

Glossar zur Schwerkraft

Florian Böhm

Modelltheorie: Die Vorstellungen zur Schwerkraft sind physikalische Modelle. Das heißt, die reale Welt muß sich keineswegs so verhalten wie in dem Modell. Das Modell ist lediglich eine möglichst sinnvolle Vorstellung von den Vorgängen der realen Welt. Dabei kann nicht allein die weitgehende Übereinstimmung der Theorien mit den in der Natur beobachteten Phänomenen das entscheidende Kriterium für ihre Qualität sein. Erst die Falsifikation einer Theorie, d.h. der Nachweis, wo das Modell Gültigkeit besitzt und wo nicht, kann nach Karl Poppers berühmtem Kriterium eine Aussage über ihre Güte ermöglichen. Dieser Satz bekommt umso höheres Gewicht, da sich gerade die physikalischen Theorien des 20. Jahrhunderts immer mehr von einer anschaulichen Vorstellung entfernen. Die Modelle erhalten einen extrem hohen Abstraktionsgrad, der sich vielfach mit Alltagserfahrungen nicht mehr deckt. Denn es ist kaum noch möglich, sich beispielsweise einen vier- oder noch höherdimensionalen Raum oder Einstülpungen im Universum bildlich vorzustellen. Daher werden die Grenzen zwischen Physik und Philosophie fließend.

Die Beschäftigung mit der Gravitation ist eines der entscheidenden Erkenntnisgebiete der Physik seit Anbeginn, da diese Kraft zu den fundamentalen Naturerscheinungen gehört. Sie ist dafür verantwortlich, daß Massen auf der Erde zu Boden fallen und daß Häuser überhaupt an einer festen Stelle errichtet werden können. Mit ihr können die Bewegungen der Planeten und die Gezeiten auf der Erde erklärt werden. Schon zu Beginn der "modernen" Naturwissenschaften in der Renaissance standen die Galileischen Fallversuche. Die gewonnenen Erkenntnisse waren Grundlage für kosmologische Betrachtungen, aus denen die Gravitationsgesetzmäßigkeiten ermittelt wurden. Die nächste elementare Feststellung war das von Newton formulierte Prinzip "actio=reactio", d.h. jede Kraft ruft eine betragsgleiche, jedoch in umgekehrte Richtung wirkende Gegenkraft hervor. Damit war im wahrsten Sinne des Wortes das Fundament der heutigen Mechanik und der Statik gelegt. Die nächste große Einsicht war, daß die Statik lediglich einen Sonderfall der Dynamik darstellt und die Schwerkraft als ein Feld zu sehen ist, das in Relation zu anderen Kraftfeldern steht. Das Wissen über die Gravitation ist somit für die Fragen, wie das Universum entstanden ist und wohin es sich bewegt, von entscheidender Bedeutung, auch für im wahrsten Sinne ganz bodenständige Anwendungen. Die ingenieurtechnische Praxis ist erst in letzter Zeit dabei, sich die neueren der beschriebenen Modelle anzueignen (z.B. in Form von Satellitennavigationssystemen), auch wenn sie die Phantasie von Science-Fiction-Autoren seit langem anregen. Reisen durch die Zeit oder Sprünge durch die Dimensionen scheinen zunächst in das Konzept der Relativitätstheorie zu passen, sind aber nach Erkenntnissen der Physik unmöglich.

Newtonsche Gesetze: Sir Isaac Newton (1643-1727) veröffentlichte 1687 in den *Philosophiae naturalis principia mathematica* das erste quantitative Gravitationsgesetz, wonach die Anziehungskraft zwischen zwei massebehafteten Körpern proportional zum Produkt ihrer Massen und umgekehrt proportional zum Quadrat ihrer Entfernungen ist. Mit dieser Gesetzmäßigkeit wurde erstmals ein Zusammenhang zwischen den Bewegungen der Himmelskörper auf ihren Bahnen und dem Verhalten von Körpern im Schwerfeld der Erde formuliert. Damit konnte eine Reihe von weiteren Phänomenen wie z.B. die Gezeiten modellhaft erklärt werden. Für viele praktische Anwendungen sind die Newtonschen Gesetze immer noch ausreichend genau. Das Gesetz wurde aufgrund

von rein phänomenologischen Beobachtungen aufgestellt. Eine Ursache für die auch über große Entfernungen wirkende Gravitationskraft konnte Newton nie angeben.

