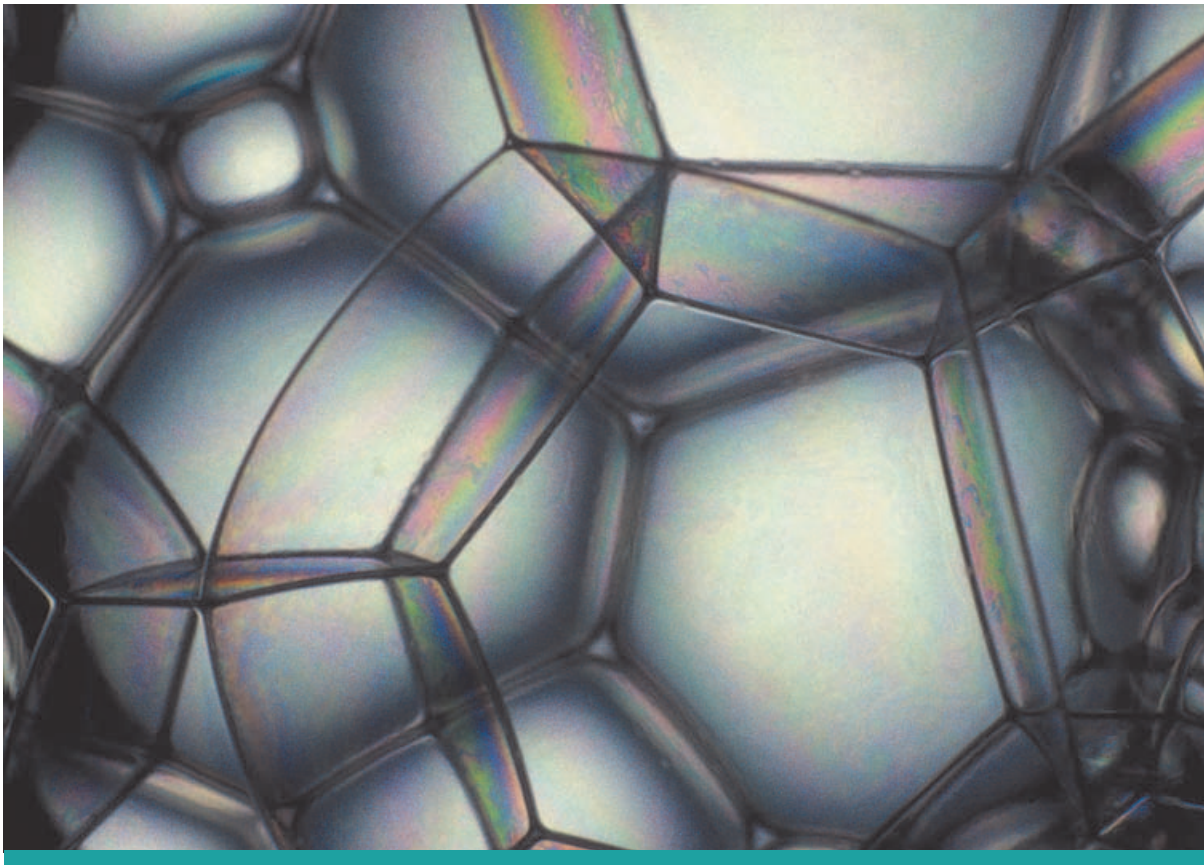


# Entwerfen im Leichtbau

Warum Leichtbau? könnte man fragen, und eine Antwort jenseits der Erkenntnis der Notwendigkeit von Leichtbau im Bauwesen als Voraussetzung zur Überbrückung von Grenzhöhen und Grenzspannweiten würde lauten: Weil es keine bessere Schule für das Verstehen der tragenden Konstruktionen in der lebenden und der nicht lebenden Natur sowie in der von Menschen gestalteten Welt gibt.

Die Suche nach den leichten Konstruktionen ist die Suche nach den Grenzen. Das Entwerfen der leichtestmöglichen Konstruktionen ist das Herantasten an das physikalisch und das technisch Machbare. Es hat zu tun mit der Ästhetik des Minimalen, mit der Suche nach dem Unbekannten und mit dem Überschreiten von durch Wissenschaftsdisziplinen gezogenen Grenzen.



Bei Konstruktionen, die große Spannweiten überbrücken, die große Höhen erreichen oder die sich bewegen bzw. die bewegt werden, ist die Reduktion des Eigengewichtes ökonomischer Zwang, häufig genug auch Voraussetzung für die Realisierbarkeit selbst. Bei den eher alltäglicheren Konstruktionen kleinerer Abmessungen, bei temporären und ephemeren Bauten bedeutet Leichtbau eine Ersparnis an eingesetzter Masse, zumeist auch an eingesetzter Energie. Spätestens hier scheint der ökologische Aspekt auf: Leicht zu bauen wird zur Haltung.

Konsequenter Leichtbau bedingt deutliche Modifikationen in den tradierten Strukturen des Entwurfsprozesses: Die Festlegungen der Systemgeometrie, die Ausformung und die Proportionierung der tragenden Strukturen sowie deren Materialbelegung haben primär der Forderung nach Gewichtsersparnis und erst sekundär denjenigen Forderungen zu folgen, die sich beispielsweise aus architektonischen Überlegungen, aus Überlegungen zur Herstellungstechnik und aus Kostenüberlegungen ergeben. Darüber hinaus lässt sich der Entwurf gewichtsminimaler Tragsysteme nicht auf der Basis einer Addition bzw. gekonnter Kombination von Grundbausteinen wie Stützen, Balken, Bögen, Platten, Scheiben etc., allgemein gesagt also geometrisch determinierter Bauteile, gestalten. Vielmehr entwirft man im Leichtbau räumliche Kräftepfade, also ausschließlich statisch konditionierte Strukturen, die man anschließend mit geeigneten Werkstoffen belegt. Entwerfen als Projektion eines im Geist auf unterschiedlichste Weise geschaffenen, gesehenen Bildes, zusammengesetzt aus Bildern, Worten und Empfindungen, aus teilweise nichtverbaler, nichtvisueller oder nichtakustischer Information, wird im Leichtbau durch Einflechten der erstrangigen Forderung nach Gewichtsminimalität um einen weiteren, physikalisch fassbaren Komplexitätsgrad gesteigert.



Ein Beispiel aus der Natur: Das Netz einer Spinne als vorgespanntes, ausschließlich zugbeanspruchtes Fadensystem

## 2. Kategorien im Leichtbau

Es gibt drei grundlegend unterschiedliche Kategorien im Leichtbau, die beim Entwerfen von Leichtbaukonstruktionen auf unterschiedliche Art miteinander kombiniert werden: Materialeichtbau, Strukturleichtbau und Systemleichtbau. Ihre nachfolgende Erläuterung und Diskussion soll einer ersten Skizzierung der Leichtbauprinzipien dienen.

