

LEICHT-
BAU-KON-
STRUK-
TIONEN

Konrad Lohöfener

»Scientific design
is linked to the stars
far more directly
than to the earth.
Star-gazing?«¹

¹ RICHARD BUCKMINSTER FULLER: *Nine Chains to the Moon*. Zitiert nach:
CLAUDE LICHTENSTEIN: *Your private sky: Diskurs R. Buckminster Fuller*, S.12

/ INHALTS- VERZEICHNIS

Vorwort	10
1/ leicht im Sprachgebrauch	16
2/ Leichtbau	
Was bedeutet Leichtbau?	
Was sind Leichtbaukonstruktionen?	22
Kulturhistorische Betrachtung	26
Sozialpolitische und kulturpolitische Aspekte	30
Wirtschaftlich-ökologische Aspekte	34
3/ Das Prinzip Leichtbau	40
3.1 Kategorien	42
— Materialleichtbau	43
— Strukturleichtbau	43
— Systemleichtbau	44
3.2 Entwurfsmethoden	46
— Experimentelle Formfindungsmethoden	47
— Mathematisch-numerische Methoden	49
3.3 Selbstbildungsprozesse	50
— Membranen	52
— Pneu und Hydro	56
— Hängekonstruktionen	60
— Die Umkehrung der Hängeformen	62
— Verzweigungen und Minimalwegesysteme	66
— Gitterschalen	70
— Geodetics	72
— Tensegrity	76
— Adaptive Systeme	78
3.4 Zusammenfassung	82
Schlusswort	86
Literatur- und Abbildungsverzeichnis	94

»Man unternehme
das Leichte,
als wäre es schwer,
damit das Selbst-
vertrauen uns nicht
sorglos macht.«⁴

leicht im Sprachgebrauch

Das Wort »leicht« ist im allgemeinen Sprachgebrauch ein vielfach verwendeter Begriff. Wir sprechen von »leichtfüßig«, »kinderleicht« oder »federleicht«, wenn uns etwas einfach erscheint, also »leicht fällt«, und sogar in einer vagen Situation verwenden wir das Wort »vielleicht«. Versucht man Entsprechungen für dieses Wort zu finden, fällt auf, dass »leicht« eng mit dem Wort »einfach« verknüpft ist. Dies wird nicht zuletzt an den gemeinsamen Synonymen wie beispielsweise »problemlos«, »simpel«, »müheles« und »unkompliziert« deutlich. Natürlich gibt es, wie immer, auch Ausnahmen. So kann »leicht« gelegentlich auch als »inhaltslos«, »trivial« oder sogar »leichtsinnig« wahrgenommen werden.⁵ Die Leichtigkeit oder das Leichtsein gilt jedoch landläufig eher als nützlich, dagegen das Schwersein als schwierig oder hinderlich. Das Wort »leicht« besitzt damit im Gegensatz zu »schwer« eine sehr positive Konnotation.

Selbst in der Mythologie lässt sich die Vorstellung vom Leichten wiederfinden. So wurde zum Beispiel im alten Ägypten die Seele von Verstorbenen mit der Feder der Göttin Maat, die als Symbol für die Wahrheit steht, aufgewogen.⁶

Verkürzt könnte eine Begriffskette gebildet werden, die folgendermaßen lautet: Leicht = Einfach = Gut und im Gegensatz dazu Schwer = Schwierig = Schlecht. Diese oder ähnliche Wortspiele ließen sich noch endlos fortsetzen. Sie gipfeln schließlich in dem Paradoxon, das jeder kennt und das da lautet »das Einfache, das so schwer zu machen ist«. Philosophisch betrachtet bietet das natürlich reichlich Stoff zum Nachdenken. So formuliert der spanische Schriftsteller BALTASAR GRACIÁN Y MORALES: »Man unternehme das Leichte, als wäre es schwer, damit das Selbstvertrauen uns nicht sorglos macht.«

5 Vgl. Duden – Die deutsche Rechtschreibung, S.637

6 Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Feder>, Stand 16.01.2010

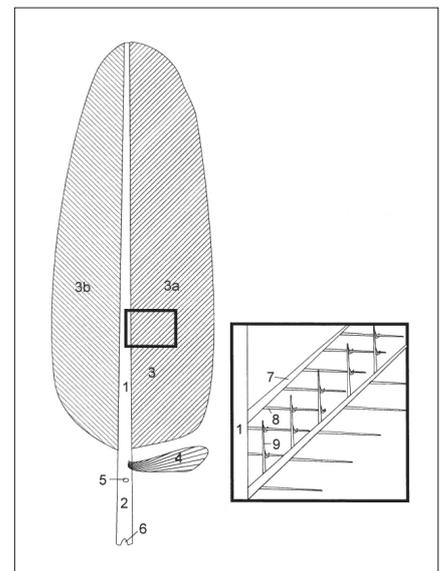


Abb. 1: **Schematischer Bau der Konturfeder:** 1 Schaft, 2 Spule, 3 Fahne (3a Außen-, 3b Innenfahne), 4 Nebenfeder, 5 oberer Nabel, 6 unterer Nabel, 7 Federast, 8 Bogenstrahl, 9 Hakenstrahl

Die Auseinandersetzung mit dem Leichten wird auch anhand eines anderen Vergleichs deutlich. Vermutlich kennt jeder das Rätsel, welches man Kindern gern stellt, fragt man sie danach, was denn leichter sei, ein Kilo Federn oder ein Kilo Blei. Es ist zu beobachten, dass sich oft eine regelrechte Verunsicherung über diese Frage einstellt. Grund hierfür sind unsere persönlichen Erfahrungen mit Materialien und deren Gewichten. Jeder von uns geht intuitiv davon aus, dass Federn leicht sein müssen und Blei schwer, auch wenn beide, wie in dem Rätsel, gleich viel wiegen. Es entsteht gewissermaßen ein Widerspruch zwischen unserer Vorstellung und der Realität.

2 / LEICHT-
BAU

»Was ist leicht?

Ist der Begriff ›leicht‹
erfassbar?

Kann man ihn messen,
kann man ihn fühlen?

Was ist wirklich
leicht und was sieht
nur so aus?«⁷

Was bedeutet Leichtbau? Was sind Leichtbaukonstruktionen?

Im folgenden Kapitel sollen die Begriffe leicht, Leichtbau und Leichtbaukonstruktion näher untersucht werden.

Leicht ist ein Objekt, das wenig wiegt. Als leicht wird demnach ein Objekt bezeichnet, welches eine geringe Masse hat, also massearm ist. Atome, kleinste Moleküle, Mikroorganismen sind extrem leichte Objekte. Schwer sind Objekte, die eine große Masse haben, wie z.B. Gestirne.⁸ Die Beispiele zeigen, dass es sich bei dem Begriff um eine Relation zwischen und zu den Dingen handelt. Leicht ist somit ein relativer Begriff. Nur Im Vergleich zu einem andern Objekt können wir einschätzen ob etwas leicht ist oder nicht. Über das subjektive Empfinden hinaus wird Leichtigkeit durch objektive Messmethoden erst erfassbar. Bei den allerfrühesten Messmethoden wurde beispielsweise Wasser als Vergleichsmedium herangezogen. Gegenstände, die schwimmen, sind leichter als Wasser. Wenn sie untergehen, sind sie schwerer. Nach und nach wurden die Messmethoden natürlich wesentlich verfeinert und differenziert. Die Waage gilt als das älteste Messgerät.⁹

In unserer Wahrnehmung wird Masse oft mit Volumen verwechselt. Die Erfahrung sagt, dass Objekte mit großem Volumen in der Regel auch schwer sind. Dinge die sehr fragil, grazil und zart sind, nehmen wir als leicht war. Ein dünnes Objekt fällt uns weniger ins Auge als ein dickes. Die menschliche Wahrnehmung von Entfernung und Kontrasten spielt also eine entschiedene Rolle wie wir Objekte bewerten und kann uns darüber hinaus auch über das tatsächliche Gewicht hinwegtäuschen.¹⁰ Vergleicht man die Tragfähigkeit von Objekten stellt man folgendes fest: Bei Objekten verschiedener Form, die in der Lage sind gleiche Kräfte über gleiche Strecken zu übertragen, ist dasjenige, welches

⁸ ebd., S.11

⁹ ebd., S.18

¹⁰ ebd., S.30

diese Aufgabe mit der geringsten Masse erfüllt leichter, als alle vergleichbaren anderen Objekte. »Eine Konstruktion kann als umso leichter bezeichnet werden, je kleiner das Verhältnis ihres Eigengewichts zu der von ihr getragenen Nutzlast ist.«¹¹

Die Art dieser Relation erkannte bereits GALILEO GALILEI, in dem er einen dünnen schlanken Vogelknochen mit dem plump erscheinenden Knochen eines Dinosauriers in Bezug auf das Eigengewicht verglich. »[...] Zur Erläuterung habe ich Euch einen Knochen gezeichnet, der die gewöhnliche Länge ums Dreifache übertrifft und der in dem Maasse verdickt wurde, dass er dem entsprechend grossen Thiere ebenso nützen könnte, wie der kleinere Knochen dem kleineren Thiere. Ihr erkennt in welchem Missverhältnis der große Knochen gerathen ist. Wer also bei einem Riesen die gewöhnlichen Verhältnisse beibehalten wollte, müsste entweder festere Materie finden, oder er müsste verzichten auf die Festigkeit, und den Riesen schwächer als Menschen von gewöhnlicher Statur werden lassen; bei übermäßiger Grösse müsste er durch das Eigengewicht zerdrückt werden und fallen.« [sic!] ¹²
GALILEI hat damit auch zum ersten Mal auf die Grenzen von maximaler Spannweite und Größe, wichtige Kriterien der Leichtbaukonstruktion, hingewiesen.

BERNARD LAFAILLE, der große französische Ingenieur formulierte: »Letztlich ist es für einen Ingenieur einzig von Bedeutung dass eine Konstruktion eine geringe Masse hat.«¹³

11 JÖRG SCHLAICH: *Leichtbau – wieso und wie*. In: ANETTE BÖGLE: *Leicht weit: Jörg Schlaich; Rudolf Bergermann*. S.306

12 GALILEO GALILEI: *Unterredung und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend*, Zitiert nach: JÖRG SCHLAICH: *Leichtbau – wieso und wie ?*. In: ANETTE BÖGLE: *Leicht weit: Jörg Schlaich; Rudolf Bergermann*. S.310

13 BERNARD LAFAILLE. Zitiert nach: FREI OTTO: *IL 24 Prinzip Leichtbau*, S.46

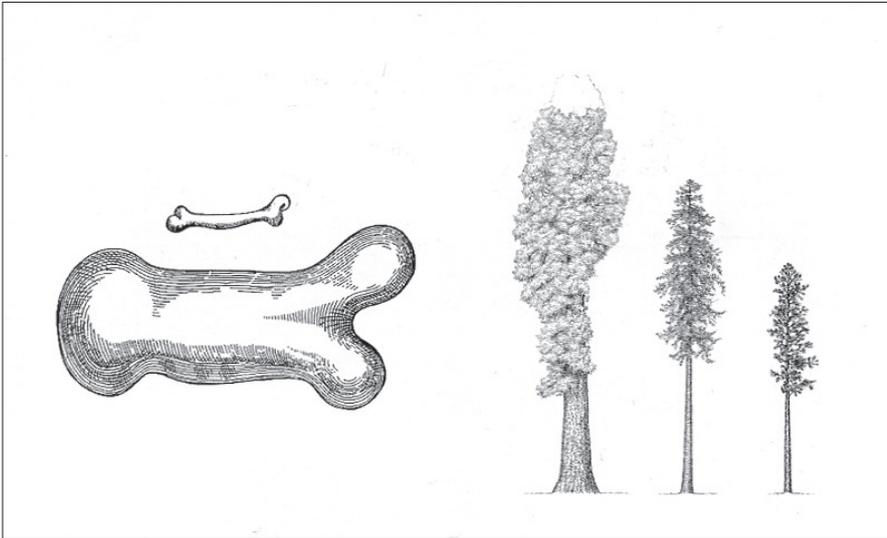


Abb. 3: Vergleich zwischen Vogel- und Dinosaurierknochen nach GALILEI, Vergleich der Stammdurchmesser in der Relation zur Größe von Mammutbaum, Douglasie und Goldkiefer (v. l. n. r.)

»Leichtbauarchitektur
ist gar nicht neu.
Sie hatte sowohl in der
Gotik, als auch in den
englischen Glashäusern
des 19. Jahrhunderts
Blütezeiten.«¹⁴

¹⁴ FREI OTTO: *Leichtigkeit gegen Brutalität*. Zitiert nach: WINFRIED NERDINGER:
Frei Otto – Das Gesamtwerk, S.11

Kulturhistorische Betrachtung

Eine kulturhistorische Betrachtung des Leichtbaus sollte mit den nomadischen Kulturen beginnen. Für eine nicht sesshafte Gesellschaft ist es wichtig, dass der Transport aller lebenswichtigen Dinge gewährleistet ist. Das Bestreben nach Reduzierung von Masse und Gewicht dieser Dinge ist demnach eine existentielle Voraussetzung für eine solche Gesellschaft. Besonders die Leichtigkeit der Behausung spiegelt das beschriebene Prinzip sehr anschaulich wider.¹⁵ Das Zelt steht, wie kein anderer Bautypus, exemplarisch für dieses Konzept. Ob in seiner Ausprägung als Tipi bei den Indianern, als Schwarzzelt in den Savannen und Wüstenregionen des mittleren Ostens, oder als Jurte, der typischen Behausung mongolischer Völker, es finden sich Zelte in allen Epochen und an ganz unterschiedlichen Orten unserer Erde.

Aber auch die frühen Mittelmeerkulturen mit ihrem ausgedehnten Handel oder die Seefahrerkultur der Wikinger können hier als Beispiel dienen. Die großen Handels- oder Seefahrerimperien wären ohne den genialen Leichtbau ihrer Segelschiffe nicht denkbar.¹⁶

Die sesshaften Kulturen brachten zunächst feste und damit schwere Bauformen hervor. »Das menschliche Schutzbedürfnis, aber auch Reichtum und Macht manifestierten sich [...] an massiven Gebäuden aus Stein und Lehm. Burgen, Schlösser, Tempel, sogar Grabstätten wie die Pyramiden der Ägypter, sind überlieferte Zeugnisse schweren Bauens.«¹⁷ Es darf dabei aber nicht übersehen werden, dass sich in den verschiedenen Kulturen schwere und leichte Konstruktionen, je nach ihren Nutzungsanforderungen, stets parallel nebeneinander finden lassen. Dennoch lässt sich

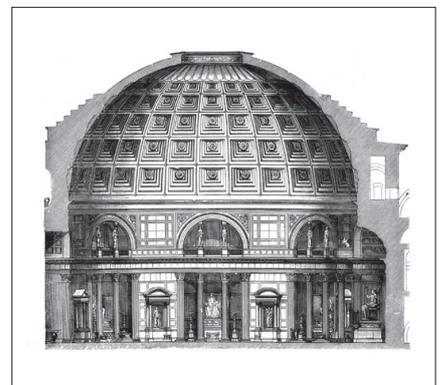
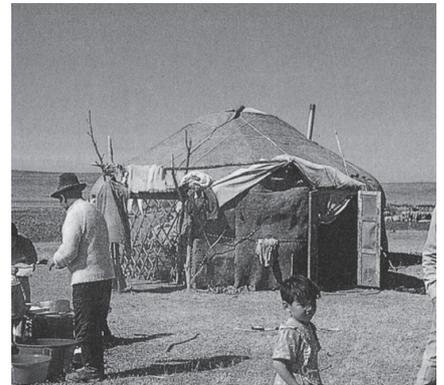


Abb. 4: Jurte

Abb. 5: Querschnitt des Pantheons in Rom

¹⁵ Vgl. EBERHARD MÖLLER: *Das Prinzip Leichtbau*. In: WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.42

¹⁶ Vgl. MICHAEL HENSEL: *Wikinger Langschiffe: elastische Holzkonstruktionen für die Seefahrt*. In: ARCH +, Sept. 2009, S.110

¹⁷ EBERHARD MÖLLER: *Das Prinzip Leichtbau*. In: WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.42

innerhalb der einzelnen Geschichtsepochen stets ein Entwicklungsprozess von schweren zu leichten Konstruktionen erkennen. Beispielsweise lässt sich das Filigranerwerden einer Konstruktion bei der Entwicklung der klassischen Tempel in der Antike deutlich ablesen. Als Höhepunkt dieser Entwicklung kann das Pantheon in Rom, aufgrund seiner erstaunlichen Kuppelspannweite angesehen werden, von der FREI OTTO sagt, »[...]daß in Sachen des Leichtbaus die Römer mit ihrem Pantheon bereits praktisch mehr konnten als die Theoretiker des Vogelfluges im 17. Jahrhundert.«¹⁸ Auch im Mittelalter, im Übergang von romanischer zu gotischer Bauweise kehrt das Leichte zurück. So entstehen in der Zeit der Hochgotik, bedingt durch religiösen Eifer, gepaart mit baukünstlerischem Wagemut, immer beeindruckendere und leichter strukturierte Kirchenbauten.

»Leichtbauarchitektur ist gar nicht neu. Sie hatte sowohl in der Gotik, als auch in den englischen Glashäusern des 19. Jhs. Blütezeiten.«¹⁴

Ab der Mitte des 19. Jhs. mit der aufkommenden Industrialisierung begann die theoretische Beschäftigung mit dem Leichtbau. Der britische Physiker JAMES CLARK MAXWELL und der Australier ANTHONY GEORGE MALDON MITCHELL, die als Begründer des Fachgebietes angesehen werden, entwickelten neue Berechnungsmethoden auf der Basis von Strukturoptimierungen. (siehe Verzweigungen und Minimalwegesysteme) Diese statischen Berechnungen in Verbindung mit neuen Verarbeitungsmethoden der Metall- und Glasindustrie ermöglichten vollkommen neue Konstruktionsformen, wie zum Beispiel die Skelettbauweise.¹⁹ Höhepunkte sind Mast- oder Turmkonstruktionen etwa von GUSTAVE EIFFEL und WLADIMIR SCHUCHOV, die legendären englischen Glashäuser oder die zahlreichen Brückenkonstruktionen von Ingenieuren wie GEORG LUDWIG FRIEDRICH LAVES und ROBERT MAILLART. Im 20. Jahrhundert wurden diese Erkenntnisse vor allem von den Pionieren des architektonischen Leichtbaus, wie RICHARD BUCKMINSTER FULLER,

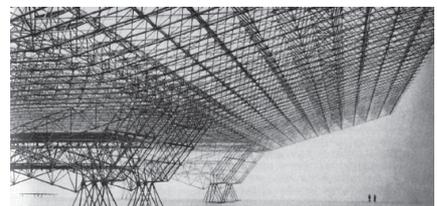
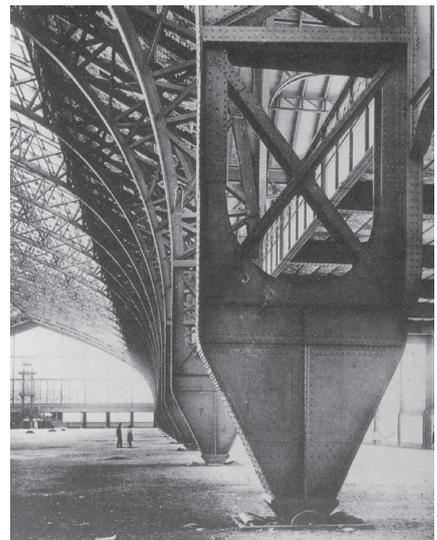
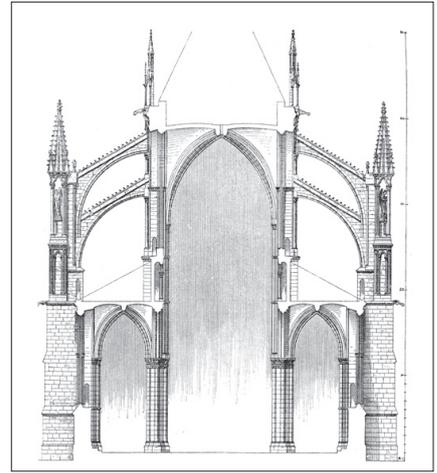


Abb. 6: Schnitt durch das Langhaus der Kathedrale von Reims: (1211–1311)
 Abb. 7: Galerie des Machines: Paris 1989, VICTOR CONTAMIN
 Abb. 8: Flugzeughangar (Raumfachwerk): KONRAD WACHSMANN

18 FREI OTTO: *IL 24 Prinzip Leichtbau*, S.199

19 Vgl. KONRAD WACHSMANN: *Wendepunkt im Bauen*, S.11

KONRAD WACHSMANN und MAX MEHRINGHAUSEN weiterentwickelt.²⁰ Der bereits 1940 von dem Ingenieur FRITZ LEONHARDT betitelte Slogan, der ursprünglich nur als Anregung für den Hoch- und Brückenbau gedacht war »Leichtigkeit – Eine Forderung unserer Zeit« hat bis heute an Aktualität nichts eingebüßt.²¹ Gerade heute wird Leichtbau bei den Architekten, Konstrukteuren und Ingenieuren angesichts von Zeiten des Rohstoffmangels und der immer knapper werdenden fossilen Brennstoffe zu einer Grundhaltung.