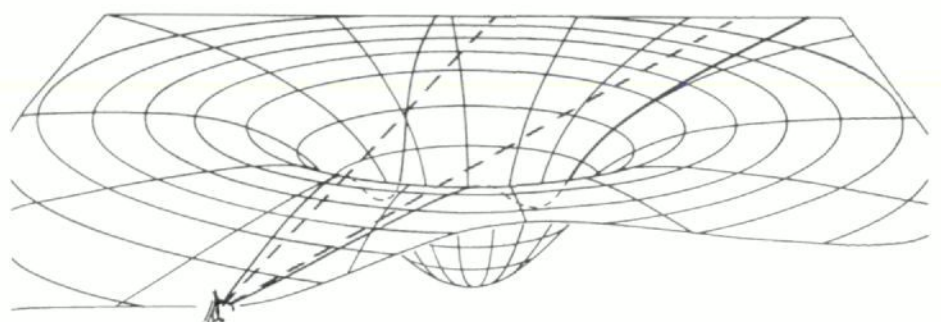
Vorstellungen von Leibniz: Bei Newtons Zeitgenossen Leibniz stieß das Modell der Gravitation als vermittlungsfreie Fernwirkungskraft auf Widerspruch. Seiner Ansicht nach war es zwingend notwendig, daß eine Reaktion von Materie Grundlage jeder Kraft sei. Entsprechend ist das rein auf Beobachtungen fußende empirische Postulat nicht akzeptabel. Er entwickelte ein System von lebendigen und toten Kräften. Die lebendige Kraft soll die Ursache einer Bewegung sein, wohingegen die tote Kraft lediglich die Möglichkeit besitzt, eine Bewegung hervorzurufen. Die lebendige Kraft entsteht durch unendlich viele Einwirkungen der toten Kraft - eine erste Hypothese der Energieerhaltung.

Allgemeine Relativitätstheorie - der gekrümmte Raum: Mit der allgemeinen Relativitätstheorie, die im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts von Albert Einstein formuliert wurde, ändert sich die Vorstellung der Gravitation und ihrer Entstehung völlig. Einsteins Theorie der Gravitation geht von der Gravitation als einer Eigenschaft des Raums aus. Dabei äußert sich die Schwerkraft als eine Krümmung des vierdimensionalen Raums in der Umgebung von Massen. Diese Krümmung des Raums wirkt sich z.B. auch auf elektromagnetische Wellen aus, die in der Umgebung großer Massen abgelenkt werden. Dies konnte anhand des Lichts weit entfernter Sterne nachgewiesen werden, das an der Sonne seinen geradlinigen Verlauf geändert hat. Weiterhin wurde in der Relativitätstheorie postuliert, daß zwar die Zeit und die Raumeigenschaften von Ort und Geschwindigkeit des Beobachters abhängig sind, die Naturgesetze jedoch immer und unabhängig von der Bewegung Gültigkeit haben. Man verließ also den Gedanken einer absoluten Zeit zugunsten einer relativistischen, vierdimensionalen Raumzeit und universeller Gesetzmäßigkeiten. Konstante in diesem Raum-Zeit-System ist die Lichtgeschwindigkeit, die allen Beobachtern unabhängig von ihrer eigenen Geschwindigkeit gleich schnell erscheint. Damit verbunden ist die Folgerung, daß die Lichtgeschwindigkeit die größte im Universum auftretende Geschwindigkeit sei und diese von einer Masse nur unter Einsatz unendlicher Energie erreicht werden könnte, also prinzipiell für massebehaftete Körper nicht erreichbar ist.

Das Gravitationsfeld in der Quantenmechanik - Welle-Teilchen-Dualismus: Die Quantenmechanik beschäftigt sich insbesondere mit den Vorgängen im Innern der Materie. Dabei werden Modelle für die Wechselwirkungen der Teilchen, z.B. eines Atoms, untersucht. Dabei entdeckte man, daß exakte Aussagen über den genauen Ort der Atombestandteile nicht möglich sind, es können lediglich Aufenthaltswahrscheinlichkeiten angegeben werden. Eine der entscheidenden Aussagen der Quantenmechanik ist die Heisenbergsche Un-

Nach der Relativitätstheorie von Einstein ist die Raumzeit in der Umgebung der Sonne gekrümmt, weil die Masse der Sonne

ein starkes Gravitationsfeld erzeugt. In der Abbildung wird dies durch die gekrümmten Koordinatenachsen dargestellt.



schärferelation, nach der es nicht möglich ist, Ort und Impuls eines Teilchens gleichzeitig korrekt zu messen. In den zwanziger Jahren entstand, begründet durch Heisenberg, Pauli, Dirac u.a., die Quantenfeldtheorie. Danach kann jedes Feld auch als Welle oder als Teilchen formuliert werden. Sämtliche Wechselwirkungen sollen auch als Elementarteilchen ausgedrückt werden können. Das ermöglicht es, die elektromagnetische, die starke, die schwache und die Gravitationswechselwirkung auch als den Austausch von hypothetischen Teilchen zu betrachten. Im Falle der Gravitation wären dies die Gravitonen. Diese Teilchen sollen masselos sein und die Gravitationswirkung mit Lichtgeschwindigkeit vermitteln können. Dabei ist die Stärke der von ihnen übermittelten Kraft wesentlich geringer als die der starken und schwachen Wechselwirkung, die für den Zusammenhalt der Atomkerne verantwortlich ist. Bislang ist es jedoch noch nicht möglich gewesen, die Gravitonen experimentell nachzuweisen. Dieser Nachweis könnte in einem Teilchenbeschleuniger erfolgen, wofür jedoch in dem speziellen Fall des Gravitons sehr große Mengen Energie erforderlich wären.