### 2.1 Materialeichtbau

Unter Materialeichtbau versteht man die Verwendung von Baustoffen mit einem günstigen Verhältnis von spezifischem Gewicht zur ausnutzbaren Festigkeit, zur ausnutzbaren Dehnung, zur ausnutzbaren Steifigkeit etc.. Ein Leichtbauwerkstoff ist dementsprechend durch mehr als eine Kennzahl, z.B. den Quotienten Steifigkeit/spez. Gewicht, gekennzeichnet; die Klassifizierung von Werkstoffen hat damit stets in einem mehrdimensionalen Feld zu erfolgen. Welcher Kenngrößenquotient maßgebend wird, hängt davon ab, ob die Dimensionierung eines Bauteils auf Festigkeit, Steifigkeit, Duktilität, Dämpfung, Stabilität etc. erfolgt. Zusätzlich ist gerade bei den Leichtbauwerkstoffen wie Kunststoffen oder Alu-

miniumlegierungen zu beachten, dass diese nicht nur gegen Spitzenwerte der Beanspruchung, sondern auch gegen ständig vorhandene Lasten, in ihrer zeitlichen Einwirkung zu akkumulierende Lastkollektive, gegen Grenzwerte der akkumulierten plastischen Deformationen etc. zu dimensionieren sind. Eine differenzierte Betrachtungsweise ist also nötig. Die Verhältnisse sind de facto komplexer als die immer wieder in die Diskussion gebrachten einfachen Verhältniszahlen über die „Leistungsfähigkeit“ von Werkstoffen, beispielsweise die sog. „Leichtbaukennzahl“, der „Bic“ oder die „Reißlänge“, dies suggerieren.

### 2.1.1 Der Bauweisenbegriff

Materialleichtbau muss prinzipiell unter Einbeziehung der konstruktiven Durchbildung der Bauteile diskutiert werden. Es genügt nicht, eine günstige Gesamtgeometrie und eine gewichtsoptimale Werkstoffbelegung eines Bauteils zu entwickeln, um danach aufgrund der teilweise erheblichen konstruktiven Probleme in den Kräfteinleitungsbereichen Massenerhöhungen infolge komplizierter und massebehafteter Details hinnehmen zu müssen. Den Fragen der Detaillierung, der Fügetechnik und der Werkstoffkombinationen kommt gerade im Leichtbau besondere Bedeutung zu.

Bedauerlicherweise fehlen im Bauwesen bis heute sowohl eine werkstoffübergreifende Konstruktions-, Entwurfs- und Bemessungslehre wie auch durchgehende Konzepte zum Recycling der Bauten und ihrer Einzelteile. Für die Behandlung der Fragen der Detaillierung, Fügetechnik und Werkstoffkombination, ansatzweise auch denen des Recycling im Leichtbau, hat der Autor deshalb bereits 1990 den in der Flugzeug- und Kraftfahrzeugtechnik angewandten Bauweisenbegriff in das Bauschaffen eingeführt. Als Bauweise wird dabei die Art und Weise bezeichnet, in der einzelne Werkstoffe geformt und miteinander zu Bauteilen (höhere Fügungsebene: Tragwerke) verbunden werden.

Die Einteilung in:

- Differentialbauweisen
- Integralbauweisen

- Integrierende Bauweisen
- Verbundbauweisen

ist Grundlegung für werkstoffübergreifendes Entwerfen und Konstruieren. Der Bauweisenbegriff erlaubt eine schnelle Bewertung der statisch-konstruktiven Eigenschaften eines Bauteils sowie der Besonderheiten seines Montage-, Demontage- und Rezyklierungsverhaltens.

Ein in Differentialbauweise hergestelltes Bauteil besteht aus mehreren, vergleichsweise einfach gestalteten Elementen. Die gegebenenfalls aus unterschiedlichen Werkstoffen bestehenden Elemente werden durch punktförmige Verbindungen zu Bauteilen gefügt. Die punktuelle Fügung ist prinzipiell mit Spannungskonzentrationen im Verbindungsbereich verbunden, ein Effekt, den man im Leichtbau natürlich gern vermeiden würde und der sich nur mit entsprechend aufwendigen Methoden, wenn überhaupt, in seinen Auswirkungen reduzieren lässt. Dem grundlegenden statisch-konstruktiven Nachteil der Spannungskonzentration im Fügungsbereich stehen die Vorteile der einfachen Fügung (auch auf der Baustelle) und der optimalen Anpassbarkeit der unterschiedlichen Elemente an das jeweilige Anforderungsprofil entgegen. Demontage- und Rezyklierverhalten in Differentialbauweise erstellter Tragwerke sind grundsätzlich vorteilhaft, da punktuelle Verbindungen üblicherweise leicht lösbar sind und die anschließende Sortierung der Ein-Stoff-Elemente einfach ist.

Ein in Integralbauweise hergestelltes Bauteil ist ein zu einem Stück geformtes Einstoff-Bauteil. Mit entsprechenden Technologien wie Gießen, Schmieden oder spanabhebenden Verfahren können dabei sehr kompliziert geformte Bauteile hergestellt werden. Bauteilgeometrie und Wandstärkenverlauf sind optimal an den Kraftfluss anpassbar, wodurch eine sehr homogene Werkstoffausnutzung unter nahezu völligem Ausschluss von Spannungskonzentrationen innerhalb des Bauteils erzielt wird. Da ein in Integralbauweise hergestelltes Bauteil nur aus einem Werkstoff besteht, besitzt es entsprechend positive Rezyklieigenschaften.

Mit der integrierenden Bauweise versucht man, die fertigungstechnisch bedingte Beschränktheit der Stückgrößen durch kontinuierliches Fügen der Einzelemente zu einem quasi-homogenen Bauteil zu umgehen. Mit Fügetechniken wie Kleben oder Schweißen wird eine entsprechende Homogenisierung der Spannungsfelder innerhalb des Bauteils möglich. Das Rezyklierverhalten ist je nach Fügungsart unterschiedlich. Natürlich sind insbesondere Schweißverbindungen positiv zu bewerten; die Verwendung mengenmäßig hoch dosierter Leime und Kleber hingegen kann unter Umständen zu Rezyklierproblemen führen.

Bei der Verbundbauweise werden Bauteile aus mehreren unterschiedlichen Werkstoffen zu einem Stück zusammengesetzt. Im Gegensatz zur Integralbauweise werden jedoch mehrere Werkstoffe zu einem Mehrstoff-Bauteil kombiniert.

Auswahl und Anordnung der Werkstoffe erfolgen dabei nach deren Eigenschaftsprofil und in Abhängigkeit vom Beanspruchungsverlauf innerhalb des Bauteils. Dies erlaubt die sehr effiziente Gestaltung von tragenden Teilen. Die Verbundbauweisen beinhalten die Kategorien

- Allgemeine Verbundbauweise,
- Faserverbund- und Hybridbauweise sowie
- Sandwichbauweise

Verbundkonstruktionen können genau dann sehr effizient und leicht gestaltet werden, wenn die eingesetzten Werkstoffe das an das Bauteil gestellte Anforderungsprofil im Verbund, also gemeinsam (!) bestmöglich erfüllen. Der Qualität des Verbundes zwischen den Werkstoffen, also z.B. der Qualität des Verbundes zwischen Armierungsfaser und Matrix, kommt dabei eine entscheidende Bedeutung zu: Je besser der Verbund, desto kürzer können beispielsweise die Krafteinleitungslängen gestaltet werden. Dies führt zu Gewichtseinsparungen. Andererseits kann eine zu hohe Haftung zwischen den Verbundpartnern zu einem ungünstigen Lastabtragungsverhalten führen. Eine

hohe Verbundwirkung führt darüber hinaus dazu, dass sich das Zweistoff-Bauteil nur schwer in seine Ausgangsstoffe zerlegen lässt. Am Beispiel des weltweit mengenmäßig am meisten verbreiteten Verbundwerkstoffes, des Stahlbetons, lässt sich dies sehr anschaulich erläutern: Infolge der extrem schlechten Verbundwirkung zwischen Bewehrungsstahl und Beton werden signifikant größere Mehr-längen (d.h. Mehrmassen), die sog. Verankerungslängen, an Bewehrungsstahl erforderlich, um den Kraftübertrag von der Betonmatrix in den Bewehrungsstahl bzw. umgekehrt zu gewährleisten. Diesem so gut wie nie ausgesprochenen, ökonomisch wie ökologisch nicht zu unterschätzenden Nachteil steht der große Vorteil eines einfachen Recyclings durch ein - infolge des schlechten Verbundes - prozesstechnisch einfaches Trennen der beiden Verbundpartner Beton und Stahl gegenüber.