Abb. 9: Salginatobelbrücke, Schiers: 1930, ROBERT MAILLART

20 Vgl. EBERHARD MÖLLER: *Das Prinzip Leichtbau*. In: WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.42

21 FRITZ LEONHARDT: *Leichtbau – Eine Forderung unserer Zeit*. Zitiert nach: WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.42

»Tu nichts
Unnatürliches,
tu nichts
Unnötiges. Alles, was
überflüssig ist,
wird mit der Zeit
hässlich.«²²

²² ALVAR AALTO. Zitiert nach: SANDRA DACHS:
Alvar Aalto, Objekt und Möbeldesign, S.9

Kulturpolitisch- sozialpolitische Aspekte

Die interessantesten und gleichzeitig bedeutendsten politischen Denkansätze zu diesem Thema sind Anfang des 20. Jhs. zu finden. Sie sind eng mit der Gedankenwelt der klassischen Moderne verbunden. Neben dem starken Einfluss der Industrialisierung müssen vor allem die traumatischen Erfahrungen des ersten Weltkrieges als Auslöser für grundsätzliche Überlegungen betrachtet werden. Angesichts des Ausmaßes an Zerstörung durch Materialschlachten forderten einige Architekten eine Entmaterialisierung und damit die Vergeistigung der Architektur. Dementsprechend müssen die Glas- und Zeltphantasien von Architekten wie BRUNO TAUT als pazifistische Antwort auf das »Blutsaufen« der Völker verstanden werden.²³ Auch am BAUHAUS wurde die Entmaterialisierung von Objekten oder Ausstattungen als »Befreiung« des Menschen gefeiert. Als Verfechter des Bauhauses forderte der Schweizer Architekturhistoriker SIEGFRIED GIEDION in seinem Buch *Befreites Wohnen* von 1929 »leicht, lichtdurchlässig und beweglich zu bauen.«²⁴ Darüber hinaus nahm er an, dass dies auch eine Widerspiegelung im seelischen Zustand ergeben würde. »Es gibt keine isolierten Angelegenheiten mehr. Die Dinge durchdringen sich.«²⁵ Dieses Zitat unterstreicht den ganzheitlichen Anspruch GIEDIONS.

Der Appell vieler Architekten nach dem Zweiten Weltkrieg war stark ideologisch gefärbt. Er basierte auf den Erlebnissen der Nazidiktatur, dem Krieg und dessen Folgen. Über die rigorose Ablehnung jener Sorte von schweren, massiven und bodenverhafteten Bauwerken, die mit Begriffen wie *Heimattümelei* und

23 Vgl. BRUNO TAUT: *Nieder mit dem Seriosismus*. Zitiert nach: WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.9

24 Vgl. SIEGFRIED GIEDION: *Befreites Wohnen*, S.8

25 ebd., S.8

Blut- und- Boden- Kult verknüpft waren, wurde gerade in Deutschland nach 1945 der Leichtbau als eine Art Verwandlungsprozess, eine Form radikalen Neubeginns, aber vor allem als Bruch mit dem Alten betrachtet. Der Leichtbau wird hier als Plädoyer gegen die »Architektur des Tötens« und gegen den Ewigkeitsanspruch des Dritten Reiches verstanden. Schon allein solche Titel von Veröffentlichungen FREI OTTOS, wie »Mit Leichtigkeit gegen Brutalität«²⁶, deuten diese gesellschaftsbezogenen Überlegungen an. Eine andere umfassende gesellschaftspolitische Aussage trifft der amerikanische Architekt und Wissenschaftler RICHARD BUCKMINSTER FULLER. Er glaubt, dass das Gewicht der Bauwerke das Maß für den Entwicklungsstand nicht nur der Industrialisierung, sondern auch der Menschen definiert.²⁷ FULLER geht sogar soweit zu behaupten, dass die Architekten, mehr noch als die Politiker, geeignet seien eine Weltverbesserung zu initiieren. »Architekten tragen eine außerordentliche große Verantwortung, sie tragen die Verantwortung, Dinge zusammen-zuführen.«²⁸

Spätestens seit dem Bau des Olympiastadions in München 1972 sind Schlagwörter wie »Offenheit, Transparenz und demokratisches Bauen« in Deutschland populär geworden.²⁹ Oftmals wird der Leichtbau dabei lediglich mit einer Aufglasung der Fassade verwechselt, mit politischer und gesellschaftlicher Transparenz gleichgesetzt und als demokratische Architektur gerechtfertigt. Diese Haltung ist allerdings stark anzuzweifeln, ist doch die »Demokratie als Bauherr« ein äußerst vages Versprechen. Der Architekturtheoretiker VITTORIO LAPUGNANI äußert sich in diesem Zusammenhang folgendermaßen:



Abb. 10: Olympische Spiele in München: 1972

26 Vgl. FREI OTTO: *Leichtigkeit gegen Brutalität*. Zitiert nach: WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.11

27 FREI OTTO: *Leichtigkeit gegen Brutalität*, Zitiert. nach: WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.11

28 RICHARD BUCKMINSTER FULLER: *Last Words*. Zitiert nach: CARSTEN KROHN: *Buckminster Fuller und die Architekten*, S.9

29 Vgl. GUIDO BREDGENS: *Demokratisches Bauen. Eine architekturtheoretische Diskursanalyse zu Parlamentsbauten in der Bundesrepublik Deutschland*, S.11

»Eine demokratische Architektur kann es genauso wenig geben wie eine demokratische Suppe.«³⁰ Es können durch leichte Konstruktionen zwar Eindrücke und Gesten vermittelt werden, politische Programme oder Staatsformen können hingegen nicht ausgedrückt und abgebildet werden. Leichtbau ist nicht zwingend auch gleichzeitig »demokratisch«, formuliert GUIDO BRENDGENS in seinem architekturtheoretischem Aufsatz zum demokratischen Bauen.

Auch JÖRG SCHLAICH kritisiert besonders die »High-Tech-Architektur«, die nur bei den »Reichen«, wie bei Banken und Versicherungen in Europa und Arabien, funktioniert und in Bereichen, wo »Geld weniger zählt als Repräsentation«. Hier sieht er die deutliche Gefahr, dass diese Entwicklung in »hohem Maß asozial« sein kann. Er plädiert deshalb für »mehr Verantwortungsgefühl« und »ganzheitliches ökologisches Bewusstsein«, für »Zurückhaltung und Disziplin, mehr Innerlichkeit- als Äußerlichkeit.« Leichtbau lohnt sich aus seiner Sicht deshalb besonders aus ökologischen, sozialen und kultureller Gründen. Er kann in Form von »Baukultur« als »adäquate Gegenleistung für verbaute Natur« verstanden werden.³¹

30 VITTORIO MAGNAGO LAMPUGNANI: *Die Diskussion um die Chimäre Bauen in der Demokratie und »demokratisches Bauen«*. Zitiert nach: GUIDO BRENDGENS: *Demokratisches Bauen. Eine architekturtheoretische Diskursanalyse zu Parlamentsbauten in der Bundesrepublik Deutschland*, S.13

31 Vgl. JÖRG SCHLAICH. In: *Detail*, Dez, 2005, S.1397

»Freude am
Konstruieren
statt Klotzen.«³²

Wirtschaftlich-ökologische Aspekte

Wenn RUDOLF DORNACH, vom ILEK in Stuttgart, zu bedenken gibt, dass heute, bezogen auf jeden Einwohner der Erde, etwa 20t Masse fest in der Architektur verbaut sind, und in der Bundesrepublik Deutschland ungefähr 60t verbautes Material pro Einwohner zusammen gerechnet werden können, dann sind diese Zahlen mehr als nur ein virtuelles Gedankenspiel. Es drängt sich die berechnete Frage auf, ob eine solche Masse an verbauten Materials pro Einwohner noch ökologisch sein kann.³³ Versteht man Ökologie, als sorgsames Haushalten mit Material- und Energieressourcen, bietet der Leichtbau diesbezüglich sogar einen sehr zukunftsfähigen Lösungsansatz. Aber gleichzeitig liegt hier auch schon das Problem. Denn oft sind leichte Konstruktion sehr aufwendig. In erster Linie sind sie zeitaufwendig in der Planungsvorleistung. Aber auch Herstellung, Instandhaltung und Pflege sind manchmal kostspieliger als bei konventionellen Konstruktionen. In dieser Problembeschreibung sieht JÖRG SCHLAICH wiederum eine Chance für den Leichtbau. Aus seiner Sicht kann er »Arbeitsplätze« in hochqualifizierten Berufen, schaffen, frei nach dem Motto: »Freude am Konstruieren statt Klotzen.«

FREI OTTO drückt das anders aus: »Es muss sorgsam geprüft werden, wo sich Material einsparen lässt, ohne die Funktionstüchtigkeit zu gefährden, was in der Konsequenz heißt, dass niedrige Löhne auf der Baustelle und die heutigen, ökologisch gesehen, zu niedrigen Material- und Energiepreise ein Hemmnis für den Leichtbau sind.«³⁴ Gerade in den modernen Industrieländern ist aber der wirtschaftliche Gesichtspunkt in der Regel entscheidend. Mit einer Discount-Mentalität, die mit »Geiz ist geil« wirbt, sind Leichtbaukonstruktionen nicht denkbar. Möglicherweise muss deswegen unsere derzeitige Grundeinstellung vollständig geändert werden.

33 Vgl. EBERHARD MÖLLER: *Das Prinzip Leichtbau*. In: WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.42

34 FREI OTTO. Zitiert nach: EBERHARD MÖLLER: *Das Prinzip Leichtbau*. In: WINFRIED NERDINGER, *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.42

Wenn die Rohstoffe knapp werden, wird es zwingend notwendig sein, über einen verantwortungsvollen Umgang mit ihnen nachzudenken. Spätestens dann wird Leichtbau, vor allem wegen des geringen Materialverbrauchs, wirtschaftlich interessant.

Der Leichtbau erscheint auch aus einem weiteren Grund interessant. Im Mittelpunkt steht dabei der Begriff der Mobilität oder besser der Beweglichkeit. Der stetig wachsende Grad an Beweglichkeit, der für unsere moderne und sich immer stärker globalisierende Welt offensichtlich eine Voraussetzung darstellt, führt zu enormen Umwälzungen und Veränderungen hinsichtlich wirtschaftlicher, sozialer, kultureller, gesellschaftlicher und politischer Konstellationen. Aber auch im Kleinen hat die Beweglichkeit Einfluss auf unsere Wohn- und Arbeitswelt. Schlagwörter wie »modernes Nomadentum« und »berufliche Flexibilität« haben längst Eingang in unseren sozialen und gesellschaftlichen Alltag gefunden.

Doch was hat Beweglichkeit eigentlich mit Leichtbau zu tun? Beweglichkeit setzt sich im Kern aus zwei Elementen zusammen, einerseits aus der reinen Bewegung und andererseits aus dem Bewegten (Gegenstand, Masse). In dieser sehr allgemeinen Betrachtungsweise kann der Begriff auf fast jede Tätigkeit angewandt werden. Versteht man in diesem Zusammenhang das »Leichtbauen« als eine Art Optimierungsprozess, der in erster Linie die Masse des Bewegten reduziert, bietet dieses Verfahren nicht nur eine Einsparung an Material sondern folgerichtig auch eine Reduzierung des Rohstoffbedarfs in Verbindung mit gemindertem Energieverbrauch, der letztendlich für jede Bewegung notwendig ist. Der Leichtbau eröffnet somit die Chance einer effizienten und optimierten Beweglichkeit.

3 / DAS
PRINZIP
LEICHT-
BAU

»Die Leichtigkeit oder Effektivität von Objekten der Natur, Technik und Kunst messen zu wollen, ist nicht mehr als das Aufspüren eines möglichen Versuchs, die realen Dinge einmal nach Form und Festigkeit in neuen und möglichen Denkweisen zu erfassen.«³⁵

Das Prinzip Leichtbau

Leichtbau lässt sich als Resultat, oder besser, als Zwischenergebnis eines Entwicklungs- und Optimierungsprozesses verstehen, das dem »Prinzip der Verringerung von Masse« folgt. Das Prinzip Leichtbau taucht in der Natur gleichermaßen wie in der Technik auf. Dabei gilt grundsätzlich für die lebende Natur, dass »Form billiger ist als Material.«³⁵ Das heißt, eine Pflanze wird immer bestrebt sein, über formale Strukturen, Material einzusparen, da ein Generieren von überflüssigem Material auch unnötigen Energieaufwand zur Folge hätte. Leichtigkeit ist für die Natur ein existenzieller und evolutionärer Vorsprung. In unserer, vom Menschen gestalteten Umwelt, sind es besonders die ingenieurtechnischen Konstruktionen die diesem Prinzip folgen, etwa solche die große Spannweiten überbrücken (Brücken, Kuppeln), große Höhen erreichen (Türme, Masten) oder sich bewegen oder bewegt werden (Zelte, Autos, Flugzeuge). Die Reduzierung ihres Eigengewichts ist dabei zwingend, da diese Konstruktionen ansonsten an ihrer eigenen Last zerbrechen würden.³⁷

Besonders interessant erscheint das Prinzip Leichtbau, wenn es nicht nur auf die Masse (absolute Leichtigkeit), sondern auch auf die Energie bezogen wird. Dabei spielen folgende Fragen eine Rolle: Wie viel Energie ist in Masse gespeichert? Oder: Wie viel Energie wird bei der Herstellung und Wartung eines Objektes verwendet? Ein extrem leichtes Objekt hat oftmals einen hohen Energieaufwand, während typisch schwere Konstruktionen wenig Energie verbrauchen oder sogar Energie viel besser speichern können. In diesem Zusammenhang kann man nur von relativer Leichtigkeit sprechen, da folglich noch andere Kriterien als die tatsächliche Masse hierbei eine Rolle spielen.³⁸

35 FREI OTTO: *IL 24 Prinzip Leichtbau*, S.9

36 Vgl. ADRIAAN BEUKERS: *Lightness*, S.44, eigene Übersetzung:
»shape is cheaper than material«

37 Vgl. WERNER SOBEK: *Entwerfen im Leichtbau*. In: UNIVERSITÄT STUTTGART:
Themenheft Forschung – Leichtbau, S.71

38 Vgl. Frei Otto, *IL 24 Prinzip Leichtbau*, S. 15

»Sie müssen immer mehr
mit immer weniger tun,
um in allen Stürmen
steuerbar und flott zu
bleiben.«³⁹

39 RICHARD BUCKMINSTER FULLER: *Tetrascroll – Goldlöckchen und die Bären.*
In: CLAUDE LICHTENSTEIN: *Your private sky: Diskurs R. Buckminster Fuller*, S.520

3.1 Kategorien

Es gibt grundsätzlich drei unterschiedliche Kategorien im Leichtbau, die miteinander kombiniert werden können und auf unterschiedlichste Art und Weise auftreten. Man unterscheidet in Materialleichtbau, Strukturleichtbau und Systemleichtbau.

— Materialleichtbau

Unter Materialleichtbau versteht man die Verwendung von Baustoffen in einem günstigen Verhältnis von spezifischem Gewicht zur ausnutzbaren Festigkeit, Dehnung oder Steifigkeit. Danach spielt neben dem Material, die Form und die Formbarkeit der Materialien eine entscheidende Rolle. In der Werkstoffforschung nimmt die Optimierung vorhandener Baustoffe heute eine zentrale Stellung ein.⁴⁰

— Strukturleichtbau

Der Strukturleichtbau ist wesentlich komplexer als der Materialleichtbau. Er beschäftigt sich mit der Art, Anzahl und Anordnung von Bauteilen, aus denen eine tragende Struktur minimalen Gewichts, dem Tragwerk, gebildet wird. Entsprechend komplex und vielfältig sind die Möglichkeiten eine Konstruktion strukturell zu erleichtern. Klassische Methoden sind üblicherweise das Ausmagern, also das Wegnehmen von ineffektiver Masse, gepaart mit einer Verstärkung besonders belasteter Bereiche. Dazu nennt WERNER SOBEK sechs »Grundregeln des Strukturleichtbaus:«⁴¹

- Biegebeanspruchungen sind zu vermeiden
- Zugkräfte sind über lange Wege gewichtsarm zu führen

⁴⁰ Vgl. WERNER SOBEK: *Entwerfen im Leichtbau*. In: UNIVERSITÄT STUTTGART: *Themenheft Forschung – Leichtbau*, S.71

⁴¹ Vgl. EBERHARD MÖLLER: *Das Prinzip Leichtbau*. In: WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S. 42

- Drückkräfte sind über kurze Wege zu leiten, da sonst die Stabilitätsproblematik der Druckglieder zu unnötigen Mehrmassen führt
- über lange Wege zu leitende Druckkräfte sind gegen Stabilitätsversagen durch geeignete Formgebung zu sichern
- Ein Kurzschließen der Kräfte innerhalb des Tragesystems führt in der Regel zu gewichtsarmen Tragwerken und nebenbei, zu einfachen Foundationen (siehe Tensegrity).

JÖRG SCHLEICH weist auf den wohl pragmatischsten Ansatz im Zusammenhang mit Strukturleichtbau hin und erweitert damit die vorgenannten Grundregeln. Er fordert, dass jede unnötige Spannweite vermieden und nur soviel gebaut wird, wie aus der Aufgabe heraus notwendig ist. »Damit wird am meisten Baumaterial gespart.«⁴²

— Systemleichtbau

Unter Systemleichtbau versteht man das Prinzip, in einem Bauteil neben der lastabtragenden Funktionen auch noch andere, zum Beispiel raumschließende, speichernde, dämmende oder vergleichbare Eigenschaften zu vereinen. Die tragenden Bauteile werden multifunktional und ersetzen gleichzeitig ansonsten zusätzlich notwendige Bauteile. Systemleichtbau kommt vor allen Dingen bei adaptiven Systemen zur Anwendung.⁴³ (siehe Adaptive Systeme)

⁴² Vgl. WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.41

⁴³ Vgl. WERNER SOBEK: *Entwerfen im Leichtbau*. In: UNIVERSITÄT STUTTGART: *Themenheft Forschung – Leichtbau*, S.74



»Der Motor der technischen Entwicklung ist die Erfindung, die durch Erprobung kontrolliert wird.«⁴⁴

3.2 Entwurfsmethoden

Im Wesentlichen lassen sich die Entwurfsmethoden im Leichtbau in experimentelle Formfindungsmethoden und mathematisch-numerische Methoden einteilen.