Quantentheorie der Gravitation – Vereinheitlichte Theorien:

Die beiden zentralen physikalischen Theorien dieses Jahrhunderts ließen sich bislang nicht zu einer vereinigen. Die Quantenmechanik findet insbesondere im Bereich extrem kleiner Entfernungen Anwendung, wohingegen sich die allgemeine und die spezielle Relativitätstheorie bislang im mikroskopischen Bereich nicht vollständig anwenden ließen. Ziel ist es, die vier elementaren Wechselwirkungen der Quantentheorie (s.o.) zu vereinigen und mit den Postulaten der Relativitätstheorie in Einklang zu bringen. Für die schwache und die elektromagnetische Wechselwirkung ist diese Vereinheitlichung bereits gelungen. Für die starke Kernkraft sind Theorien mit neuen Elementarteilchenstrukturen erarbeitet worden. Nur für die Gravitation läßt sich diese Vereinigung bislang nicht schlüssig nachweisen. Ansätze wurden formuliert durch die Einführung weiterer Dimensionen und einer neuen Vorstellung von der Struktur des Raums. Diese arbeitet mit hypothetischen Strings, das heißt, die Teilchen werden nicht mehr als Punkte, sondern als eindimensionale, offene oder geschlossenen Linien gesehen. In der Raumzeit entstehen daraus flächige oder räumliche Gebilde. Durch die Verbindung dieser Strings werden die verschiedenen Wechselwirkungen erklärt. Es entstehen so interessante, allerdings wenig anschauliche räumliche Gebilde. Die Suche nach einer vereinheitlichten Quantentheorie der Gravitation ist für die Physik von Bedeutung, da sich damit ein wesentlich tieferes Verständnis von kosmologischen Vorgängen finden ließe und Theorien wie die des Urknalls oder der Schwarzen Löcher bestätigt werden könnten. Die Klärung des Zusammenhangs könnte ein konsistentes theoretisches Modell von der Entstehung des Universums ermöglichen.

Interaktiver Umgang mit der Gravitation: Eines der zentralen Themen in Wissenschaft und Technik ist der Umgang mit Kraftfeldern. Intelligentes Interagieren mit den Wirkungen der Schwerkraft ist vielfach erforderlich, um Artefakte energetisch optimal zu gestalten. Bei der Konstruktion von Gebäuden oder Verkehrsmitteln werden intelligente Lösungen für ungewöhnliche Aufgaben oft erst durch die Kenntnis von Kraftfeldern möglich. Hochhäuser in erdbebengefährdeten Gebieten, schnelle Züge auf alten, kurvenreichen Bahnstrecken oder schnelle Schiffsverbindungen sind Produkte eines interaktiven Verständnisses von Schwerkraft. Die Kraftfelder werden nicht als unabänderliche Vorgabe gesehen, sondern als eine Randbedingung, mit der kreativ umgegangen werden kann. Es wird mit Verhältnissen zwischen Kräften gearbeitet,

um die Veränderung eines Systemzustands hervorzurufen. Seien es Gewichtskräfte, die durch Auftriebskräfte ausgeglichen werden, oder Bewegungen, die durch Schwerpunktverschiebungen neutralisiert werden. Dabei spielt das Prinzip der Adaptivität und Steuerbarkeit die zentrale Rolle. Diese Anpassung von Systemzuständen an Umgebungszustände funktioniert auf zwei Wegen. Einerseits kann sie passiv nach den Prinzipien der Selbstorganisation erfolgen. Andererseits sind aktive, kybernetische Steuerungen möglich. Allgemein reagiert eine aktive Steuerung schneller als eine passive, dafür benötigt sie allerdings zusätzliche Energie und eine entsprechende Sollwertvorgabe, um die Zustandsänderung auszuführen. Die Sollwertvorgabe kann durch den Menschen oder über Sensoren und Rechner erfolgen. Bei der passiven Steuerung stellt sich die Zustandsänderung automatisch und absolut zuverlässig, z.B. infolge veränderter Gleichgewichte ein. Der Aufwand ist meist deutlich geringer als bei aktiven Systemen.

Die aktiven und passiven Prinzipien gibt es auch in Form des dynamischen und statischen Auftriebs in fluidischen Medien oder bei Formen, die sich anpassen können.