02

## 2.2 Strukturleichtbau

Geht man von der Ebene der Werkstoffe sowie deren Kombination und Fügung zu derjenigen der Bauteile und der aus ihnen zusammengesetzten Tragwerke über, so stellt hier der Strukturleichtbau die Aufgabe, ein gegebenes Beanspruchungskollektiv mit einem Minimum an Eigen-

*Strukturleichtbau: Die „Stuttgarter Schale“ ist lediglich 10 mm dick. Sie stellt mit einem Bauteildicken/Spaltenverhältnis von 1/850 die dünnste je gebaute Glasschale dar.*

## SUMMARY

*Lightweight construction means the search for limits. The design of the lightest constructions approaches the physically and the technically feasible. Lightweight construction often is not only a precondition for demanding constructions; it also significantly reduces materials and energy employed and has therefore clear ecological consequences. The use of adaptive systems will further push the limits of the lightweight construction in the future and, at the same time, will enable optimizations in the area of conventional structures or components.*

*Leichtbau ist die Suche nach den Grenzen. Das Entwerfen der leichtestmöglichen Konstruktionen ist das Herantasten an das physikalisch und das technisch Machbare. Leichtbau ist bei vielen anspruchsvollen Konstruktionen nicht nur eine Grundvoraussetzung für deren Realisierbarkeit; er bedeutet in der Regel auch eine markante Ersparnis an eingesetzter Masse und Energie und hat somit klare ökologische Auswirkungen. Der Einsatz adaptiver Systeme wird in den kommenden Jahren die Grenzen des Leichtbaus noch weiter hinausschieben und gleichzeitig Optimierungen im Bereich konventioneller Strukturen oder Bauteile ermöglichen.*

gewicht der Konstruktion unter Einhaltung einer Reihe vorgegebener Restriktionen zu gegebenen Auflagerpunkten zu leiten. Strukturleichtbau beschäftigt sich also mit Art, Anzahl und Anordnung der Bauteile, aus denen eine tragende Struktur minimalen Gewichts gebildet wird. Strukturleichtbau bedeutet deshalb letztendlich die Lösung eines Minimierungs-, d.h. Optimierungsproblems in einem mit Restriktionen versehenen Entwurfsraum. Das Tragwerk hat dabei ausschließlich die Funktion der Abtragung von Lasten.

### 2.3 Systemleichtbau

Unter Systemleichtbau versteht man das Prinzip, in einem Bauteil neben der lastabtragenden auch noch andere, wie zum Beispiel raumabschließende, spei-

chernde, dämmende oder vergleichbare Funktionen zu vereinigen. Die tragenden Bauteile werden somit multifunktional, eine im Bauwesen immer wieder, wenn auch nicht oft genug bewusst benutzte Lösung. Viele mögliche Anwendungsbereiche sind noch unerschlossen, wie das Beispiel einer Beteiligung der Glaseindeckung filigraner Stabkuppeln an der Lastabtragung zeigt – ein Konstruktionsprinzip, das man in der Kraftfahrzeugtechnik bereits vorfindet: Dort werden zunehmend die Glasscheiben als aussteifende Elemente herangezogen.

### 3. Entwerfen im Leichtbau

Entwerfen im Leichtbau bedeutet primär die Entwicklung räumlicher Kräftepfade und deren anschließende Materialisierung unter der Zielsetzung, ein möglichst niedriges oder sogar minimales Gewicht der Konstruktion zu erzielen. Gewichtsarme Konstruktionen lassen sich aber, von wenigen Sonderfällen abgesehen, nicht mehr mit den tradierten Entwurfs-

methoden, also quasi „von Hand“ entwickeln. Die tradierten Entwurfsmethoden ermöglichen zwar die Darstellung oder gar die Entwicklung geometrisch komplizierter Gebilde, versagen jedoch völlig bei der Aufgabe, im Gleichgewicht befindliche, gewichtsminimale räumliche Kraftsysteme zu entwickeln.

Wo immer man sich das Ziel setzte, gewichtsminimale Konstruktionen oder auch Konstruktionen, bei denen die tragende Struktur nur ganz bestimmten Spannungszuständen – wie beispielsweise einer ausschließlichen Druckbeanspruchung – ausgesetzt wird, zu entwerfen, verwendete man zumeist individuell entwickelte Methoden. Die Seifenhautstudien von Plateau im Zusammenhang mit der Erforschung der Minimalflächen, die berühmten Hängemodelle des spanischen Baumeisters Antonio Gaudi, die er unter anderem zur Erarbeitung der Geometrie der Kirche Sagrada Familia in Barcelona verwendete, die Analogieschlüsse von d'Arcy Thompson, in denen er das Tragverhalten lebender und nicht lebender Objekte analysierte, die Minimalstrukturen von Maxwell [1] und Mitchell [2] oder auch die berühmten Hängeversuche des Schweizer Ingenieurs Heinz Isler gehören zur Vielzahl der im Verlauf vieler Jahrzehnte unabhängig voneinander entwickelten Insellösungen.

Es war das Verdienst von Frei Otto, die auf experimentellem Arbeiten basierenden Methoden zusammenzutragen, diese um eine Reihe weiterer Methoden zu ergänzen und erstmals eine Kategorisierung der unterschiedlichen, von Frei Otto als „Formfindungsmethoden“ bezeichneten Methoden vorzulegen [3]. In den seither vergangenen fünf Jahrzehnten wurden diese Methoden insbesondere an der Universität Stuttgart detailliert untersucht, ergänzt und weiterentwickelt. Dass der Begriff „Formfindung“ etwas unglücklich gewählt ist, wird zwischenzeitlich allgemein akzeptiert. Der Term „Finden“ beinhaltet letztlich einen Zufallscharakter, der bei diesen nachstehend ausführlicher beschriebenen und wissenschaftlich allesamt fundierten Methoden, die man besser als „Formentwicklungsmethoden“ bezeichnet hätte, definitiv nicht vorhanden ist.

Neben den experimentellen Methoden haben die sog. mathematisch-numerischen Formfindungsmethoden in den vergangenen Jahren, insbesondere auch aufgrund der Leistungs- und Preisentwicklung in der Computertechnik, enorm an Wichtigkeit gewonnen. Die grundlegenden Arbeiten hierzu entstanden bereits in den sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts, ebenfalls an der Universität Stuttgart. Hier wurden die wenigen bis dato bekannten analytischen Methoden zur Entwicklung gewichtsminimaler oder spannungsrestringierter Strukturen aufgearbeitet und, insbesondere durch die bahnbrechenden Arbeiten von Linkwitz und Argyris, grundlegend erweitert.