— Experimentelle Formfindungsmethoden

Wo immer man sich zum Ziel setzte, gewichtsminimale Konstruktionen zu entwerfen, verwendete man zunächst individuell entwickelte Methoden. Die Seifenhautstudien von ANTOINE FERDINAND PLATEAU im Zusammenhang mit der Erforschung der Minimalflächen, die berühmten Hängemodelle des spanischen Architekten ANTONIO GAUDI, die Analogieschlüsse von D'ARCY WENTWORTH THOMPSON, in denen er das Tragverhalten lebender und nichtlebender Objekte analysiert⁴⁵, oder auch die Minimalstrukturen von JAMES CLARK MAXWELL und ANTHONY GEORGE MALDON MITCHELL⁴⁶, gehören zu den im Verlauf vieler Jahrzehnte unabhängig voneinander entwickelten Verfahren. Es war gerade der Verdienst des Stuttgarter INSTITUTS FÜR LEICHTE FLÄCHENTRAGWERKE, unter der damaligen Leitung von FREI OTTO diese, auf experimentellen Arbeiten basierenden Methoden, zusammenzutragen, um eine Reihe weiterer Methoden zu ergänzen und erstmals eine Kategorisierung der unterschiedlichen Formentwicklungsmethoden, von FREI OTTO als »Formfindungsmethoden« bezeichnet, vorzulegen.⁴⁷

45 D'ARCY WENTWORTH THOMPSON: *On growth and form*, Cambridge 1917

46 ANTHONY GEORGE MALDON MITCHELL: *The limits of economy of material in frame structures*, Philosoph. Mag. 8, 1904

47 Vgl. WERNER SOBEEK: *Entwerfen im Leichtbau*. In: UNIVERSITÄT STUTTGART: *Themenheft Forschung – Leichtbau*, S.75

— Mathematisch-numerische Methoden

Neben den experimentellen Methoden gibt es auch computergestützte mathematisch-numerische Formfindungsmethoden, wobei in indirekte und direkte Methoden unterschieden werden muss. Die indirekte oder Deformationsmethode stellt eine numerische Simulation der experimentellen Methode dar. Dabei wird die vorgegebene Ausgangsform solange durch Aufbringen einer Last verformt, bis sich schließlich eine Geometrie einstellt, welche auch die übrigen Entwurfsanforderungen erfüllt. Die am häufigsten angewandte Methode zur computergestützten Berechnung ist die Finite-Elemente-Methode (FEM). Dabei lässt sich nur durch das ständige Ändern der Vorgabedaten und eine anschließende Neuberechnung, also dem indirekten Weg, ein befriedigendes Endergebnis erzielen. Die direkte Methode arbeitet mit vorformulierten, geometrischen Randbedingungen, mit dem formbestimmenden Lastfall und einem ganz bestimmten, vorgegebenen Spannungszustand und versucht daraus eine Form zu entwickeln.⁴⁸

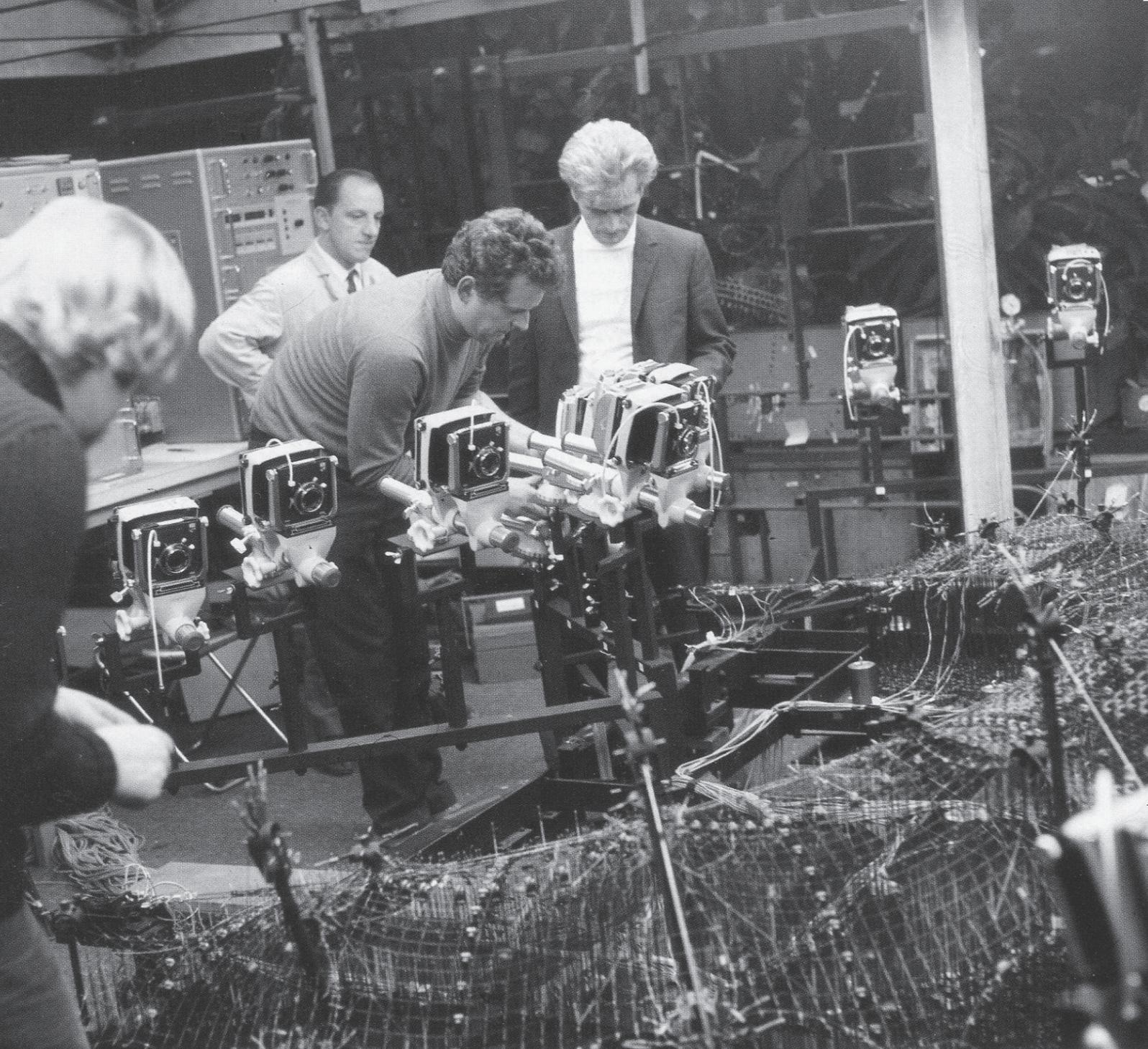


Abb. 12: Messmodelle für das Olympiادach
in München 1972 (Anfänge der computerge-
stützten Formfindung)

»...there must be some fundamental principles and laws, an intrinsic force system, which can form the basis for the design of minimum inventory / maximum diversity building systems.«⁴⁹

49 PETER PEARCE: *structure in nature is a strategy for design*. Zitiert nach:
ADRIAAN BEUKERS: *Lightness – the inevitable renaissance of minimum energy structures*, S.49

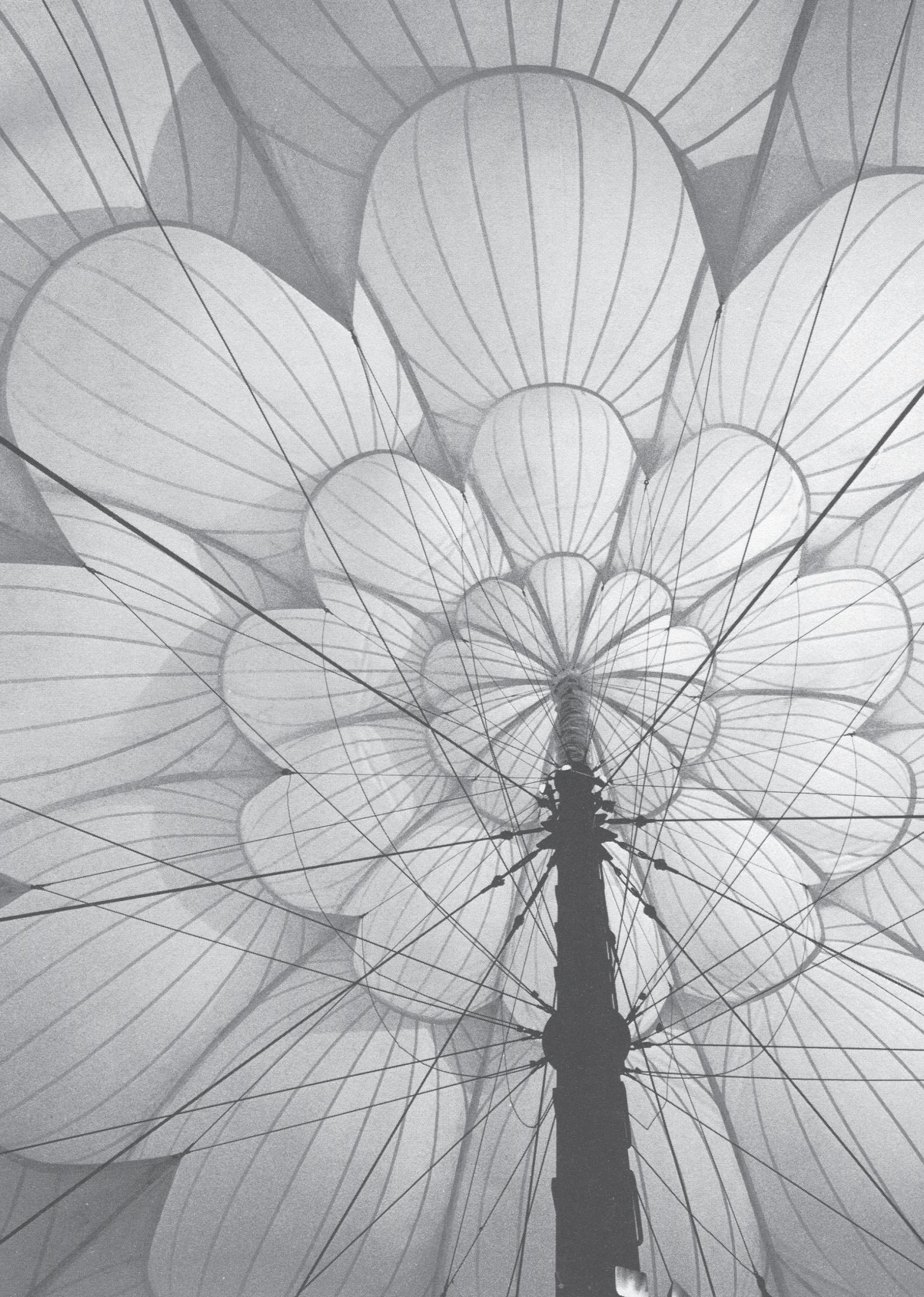
3.3 Selbstbildungsprozesse

Für das wesentliche Optimierungsziel leichter Konstruktionen, dem Verringern von Masse, bieten die sogenannten Selbstbildungsprozesse ein unschätzbares Potential. Selbstbildungsprozesse laufen ohne Zutun oder Hilfe des Menschen ab. Es sind gestaltbildende Prozesse, die aufgrund von Naturgesetzen und unter vorgegeben Randbedingungen zu sichtbaren Formen und Konstruktionen führen.

Während in der lebenden Natur vorrangig biologische, vor allem genetisch gesteuerte Selbstbildungsprozesse ablaufen, überwiegen in der nichtlebenden Natur physikalische Selbstbildungsprozesse, die sogar für technische Konstruktionen genutzt werden. Dabei wirken die physikalischen Gesetzmäßigkeiten und Randbedingungen ständig und immer gleich, unabhängig von der Größe der Konstruktionen. Das bedeutet, dass Selbstbildungsprozesse genau so in winzig kleinen Konstruktionen (Zellen oder Schäumen), wie auch in sehr großen Konstruktionen (Hängebrücken) stattfinden. Der Grad der »Selbstbildung« kann sich stark unterscheiden. Während ein Seil, welches an zwei Punkten befestigt ist, (schon unter Eigenlast) tatsächlich seine Form selbst findet, muss eine Kuppel erst gebaut werden, obwohl sie vorher über ein Hängemodell ermittelt wurde, um im endgültigen Zustand ihre Stabilität zu erreichen.⁵⁰

Weil bei den Selbstbildungsprozessen der Maßstab keine Rolle spielt, bietet sich die Möglichkeit von sehr simplen, aber gerade deshalb auch äußerst anschaulichen Experimenten und Modellen an, auf die im Folgenden näher eingegangen werden soll.

⁵⁰ Vgl. RAINER BARTHEL: *Naturform – Architekturform*. In: WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.17



— Membranen

Membranen stellen eine der elementarsten Selbstbildungsprozesse dar. Eine Methode Membranflächen experimentell zu erzeugen, besteht zum Beispiel in der Herstellung von Seifenhäuten. Die Verwendung von destilliertem Wasser mit wenigen Tropfen Spülmittel führt zu relativ stabilen Membranen. Taucht man einen Rahmen in diese Flüssigkeit und zieht ihn vorsichtig heraus, bildet sich zwischen den Rahmenteilen eine Membran, die sogenannte Seifenhaut. Dabei ist zu beobachten, dass die Form des Rahmens die Geometrie der Membran entscheidend bestimmt.⁵¹ Interessanterweise gibt es häufig auch Mehrfachlösungen. Zum Beispiel bilden sich unterschiedlich ausgeformte Seifenhautflächen bei gleicher Rahmenform, wobei alle Formen das gleiche Minimalgewicht besitzen. Der Physiker ANTOINE FERDINAND PLATEAU beschreibt als erster im Zusammenhang mit seinen Untersuchungen zu Kapillarkräften und Oberflächenspannungen diese Struktur von Seifenblasen und Schäumen.⁵² Eine Membran hat ganz spezifische physikalische und geometrische Eigenschaften, die in erster Linie aus den einwirkenden Kräften resultieren. Durch die Kräfte zwischen den Molekülen der Seifenhaut zieht sich die Membran immer in eine Form, in der die Flächenspannung an jeder Stelle und in jeder Richtung gleich groß ist. Charakteristisch für die Seifenhaut ist, dass sie antiklastisch geformt und dass der Betrag der Hauptkrümmungsradien an jedem Punkt gleich ist. Damit stellt die Seifenhaut eine Gleichgewichtsfigur dar, bei einem in alle Richtungen gleichen und über die gesamte Fläche konstanten Vorspannungszustand. Gleichzeitig bildet sich eine Fläche mit dem geringst möglichen Flächeninhalt heraus. Man kann letztendlich von einer »Minimalfläche« sprechen, die bei vorgegeben Randbedingungen von selbst und unmittelbar entsteht.⁵³

Ein anderes, sehr beeindruckendes und äußerst sinnfälliges Beispiel aus der Natur sind Spinnennetze. Neben ebenen Radialnetzen

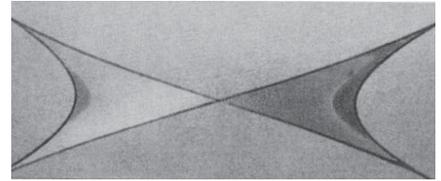
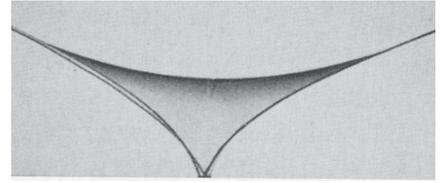


Abb. 13: (linke Seite) **Brass Rail Restaurants, New York World Fair, 1963 – 64,**
VICTOR LUNDY
Abb. 14, 15: **Seifenhautstudien**
Abb. 16: **Spinnennetz**

⁵¹ ebd., S.18

⁵² Vgl. WERNER SOBEK: *Entwerfen im Leichtbau*. In: UNIVERSITÄT STUTTGART: *Themenheft Forschung – Leichtbau*, S.74

⁵³ Vgl. RAINER BARTHEL: *Naturform – Architekturform*. In WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.19

können verschieden Spinnenarten auch räumlich gekrümmte, also antiklastisch geformte, Netze ausbilden. Die Stabilisierung erfolgt über eine Vorspannung, aus der eine Krümmung der Netze resultiert.

Das Experimentieren mit Minimalflächen, unter Zuhilfenahme von Seifenhäuten und unter Einbeziehung der Kenntnisse über Spinnennetze, ist eine wichtige Methode für die Formfindung. Zeltkonstruktionen in der Ausprägung von reinen Membrankonstruktionen oder als Seilnetzkonstruktionen sind auf diese Weise darstellbar, wobei zum Beispiel die Membran durch gitterförmige Netze ersetzt werden kann. Der Vorteil bei Netzen besteht darin, dass kein Schnittmuster gebraucht wird, lediglich die Netzstruktur verändert sich. Dies wird häufig in der Architektur angewandt, weil sich damit größere Spannweiten überbrücken lassen.