Statisches und dynamisches Gleichgewicht: Die hydro- und aerostatischen Modelle des Schwerkraftausgleichs gehen davon aus, daß die Dichte des Körpers geringer ist als die des umgebenden Mediums. Dabei ist die Auftriebskraft gleich der Gewichtskraft des vom Körper verdrängten Flüssigkeits- oder Luftvolumens. Diese Kraft muß mit der Gewichtskraft des Körpers im Gleichgewicht stehen. Die Resultierende der nach oben gerichteten Auftriebskraft und der nach unten gerichteten Gewichtskraft gibt an, ob der Körper steigt, fällt oder in seiner momentanen Lage bleibt. Die Lageänderung wird im wesentlichen vom Unterschied der Dichten des Körpers und des ihn umgebenden Mediums bestimmt und stellt sich passiv, ohne weiteres Zutun ein. Ein Beispiel ist der Schiffsrumpf, dessen Dichte geringer ist als die des durch ihn verdrängten Wassers, weil er neben dem hohen Gewicht des Rumpfmaterials Holz oder Stahl eine sehr große Menge Luftvolumen enthält. Dieser sogenannte hydrostatische Auftrieb kann durch Veränderung der Körperdichte gesteuert werden, wie z.B. beim Unterseeboot. Durch das Fluten der Tauchtanks wird das Gewicht und damit die Dichte des Rumpfs größer. Je nach Menge des aufgenommenen Wassers wird das Gleichgewicht in geringerer oder größerer Tiefe erreicht. Durch Ausblasen des Tanks kann die Tauchtiefe wieder verringert werden. Ähnliche Funktion besitzt die Schwimmblase von Fischen.

Eine weitere Möglichkeit der Tiefenvariation ergibt sich durch die Nutzung des Höhenruders. Durch dessen Ausschlag wird die Umströmung des Ruders verändert und ein dynamischer Auf- oder Abtrieb erzeugt. Dieser bewirkt eine veränderte vertikale Fortbewegung des Unterseeboots und ermöglicht seine Steuerung in allen drei räumlichen Dimensionen. Die dabei genutzten Effekte sind hydrodynamischer Natur, d.h. der Ausgleich der Schwerkraft erfolgt durch die Nutzung von Geschwindigkeitsunterschieden zwischen Strömungen. Angewendet wird dieses aktive Prinzip der Auftriebserzeugung auch bei Tragflügelbooten (Hydrofoils oder Jetfoils). Bei höheren Geschwindigkeiten hebt sich der Rumpf dieser Fahrzeuge aus dem Wasser und der Auftrieb erfolgt nicht mehr hydrostatisch, sondern nur noch hydrodynamisch durch die Umströmung des unter dem Rumpf angebrachten Tragflügels. Dieser Tragflügel, der einem Flugzeugflügel nicht unähnlich ist, erfährt an seiner Oberseite Sog- und seiner Unterseite Druckkräfte, so daß er die Gewichtskräfte des Fahrzeugs ausgleichen kann. Der Antrieb des Fahrzeugs muß nur den durch die Profilform induzierten Widerstand aktiv überwinden und kann mit dem Rest der Leistung die Vortriebsgeschwindigkeit verstärken. Der große Vorteil dieses Entwurfsprinzips gegenüber Schiffen mit konventionellen Rümpfen liegt in dem deutlich geringeren Widerstand bei höheren Geschwindigkei-

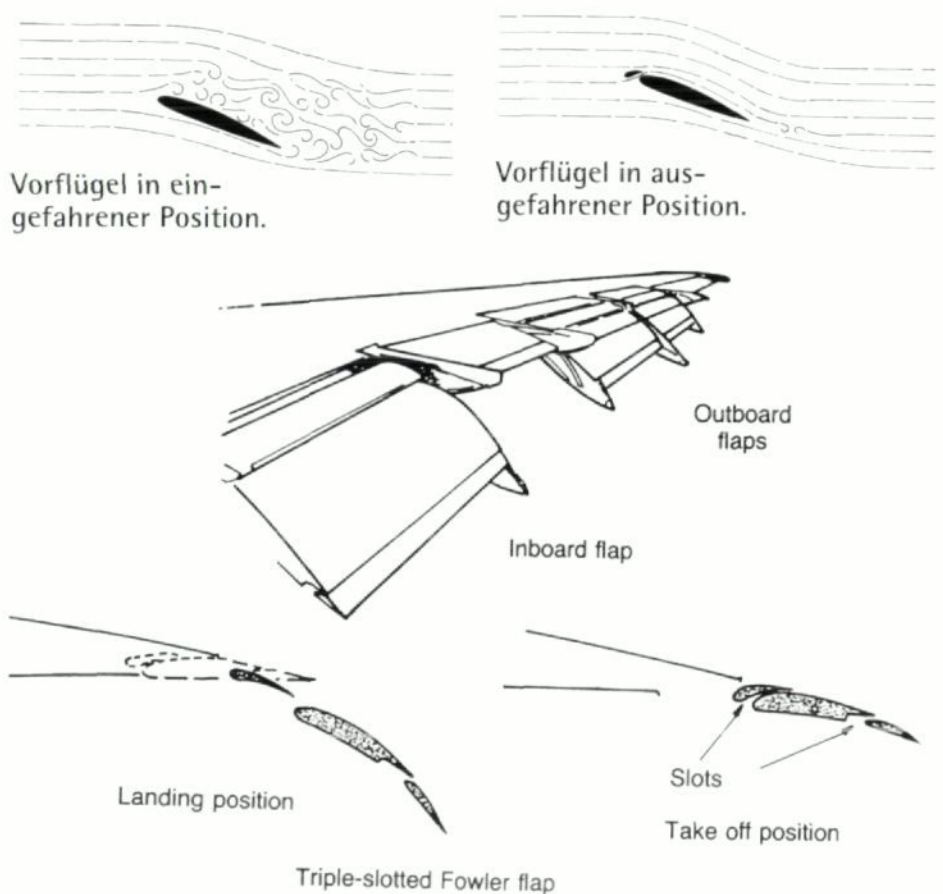
ten. Diese hydrodynamischen Prinzipien nutzen auch Flossenstabilisatoren, indem sie Seegangsbewegungen abdämpfen. Sie befinden sich an den Rumpfsseiten von Hochseeschiffen und werden bei rauher See ausgefahren.