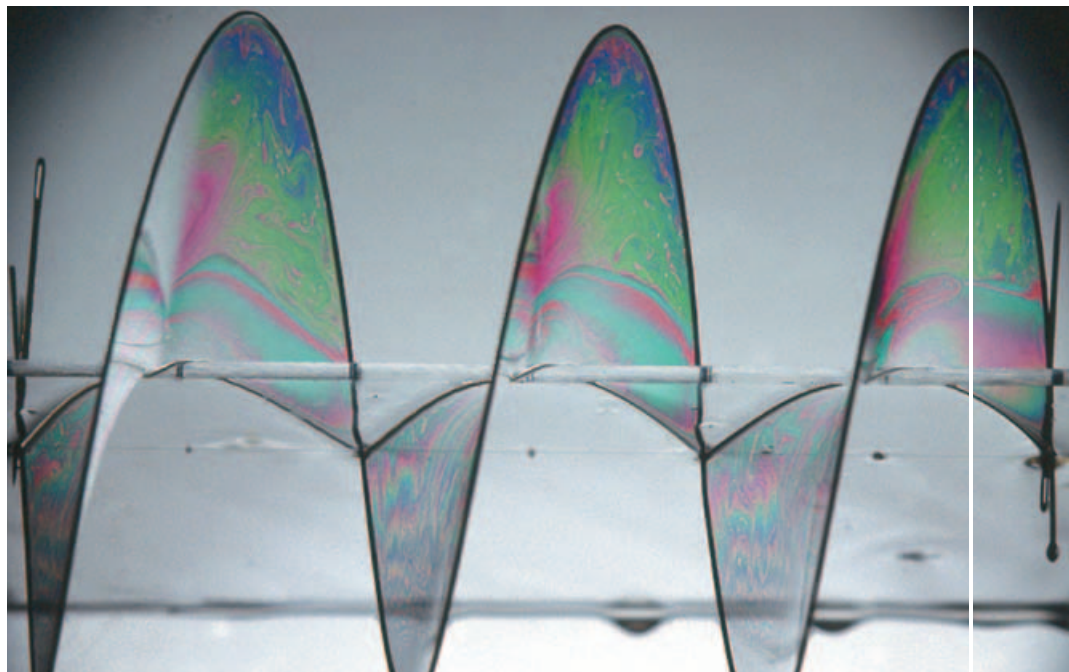
### 3.1 Experimentelle Formfindungsmethoden

Unter experimentellen Formfindungsmethoden versteht man die Gruppe derjenigen Methoden, bei denen die tragende Struktur einer Konstruktion durch Zuhilfenahme geeigneter physikalischer Modelle bei gleichzeitiger Beachtung von Maßstabs- und/oder Modelleffekten entwickelt wird.

Üblicherweise werden die experimentellen Methoden in folgende Gruppen eingeteilt:

- Hängemodelle
- mechanisch vorgespannte Strukturen
- pneumatisch gebildete Formen
- Fließformen

Während die Hängemodelle, die mechanisch aufgespannten und die pneumatisch aufgespannten Strukturen einer Einteilung nach der Art der Lastaufbringung folgen, stellt die Gruppe der Fließformen eine dazu nicht kompatible Kategorie dar. Fließformen, die mit Werkstoffen realisiert werden, die während der Formfindung ausgeprägt viskoelastisches bzw. viskoplastisches Verhalten zeigen, sind entsprechend mit den vorgenannten drei Methoden kombinierbar.



03

*Experimentelle Formfindung am Beispiel einer Seifenhautlamelle. Seifenhautlamellen besitzen eine verschwindende mittlere Krümmung, sie sind Minimalflächen. Seifenhäute weisen isotensoidische Spannungsfelder auf.*

Interessanterweise sind alle Ergebnisse der vorstehend genannten experimentellen Formfindungsmethoden zugbeanspruchte Konstruktionen. Der Grund hierfür liegt darin, dass sich eine stabile Gleichgewichtsform bei einer zugbeanspruchten Struktur im Experiment sehr einfach, bei einer druckbeanspruchten Struktur aufgrund der stets vorhandenen (In-) Stabilitätsproblematik nur in sehr wenigen Fällen erarbeiten lässt: Die Modelle würden zumeist während der Formentwicklungsphase infolge von (In-) Stabilitätsproblemen versagen. Die Formfindung druckbeanspruchter Konstruktionen erfolgt deshalb üblicherweise über die so genannte „Umkehrform“. Der dabei zu Grunde gelegte Ansatz lautet: Eine unter einer bestimmten Belastung ausschließlich zugbeanspruchte Konstruktion steht bei Umkehr der Lastrichtung oder der Umkehr der Wirkungsrichtung des Gravitationsvektors unter einer ausschließlichen Druckbeanspruchung. Zur Formfindung einer Schale, die bei Eigengewichtsbelastung unter Druckbeanspruchung steht, genüge es also beispielsweise, die Form einer „auf dem Kopf“ stehenden, ausschließlich zugbeanspruchten Konstruktion zu ermitteln.

Die vorstehend beschriebene Methode der „Umkehrform“ liegt zunächst nahe. Dementsprechend war sie über Jahrzehnte hin Bestandteil der akademischen Lehrmeinung. Bedauerlicherweise wurde bei ihrer Formulierung jedoch ein grundlegender, erst 1987 in [6] entdeckter und später als „erweitertes Kompensationsproblem“ beschriebener Effekt übersehen (siehe Kap. 3.5). Die Entdeckung des erweiterten Kompensationsproblems bedeutete letztlich die Falsifikation der Methode der Umkehrform in ihrer bisherigen, als allgemeingültig postulierten Formulierung. Für einige Ausnahmefälle konnte gezeigt werden, dass die Anwendung des Prinzips, wenn auch eher zufälligerweise, zur prognostizierten Lösung führt. Für die Komplementärmenge der mit der Methode entwickelten Konstruktionen ist jedoch festzustellen, dass die diesen zugesprochenen Spannungsfelder nicht mit der Wirklichkeit übereinstimmen.

### 3.2 Mathematisch-numerische Formfindungsmethoden

Die computergestützten mathematisch-numerischen Formfindungsmethoden lassen sich in folgende Kategorien einteilen:

- Indirekte Methoden (Deformationsmethoden)
- Direkte Methoden

Die indirekten oder Deformationsmethoden stellen faktisch eine numerische Simulation der experimentellen Methoden dar. Bei ihnen wird eine vorgegebene Ausgangsform durch Aufbringen einer Belastung so lange verformt, bis die sich einstellende Geometrie auch die übrigen Entwurfsanforderungen erfüllt. Durch die Art der Belastung und durch die Materialeigenschaften, die der zu verformenden Struktur gegeben sind, lassen sich Hängemodelle, Fließformen, mechanisch aufgespannte Strukturen oder pneumatisch vorgespannte Formen berechnen.

Die am häufigsten verwendete Deformationsmethode beruht auf der Methode der Finiten Elemente in der geometrisch nichtlinearen Formulierung. Verfahren auf der Basis der Vektoranalysis sowie auf Sonderformen beschränkte Algorithmen werden ebenfalls verwendet.

Ähnlich wie bei den experimentellen Methoden lässt sich bei den indirekten Methoden ein nicht vollständig befriedigendes Endergebnis einer Berechnung nur durch Änderung der Vorgabedaten und anschließende Neuberechnung, also auf indirektem Weg, verbessern. Dabei ist es schwierig, teilweise auch unmöglich, bestimmte Spannungszustände in der Struktur zu erzeugen. Ein Beispiel hierfür ist die Aufgabe, eine unter Eigengewicht isostatisch druckbeanspruchte Betonschale durch Verformen einer ursprünglich ebenen Haut zu berechnen. Zwar lässt sich durch Zuschalten eines Steuerungsalgorithmus die Ergebnisqualität verbessern, die indirekten Methoden sind allerdings vom Ansatz her zur Lösung derartiger Probleme weniger geeignet und deshalb den direkten Methoden weit unterlegen.