Bei Zeltkonstruktionen muss die strenge Vorgabe der Spannungsgleichheit, die sich bei Seifenhäuten von selbst einstellt, nicht eingehalten werden. Dieses Phänomen lässt sich am deutlichsten dann erkennen, wenn Falten auftreten, welche punktuelle Dehnungen, also Spannungsspitzen markieren. Das Optimum bei Membrankonstruktionen stellt dagegen eine weitgehende Spannungsverteilung in alle Richtungen dar. »Richtig gespannte Zelte haben eine weitgehend gleiche Spannung in alle Richtungen.«⁵⁴ Der Grad des Selbstbildungsprozesses bei technischen Zelten ist wesentlich geringer als bei Seifenhäuten. Erst durch einen Zuschnitt und später durch das Spannen zwischen vorgegeben Punkten, findet die Zelthaut ihre endgültige Form. Grundsätzlich lassen sich Zelte in abgestützte und abgehängte Systeme einteilen. Die genaue wissenschaftliche Analyse der einzelnen Zelttypen ist vor allem FREI OTTO zu verdanken. Da eine Membrankonstruktion wesentlich beeinflusst wird durch ihre Abstützungen und Ränder, den sogenannten Hoch- und Tiefpunkten, kann aus der Anordnung dieser Punkte eine Unterscheidung von folgenden Zelttypen vorgenommen werden: Vierpunktzelt, Spitzzelt, Bogenzelt, Wellenzelt. Neben den aufgeführten Zelttypen gibt es unzählige Mischformen.⁵⁵



Abb. 17: Tipi der Shoshoni Indianer:
Spitzzelt

Abb. 18: Seilnetz des Deutschen Pavillon in
Montreal, 1967

54 FREI OTTO, *IL 18 – Seifenblasen*, S.15

55 Vgl. RAINER BARTHEL: *Naturform – Architekturform*. In: WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.19

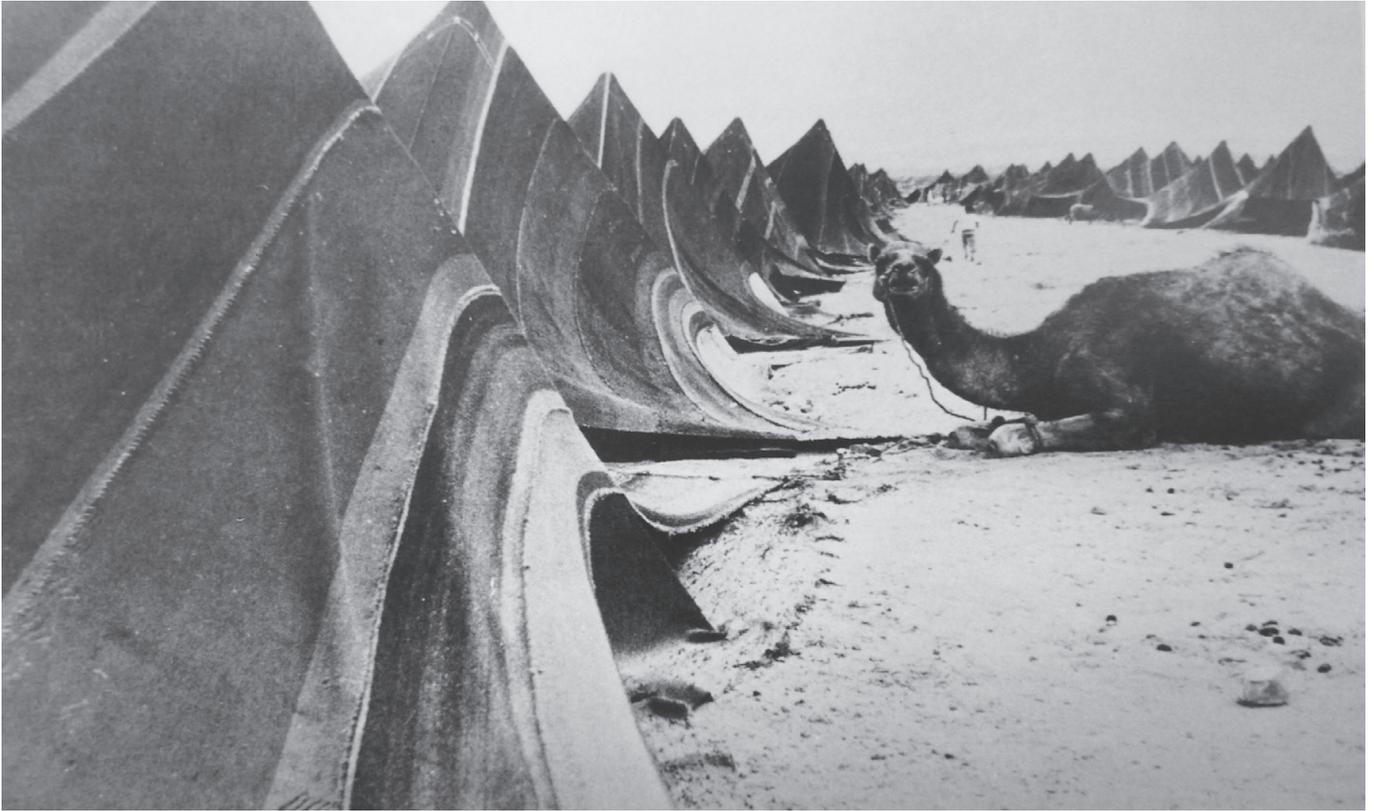
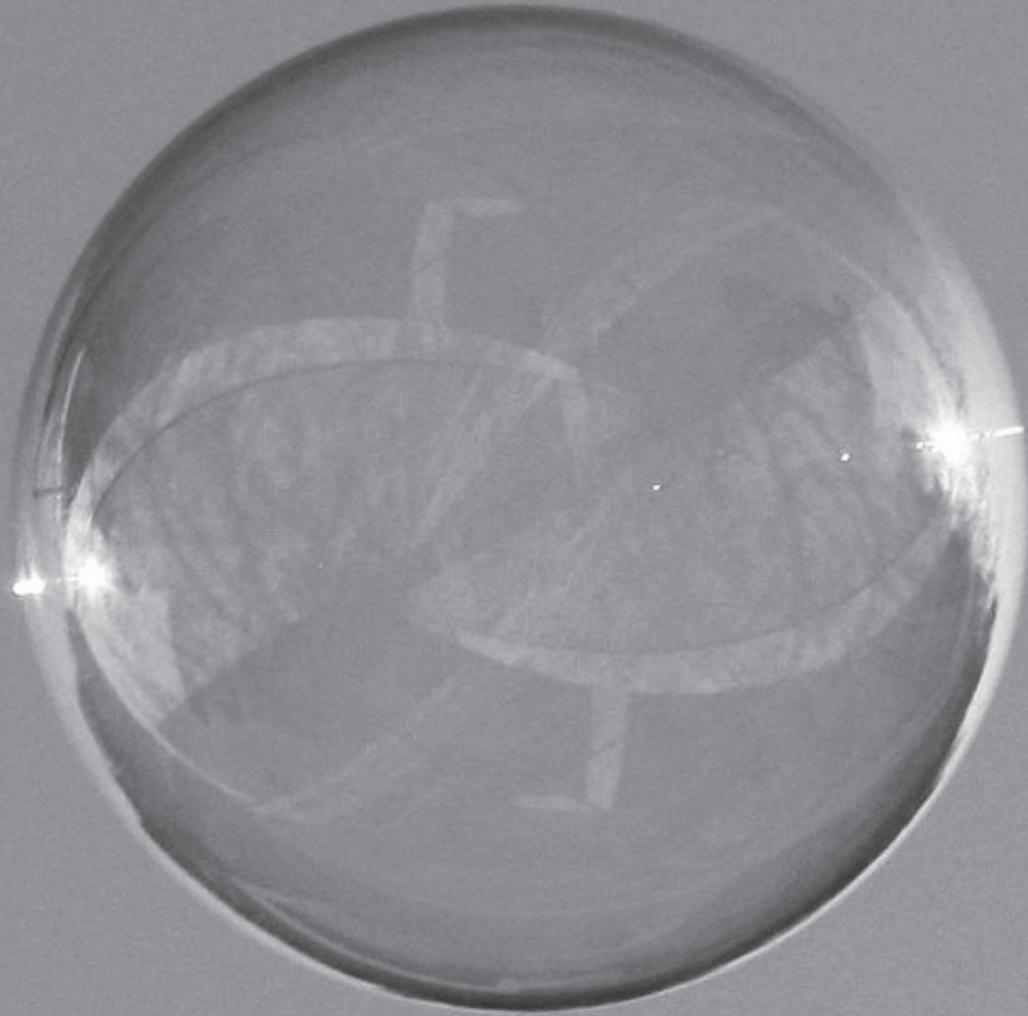


Abb. 19: **Wüstenzelte:** Wellenzelte
Abb. 20: **Eingangsbogen auf der Buga:**
Bogenzelt, 1957, FREI OTTO



»Am Anfang
war der Pneu.«⁵⁶



56 FREI OTTO UND JOHANN-GERHARD HELMCKE. Zitiert nach:
WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.45

Tatsächlich nimmt man an, dass die frühesten Entstehungsformen des Lebens als Entmischungsvorgänge vorstellbar sind und man dabei zwangsläufig zu membranumhüllten Tröpfchen (Koazervate, Mikrosphären) gelangt. Die frühesten Lebewesen (Protobionten) besitzen bereits umhüllende Membranen.⁵⁷ Die pneumatisch gespannte Membran ist neben der Selbstbildung von Minimalflächen eine der elementarsten Konstruktionsformen der Natur. Die einfachste pneumatische Konstruktion ist die Seifenblase. Sie besteht grundsätzlich aus einer dünnen Membran, die durch zwei Medien, zwischen denen ein Druckunterschied herrscht, getrennt wird. Ein gleichmäßiger Innendruck lässt eine perfekte Kugelform entstehen. Kugelsegmente bilden sich, wenn Seifenblasen an einer Fläche anliegen. Eine Addition von Seifenhäuten ergibt Schaumstrukturen. Einschnürungen, Verspannungen im Inneren und Veränderungen der Druckverhältnisse lassen eine unendlich große Formenvielfalt entstehen.⁵⁸

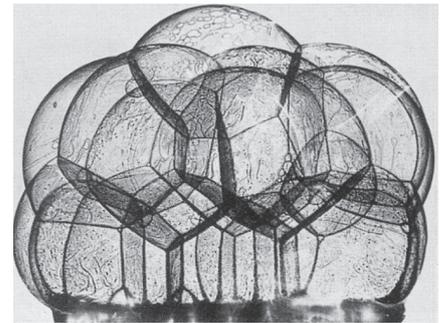


Abb. 21: (linke Seite) **Seifenblase**

Abb. 22: **Schaumstruktur**

Ein Hydro funktioniert im wesentlichen nach dem gleichen Prinzip. Allein der Druckunterschied wird nicht durch ein Gas sondern durch ein flüssiges Medium generiert. Der Wassertropfen stellt zum Beispiel eine solche Konstruktion dar. Der hydrostatische Druck, der nach unten wächst, erzeugt dabei die typische Tropfenform.⁵⁹

In beiden Fällen, sowohl beim Pneu, als auch beim Hydro, herrschen innerhalb der Membranfläche an jeder Stelle und in jede Richtung die gleichen Flächenspannungen. Die Kräfte zwischen den Molekülen verhalten sich dabei so, dass sie innerhalb der Fläche überall gleich groß sind und im Gleichgewicht mit der senkrecht dazu stehenden Last wirken.⁶⁰

⁵⁷ Vgl. WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.22

⁵⁸ ebd. S.23

⁵⁹ ebd. S.23

⁶⁰ Vgl. THOMAS HERZOG: *Pneumatische Konstruktionen*, S.34-60

Die technischen Pneus gehen auf die mit Gas oder Warmluft gefüllten Ballone der Gebrüder MONTGOLFIER zurück. Diese Entwicklung markiert den Beginn der Luftfahrt, bei der die Konstruktion von Pneus, gerade in der Anfangszeit, eine zentrale Rolle spielt. Seine modernste Anwendung findet der Pneu in der Raumfahrt.⁶¹

In der Geschichte des Rades stellt das luftgefüllte Gummirad die vorerst letzte größere technische Innovation, nach der Entwicklung des Speichenrades dar. Dieser Gummireifen wurde schon 1845 von ROBERT WILLIAM THOMPSON erfunden, geriet jedoch wieder in Vergessenheit, bis die Firma Dunlop den Luftreifen zuerst für Fahrräder, dann für Motorräder und später für Automobile weiter entwickelte. Unser ganzes Transportwesen auf der Straße wird seither davon maßgeblich beherrscht.⁶²

In der Architektur geht das erste Patent für eine pneumatische Lufthalle aus dem Jahre 1917 auf FRIEDRICH WILLIAM LANCASTER zurück. Jedoch werden Lufthallen im größeren Umfang erst seit den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts gebaut. An dieser Stelle ist WALTER BIRD zu nennen, der mit seiner amerikanischen Firma BIRDAIR STRUCTURES zunächst pneumatische Kuppeln für Radar und Raketenanlagen baute und später weltweit zum führenden Hersteller für Lufthallen wurde. Eines der beeindruckendsten architektonischen Beispiele ist der amerikanische Pavillon auf der Weltausstellung von Osaka 1970, dessen Dachkonstruktion aus einer seilverstärkten pneumatischen Membran bestand und die unglaubliche Fläche von 142 m Länge und 83 m Breite überspannte.⁶³ »Aus heutiger Sicht kommt der Lufthalle eine ganz besondere Bedeutung zu. Sie ist extremster Leichtbau. [...] Die Lufthalle ist eine der grundlegenden bautechnischen Neuerungen der letzten 100 Jahre. Es ist fraglich ob es neben dem Zelt, dem Gewölbe (einschließl. der Schale) und der Stützen- Balkenkonstruktion überhaupt noch eine vergleichbare Innovation für das Bauwesen

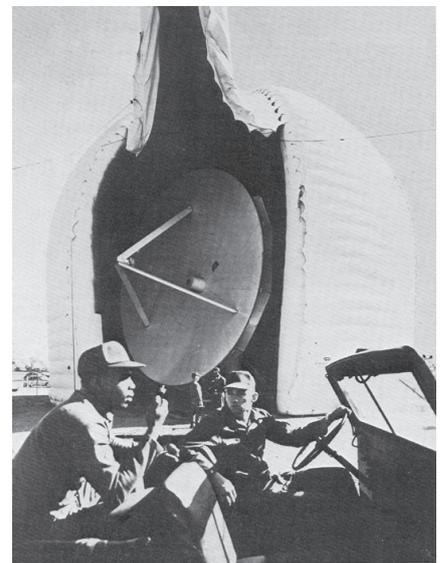


Abb. 23: Heißluftballon der Gebrüder Montgolfier, 1783

Abb. 24: Pneumatische Kuppel für Radaranlagen

61 Vgl. PHILIP DREW: *Frei Otto – Form und Konstruktion*, S.24

62 Vgl. <http://de.wikipedia.org/wiki/Luftreifen>

63 Vgl. SEAN TOPHAM: *Blow-up: Inflatable Art, Architecture and Design*, S.47

geben kann.«⁶⁴ Auch der Architekt THOMAS HERZOG hat sich intensiv mit Pneus beschäftigt. Sein Buch *Pneumatische Konstruktionen*⁶⁵ aus dem Jahr 1976 stellt bis heute eines der umfangreichsten Gesamtwerke dar.



Abb. 25: (links oben) **Waterwalk**, 1968
 Abb. 26: (rechts oben) **Michelinmännchen**
 Abb. 27: (links unten) **Pneumacosc**, 1967
 Abb. 28: (Mitte) **Amerikanischer Pavillon Weltausstellung Osaka**, 1970
 Abb. 29: (Mitte, unten) **Amerikanischer Pavillon Osaka, Innenansicht**, 1970
 Abb. 30: (rechts) **pneumatisch geodätische Kuppel**



64 FREI OTTO UND BODO RASCH. Zitiert nach: WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.23

65 THOMAS HERZOG: *Pneumatische Konstruktionen*, Stuttgart 1976



— Hängekonstruktionen

Der simpelste experimentelle Nachweis für einen Selbstbildungsprozess lässt sich mit einem Seil, welches zwischen zwei Punkten aufgehängt wird, bewerkstelligen. Dieses Seil bildet aufgrund seiner Eigenlast unmittelbar eine durchhängende Bogenform aus. Im Seil herrscht nur Zug, kein Druck und keine Biegung, so dass die Gefahr des Knickens, wie bei einem druckbeanspruchten Tragwerk, nicht besteht. Nach einer Auslenkung findet das Seil selbstständig zu seiner Ausgangsposition zurück. Damit ist eine Hängekonstruktion statisch eine ausgesprochene Optimalform und insofern auch eine Form der Natur, als sie von den Gesetzen der Natur bestimmt wird.

Beispiele für technische Ausführungen lassen sich vor allem bei Hängebrücken finden. Das Problem, dass bei großen Spannweiten darauf zu achten ist besonders gewichtsminimal zu konstruieren, bedingt durch die Gefahr eines Versagens des Tragwerkes aufgrund des Eigengewichtes und der Nutzlast, wurde schon von alters her erkannt und stets berücksichtigt.

So finden sich gerade in den Bergregionen der Anden in Südamerika oder in den Bergen Chinas frühe Zeugnisse von Hängebrücken, die unter Verwendung natürlicher Faserstoffe gebaut wurden. Bis heute stellen sie gewissermaßen eine entwicklungstechnische Höchstleistung dar.⁶⁶

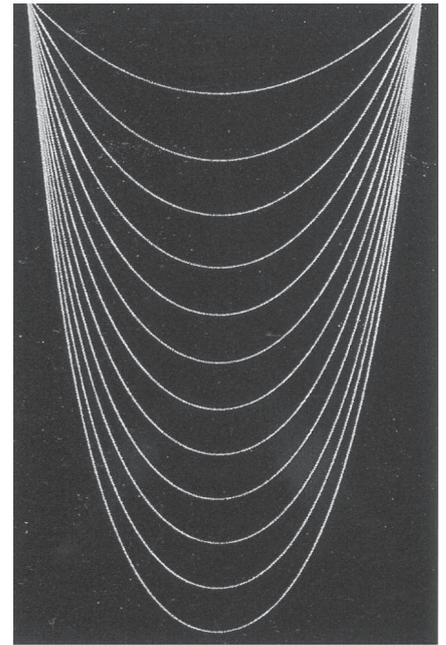
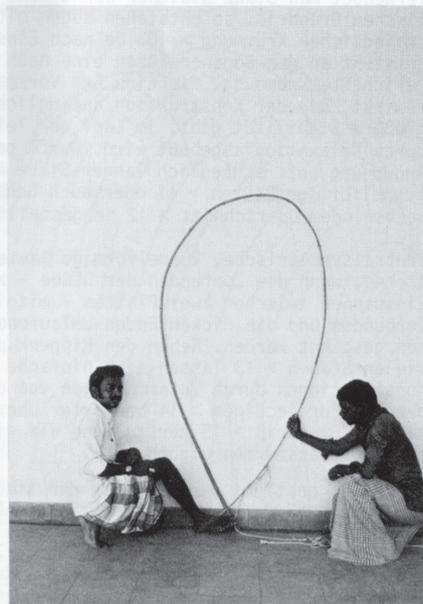
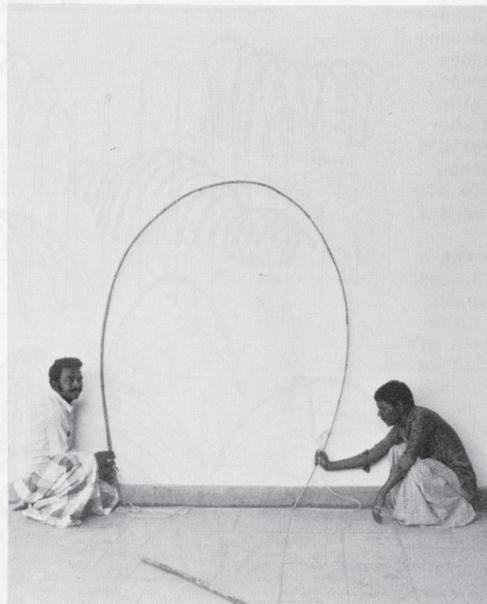
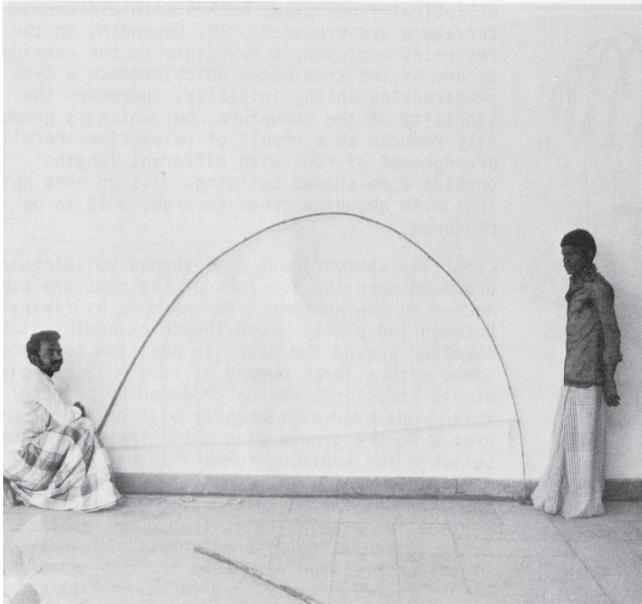
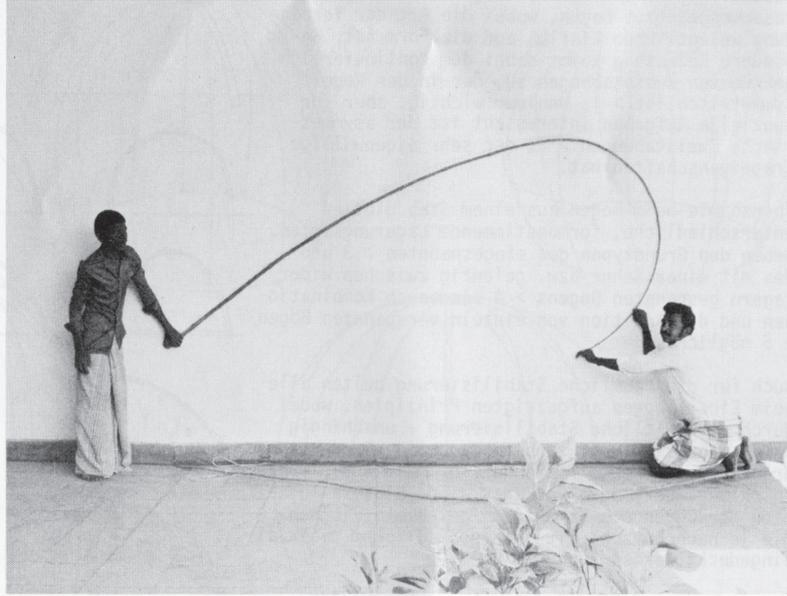
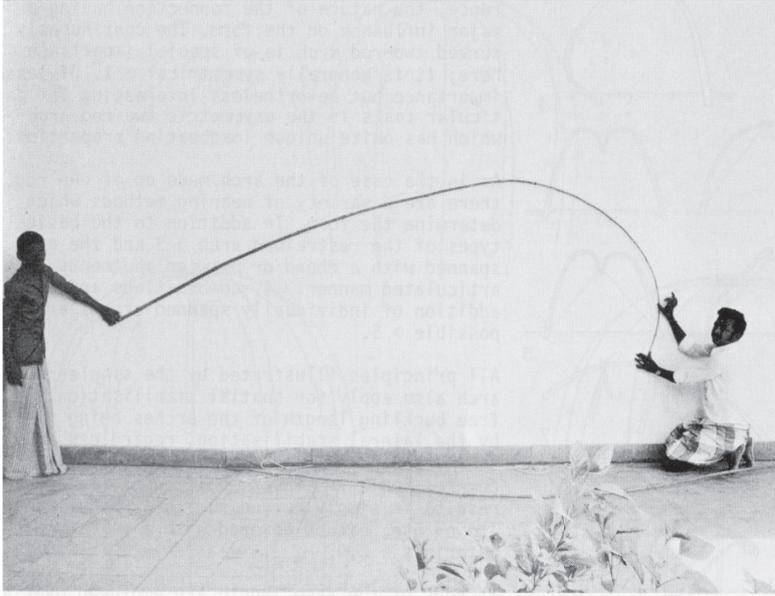