Analog zu den hydrostatischen und -dynamischen Prinzipien im Umgebungsmedium Wasser gelten für die Luft analoge Prinzipien. Klassische Beispiele für passive aerostatische Auftriebserzeugung sind Ballone und Luftschiffe. Die auftriebserzeugenden Bauteile sind dabei mit einem Gas gefüllt, das eine geringere Dichte als die umgebende Luft hat, wie z.B. Helium, Wasserstoff oder Heißluft. Ähnlich dem Seeschiff kommt es hier wieder auf ein möglichst großes, die umgebende Luft verdrängendes Körpervolumen an, wobei nicht das gesamte Rumpfvolumen mit dem auftriebserzeugenden Medium gefüllt sein muß. Beim Starrluftschiff wird durch ein Rumpfgerippe eine hohe Stabilität des Fahrzeugs erreicht, was eine deutlich bessere Manövrierfähigkeit und Wetterbeständigkeit als bei Ballons schafft. Zur Höhensteuerung besteht auch hier die Möglichkeit der Dichteveränderung durch Ablassen von Traggas oder einer Änderung der Heißlufttemperatur. Das Fahrzeuggewicht kann durch das Abwerfen von Sandballast verringert werden. Genauso wie beim Unterseeboot kann man auch beim Luftschiff die aerodynamischen Prinzipien an Steuerflächen wie Höhen- und Seitenruder zur Navigation in allen Raumdimensionen nutzen. Um aus der vorhandenen Antriebsleistung den maximalen Vortrieb zu erhalten, minimiert man den aerodynamischen Widerstand, weshalb es zu der charakteristischen Zigarrenform der Zeppeline gekommen ist. Heute werden wieder Luftschiffe entworfen, wie der Zeppelin NT oder das britische Airship, die noch günstigere aerodynamische Formen haben sollen. Als Vorbild für neue Rumpfformen dient der Pinguin, nach heutigen Erkenntnissen das strömungsgünstigste Lebewesen.

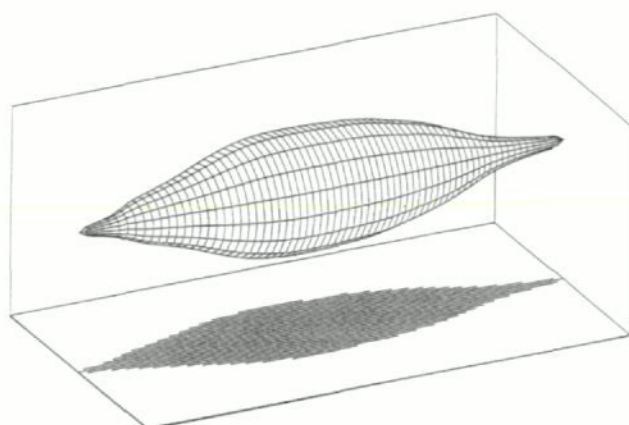
Ausschließlich aktiven aerodynamischen Auftrieb besitzt das Flugzeug mit seinen Tragflächen. Im Gegensatz zum Luftschiff "schwebt" es nicht, sondern "fliegt". Darum dürfen Flugzeuge während des Fluges eine gewisse Mindestgeschwindigkeit nicht unterschreiten, da unterhalb dieser Geschwindigkeit ein Abriß der Strömung in Umgebung der Tragflächen und damit ein Zusammenbruch des Auftriebs zu erwarten ist. Diese Geschwindigkeit kann nicht nur durch Antriebsleistung aufgebracht werden, sondern auch das Ergebnis der Nutzung des Windes sein. Thermische Effekte in der Atmosphäre werden vor allem beim Segelflug zur Steigerung des Auftriebs genutzt, aber ebenso nutzen Vögel das aerodynamische Prinzip für ihren Flug, da ihre Dichte größer ist als die der Luft. Sie können also nicht in der Luft schweben, sondern lediglich unter Ausnutzung der verschiedenen Strömungen in unterschiedlichen Höhen segeln. Seevögel wie der Albatros können durch den dynamischen Segelflug erhebliche Mengen an Energie sparen. Sie erzielen mittels spezieller abwärts gerichteter Flugbahnen Geschwindigkeit, die sie für einen anschließenden Steigflug und erhebliche Reichweiten ohne großen zusätzlichen Energieeinsatz befähigen.