Mit den direkten Methoden wird versucht, eine Form, die – bei gegebenen geometrischen Randbedingungen – unter dem formbestimmenden Lastfall einen ganz bestimmten, vorgegebenen Spannungszustand besitzt, zu entwickeln. Die Ausgangsform im üblichen Sinn ist unbekannt oder ohne Belang, da sie lediglich als durch Überlegungen zur numerischen Stabilität bedingter „Startwert“ für die Berechnung vorgegeben werden muss und daher manchmal physikalisch nicht zulässig zu sein braucht (z. B. Verstoß gegen die Gleichgewichtsbedingungen).

Die bekanntesten der direkten Methoden sind:

- die Kraftdichtemethode, die von Linkwitz, Preuss und Schek entwickelt wurde;
- die numerische Lösung des die Membranschale beschreibenden Differentialgleichungssystems;
- indirekte Methoden in Kombination mit einer Optimierungsstrategie.

Mit den direkten Methoden lassen sich „spannungsoptimale“ Strukturen entwerfen, also beispielsweise Seifenhäute als Membranen gleicher Spannung (Isotensoiden), Türme mit konstanter Spannung im Schaft oder auch Fachwerkstrukturen, bei denen die einzelnen Elemente bestimmte Spannungsvorgaben erfüllen.

Prinzipiell gilt für die direkten Methoden, dass die Existenz einer Lösung nicht a priori vorhersagbar ist. Abhängig vom vorgegebenen, also vom „gewünschten“ Spannungszustand stellt sich vielmehr erst im Verlauf einer Berechnung heraus, ob das Problem keine, eine oder mehrere Lösungen besitzt. Im letzteren Fall lässt sich durch Hinzufügen der Forderung nach Gewichtsminimalität die 'leichteste' Lösung ermitteln. Interessanterweise gibt es häufig auch Mehrfachlösungen, wie beispielsweise zwei Seifenhautflächen innerhalb des gleichen Drahtrahmens, die alle das gleiche Minimalgewicht besitzen.

Prinzipiell lassen sich alle experimentellen Modelle in mathematisch-numerischen Modellen abbilden. Letztere haben allerdings neben dem Vorteil einer hohen Genauigkeit in der Aussage zu Kraft und Geometrie den Nachteil einer geringeren Anschaulichkeit; aus diesem Grund stellt man die experimentellen Methoden gern an den Anfang der Entwurfsarbeit und geht erst in der zweiten Phase des Entwurfs zu den mathematisch-numerischen Methoden über.

Bei vorgegebener Wahl eines Tragsystems oder -prinzips lassen sich mit den bekannten experimentellen Formfindungsmethoden gewichtsarme Tragwerke entwickeln. Zum Entwurf gewichtsminimaler Tragwerke erweisen sich die meisten experimentellen Methoden als untauglich. (Die Seifenhautmodelle stellen hier eine Ausnahme dar). Die mit einer zusätzlichen Minimalbedingung versehenen mathematisch-numerischen Methoden erfahren hierdurch eine besondere Bedeutung, denn nur in wenigen Fällen, wie z. B. bei den Maxwellstrukturen, lassen sich gewichtsminimale Tragwerke ohne sie entwickeln.

### 3.3 Der 'Formbestimmende Lastfall'

Die klassischen Formfindungsmethoden basieren alle auf der Vorgabe einer als „Formbestimmender Lastfall“ [6,7] bezeichneten Laststellung. Die während der Formfindung „gefundene“ Form besitzt die gewünschten Eigenschaften in genau diesem Lastfall. Der „richtigen“ Wahl des formbestimmenden Lastfalls fällt damit grundlegende Bedeutung zu. Im Bereich

der relativ massiven Konstruktionen, wie z. B. den Betonschalen, wurde häufig und völlig zurecht der Lastfall Eigengewicht als dominanter und damit formbestimmender Lastfall angesetzt. Im extremen Leichtbau jedoch entfällt häufig die Dominanz eines einzelnen Lastfalls. Ein Automobilkotflügel wiegt nur Bruchteile der auf ihn wirkenden Windlast, die textile Überdachung eines Stadions nur Bruchteile der von ihr abgetragenen Belastungen aus Wind und Schnee. Während die bisher publizierten Arbeiten für die Formfindung gewichtsarmer und gewichtsminimaler Konstruktionen stets die Existenz eines dominanten und deshalb als „formbestimmend“ verwendbaren Lastfalles voraussetzen, ist die eindeutige Existenz eines solchen Lastfalles bei den extrem leichten Konstruktionen üblicherweise gar nicht gegeben. Das Problem nichteindeutiger bzw. multipler formbestimmender Lastfälle führt in einen bisher wissenschaftlich noch nicht ausreichend untersuchten Problembereich, aus dem aus heutiger Sicht nur zwei Wege führen: Der erste benutzt die bekannte Vielparameteroptimierung, bei der unter Zugrundelegung aller möglicherweise auftretenden Lastfallkombinationen auch geringer Eintretenswahrscheinlichkeit eine Lösung des Formfindungsproblems ermittelt wird. Der zweite Weg wurde in Stuttgart entwickelt [10,11] und weist in eine völlig andere Richtung: Der Existenz multipler formbestimmender Lastfälle wird mit der „Formfindung“ (wobei der Begriff spätestens hier seine Sinnhaftigkeit endgültig verliert) einer adaptiven, d.h. in ihren Eigenschaften kontinuierlich manipulierbaren Strukturen begegnet. Wie in Kapitel 4 gezeigt werden wird, bedeutet dieser Ansatz nicht nur eine wesentlich elegantere Lösung des Problems – er führt vielmehr in eine vollkommen neue Dimension von Leichtigkeit.

### 3.4 Über die Mannigfaltigkeit von Spannungszuständen

In einer innerlich und/oder äußerlich statisch unbestimmten Struktur kann unter ein- und demselben Lastfall eine Mannigfaltigkeit innerer Kraft- bzw. Spannungsfelder existieren. Welches dieser möglichen Spannungsfelder sich in einer Struktur einstellt, ist abhängig von der Verteilung



der Steifigkeiten innerhalb der Struktur bzw. an deren Auflagern. Überträgt man diese Aussage auf das Formfindungsproblem, so gewinnt sie in zweierlei Hinsicht Bedeutung: Zunächst einmal erkennt man, dass man an einer auf experimentellem Wege gefundenen Form den inneren Beanspruchungszustand in den meisten Fällen nicht ablesen, d.h. keinen tieferen Aufschluss über deren inneren Beanspruchungszustand gewinnen kann. Bereits am denkbar einfachsten Fall einer in einen räumlich verwundenen Rahmen eingespannten Seifenhautlamelle, also eines Isotensoids, erkennt man, dass die Geometrie der Seifenhautlamelle unabhängig von der Oberflächenspannung der Seifenhautlösung selbst ist, oder, in anderen Worten, dass sich das Ergebnis des Formfindungsprozesses, also die Geometrie der Seifenhaut, bei Multiplikation des inneren Spannungszustandes der Lamelle mit einem Skalar nicht ändert. Die Multiplikation des Spannungsfeldes mit einem Skalar führt auch bei allen anderen mechanisch vorgespannten Konstruktionen, die – durch den Formfindungsprozess bedingt – üblicherweise vergleichsweise inhomogene, in keinem Fall jedoch isotensoidische Spannungsfelder aufweisen, zu keiner neuen Geometrie. Darüber hinaus lässt sich aufzeigen [6], dass in einer Membrane oder einer Schale allein durch Manipulation der Auflagersteifigkeiten und/oder der Struktursteifigkeiten eine Vielzahl unterschiedlicher Spannungsfelder in der Struktur eingestellt werden können, ohne dass dies eine andere Geometrie bedingt. Die Verunsicherung, die man durch die Erkenntnis der möglichen Mannigfaltigkeit der Spannungsfelder in einer „gefundenen“ Struktur erfährt, bedeutet Risiko und Chance zugleich, woraus sich auch die zweite Bedeutung der eingangs gewonnenen Erkenntnis ableitet: Bei der Realisierung, d.h. bei der bautechnischen Umsetzung einer in einem Formfindungsprozess entwickelten Struktur kommt es in entscheidender Weise darauf an, dass sich der in der Struktur erwartete, in der Formfindung entwickelte Spannungszustand auch tatsächlich einstellt. Dass letzteres eine nichttriviale Forderung ist, liegt auf der Hand: Nur innerhalb bestimmter Genauigkeiten erfassbare Auflagersteifigkeiten, zeitabhängige Phänomene wie Kriechen und Schwinden der

Werkstoffe und, nicht zuletzt und von besonderem Einfluss, der Baufortschritt selbst, beeinflussen, neben vielen anderen Einflussgrößen, den sich tatsächlich in einer Struktur einstellenden Beanspruchungszustand.