Abb. 31: (linke Seite) **Hängebrücke**
Abb. 32: **Kettenlinie**
Abb. 33: **Hängemodell für die Sagrada Família, ANTONIO GAUDI**

⁶⁶ Vgl. PHILIP DREW: *Frei Otto: Form und Konstruktion*, S.23



— Die Umkehrung der Hängeformen

Die Umkehrung der Hängeformen bedeutet eine Umkehrung der Zugbeanspruchung vom Hängemodell in eine Druckbeanspruchung einer Bogen- bzw. Schalenstruktur. Experimentell lassen sich Bögen, Gewölbe, Kuppeln und Schalen im Hängemodell mit Kettennetzen nachweisen. Die einfachste Methode, Bögen mit Hilfe eines Seiles zu simulieren, wurde im vorherigen Kapitel bereits beschrieben. Kettenmodelle aus Viereck- oder Sechsecknetzen können als dreidimensionale Erweiterungen des hängenden Seils verstanden werden. Aufgrund ihres höheren Komplexitätsgrades ist auch ihre Formenvielfalt um ein Weites höher als bei Bögen.⁶⁷

Dabei erlauben Kettenmodelle nicht nur doppelt gekrümmte Flächen abzubilden, sondern auch ihre inneren Spannungsverteilungen sichtbar zu machen. Stellen sich bei den Knotenpunkten der zulaufenden Ketten generell gleiche Winkel ein, kann man von einer optimalen Spannungsverteilung im Netz ausgehen. Jedoch kann das Hängemodell in beiden Fällen nur als Hilfsmittel betrachtet werden, um eine Konstruktion frei von Biegebeanspruchung unter bestimmten Lasten (meist der Eigenlast), zu generieren. »Ein Tragwerk, dass in der Form dieser Stützenlinie gebaut wird, ist unter Eigengewicht im wesentlichen nur druckbeansprucht, nicht zug- und nicht biegebeansprucht.« Gerade die Vermeidung von Biegung, eine zentrale Forderung des Strukturleichtbaus (siehe Kapitel Strukturleichtbau), ermöglicht materialsparende Tragwerke. Das oben beschriebene Hängemodell gibt jedoch zunächst keinen Aufschluss über die Stabilität der Konstruktion. So kann der Bogen knicken oder seitlich umkippen oder die Schale ausbeulen, je nach dem, wie stark die Konstruktion dimensioniert ist. Es müssen also zusätzliche Maßnahmen getroffen werden, über die das Hängemodell keine Hinweise gibt. Üblicherweise sind dies empirische Versuche oder statisch-numerische Berechnungen.⁶⁸ Eine Minimalkonstruktion, wie ein reines Hängemodell, ist das Umkehrprinzip damit nicht, und ist aus diesem Grund auch nicht in der Natur anzutreffen.

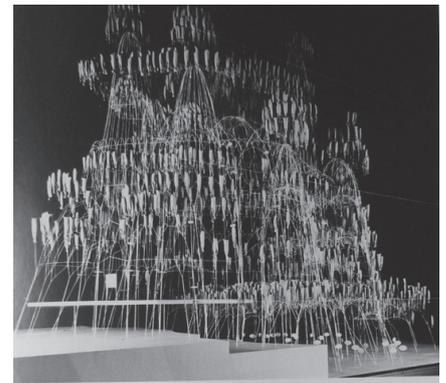


Abb. 34: (linke Seite) **Fotoreihe:**

Bogenlinie aus Bambusrohr

Abb. 35: **Hängemodell für die Sagrada**

Família: Spiegelbild, ANTONIO GAUDI

⁶⁷ Vgl. WINFRIED NERDINGER, *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.24

⁶⁸ Vgl. WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.24

Sie ist somit auch kein Selbstbildungsprozess, sondern eine Entdeckung des Menschen. Der Mensch nutzt diesen indirekten Weg der Formfindung lediglich, weil sich druckbeanspruchte Systeme nicht von selbst bilden. Trotzdem bietet sich auf diese Weise die experimentelle Möglichkeit einer annähernden Optimalformfindung für druckbeanspruchte Bögen oder Flächentragwerke.⁶⁹

Das Prinzip wurde erstmals von ROBERT HOOD 1676 skizziert. Man geht davon aus das CHRISTOPHER WREN für die Kuppelkonstruktion der SAINT PAUL'S CATHEDRAL in London das Umkehrprinzip heranzog. ANTONIO GAUDI ist wohl der berühmteste Baumeister, der diese empirischen Modelle für seine Bauwerke zu nutzen wusste. Er verwendete große Spiegel, um seine Hängemodelle umzukehren. Die Kathedrale SAGRADA FAMÍLIA in Barcelona ist diesbezüglich wohl sein eindrucksvollstes Werk. Aber auch Namen von Architekten und Ingenieuren wie FELIX CANDELA, PIER LUIGI NERVI, KENZO TANGE und HEINZ ISLER stehen für die architektonische Meisterleistungen im Bereich der Kupel- und Schalenbauten.⁷⁰

An dieser Stelle soll noch kurz auf das *Hyperboloid* und das *hyperbolische Paraboloid* eingegangen werden, welche beide eine antiklastisch geformte Fläche aufweisen. Beide Bauformen tauchen gleichzeitig Ende des 19. Jhs. auf. Unabhängig voneinander hatten der Ingenieur WLADIMIR SCHUCHOV und der Architekt ANTONIO GAUDI die konstruktiven und herstellungstechnischen Vorteile der Anwendbarkeit im Bauwesen entdeckt. Dies hatte besonders zwei praktische Gründe. Zum einen gibt ihre sattelähnliche Form selbst dünnen Flächentragwerken eine relative Stabilität. Zum andern lassen sich ihre gekrümmten Flächen problemlos aus geraden Elementen herstellen. Interessanterweise ist diese Bauformen erst wieder in den fünfziger und sechziger Jahren des 20. Jahrhunderts vorübergehend als sogenannte *HP-Schale* in Mode geraten.⁷¹

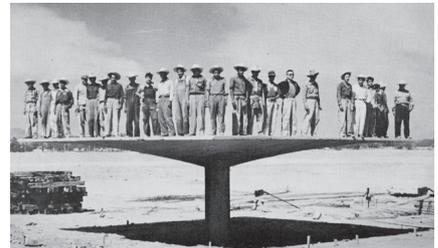
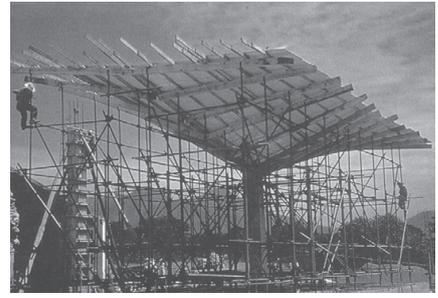


Abb. 36: **hyperbolische Schale:** Bauphase, FELIX CANDELA

Abb. 37: **hyperbolische Schale:** Belastungstest, FELIX CANDELA

69 ebd., S.24

70 ebd., S.25-26

71 JOS TOMOLW: *Die Einführung einer neuen Konstruktionsform durch Suchov und Gaudi*. In: KLAUS BACH: *Vladimir G. Šuchov, 1853-1939: die Kunst der sparsamen Konstruktion*, S.110

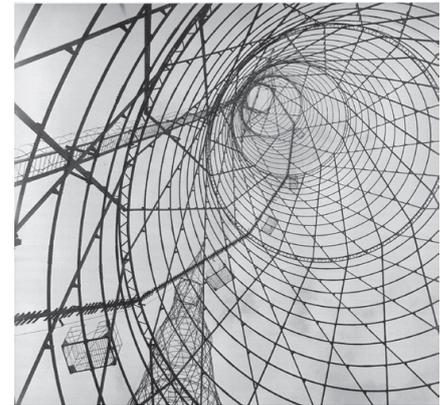
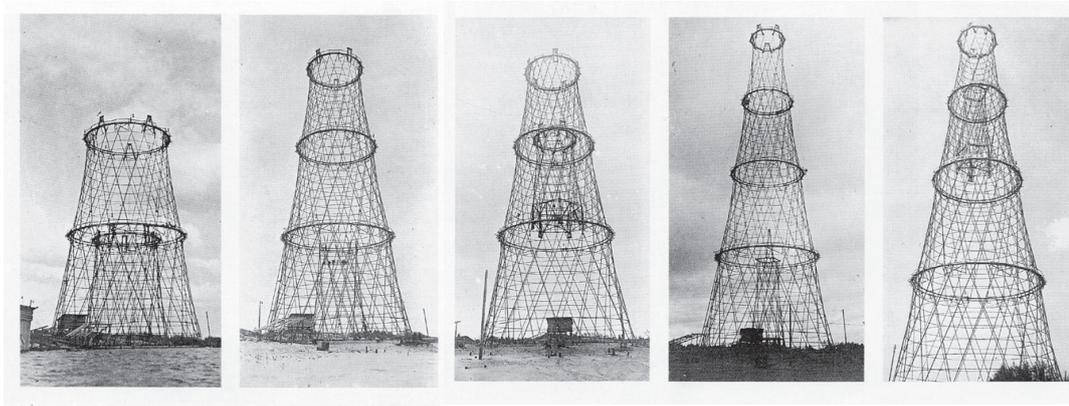


Abb. 38:(links) **fünfstöckiger Nigrés-Stromleitungsmast**, 1927/1929,
WLADIMIR SCHUCHOV

Abb. 39: (oben) **fünfstöckiger Nigrés-Stromleitungsmast**: Detail

Abb. 40: (unten) **fünfstöckiger Nigrés-Stromleitungsmast**: Bau im sogenannten Teleskopverfahren





— Verzweigungen und Minimalwegesysteme

Mit den Studien zu den Minimalwegesystemen können vor allem Verzweigungen in der Natur, die die kürzeste Gesamtlänge zwischen vorgegebenen Punkten erzeugen, experimentell dargestellt werden.⁷² Der experimentelle Aufbau besteht aus einer Glasplatte, die in ein mit Seifenlauge gefülltes Becken horizontal gehängt wird. Eine Vielzahl von Nadeln berührt die Platte von unten. Diese Nadeln können durch dünne Stangen vom Beckenrand in ihrer Position verschoben werden. Lässt man nun den Füllpegel im Becken langsam steigen, so dass sich die Flüssigkeit knapp unterhalb der Platte befindet, bilden sich aufgrund der Oberflächenspannung der Flüssigkeit, Seifenhäute zwischen Glasplatte, Nadeln und Wasseroberfläche heraus. Da Seifenhäute sich immer auf die kleinst mögliche Oberfläche zusammenziehen, entsteht von oben betrachtet ein Muster, das alle Nadeln berührt. Dabei weisen die Abstände zwischen den Nadeln die geringste Gesamtlänge auf. Das Wegenetz bildet charakteristische Verzweigungen aus, die alle durch einen 120° Winkel gekennzeichnet sind.⁷³

1962 analysierte der Mediziner ARTHUR H.C. VON HOCHSTÄDTER Bindegewebe des Menschen und erkannte darin das Prinzip des »60- grädigen Leichtbaus.«⁷⁴ Der Unterschied in der Winkelangabe ($60^\circ/120^\circ$) muss dabei nicht irritieren, resultiert er lediglich aus der Angabe von Außenwinkeln bzw. Innenwinkeln. Genauso bestätigten sich BUCKMINSTER FULLERS Erkenntnisse über Winkelmodule von 60° in allen natürlichen Gewebearten aber auch in natürlichen Flechtwerken.⁷⁵ Dieses aus der Natur übertragene Prinzip findet seine räumliche Anwendung in den geodätisch-tensegeren Strukturen von FULLER.

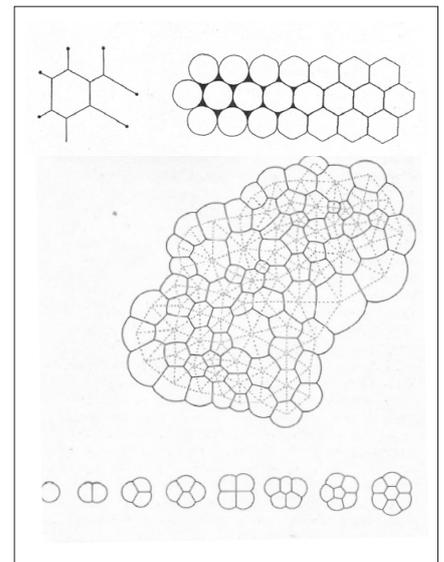


Abb. 41: (linke Seite) **Verzweigungen bei Blitzen**

Abb. 42: **Verzweigungen bei Zellen und Schäumen**

72 Vgl. EWALD BUBNER: *Minimalstrukturen : Beiträge zum Symposium »Minimalstrukturen«*, S.76

73 Vgl. WINFRIED NERDINGER: *Frei Otto – Das Gesamtwerk*, S.28

74 Vgl. CLAUDE LICHTENSTEIN: *Your private sky : Diskurs R. Buckminster Fuller*, S.449

75 ebd., S.448

Bei elektrischer Energie wird infolge von Ladungsübertritten Energie über Blitze sichtbar. Auch hier ist das Phänomen der Verzweigungen mit dem kürzesten Gesamtweg zu beobachten. Ein weiteres minimales Wegenetz beschreiben die *Mitchell-Strukturen*, die von dem australischen Ingenieur ANTHONY GEORGE MALDON MITCHEL im Jahre 1904 entwickelt wurden und auf den elektromagnetischen Grundgleichungen von MAXWELL basieren.

Mit Hilfe dieser mathematisch- numerisch genau definierbaren Strukturen lassen sich optimale Kräftepfade für Bauteile konzipieren und damit extrem gewichtsminimale Tragwerke, wie etwa filigrane Fach- und Netzwerkstrukturen ausbilden.⁷⁶ In der Natur finden sich Analogien zu diesen Strukturen im Knochenaufbau, der *Knochenspongiosa*.

Wie sich leicht erkennen lässt, sind die physikalische Randbedingungen bei diesen Experimenten sehr unterschiedlich. Sie haben jedoch alle auf ihre unterschiedliche Weise mit der Bündelung oder Wegeminimierung zu tun. Damit stellen sie ein effizientes wie auch effektives Optimierungsziel dar.⁷⁷

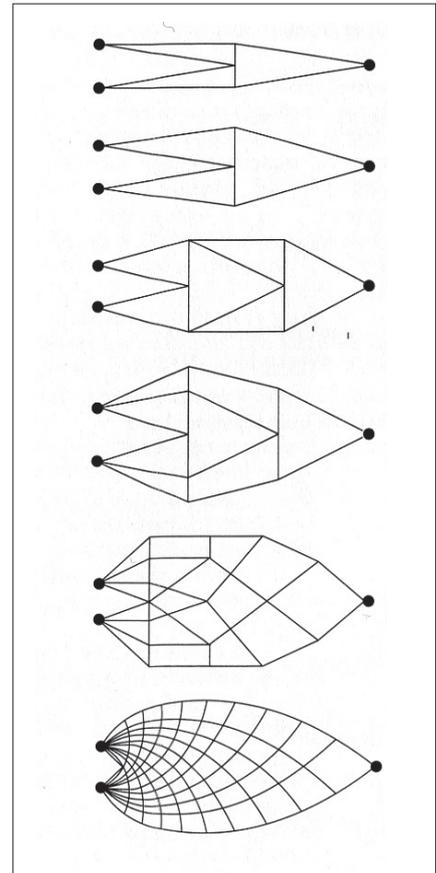
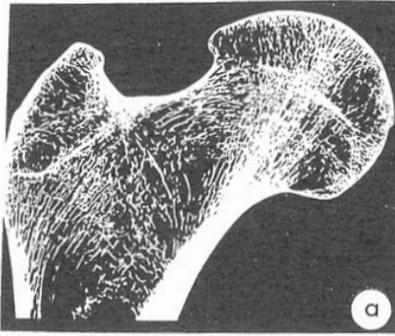


Abb. 43: optimale Verzweigungen nach Mitchell (Mitchell-Strukturen)

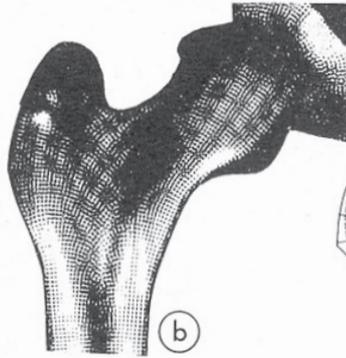
Abb. 44: (rechte Seite) Mitchell-Strukturen im Oberschenkelknochen