Flugzeuge mit variabler Flügelgeometrie: Flugzeuge passen sich durch die Verstellung ihrer Flügelgeometrie entsprechend der von ihnen gewünschten Bahn an ihre Umweltbedingungen an. Klassisches Beispiel dafür sind die Klappensysteme an der Stirn- und Rückseite von Flugzeugtragflächen, die den

Auftriebsbeiwert verändern. In der Startphase werden besonders hohe Auftriebsleistungen benötigt, die durch das Ausfahren der Vorflügel wesentlich schneller erreicht werden können, was die erforderliche Startbahnstrecke senkt. Für den Landeanflug wird eine Flügelkonfiguration angestrebt, die den notwendigen Auftrieb bei einer möglichst geringen Geschwindigkeit ermöglicht, um die Landegeschwindigkeit und die benötigte Landebahnstrecke zu senken. Der durch das Ausfahren der Klappen gesteigerte Auftriebswert zieht jedoch auch einen vergrößerten Luftwiderstand der Tragfläche nach sich. In den verhältnismäßig kurzen Phasen des Starts und Steigfluges sowie im Landeanflug nimmt man dies in Kauf, im Reiseflug werden die Klappen vollständig eingefahren. Mittlerweile experimentiert man außerdem mit Tragflächenprofilen, die ihre Geometrie verändern können, so daß man sich auch während des Fluges an die Umströmung der Flügel anpassen kann. Gleichzeitig soll die variable Profilwölbung einen geringeren Treibstoffverbrauch ermöglichen. Profilveränderungen werden bereits bei einigen Überschallflugzeugen angewandt, hauptsächlich im militärischen Bereich. Diese Flugzeuge besitzen einen Schwenkflügel, der entweder die gepfeilte Form einer konventionellen Tragfläche oder die eines Deltaflügels annehmen kann. Die konventionelle Tragflächenform bietet optimierte Flugeigenschaften für Start, Landung und den Geschwindigkeitsbereich unterhalb der Schallgeschwindigkeit. Im Überschallbereich sind die aerodynamischen Eigenschaften des Deltaflügels deutlich vorteilhafter.



Dynamische Systeme zum Gewichtsausgleich im Fahrzeugbau: Beim Bau von Schienenfahrzeugen sind in den letzten Jahren eine Reihe von dynamischen Fahrwerksystemen entwickelt worden. Ziel dabei war es, den Fahrkomfort zu erhöhen, die Belastung des Gleiskörpers zu senken und höhere Geschwindigkeiten auf bestehenden Strecken zu ermöglichen. Diese Methode kann auf vielen Strecken eine ökonomische und ökologische Alternative zum Bau von teuren Hochgeschwindigkeitsstrecken sein. Auch Strecken im Regionalverkehr können so mit verhältnismäßig bescheidenem Aufwand eine deutliche Attraktivitätssteigerung erfahren. Im wesentlichen arbeiten diese Neigesysteme mit einer Regelung der Wagenkastenbewegung, die von der Bewegung der Räder und Drehgestelle entkoppelt wird. Dadurch wird die seitliche Beschleunigung auf die Fahrgäste geringer. Ähnlich einem Zweiradfahrer neigt sich der Zug in der Kurve.



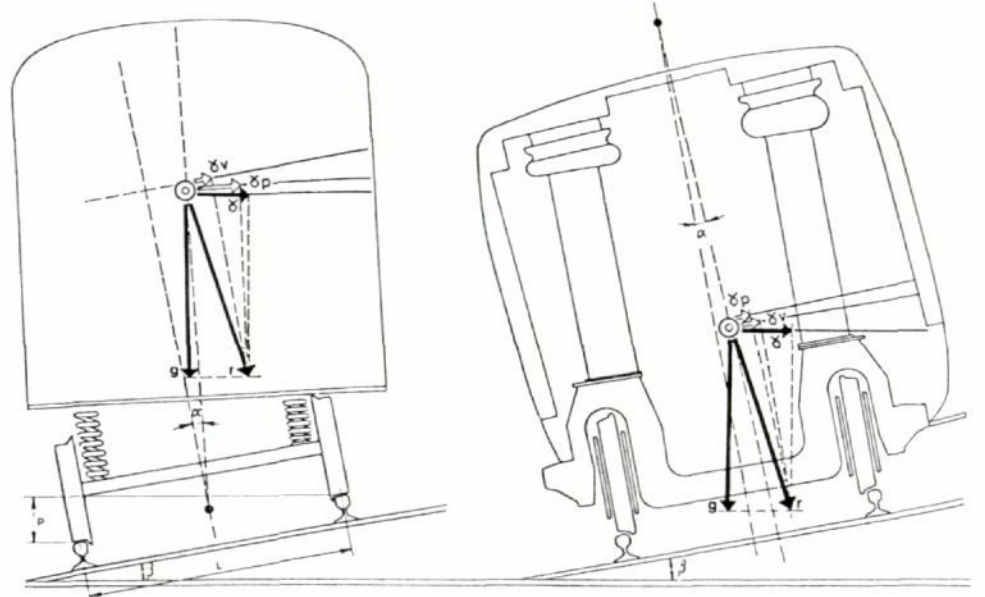
Der Pinguin als Vorbild für den Zeppelin.