### 3.5 Das (klassische) Kompensationsproblem

Beim Bauen zugbeanspruchter Konstruktionen ist es seit langem bekannt, dass die in der Formfindung ermittelte Geometrie („Sollgeometrie“), die mit dem in der Formfindung entstandenen bzw. zugrunde gelegten Spannungszustand behaftet ist, zunächst in eine spannungsfreie Form („Nullgeometrie“) überführt werden muss, um hergestellt bzw. gebaut werden zu können. Die mit dem Entspannungsvorgang einhergehende Geometrieänderung wird als Kompensation bezeichnet. Bei den zugbeanspruchten Konstruktionen (Seilnetze, Membranen) weist die Nullgeometrie typischerweise einen kleineren Flächeninhalt als die Sollgeometrie auf: Beim Übergang vom unbelasteten in den belasteten, spannungsbehafteten Zugspannungszustand wird das Material üblicherweise gedehnt, indem die Konstruktion zu ihren Auflagern gezogen bzw. gegen diese verspannt wird.

Das bei Seilnetzen und Membranen bisher zur Anwendung gekommene Kompensationsverfahren besteht darin, die spannungsbehaftete Sollgeometrie mit geeigneten Verfahren und unter Zugrundelegung der (und hier liegt eine der Schwierigkeiten!) zutreffenden Werkstoffgesetze zu entspannen und sie dabei in eine – üblicherweise mit Falten behaftete – Nullgeometrie zu überführen. Man bezeichnet diese Vorgehensweise auch als „klassisches“ Kompensationsproblem.

### 3.6 Das erweiterte Kompensationsproblem

Die Arbeiten an unserem Institut zeigten bereits zu Anfang der 1990er Jahre, dass die lange vertretene Annahme, jede eigenspannungsbehaftete (Formfindung!) Form könne durch eine Veränderung ihrer Geometrie in eine spannungsfreie Form überführt werden, falsch ist. Seilnetze und Membranen bilden eher zufälligerweise und wegen ihrer ganz besonderen Werk-

stoffeigenschaften eine Ausnahme von dieser Einschränkung. Sie sind stets kompensierbar. Bei Konstruktionen aus anderen Baustoffen, beispielsweise bei Schalentragerwerken aus Beton, tritt jedoch das Problem der Nichtexistenz einer durch Kompensation der Sollgeometrie abzuleitenden „spannungsfreien Nullgeometrie“ sehr häufig auf. Bei der planerischen und bautechnischen Umsetzung der in einem Formfindungsprozess entstandenen Form geht es in solchen Fällen darum, eine spannungsfreie Nullgeometrie so zu finden, dass beim Übergang dieser Nullgeometrie in die spannungsbehaftete Endform einerseits eine weitestgehende Annäherung an die in der Formfindung entwickelte Sollgeometrie stattfindet und sich andererseits eine möglichst geringe Abweichung von dem in der Formfindung fixierten Sollspannungszustand ergibt. Dieses alles andere als triviale Problem wird als „erweitertes“ Kompensationsproblem bezeichnet.

#### 4. Adaptive Systeme

Die tragenden Konstruktionen in der nicht lebenden Natur und der Technik besitzen üblicherweise Bauteile mit invarianten physikalischen Eigenschaften, beispielsweise eine konstante Bruchfestigkeit oder - und dies ist für die nachfolgenden Überlegungen von Bedeutung - eine zeitunabhängige, also invariante Steifigkeit. Beim Entwurf einer Struktur mit invarianter Steifigkeitsbelegung sind die inneren Beanspruchungen der Konstruktion unter dem formbestimmenden Lastfall entwerfbar, d.h. wählbar. Mit der Festlegung des statischen Systems und dessen Steifigkeitsbelegung liegen gleichzeitig alle in den einzelnen Bauteilen unter der Einwirkung äußerer Lasten auftretenden Beanspruchungen fest, wobei die Dimensionierung der einzelnen Bauteile gegen die ungünstigsten Beanspruchungszustände, typischerweise Spannungsmaxima, erfolgt.

In der soeben beschriebenen, für den Tragwerksentwurf üblichen Vorgehensweise wird die Struktur also für innere Beanspruchungszustände als Ergebnis eines Strukturentwurfes ausgelegt, bei dessen Entstehen eine Ineffektivität der Struktur insgesamt oder einzelner Bauteile unter

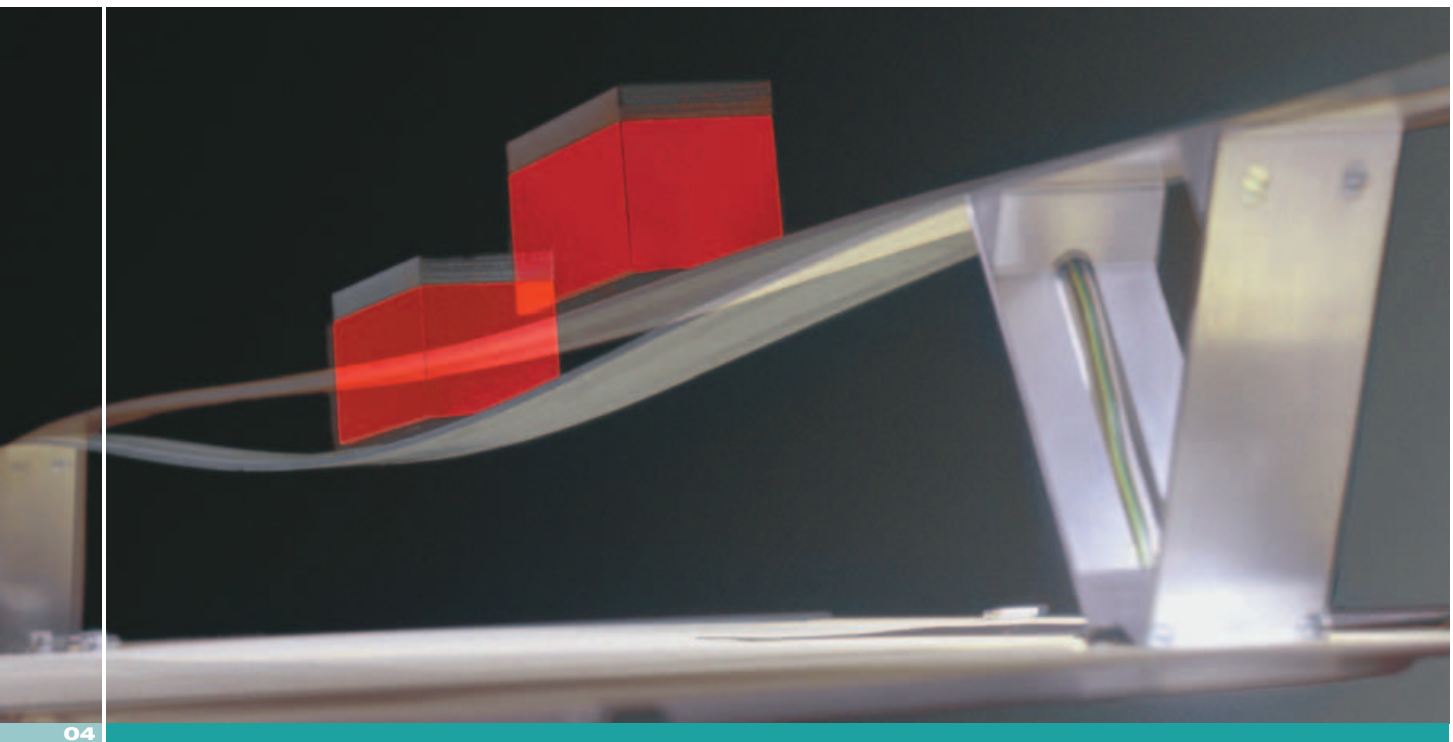
bestimmten Laststellungen üblicherweise nicht vorhersehbar waren oder die prinzipiell unvermeidbar sind. Andererseits wäre es nahe liegend, tragende Konstruktionen so zu konzipieren, dass sie die in ihnen entstehenden Beanspruchungszustände unter verschiedenen Einwirkungen auf der Basis selbststeuernder Prozesse manipulieren. Spitzenbeanspruchungen einzelner Bauteile oder Bauteilbereiche könnten dann zugunsten einer zeitgleichen Homogenisierung der Beanspruchungsverteilung insgesamt vermieden werden. Natürlich können auf diese Weise in teilweise erheblichem Umfang das Eigengewicht einer Konstruktion vermindert, Verformungen reduziert und Schwingungen unter dynamischer Beanspruchung gedämpft werden [9,10,11].