⁷⁶ Vgl. ADRIAAN BEUKERS: *Lightness*, S.169

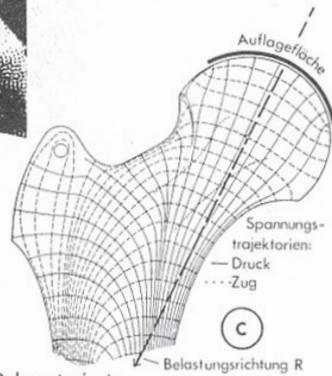
⁷⁷ Vgl. EWALD BUBNER: *Minimalkonstruktionen : Beiträge zum Symposium »Minimalkonstruktionen«*, S.76-77



Zentraler Längsschnitt (Hals und Kopf des Femur des Menschen)

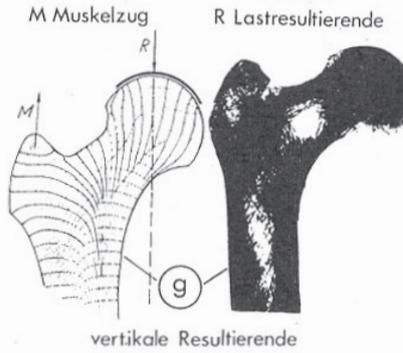
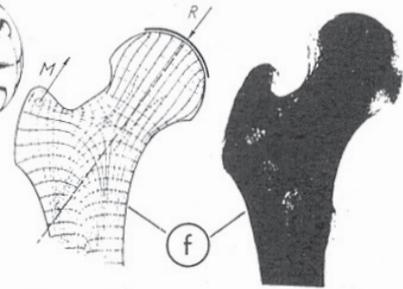
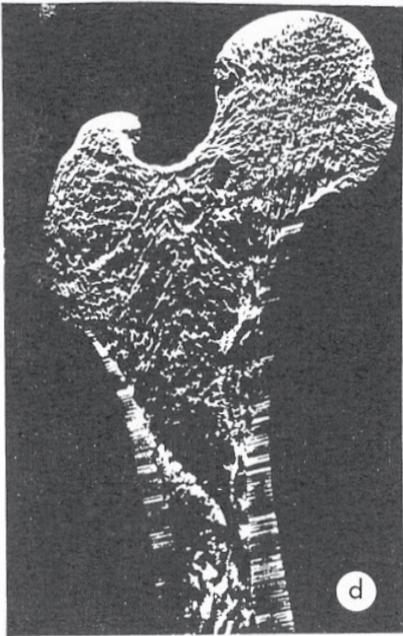


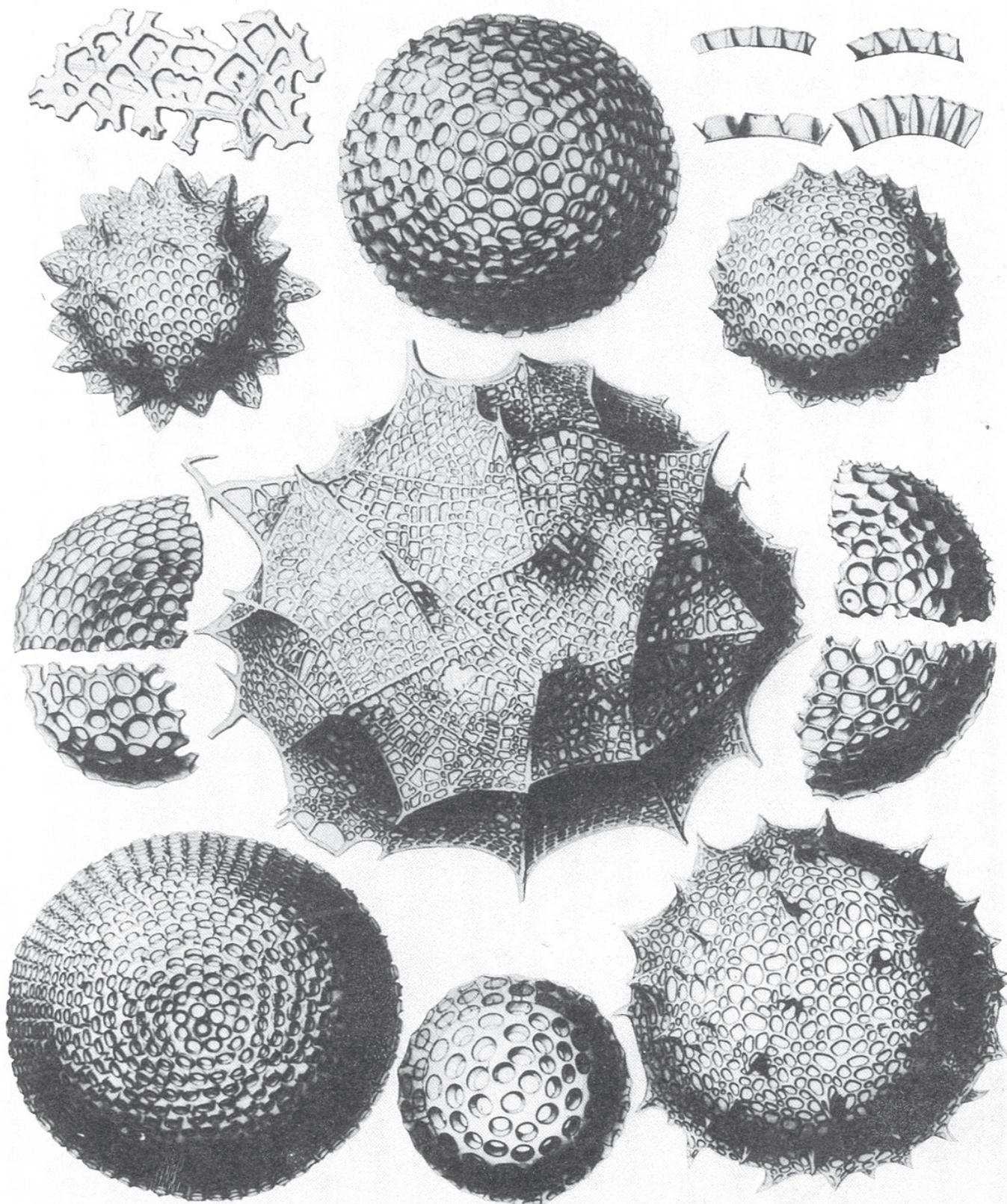
Spannungsverteilung im Plexiglasmodell



Rekonstruierte Spannungstrajektorien

Knochen längsesägt





— Gitterschalen

Die Konstruktion der Gitterschalen beruht auf zwei grundlegenden Prinzipien, dem Umkehrprinzip und der Verformung eines ebenen Gitterwerks in eine doppelt gekrümmte Form. Obgleich das Umkehrprinzip bereits ausführlich beschrieben wurde (siehe Die Umkehrung der Hängeform), sind Gitterschalen gerade aufgrund ihrer Anwendung in der Technik und ihres Komplexitätsgrades gesondert zu betrachten. Gitterschalen sind vorwiegend auf Druckbeanspruchung optimierte Konstruktionen ohne Biegung und deshalb nur indirekt als natürliche Selbstbildungsprozesse zu bezeichnen. Trotzdem finden sich Beispiele in der Natur, die nicht nur formale Analogien zu den technischen Gitterschalen zulassen. So sind Seeigelschalen aus Einzelelementen zusammen gesetzt, welche gleichzeitig stabil verzahnt sind. Ihre Stabilität gewinnen sie vermutlich nach dem *Tensegrity Prinzip*.⁷⁸ Aber auch kugelige Radiolarien weisen unter dem Mikroskop charakteristische Gitterschalen auf.⁷⁹ Der deutsche Zoologe ERNST HAECKEL entdeckte aufgrund mikroskopischer Analysen, die Strukturen von Radiolarien, die *ikosaedrische* Symmetrien aufweisen.⁸⁰ Ein beeindruckendes Beispiel aus der Architektur ist der Japanische Pavillon, der für die Expo 2000 in Hannover von SHIGERU BAN entworfen wurde. Das Bauwerk entstand in enger Zusammenarbeit mit FREI OTTO und basiert auf dessen Erkenntnissen aus seiner Arbeit an der Mannheimer Multihalle, welche als Vorgänger und Vorbild gehandelt wird. Mit dem Japanischen Pavillon, einer aus Pappröhren bestehenden räumlichen Konstruktion über einer Fläche von 3100 Quadratmetern, wurde eine der erstaunlichsten Raumstrukturen geschaffen. Nebenbei bemerkt, wurde dieses lediglich temporär geplante Bauwerk voll recycelfähig konzipiert.⁸¹



Abb. 45: (linke Seite) **Gitterstrukturen bei Mikroorganismen**

Abb. 46: **Bastkörbe**

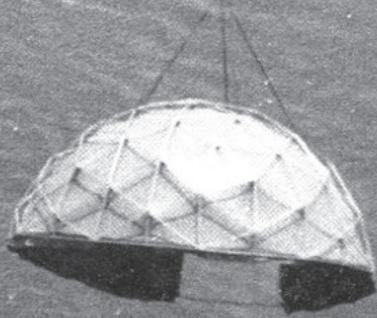
Abb. 47: **Japanischer Pavillon für die Expo 2000 in Hannover, SHIGERU BAN, 2000**

78 Vgl. http://www.iti.tuwien.ac.at/download/archiv/ss05/modul/Eff_Einf.pdf, S.11

79 Vgl. CLAUDE LICHTENSTEIN: *Your private sky: Diskurs R. Buckminster Fuller*, S.44

80 ebd., S.445

81 Vgl. MATILDA MCQUAID: *Shigeru Ban*, S.62



Geodätische Kuppeln verdanken ihren Namen dem griechischen Wort Geos (Erde), da mit ihrer Konstruktion versucht wird, sich der Form der Erdkugel anzunähern. FULLER erkannte früh das Dilemma in der Kartographie, nämlich eine sphärische Welt auf einer Fläche abzubilden und dabei ohne Verzerrungen die erforderliche Maßstabs-, Winkel- und Flächentreue zu wahren.⁸² Seine Untersuchungen und Entwicklungen ergaben den *Dymaxion Globus*, einem Würfel mit abgeschnittenen Ecken, der die Form eines halb-regelmäßigen *Kuboktaeders* (erstmalig von ARCHIMEDES konstruiert) besitzt. Seine 14 Segmente weisen eine gleichmäßige, und keine extreme Verzerrung wie bei einem normalen Globus auf. Diese relative Entzerrung sollte vor allem als politische bzw. geopolitische Karte dienen, hat sich aber bis heute nicht durchgesetzt. Die Kartenprojektionen FULLERS können als erste Schritte seiner Überlegungen zu der »Einteilung der Kugel in Großkreismodelle gesehen werden, deren Faltungen und schließlich Quantelung in ein geodätisches Netzwerk führt.«⁸³ In Anwendung dieser Grundlagenforschung folgten schließlich zahlreiche Konstruktionen und Erfindungen. Dabei gehen viele von FULLERS Modellen auf die zentrale Entdeckung der »dichtesten Packen von Kugeln« die seit JOHANNES KEPLER bekannt sind zurück, die er als *Jitterburg-Transformation* bezeichnete.⁸⁴ Als Ausgangsform benutzt FULLER einen *Ikosaeder*. Dieser besteht aus 20 gleichen Dreiecken. Seine Knotenpunkte liegen alle auf der Oberfläche einer Kugel. Unterteilt man nun die Dreiecke in immer kleinere Dreiecke, deren Knotenpunkte wiederum auf der Kugeloberfläche liegen, so erhält die gesamte Struktur ein immer feingliedrigeres Aussehen. Bei sphärisch gekrümmten Dreiecken liegen auch die Kanten auf der Kugeloberfläche. Charakteristisch für Strukturen mit geraden Stäben ist, dass in den Ecken der Großdreiecke fünf aneinander grenzende Dreiecke je ein Fünfeck ergeben.⁸⁵

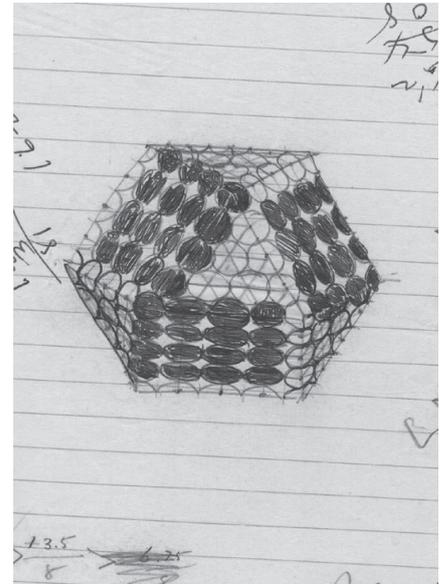
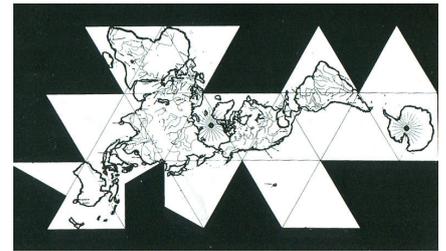


Abb. 48: (linke Seite) **flying houses**

Abb. 49: **Dymaxion Globus**

Abb. 50: **Jitterburg-Modell**, Skizze Fuller
1947

82 Vgl. CLAUDE LICHTENSTEIN: *Your private sky: Diskurs R. Buckminster Fuller*, S.254

83 ebd., S.276

84 ebd., S.268

85 Vgl. STEFAN PETERS: *tensional integrity*, Universität Stuttgart 1998, S.9

FULLER entwickelte aus diesen Erkenntnissen beispielsweise im Jahr 1954 für die US-Marine leichte, transportable Schutzkuppeln aus Pappe. Diese Behausungen, die für sechs Mann konzipiert waren, und weniger als 10 Dollar kosteten, wurden als *Kleenex-Häuser* bekannt, weil sie nach Gebrauch weggeworfen werden konnten.⁸⁶ Im Jahre 1967 stellten die USA in Montreal eine *Fuller-Kuppel* aus. Sie ist bis heute die bekannteste Kuppel in Kugelform. Der Durchmesser der Kugel beträgt 76,2m bei einer Höhe von 61m.

Nachdem FULLER mit dem Bau großer geodätischer Kuppeln bekannt geworden war, lieferten Naturwissenschaftler und Mediziner nachträglich Beweise für geodätische und tensegre Strukturen in Mikrolebewesen. Gewebeuntersuchungen am menschlichen Organismus zeigten Strukturen, die geodätischen Flechtwerken entsprechen.⁸⁷ Von DONALD CASPAR und ARON KLUG (Nobelpreis 1982) wurde FULLER hinzugezogen, um die Struktur von Virus-Proteinschalen zu klären. Am spektakulärsten aber war die Entdeckung einer neuen Klasse von Kohlenstoffmolekülen durch HAROLD KROTO, RICHARD E. SMALLEY und ROBERT FLOYD CURL 1985 (Nobelpreis 1997), den so genannten *Buckminsterfullerenen*. Dabei inspirierte der *Expo-Dom* von Montreal die Wissenschaftler entscheidend bei der Entdeckung der *ikosaedrischen* Symmetrie kugelförmiger Käfigmoleküle. In den Bereichen der Chemie haben die *Fullerene* vermutlich eine besonders große Auswirkung. Chemiker sprechen von einem »Ende der flachen Chemie«⁸⁸

Das Prinzip der Selbstbildungsprozesse wird in folgendem Zitat von FULLER am deutlichsten: »Was mich daher an allen diesen Befunden geodätisch-tensegerer Bildungen der Natur aus jüngster Zeit interessiert, ist die Tatsache, dass sie offenkundig bestätigen, dass ich das mathematische Koordinatensystem gefunden habe, das im Bauen der Natur verwendet wird. Ich begann damit, Struktur zu erforschen und ein rein mathematisches Prinzip zu