Einen passiven Weg, dieses Ziel allein durch die Verschiebung des Kraftgleichgewichtes zu erreichen, nutzt das innovative spanische System Talgo Pendular. Dieser Zug besteht aus sehr kurzen Wagenkästen, zwischen denen sich die eigentlichen Fahrwerke befinden. Die Räder liegen also nicht unter den Wagen wie bei konventionellen Bauarten, sondern dazwischen. Die Räder sind einzeln an einem Joch aufgehängt, eine durchgehende Achse zwischen den Rädern existiert nicht. (Daher kann man bei Zügen dieser Bauart einen Wechsel der Spurweite von der spanischen Breitspur auf die Normalspur durch Verschieben der Räder ohne Anhalten am Grenzbahnhof ermöglichen.) Von diesem Joch gehen säulenartige Stützen aus, an deren Spitze sich Luftfedern befinden, die die Oberseiten der Wagenkästen mit den Radsätzen verbinden. Durch diese Aufhängung liegt der Schwerpunkt der Wagenkästen unterhalb ihrer Aufhängung, und sie erhalten in schnell durchfahrenen Kurven die Möglichkeit zum Pendeln. Der Wagenkasten neigt sich mitsamt dem Fußboden und den Fahrgästen um etwa $3,5^\circ$ zur Innenseite der Kurve hin. Dabei verringert sich die Wirkung der Fliehkraft auf die Fahrgäste, die nicht mehr wie bei herkömmlichen Fahrzeugen gegen die Kurveninnenseite gedrängt werden, da Wagenboden und Fliehkrafttrichtung ungefähr die gleiche Ebene annehmen. Die Pendelbewegung erfolgt passiv ohne zusätzlichen Energie- oder Steuerungsaufwand. Lediglich die Ventile der Luftfedern müssen über die Einleitung der Kurvenfahrt informiert werden, um die Federn elastisch zu verformen und die Neigung der Wagenkästen zu ermöglichen. Durch die Einzelradaufhängung der Fahrzeuge und die relativ geringen Achslasten wird einer übermäßigen Schienenbelastung vorgebeugt und die Geschwindigkeit auf konventionellen Strecken um etwa 15 % gegenüber herkömmlichem Wagenmaterial gesteigert. Außerdem sorgen die nach Leichtbauprinzipien aus stranggepressten Aluminiumprofilen gebauten Wagenkästen zudem für geringeren Energieverbrauch pro Sitzplatz.

Eine andere Bauphilosophie nutzt aktive hydraulisch oder elektrisch betätigte Vorrichtungen für die Wagenkastenneigung. Bei dem italienischen System Pendolino besitzt das Drehgestell eine Wiegekonstruktion, auf der der Wagenkasten ruht. Über Hydraulikzylinder ist es möglich, den Wagenkasten entsprechend der durchfahrenen Bogenstrecke zur Kurveninnenseite um $6^\circ - 10^\circ$ zu neigen. Ein Regelsystem sorgt für das rechtzeitige Auslenken und Zurückstellen der Hydraulikzylinder. Dadurch lassen sich auf konventionellen Strecken Geschwindigkeitssteigerungen von etwa 28 % erzielen. Ähnlich arbeitet das Neigesystem des schwedischen Zuges X 2000, mit dem eine Neigung von bis zu $6,5^\circ$ und eine um bis zu 26 % höhere Geschwindigkeit erreicht werden kann. Eine Neuentwicklung eines großen deutschen Rüstungs- und Technologiekonzerns macht sich das elektrische Nachführsystem der Kanone der Panzers Leopard zunutze. Dieses System wurde ursprünglich für die Aufgabe konstruiert, die Kanone auch in schwierigem Gelände und bei wechselnder Neigung und Richtung in der programmierten Positionierung zu halten. Zur Erfüllung dieser Aufgabe ist eine komplexe Regel elektronik erforderlich, die Veränderungen in der Lage des Panzers registriert und sie in Steuerbefehle für die Servomotoren der Kanonenpositionierung umsetzt. In der Anwendung als Neigesystem für Reisezugwagen erhält die Regelelektronik von drei Sensorsystemen Informationen:

- einem Pendel zur Beschleunigungsmessung
 - zwei Wendekreiseln zur Messung der Winkelgeschwindigkeit im Kreisbogen und zur Erkennung der Übergangsbögen.
- Die Elektronik ermittelt aus diesen Daten die angemessene Stellung der Wagenkasten neigung und gibt daraufhin Steuersignale an den Servomotor, der über einen Spindeltrieb den

Wagenkasten in die geforderte Position bringt. Durch den Einsatz von elektrischen statt hydraulischen Stelleinrichtungen können das Volumen und Gewicht des Systems sowie der Energiebedarf und die Reaktionszeiten des Systems verringert werden, das für eine Neigung des Wagenkastens bis zu 8 % ausgelegt wurde.



