen.
- 6 Hier sei an Rudolf Steiners Unterscheidung von Arithmetik-Geometrie-Kinematik (»Phronomie«) einerseits und »Eigentliche Mechanik« andererseits erinnert [14]. Dies ist eine pragmatische Lesart davon: Bis zur Kinematik komme ich, ohne hinzuschauen, wie es wirklich ist. Echten Spannungen in echten Gegenständen gegenüber braucht es eine Auseinandersetzung mit der Welt, so wie sie ist.

## Literatur

- [1] Manfred von Mackensen, Heinz-Christian Ohlendorf: Kräfte – Eine Einführung. Pädagogische Forschungsstelle, Kassel 2000
- [2] Florian Theilmann: Mechanik anders greifen, in: »Erziehungskunst«, H. 2/2002, S. 154 ff.
- [3] Florian Theilmann: Auf Galileis Spuren, in: »Lehrrundbrief« 72, Juni 2001, S. 25 ff.
- [4] Florian Theilmann: Zu den Begriffen Kraft und Energie, in: »Lehrrundbrief« 74, März 2002, S. 20 ff.
- [5] Florian Theilmann: Energie und ihr Umfeld, unmetaphysisch bedacht, in: »Erziehungskunst«, H. 11/2002, S. 1205 ff.
- [6] Florian Theilmann: Stoßversuche mit rollenden Kugeln – Masse, Impuls und Bewegung, in: »Lehrrundbrief« 77, März 2003, S. 21 ff.
- [7] Florian Theilmann: Blick in den Spiegel, in: »Erziehungskunst«, H. 7/8, 2003, S. 866 ff.
- [8] Georg Maier: Zum Erscheinen der Qualitäten Druck und Zug in der Mechanik, in: »Elemente der Naturwissenschaft« 10, 1969, S. 1 ff.
- [9] Georg Maier: Bauformen als Ausdruck mechanischer Kräfte, in: »Elemente der Naturwissenschaft« 27, 1977, S. 22 ff.
- [10] James Edward Gordon: Structures or Why Things Don't Fall Down. Penguin Books, London 1978
- [11] Leopold Müller-Salzburg: Spannungen und Deformationen in der technischen Mechanik – ein goethenistischer Versuch, in: »Elemente der Naturwissenschaft« 47, 1986, S. 1 ff.
- [12] Georg Maier: Zum Umgang mit dem Begriff der Kraft, in: »Elemente der Naturwissenschaft« 47, 1986, S. 8 f.
- [13] James Edward Gordon: The New Science of Strong Materials or Why You Don't Fall Through the Floor. Penguin Books, London 1991
- [14] Rudolf Steiner: Geisteswissenschaftliche Impulse zur Entwicklung der Physik – Erster naturwissenschaftlicher Kurs, Dornach <sup>3</sup>1987, GA 320
- [15] Rudolf Steiner: Von der Natur zur Unter-Natur, Mitgliederbrief vom März 1925, in: Anthroposophische Leit-