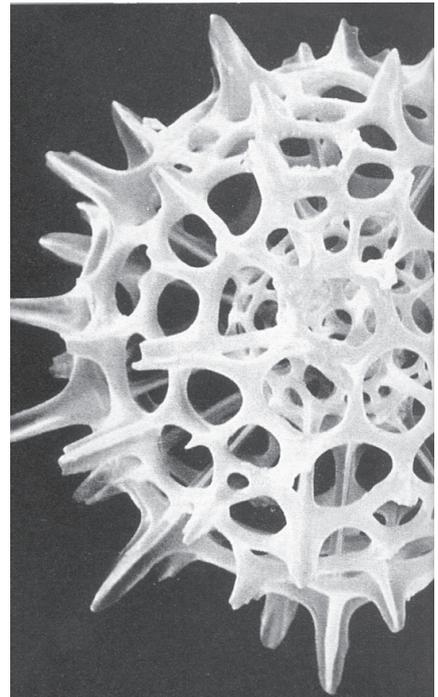


Abb. 51: Expo-Dom Montreal, 1967

Abb. 52: Radiolarium

Abb. 53: (rechte Seite) ikosaedrische Symmetrie nach U.S. Patent, 1954

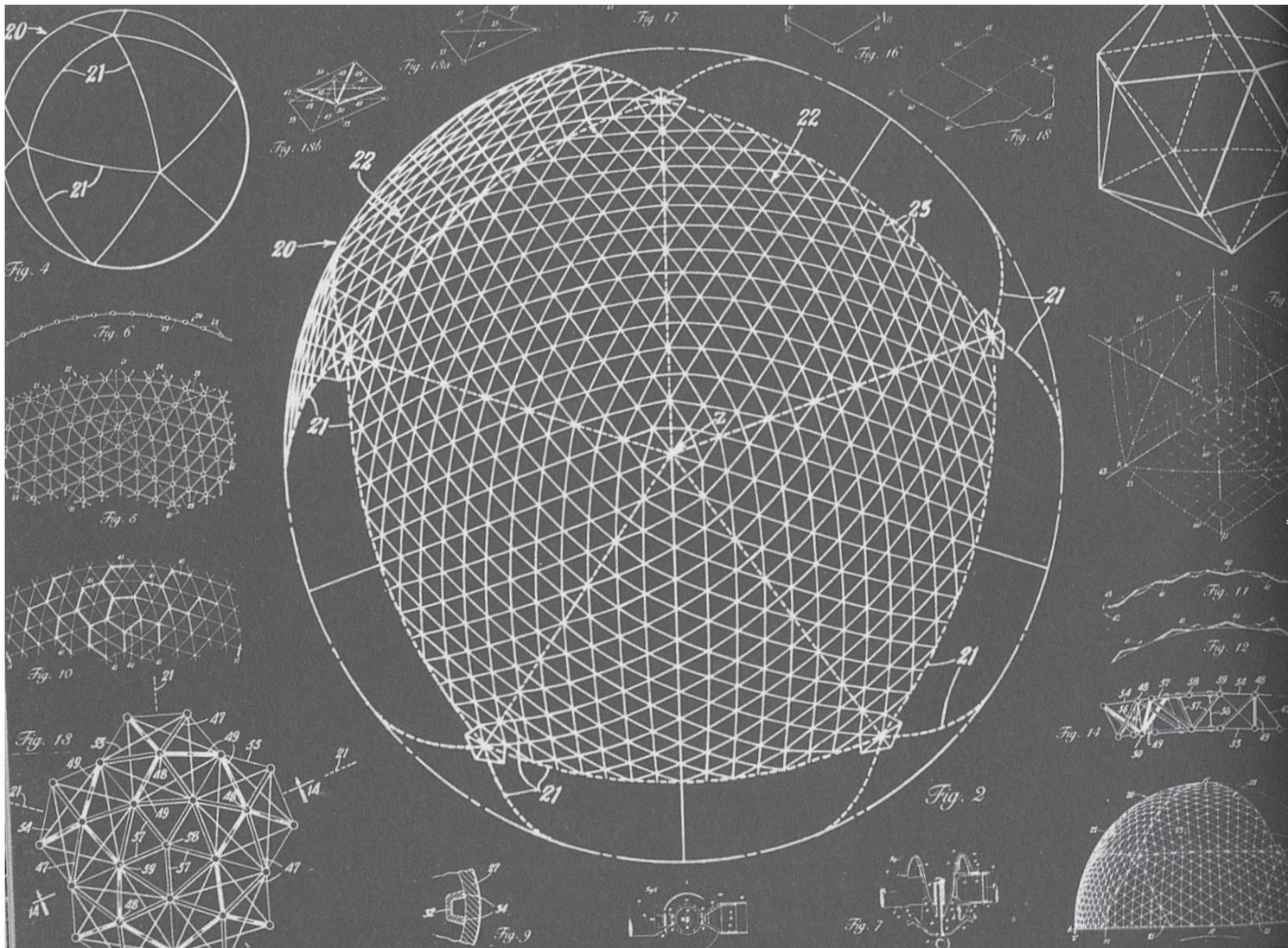
RICHARD BUCKMINSTER FULLER

86 ebd., S.10

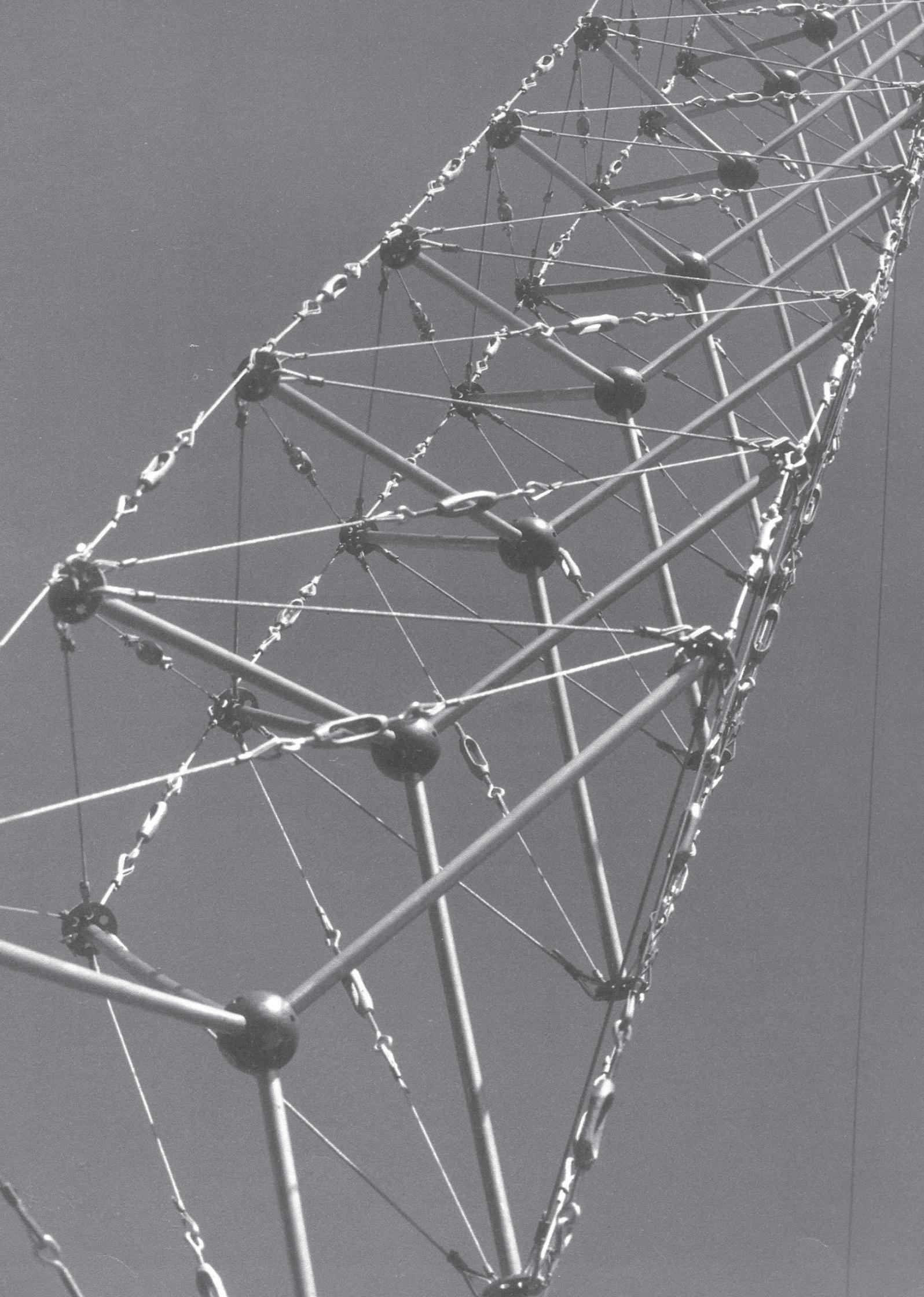
87 Vgl. CLAUDE LICHTENSTEIN: *Your private sky: Diskurs R. Buckminster Fuller*, S.442

88 ebd., S.456

entwickeln, aus dem die prinzipiellen Muster auftauchen, die sich von selbst ganz prinzipiell entwickeln.«⁸⁹ Bis zum Lebensende von BUCKMINSTER FULLER wurden über 300.000 geodätische Kuppeln gebaut. Sogar der Fußball, der aus fünf- bzw. sechseckigen Segmenten zusammengesetzt ist und in dieser Form erstmals 1970 bei der WM in Mexiko eingesetzt wurde, greift auf diese geodätische Struktur zurück.⁹⁰



89 RICHARD BUCKMINSTER FULLER: *WDS2: Mexico lecture*. Zitiert nach:
 CLAUDE LICHTENSTEIN: *Your private sky: Diskurs R. Buckminster Fuller*, S.444
 90 [http://de.wikipedia.org/wiki/Fu%C3%9Fball_\(Sportger%C3%A4t\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Fu%C3%9Fball_(Sportger%C3%A4t))



— Tensegrity

Der Begriff *Tensegrity* oder »tensional integrity« wurde von RICHARD BUCKMINSTER FULLER um 1949 geprägt und bezeichnete anfangs die Skulpturen von KENNETH SNELSON, einem Studenten FULLERS. Diese Skulpturen bestehen aus Zuggliedern die mit wenigen Druckstäben gegeneinander ausgesteift sind, wobei kein Stab einen anderen berührt. FULLER erkannte das Prinzip dieser Strukturen und entwickelte sie weiter, machte sie bekannt und patentierte seine Version 1962. Er war auch der erste, der tensegare Strukturen am Drahtspeichenrad wahrnahm und diese als Revolution im Konstruieren erkannte. Tensegrity Strukturen werden in offene und geschlossene Systeme unterschieden. Offene Systeme nutzen sekundäre Strukturen, z.B. den Baugrund, um Kräfte, die aus dem Eigengewicht und den äußeren Lasten resultieren, ableiten zu können. Erst in diesem Zusammenwirken können sie als stabile Systeme bezeichnet werden. Geschlossene Systeme sind, unabhängig von ihrer Lagerung, in sich stabil.⁹¹ Das einfachste Tensegrity System ist ein sogenannter *Seilbinder*. Dabei werden zwei Seile (Tragseil und Spannseil) durch einen einzelnen Druckstab verspannt. Bei vertikaler Belastung des Stabs wird die Last im Tragseil erhöht, während im Spannseil die Vorspannkraft abnimmt. Diese System kann erweitert werden, indem man Druckstäbe einbringt und Stück für Stück verspannt. Hier werden Analogien zu zugunterspannten Brücken deutlich.⁹² FULLER stellte darüber hinaus fest, dass das »Wesen aller geodätischen Kuppeln«⁹³ in Tensegrity-Strukturen besteht, und er sah folgerichtig die Möglichkeit stützenfreie Konstruktionen von beliebiger Größe zu bauen. In der Nanotechnik entdeckte dieses Prinzip SUMIO IJIMA im Jahre 1991 bei Kohlenstoffnanoröhren, die nach BUCKMINSTER FULLER als *Bukyröhren* benannt wurden. Das Zusammenwirken von Muskeln und Knochen lässt sich ebenso als Tensegrity-Struktur begreifen. Beispiele hierfür sind die *Filamente* und nadelartigen *Cytoskelette* der Zellen.⁹⁴

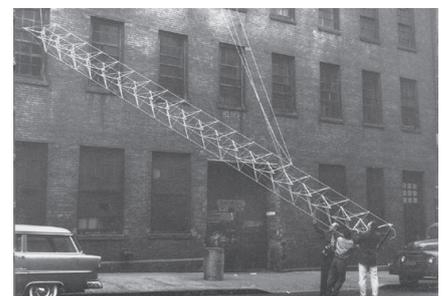
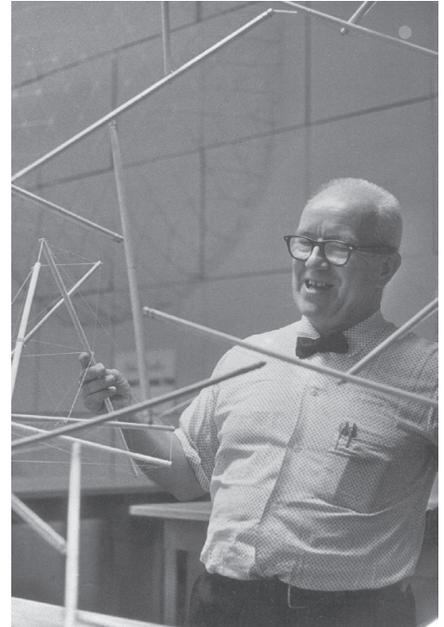


Abb. 54: (linke Seite) **Tensegrity Turm**

Abb. 55: **Speichenrad**

Abb. 56: **Tensegrity Struktur mit RICHARD BUCKMINSTER FULLER**

Abb. 57: **X-Piece, KENNETH SNELSON**

⁹¹ Vgl. STEFAN PETERS: *tensional integrity*, Universität Stuttgart 1998, S.24

⁹² ebd., S.25

⁹³ RICHARD. BUCKMINSTER FULLER, *Inventions*. Zitiert nach: Claude Lichtenstein, *Your private sky : Diskurs R. Buckminster Fuller*, S.408

⁹⁴ Vgl. CLAUDE LICHTENSTEIN: *Your private sky: Diskurs R. Buckminster Fuller*, S.461

»Extremer
Leichtbau ist
Bauen
mit Energie.«⁹⁵

— Adaptive Systeme

»Systeme, die sich durch selbstgesteuerte oder selbstorganisierte Vorgänge verändern, bezeichnet man als adaptive Systeme.«⁹⁶ In gewisser Weise können sie den Selbstbildungsprozessen zugeordnet werden. Damit sind adaptive Systeme Strukturen, die in Wechselwirkung zu ihrer Umgebung stehen. Hauptbestandteile von adaptiven Systemen sind Sensoren, Regeleinheiten und Aktoren, deren Zusammenhänge in dem schematischen Überblick (siehe Abb. 59:) verdeutlicht werden soll.⁹⁷ Neben »adaptiv« werden auch Begriffe wie »intelligent« oder »smart« benutzt um diese Systeme zu beschreiben. Sie meinen jedoch im Kern dasselbe, wie ein Zitat von CULSAW verdeutlicht: »I conclude by observing that adaptronics, smart structures or whatever we call it, is nothing other than a synonym for good engineering [...].«⁹⁸

Adaptive Systeme und Vorgänge sind in der lebenden Natur eine selbstverständliche und unbedingte Voraussetzung für die Erhöhung von Überlebenschancen auch hinsichtlich einer Weiterentwicklung der jeweiligen Spezies. Dabei kann in drei Kategorien in Abhängigkeit von der Adaptionsgeschwindigkeit unterschieden werden, in Kurzzeitadaptation, Langzeitadaptation und evolutionäre Adaption. Wenn die Anpassung in Echtzeit auftritt, spricht man von Kurzzeitadaptation. Die farbliche Anpassung eines Chamäleons kann hier beispielhaft angeführt werden. Langzeitadaptation sind beispielsweise Wachstumsprozesse von Bäumen und Knochen. Es wird Material lediglich an den hoch beanspruchten Stellen angelagert. Auf diese Weise werden Spannungsspitzen vermieden. Bei evolutionären Anpassungsprozessen werden Eigenschaften natürlicher Systeme im Verlauf von mehreren Generationen hinsichtlich Form und Funktion optimiert.⁹⁹ Diese in der Natur selbstverständlichen, aufgrund des evolutionären Zwanges ablaufenden Prozesse, können auch beim Einsatz in technischen

96 WERNER SOBEK: *Entwerfen im Leichtbau*. In: UNIVERSITÄT STUTTGART: *Themenheft Forschung – Leichtbau*, S.79

97 Vgl. PATRICK TEUFFEL: *Entwerfen adaptiver Strukturen*, S.12

98 CLUSHAW. Zitiert nach: PATRICK TEUFFEL: *Entwerfen adaptiver Strukturen*, S.13

99 WERNER SOBEK: *Entwerfen im Leichtbau* In: UNIVERSITÄT STUTTGART: *Themenheft Forschung – Leichtbau*, S.79

Systemen Anwendung finden. Besonders Kurzzeit- und Langzeit-adaptionen lassen sich auf technische Strukturen übertragen, wobei bei Tragwerken meistens Prinzipien des System- und des Strukturleichtbaus ausgenutzt werden. Das von PATRICK TEUFEL entwickelte Brückenkonzept, der sogenannte *Stuttgarter Träger* gilt hierbei als Standardbeispiel. Die Beeinflussung der Konstruktion wird dabei durch einen beweglichen Brückenträger gelöst, der den Abstand zwischen den Brückenauflagern, je nach Lastfall, verkürzt und so ein Durchbiegen der Brücke verhindert, gleichzeitig aber eine extrem gewichtsminimale Konstruktion ermöglicht. Auch schaltbare Gläser gehören zu adaptiven Systemen. Sie können sich im Gegensatz zu konventionellen, im Regelfall starren Gebäudehüllen, an die Veränderungen der Umgebung, beispielsweise jahreszeitliche oder witterungsbedingte Veränderungen, anpassen. Natürlich ablaufende evolutionäre Adaptionen, gemeint sind hier Mutation und Selektionsprozesse, finden ihre Entsprechung in der Technik. Diese Prozesse werden in computergestützten Berechnungen, auf mathematisch-numerischer Basis, simuliert, um beispielsweise gewichtsminimale Geometrien zu bestimmen (mittels FEM Modellen).¹⁰⁰ *Adaptronic* und *Mechatronic* sind Fachbereiche, die sich mit den elektronischen und mechanischen Komponenten adaptiver Systeme beschäftigen. Auf diesem wissenschaftlichen Terrain hat sich schon jetzt eine interdisziplinäre Zusammenarbeit über die gewohnten Fachbereiche hinaus etabliert.¹⁰¹ WERNER SOBEK schlussfolgert: »Der Einsatz adaptiver Systeme wird in den kommenden Jahren die Grenzen des Leichtbaus noch weiter hinauschieben und gleichzeitig Optimierungen in Bereichen konventioneller Strukturen oder Bauteilen ermöglichen. Material wird eingespart und bei Auftreten der Beanspruchung in seiner Wirkung durch Energie ersetzt. Extremer Leichtbau ist Bauen mit Energie.«¹⁰²

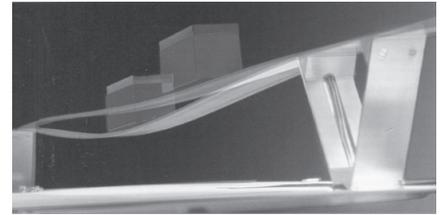


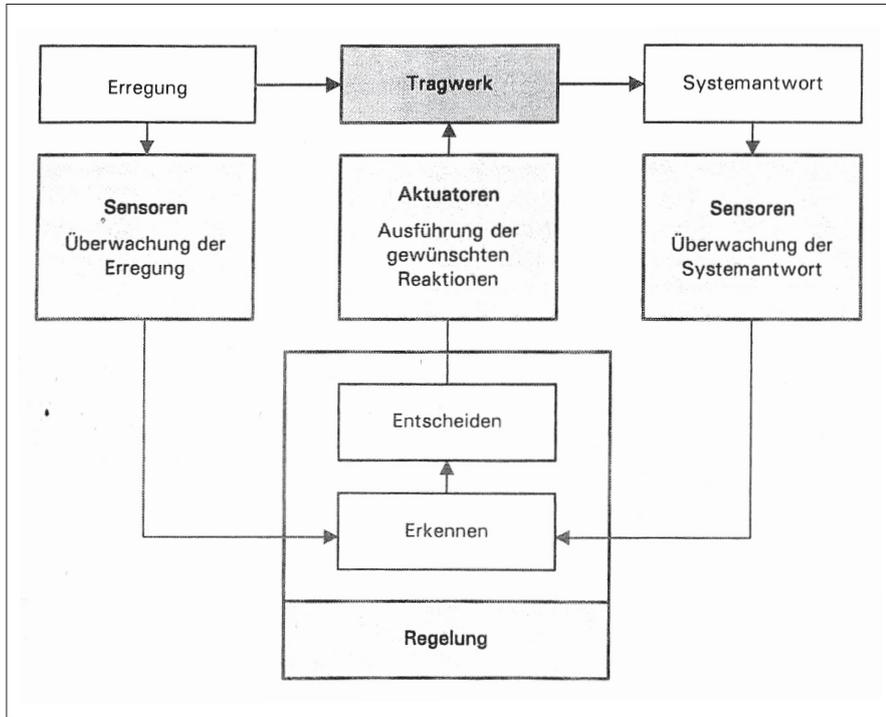
Abb. 58: Modell des Stuttgarter Trägers, PATRICK TEUFEL

Abb. 59: schematischer Überblick adaptiver Systeme

¹⁰⁰ ebd., S.80-81

¹⁰¹ Vgl. PATRICK TEUFEL: *Entwerfen adaptiver Strukturen*, S.13

¹⁰² WERNER SOBEK: *Entwerfen im Leichtbau*. In: UNIVERSITÄT STUTTGART: *Themenheft Forschung – Leichtbau* S.81



3.4 Zusammenfassung

Diese Abhandlung beschäftigt sich im Wesentlichen mit den Ergebnissen der Grundlagenforschung im Leichtbau. Dazu zählen vor allem die selbstbildenden Prozesse, deren Strukturen die elementarsten Bausteine in unserer konstruktiv-physischen Welt darstellen. Aufgrund ihrer außergewöhnlichen Varianz finden sie die unterschiedlichste Anwendung in unserer bestehenden Lebenswirklichkeit. Sie beeinflussen sowohl wissenschaftliche Disziplinen, technische Entwicklungen als auch alltägliche Lebensbereiche bis hin zum ästhetischen Erscheinungsbild vieler Konstruktionen. Dabei ist die Forschung auf dem Gebiet des Leichtbaus längst noch nicht abgeschlossen und die Anwendungsmöglichkeiten sind bei weitem noch nicht ausgeschöpft. Aktuell werden Konzepte entwickelt, die sich neben den klassischen Themen, wie Material- und Strukturleichtbau, mit noch leichteren Strukturen, nämlich den adaptiven Systemen, die als Ultraleichtbau bezeichnet werden, auseinandersetzen.

»Furniture design
... is a small piece of
architecture
one man can handle.«¹⁰⁴



Abb. 60: **Superleggera**

/ L I T E R A -
T U R - U N D
A B B I L D U N G S -
V E R -
Z E I C H N I S

BACH, KLAUS

Vladimir G. Šuchov, 1853-1939:

die Kunst der sparsamen Konstruktion.

Stuttgart: Deutsche Verlags- Anstalt, 1990.