Systeme, die sich mit Hilfe selbstgesteuerter oder selbstorganisierter Vorgänge aktiv verändern, bezeichnet man als adaptive Systeme. Adaptive Systeme bestehen aus einer mit ihrer Umgebung in Wechselwirkung stehenden Struktur. Anpassungsvorgänge der Struktur erfolgen durch sog. Aktuatoren, die durch einen übergeordneten Steuerungs-Regelungsprozess aktiviert werden. Der Steuerungs-Regelungsprozess selbst wiederum bezieht seine Eingangssignale von Sensoren, also Elementen, die physikalische Zustände oder deren Veränderung erkennen können. Idealerweise können Aktuatoren und Sensoren in einem multifunktionalen Element/Material vereint werden.

In Abhängigkeit von der Adaptionsschwindigkeit unterscheiden wir drei verschiedene Adaptionssklassen [10]:

**Kurzzeitadaption:** Eine Anpassung der Struktur erfolgt durch sofortige Reaktion auf externe Einflüsse. Die Farbänderung eines Chamäleons als Anpassung auf farblich veränderte Umgebungsbedingungen gehört hierzu.

**Langzeitadaption:** Hierzu gehören Wachstumsprozesse, die über den gesamten oder teilweisen Lebenszeitraum (von Minuten zu Jahrzehnten) eines natürlichen Systems auftreten. Durch derartige Prozesse werden die Systemeigenschaften verbessert, z. B. werden in Bäumen Spannungsspitzen durch lokales Wachstum der hoch beanspruchten Bereiche abgebaut.



04

Der „Stuttgarter Träger“ stellt eine Brücke dar, deren Träger ein Bauhöhe/Spannweitenverhältnis von 1/600 aufweist. Dank der Adaptivität der Konstruktion weist die Brücke unter der sich bewegenden Last (Hier: Lokomotive) keine Verformung auf.

**Evolutionäre Adaption:** In evolutionären Prozessen werden die Eigenschaften natürlicher Systeme im Verlauf mehrerer Generationen optimiert, zumeist unter dem Gesichtspunkt einer Erhöhung der Überlebenschancen und/bzw. einer Steigerung der Reproduktionsrate. Veränderungen der Systeme erfolgen durch Mutations- und Selektionsprozesse. Diese Vorgänge können auf mathematisch-numerischer Basis simuliert werden, beispielsweise um so die gewichtsoptimale Geometrie eines Fachwerkkragträgers zu bestimmen.

Aus der Vielzahl denkbarer Anwendungsbereiche adaptiver Systeme in der Architektur werden an unserem Institut seit mehr als zehn Jahren zwei uns sehr interessant erscheinende Bereiche näher untersucht: Adaptive Gebäudehüllen und adaptive Tragwerke.

#### 4.1 Adaptive Gebäudehüllen

Die derzeit in Bauwesen eingesetzten Dach- und Fassadensysteme, die wir hier verallgemeinernd als Gebäudehüllen bezeichnen wollen, besitzen im Regelfall konstante physikalische Eigenschaften. Sie können damit prinzipiell nur sehr bedingt auf Veränderungen im Außenbereich, also bei-

spielsweise jahreszeitliche, witterungs- oder umgebungsbedingte Veränderungen reagieren. Dasselbe gilt für Veränderungen im Gebäudeinneren. Letztere können aus Nutzungsänderungen, Veränderungen der Komfortansprüche, einem veränderten Emissionsniveau etc. bestehen.

Die Forschung im Bereich der adaptiven Gebäudehüllen befasst sich damit, wie Gebäudehüllen auf Veränderungen des Innen und des Außen reagieren können, wie man Wärme-/Kältespeicherqualitäten in die Gebäudehüllen einbauen kann und vieles mehr. Der Schwerpunkt der an unserem Institut hierzu gemachten Forschungen liegt hierbei auf der generellen Systementwicklung, der Entwicklung schaltbarer Gläser [12] und der Entwicklung reagibler und energiespeichernden textiler Gebäudehüllen [13].

#### 4.2 Adaptive Tragwerke

Adaptive Tragwerke sind Konstruktionen, welche die in ihnen aufgrund äußerer wie innerer Einwirkungen entstehenden Kräfte (und damit auch zeitabhängige wie zeitunabhängige Verformungen) im Sinne der Adaptivität manipulieren können. Dabei ist zunächst zu unterscheiden zwi-

schen einer Manipulation der Einwirkung selbst sowie einer Manipulation der Reaktion der Konstruktion. Beide Manipulationen können gleichzeitig auftreten. Am Beispiel einer Brücke erläutert bedeutet dies z.B., dass die adaptive Konstruktion einerseits die auf sie wirkende Windwirkung durch gezielte Beeinflussung der Umströmung verändert (Beeinflussung der Einwirkung) und dass sie, ggf. gleichzeitig, durch interne Steifigkeitsveränderungen eine Homogenisierung des Beanspruchungszustandes in der Struktur herbeiführt.