BAHAMÓN, ALEJANDRO

The Magic of Tents: Transforming Space.

New York: Harper Collins Publishers, 2004.

BEUKERS, ADRIAAN BEUKERS; VAN HINTE, ED

Lightness: the inevitable renaissance of

minimum energy structures.

Rotterdam: o1o Publishers, 2001.

BUBNER, EWALD

Minimalkonstruktionen:

Beiträge zum Symposium »Minimalkonstruktionen«.

Köln: Müller Verlag, 1977.

BÖGLE, ANNETE

Leicht weit: Jörg Schlaich; Rudolf Bergermann.

München: Prestel Verlag, 2005.

DACHS, SANDRA

Avar Aalto, Objekt und Möbeldesign.

Köln: Dumont Verlag, 2007.

DREW, PHILIP

Frei Otto – Form und Konstruktion.

Stuttgart: Hatje Verlag, 1976.

FORSTER, BRIAN

*Bauen mit Membranen:
der innovative Werkstoff in der Architektur.*
München: Prestel Verlag, 2004.

FULLER, RICHARD BUCKMINSTER; KRAUSSE, JOACHIM

*Bedienungsanleitung für das Raumschiff
Erde und andere Schriften.*
Hamburg: Philo Fine Arts Verlag, 2008.

FUZIO, GIOVANNI:

*Quaderni del Centro di documentazione
sulla industrializzazione.*
Bari: Dedalo libri Verlag, 1968.

GIEDION, SIEGFRIED

Befreites Wohnen.
Frankfurt am Main: Syndikat Verlag, 1985.

GIEDION, SIEGFRIED

Raum, Zeit, Architektur.
Ravensburg: Otto Maier Verlag, 1976.

HERZOG, THOMAS

Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft.
Stuttgart: Hatje Verlag 1976.

HENSEL, MICHAEL

*Wikinger Langschiffe: Elastische Holzkonstruktionen für
die Seefahrt.* In: Arch +, 9/2009.

S.110-111

KNAACK, ULRICH

Deflateables.

Rotterdam: 010 Publishers, 2008.

KROHN, CARSTEN

Buckminster Fuller und die Architekten.

Berlin: Reimer Verlag, 2004.

LICHTENSTEIN, CLAUDE

*Your private sky: Richard Buckminster Fuller –
Design als Kunst einer Wissenschaft.*

Zürich: Verlag Lars Müller, 1999.

MCQUAID, MATILDA

Shigeru Ban.

New York: Phaidon Press, 2003.

MEHRINGHAUSEN, MAX

Raumfachwerk aus Stäben und Knoten.

Wiesbaden: Bauverlag, 1975.

MINKE, GERNOT

Zur Effizienz von Tragwerken.

Stuttgart: Krämer Verlag, 1970.

NERDINGER, WINFRIED

Frei Otto – Das Gesamtwerk.

Basel: Birkhäuser Verlag, 2005.

PÖSCHL, WOLFGANG

Ein Haus ist kein Segelschiff. In: Arch+, 9/ 2009.

S.110–118.

SCHANZ, SABINE

Frei Otto, Bodo Rasch:

Gestalt finden– auf dem Weg zu einer Baukunst des Minimalen.

Stuttgart: Ed. Menges Verlag, 1995.

SCHLAICH, JÖRG

Architect und Ingenieur. In: *Detail*, 12/ 2005.

S. 1458.

SLOTERDIJK, PETER

Sphären [plurale Sphärologie] Band 3, Schäume.

Frankfurt am Main: Suhrkamp Verlag, 2005.

SOBEK, WERNER

Entwerfen im Leichtbau. In: Universität Stuttgart:

Themenheft Forschung – Leichtbau.

Stuttgart: 2007.

S.71 -84

SOBEK, WERNER

Wer denkt für morgen –Das Prinzip »Dreimal null«.

In: *Zeit*: Stand 2/2010

(<http://www.zeit.de/2009/20/PD-Werner-Sobek?page=all>)

STOHR, KATE

Design like you give a damn:

architectural responses to humanitarian crises.

London: Thames & Hudson, 2006.

TERRAGNI, EMILIA

Jean Prouvé / Charles & Ray Eames: Möbel als Konstruktion.

Wheil am Rhein: Vitra Publikation (Verlag unbekannt), 2002.

TOPHAM, SEAN

Blow-up: inflatable art, architecture and design.

München: Prestel Verlag, 2002.

WACHSMANN, KONRAD

Wendepunkt im Bauen.

Stuttgart: Deutsche Verlags-Anstalt, 1989.

Dissertationen Fachpublikationen

BREDGENS, GUIDO

*Demokratisches Bauen – Eine architekturtheoretische
Diskursanalyse zu Parlamentsbauten in der Bundesrepublik
Deutschland: Dissertation.*

Technische Universität Dresden: 2007.

MITCHELL, ANTHONY GEORGE MALDON

The limits of economy of material in frame structure.

Philosoph. Mag. 8, 1904.

NACHTIGALL, WERNER

*Biotechnik und Bionik – Fachübergreifende
Diziplinen der Naturwissenschaft.*

Wiesbaden: 1982.

PETERS, STEFAN

tensional integrity: Diplomarbeit.

Universität Stuttgart: 1998.

TEUFFEL, PATRICK

Entwerfen adaptiver Strukturen: Dissertation.

Universität Stuttgart 2004.

THOMPSON, D'ARCY WENTWORTH
On growth and form.
Cambridge: 1917.

MITTEILUNGEN DES INSTITUTS FÜR LEICHTE
FLÄCHENTRAGWERKE, (IL MITTEILUNGEN)
Universität Stuttgart

- IL 1, *Minimalnetze*, 1969
- IL 5, *Wandelbare Dächer*, 1972
- IL 8, *Netze in der Natur und Technik*, 1975
- IL 9, *Pneus in der Natur und Technik*, 1977
- IL 10, *Gitterschalen*, 1974
- IL 12, *Wandelbare Pneus*, 1975
- IL 16, *Zelte*, 1976
- IL 18, *Seifenblasen*, 1988
- IL 20, *Aufgaben*, 1979
- IL 21, *Grundlaagen – Form Kraft Masse 1*, 1979
- IL 24, *Prinzip Leichtbau – Form Kraft Masse 4*, 1996
- IL 25, *Experimente – Form Kraft Masse 5*, 1990
- IL 28, *Diatomeen 1*, 1985
- IL 31, *Bambus*, 1986
- IL 35, *Pneu und Knochen*, 1995
- IL 37, *Alte Baumeister*, 1994
- IL 39, *Ungeplante Siedlungen*, 1994
- IL 41, *Intelligent Bauen*, 1995

Internetquellen Stand 2/2010

[http://de.wikipedia.org/wiki/Fu%C3%9Fball_\(Sportger%C3%A4t\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Fu%C3%9Fball_(Sportger%C3%A4t))
<http://de.wikipedia.org/wiki/Feder>,
<http://www.topopt.dtu.dk/?q=node/9&ex=bridge>
<http://de.wikipedia.org/wiki/Luftreifen>
[hhpt://www.iti.tuwien.ac.at/download/archiv/ss05/modul/Eff_Einf.pdf](http://www.iti.tuwien.ac.at/download/archiv/ss05/modul/Eff_Einf.pdf), S.11

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: *Schematischer Bau der Konturfeder.*

In: <http://de.wikipedia.org/wiki/Feder>

Abb. 2: *Modellflieger aus Balsaholz.*

KONRAD LOHÖFENER

Abb. 3: *Vergleich zwischen Vogel- und Dinosaurierknochen.*

In: BÖGLE, ANNETE: *Leicht weit: Jörg Schlaich; Rudolf Bergermann.* München: Prestel Verlag, 2005. S.308

Abb. 4: *Jurte.*

In: BEUKERS, ADRIAAN BEUKERS; VAN HINTE, ED: *Lightness: the inevitable renaissance of minimum energy structures.* Rotterdam: 010 Publishers, 2001. S.144

Abb. 5: *Querschnitt des Pantheons in Rom.*

In: [http://de.wikipedia.org/wiki/Pantheon_\(Rom\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Pantheon_(Rom))

Abb. 6: *Schnitt durch das Langhaus der Kathedrale von Reims.*

In: http://de.wikipedia.org/wiki/Kathedrale_von_Reims

Abb. 7: *Galérie des Maschines.*

In: SCHLAICH, JÖRG: *Architect und Ingenieur.*

In: *Detail*, 12/ 2005.S. 1458.

Abb. 8: *Flugzeughangar (Raumfachwerk).*

In: KROHN, CARSTEN: *Buckminster Fuller und die Architekten.*

Berlin: Reimer Verlag, 2004. S. 51

Abb. 9: *Salginatobelbrücke, Schiers.*

In: <http://www.flickr.com/photos/rk-tecture/3871634313/sizes/l/>

Abb. 10: *Olympische Spiele in München.*

In: BÖGLE, ANNETE: *Leicht weit: Jörg Schlaich; Rudolf Bergermann.* München: Prestel Verlag, 2005. S.108

Abb. 11: *moderne Karawane.*

In: BERKEL, BEN VAN: *Buy Me a Mercedes-Benz: The Book of the Museum.* Stuttgart: Actar Coac Assn of Catalan Arc Verlag 2006. S.210

Abb. 12: *Messmodelle für das Olympiadach in München.*

In: NERDINGER, WINFRIED: *Frei Otto – Das Gesamtwerk.* Basel: Birkhäuser Verlag, 2005. S.124

Abb. 13: *Brass Rail Restaurants, New York World Fair.*

In: HERZOG, THOMAS: *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft.* Stuttgart: Hatje Verlag 1976. S. 46

Abb. 14, 15: *Seifenhautstudien.*

In: NERDINGER, WINFRIED: *Frei Otto – Das Gesamtwerk.* Basel: Birkhäuser Verlag, 2005. S.18

Abb. 16: *Spinnennetz.*

In: NERDINGER, WINFRIED: *Frei Otto – Das Gesamtwerk.* Basel: Birkhäuser Verlag, 2005. S.93

Abb. 17: *Tipi der Shoshoni Indianer.*

In: http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Datei:Shoshoni_tipis.jpg&filetimestamp=20050523145205

Abb. 18: *Seilnetz des Deutschen Pavillon in Montreal.*

In: BÖGLE, ANNETE: *Leicht weit: Jörg Schlaich; Rudolf Bergermann.* München: Prestel Verlag, 2005. S.108

Abb. 19: *Wüstenzelte.*

In: HERZOG, THOMAS: *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft.* Stuttgart: Hatje Verlag 1976. S. 43

Abb. 20: *Eingangsbogen auf der Buga: Bogenzelt.*

In: NERDINGER, WINFRIED: *Frei Otto – Das Gesamtwerk.* Basel: Birkhäuser Verlag, 2005. S.185

Abb. 21: *Seifenblase.*

In: <http://www.flickr.com/photos/west-park/2471297625/>

Abb. 22: *Schaumstruktur.*

In: NERDINGER, WINFRIED: *Frei Otto – Das Gesamtwerk.* Basel: Birkhäuser Verlag, 2005. S. 22

Abb. 23: *Heißluftballon der Gebrüder Montgolfier.*

In: <http://de.wikipedia.org/wiki/Hei%C3%9Fluftballon>

Abb. 24: *Pneumatische Kuppel für Radaranlagen.*

In: HERZOG, THOMAS: *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft.* Stuttgart: Hatje Verlag 1976. S. 60

Abb. 25: *Waterwalk.*

In: HERZOG, THOMAS: *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft.* Stuttgart: Hatje Verlag 1976. S. 42

Abb. 26: *Michelinmännchen.*

In: HERZOG, THOMAS: *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft.* Stuttgart: Hatje Verlag 1976. S. 42

Abb. 27: *Pneumacosm.*

In: HERZOG, THOMAS: *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft.* Stuttgart: Hatje Verlag 1976. S. 85

Abb. 28: *Amerikanischer Pavillon Weltausstellung Osaka.*
In: HERZOG, THOMAS: *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft.* Stuttgart: Hatje Verlag 1976. S. 117

Abb. 29: *Amerikanischer Pavillon Osaka, Innenansicht.*
In: HERZOG, THOMAS: *Pneumatische Konstruktionen: Bauten aus Membranen und Luft.* Stuttgart: Hatje Verlag 1976. S. 117

Abb. 30: *pneumatisch geodätische Kuppel.*
In: LICHTENSTEIN, CLAUDE: *Your private sky: Richard Buckminster Fuller – Design als Kunst einer Wissenschaft.* Zürich: Verlag Lars Müller, 1999. S. 353

Abb. 31: *Hängebrücke.*
In: BEUKERS, ADRIAAN BEUKERS; VAN HINTE, ED: *Lightness: the inevitable renaissance of minimum energy structures.* Rotterdam: 010 Publishers, 2001. S. 54

Abb. 32: *Kettenlinie.*
In: NERDINGER, WINFRIED: *Frei Otto – Das Gesamtwerk.* Basel: Birkhäuser Verlag, 2005. S. 24

Abb. 33: *Hängemodell für die Sagrada Família.*
In: NERDINGER, WINFRIED: *Frei Otto – Das Gesamtwerk.* Basel: Birkhäuser Verlag, 2005. S. 56

Abb. 34: *Fotoreihe: Bogenlinie aus Bambusrohr.*
In: FREI OTTO: IL 31, *Bambus*, 1986. S. 307

Abb. 35: *Hängemodell für die Sagrada Família: Spiegelbild.*
In: NERDINGER, WINFRIED: *Frei Otto – Das Gesamtwerk.* Basel: Birkhäuser Verlag, 2005. S. 56

Abb. 36: *hyperbolische Schale.*
In: <http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkes/abc-structures-2005/Lectures-2005/term-work/50-questions/Candela.jpeg>

Abb. 37: *hyperbolische Schale: Belastungstest.*

In: <http://www.arch.mcgill.ca/prof/sijpkes/abc-structures-2005/Lectures-2005/term-work/50-questions/Candela.jpeg>

Abb. 38: *fünfstöckiger Nigrés-Stromleitungsmast.*

In: BACH, KLAUS: *Vladimir G. Šuchov, 1853-1939: die Kunst der sparsamen Konstruktion.*
Stuttgart: Deutsche Verlags- Anstalt, 1990. S. 120

Abb. 39: *fünfstöckiger Nigrés-Stromleitungsmast: Detail.*

In: BACH, KLAUS: *Vladimir G. Šuchov, 1853-1939: die Kunst der sparsamen Konstruktion.*
Stuttgart: Deutsche Verlags- Anstalt, 1990. S.98

Abb. 40: (unten) *fünfstöckiger Nigrés-Stromleitungsmast: Bau im sogenannten Teleskopverfahren.*

In: BACH, KLAUS: *Vladimir G. Šuchov, 1853-1939: die Kunst der sparsamen Konstruktion.*
Stuttgart: Deutsche Verlags- Anstalt, 1990. S.99

Abb. 41: *Verzweigungen bei Blitzen.*

In: <http://www.flickr.com/photos/manufolio/2706500114/>

Abb. 42: *Verzweigungen bei Zellen und Schäumen.*

In: BEUKERS, ADRIAAN BEUKERS; VAN HINTE, ED: *Lightness: the inevitable renaissance of minimum energy structures.* Rotterdam: 010 Publishers, 2001. S. 53

Abb. 43: *optimale Verzweigungen nach Mitchell.*

In: BEUKERS, ADRIAAN BEUKERS; VAN HINTE, ED: *Lightness: the inevitable renaissance of minimum energy structures.* Rotterdam: 010 Publishers, 2001. S. 169

Abb. 44: Mitchell-Strukturen im Oberschenkelknochen.

In: BUBNER, EWALD: *Minimalstrukturen: Beiträge zum Symposium »Minimalstrukturen«*.
Köln: Müller Verlag, 1977. S. 233

Abb. 45: Gitterstrukturen bei Mikroorganismen.

In: LICHTENSTEIN, CLAUDE: *Your private sky: Richard Buckminster Fuller – Design als Kunst einer Wissenschaft*.
Zürich: Verlag Lars Müller, 1999. S. 455

Abb. 46: Bastkörbe.

In: FREI OTTO: IL 31, *Bambus*, 1986. S. 36

Abb. 47: Japanischer Pavillon für die Expo 2000 in Hannover.

In: MCQUAID, MATILDA : *Shigeru Ban*.
New York: Phaidon Press, 2003. S. 65

Abb. 48: flying houses.

In: LICHTENSTEIN, CLAUDE: *Your private sky: Richard Buckminster Fuller – Design als Kunst einer Wissenschaft*.
Zürich: Verlag Lars Müller, 1999. S. 373

Abb. 49: Dymaxion Globus.

In: KROHN, CARSTEN: *Buckminster Fuller und die Architekten*.
Berlin: Reimer Verlag, 2004. S. 33

Abb. 50: Jitterburg-Modell.

In: LICHTENSTEIN, CLAUDE: *Your private sky: Richard Buckminster Fuller – Design als Kunst einer Wissenschaft*.
Zürich: Verlag Lars Müller, 1999. S.280

Abb. 51: Expo- Dom Montreal.

In: LICHTENSTEIN, CLAUDE: *Your private sky: Richard Buckminster Fuller – Design als Kunst einer Wissenschaft*.
Zürich: Verlag Lars Müller, 1999. S. 423

Abb. 52: Radiolarium.

In: BEUKERS, ADRIAAN BEUKERS; VAN HINTE, ED:
*Lightness: the inevitable renaissance of minimum energy
structures*. Rotterdam: 010 Publishers, 2001. S. 51

Abb. 53: ikosaedrische Symmetrie nach U.S. Patent.

In: LICHTENSTEIN, CLAUDE: *Your private sky: Richard
Buckminster Fuller – Design als Kunst einer Wissenschaft*.
Zürich: Verlag Lars Müller, 1999. S.

Abb. 54 Tensegrity Turm.

In: LICHTENSTEIN, CLAUDE: *Your private sky: Richard
Buckminster Fuller – Design als Kunst einer Wissenschaft*.
Zürich: Verlag Lars Müller, 1999. S.345

Abb. 55: Speichenrad.

In: LICHTENSTEIN, CLAUDE: *Your private sky: Richard
Buckminster Fuller – Design als Kunst einer Wissenschaft*.
Zürich: Verlag Lars Müller, 1999. S. 401

Abb. 56: Tensegrity Struktur mit Richard Buckminster Fuller.

In: LICHTENSTEIN, CLAUDE: *Your private sky: Richard
Buckminster Fuller – Design als Kunst einer Wissenschaft*.
Zürich: Verlag Lars Müller, 1999. S. 393

Abb. 57: X-Piece.

In: LICHTENSTEIN, CLAUDE: *Your private sky: Richard
Buckminster Fuller – Design als Kunst einer Wissenschaft*.
Zürich: Verlag Lars Müller, 1999. S. 401

Abb. 58: Modell des Stuttgarter Trägers.

In: SOBEK, WERNER: *Entwerfen im Leichtbau*. In: Universität
Stuttgart: *Themenheft Forschung – Leichtbau*. Stuttgart: 2007. S. 80

Abb. 59: *schematischer Überblick adaptiver Systeme.*

In: TEUFFEL, PATRICK: *Entwerfen adaptiver Strukturen: Dissertation.*
Universität Stuttgart 2004. S.12

Abb. 60: Superlegger.

In: http://designmuseum.org/media/item/3950/-1/8_9Lg.jpg

Diplomarbeit, Schriftlicher Teil
2/2010

Burg Giebichenstein
Hochschule für Kunst
und Design Halle
Fachbereich Design
Studiengang Industriedesign

Die Arbeit wurde betreut von:
Prof. Dr. Matthias Götz
Prof. Klaus Michel