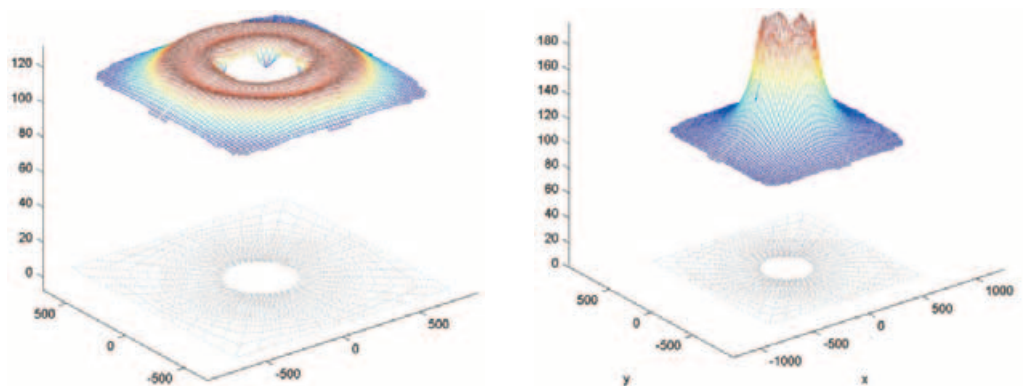
Durch die Manipulation der in der Struktur wirkenden Kraftzustände mit der Zielsetzung einer Homogenisierung der in ihr wirkenden Beanspruchungsverteilung lässt sich das Eigengewicht tragender Strukturen in bemerkenswerter Größenordnung reduzieren. Bei einigen der am Institut untersuchten Systeme konnten mehr als fünfzig Prozent des ursprünglichen Eigengewichts einer bereits unter Leichtbaugesichtspunkten entworfenen Konstruktion eingespart werden. Durch Einführen der Adaptivität lassen sich die Grenzen des Leichtbaus somit in bisher nicht gekannte Bereiche hinauschieben. Material wird eingespart und, bei Auftreten der Beanspruchung, in seiner Wirkung durch Energie ersetzt: Extremer Leichtbau ist Bauen mit Energie.

Selbstverständlich werden bei einer Manipulation der in der Struktur wirkenden Kraftzustände mit der Zielsetzung einer Homogenisierung der in der Struktur wirkenden Beanspruchungsverteilung auch die „natürlicherweise“ auftretenden Strukturverformungen verändert. Führt man eine Adaption einer tragenden Struktur mit dem (Optimierungs-) Ziel einer Minimierung des Eigengewichts der Struktur durch, so treten diese Verformungen als Nebeneffekt auf. Die genannten Verformungen lassen sich aber natürlich auch begrenzen, indem man sie als Nebenbedingungen der Optimierungsaufgabe einführt. Im Grenzfall kann so eine Verformungsnebenbedingung auch das

Verschwinden einer Verformung an gewissen Punkten einer Konstruktion fordern. So lässt sich beispielsweise erzielen, was in der Natur unmöglich ist: Keine Verformung. Der an unserem Institut entwickelte sog. „Stuttgarter Träger“ gilt heute als das Standardbeispiel für die Demonstration der Möglichkeiten einer Beeinflussung einer Konstruktion, die multiplen bzw. instationären Lastfällen ausgesetzt ist [10].

Adaptive Strukturen werden in wenigen Jahren ein fester Bestandteil des täglichen Lebens sein. Aktive Prothesen und Implantate mit sensorischen Funktionen und Aktuatoren sind in der Entwicklung; die Raumfahrt arbeitet an adaptiven Fachwerkstrukturen, bei denen aktive (z. B. piezokeramische) Elemente verwendet werden, um eine genaue Positionierung oder Schwingungsisolierung von Satellitenreflektoren zu erreichen. Die Arbeiten des Instituts werden zu adaptiven Tragwerken im Bauwesen führen, die zum einen die Grenzen des Leichtbaus weiter hinauschieben und zum anderen auch Optimierungen im Bereich konventioneller Strukturen oder Bauteile ermöglichen, seien es nun Augstäbe im Metallbau, dünne Glasscheiben oder Bauteile aus Beton.

Werner Sobek



Adaptivität im Kleinen: Wenige Aktuatoren genügen, um die Spannungskonzentrationen am Rand einer Bohrung, die in eine biaxial beanspruchte dünne Scheibe eingebracht wurden, deutlich zu dämpfen.

## Literatur

- 1 Maxwell, C.: Scientific Papers II. Cambridge: Cambridge University Press (1869) 175.
- 2 Michell, A.G.M.: The limits of economy of material in frame structures. *Philosoph. Mag.* 8 (1904) 589-597.
- 3 Otto, F.: Zugbeanspruchte Konstruktionen. Bd. 1+2. Berlin: Ullstein 1962.
- 4 Hertel, H.: Leichtbau. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1960.
- 5 Wiedenmann, J.: Leichtbau. Bd. 1+2. Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer (1989).
- 6 Sobek, W.: Auf pneumatisch gestützten Schalungen hergestellte Betonschalen. Dissertation Universität Stuttgart. Stuttgart (1987).
- 7 Sobek, W.: Zum Entwerfen im Leichtbau. *Bauingenieur* 70 (1995) S.323-329.
- 8 Klein, B.: Leichtbaukonstruktionen. Braunschweig/Wiesbaden: Friedrich Vieweg & Sohn (1997).
- 9 Janocha, H. Ed.: *Adaptronics and Smart Structures*, Berlin: Springer (1999).
- 10 Sobek, W.; Haase, W.; Teuffel, P.: "Adaptive Systeme", *Stahlbau* 69(7) (2000), 544-555.
- 11 Sobek, W.; Teuffel, P. (2001): "Adaptive Structures in Architecture and Structural Engineering", *Smart Structures and Materials – Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways (SPIE Vol. 4330): Proceedings of the SPIE 8<sup>th</sup> Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, 4-8 March 2001, Newport Beach, CA, USA*. Ed. Liu, S. C., Bellingham: SPIE.
- 12 Haase, W.: Adaptive Strahlungstransmission von Verglasungen mit Flüssigkristallen. Dissertation Universität Stuttgart. Stuttgart (2004).
- 13 Holzbach, M.: Adaptive und konditionierende textile Gebäudehüllen auf Basis hochintegrativer Bauteile. Dissertation Universität Stuttgart (in Vorbereitung).

## DER AUTOR



## PROF. DR.-ING. WERNER SOBEK

studierte Bauingenieurwesen und Architektur an der Universität Stuttgart, unter anderem bei Prof. Frei Otto. In dieser Zeit begann seine Beschäftigung mit dem Leichtbau, insbesondere mit textilen Konstruktionen. Nach dem Diplom bei Prof. Dr.-Ing. Jörg Schlaich arbeitete er in den USA und im Ingenieurbüro Schlaich, Bergermann und Partner in Stuttgart. Seit 1995 ist er Direktor des Instituts für Leichte Flächentragwerke und Nachfolger auf dem Lehrstuhl von Frei Otto. Im Jahr 2000 trat er auch die Nachfolge von Prof. Dr. Schlaich an und fusionierte die beiden Lehrstühle zum Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren. 1992 gründete er ein eigenes Ingenieurbüro, inzwischen mit Ablegern in New York und Frankfurt a. M., aus dem zahlreiche preisgekrönte Werke hervorgegangen sind. Einen Einblick vermittelte 2004 die Ausstellung "show me the future – engineering and design by werner sobek" in der Pinakothek der Moderne in München. Werner Sobek ist Vorsitzender des Hochschulrats der HafenCity-Universität in Hamburg und lehrt 2007 als Gastprofessor an der Harvard University in Cambridge/Massachusetts.

## Kontakt

Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren  
 Pfaffenwaldring 7 und 14, 70569 Stuttgart  
 Tel +49.711.685 6 62 26 | -6 35 99  
 Fax +49.711.685 6 69 68 | -6 37 89  
 E-Mail: [werner.sobek@ilek.uni-stuttgart.de](mailto:werner.sobek@ilek.uni-stuttgart.de)  
<http://www.uni-stuttgart.de/ilek/>