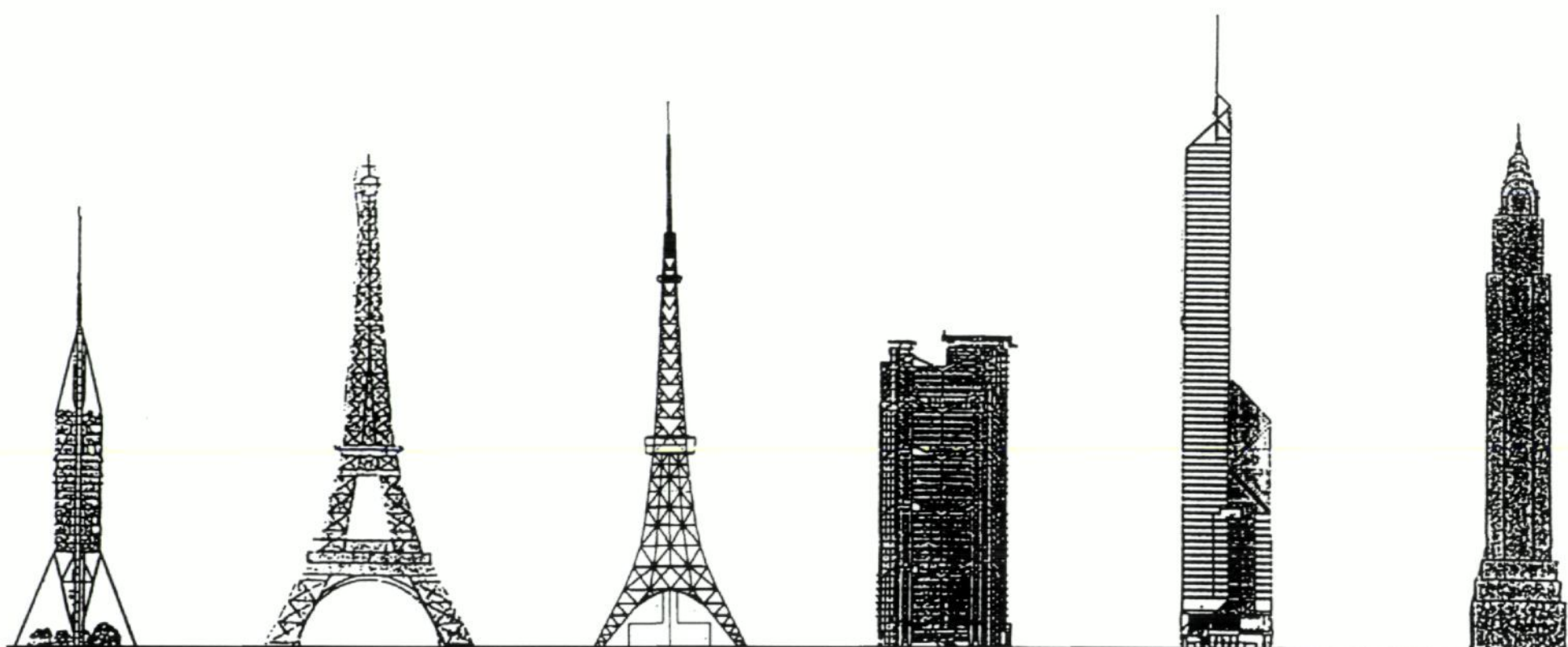
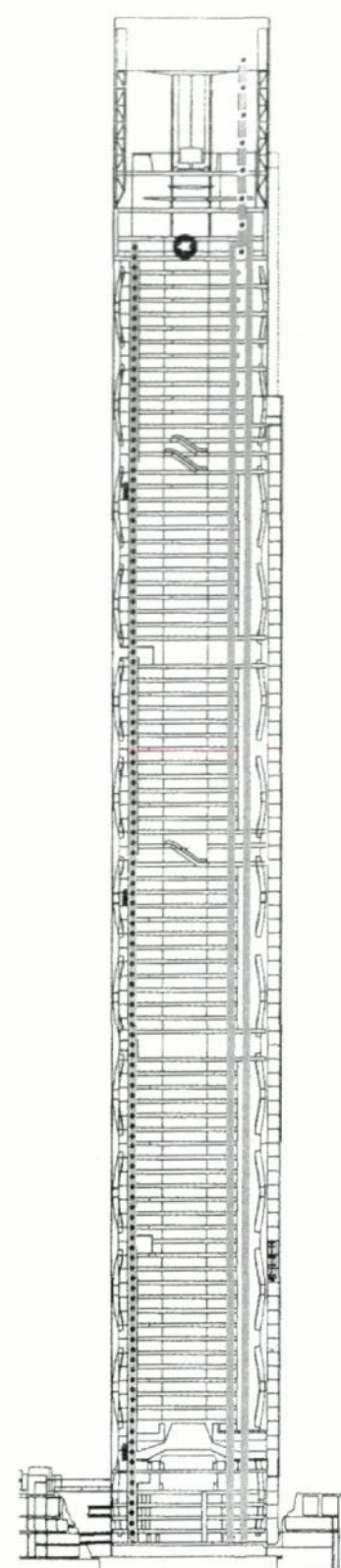
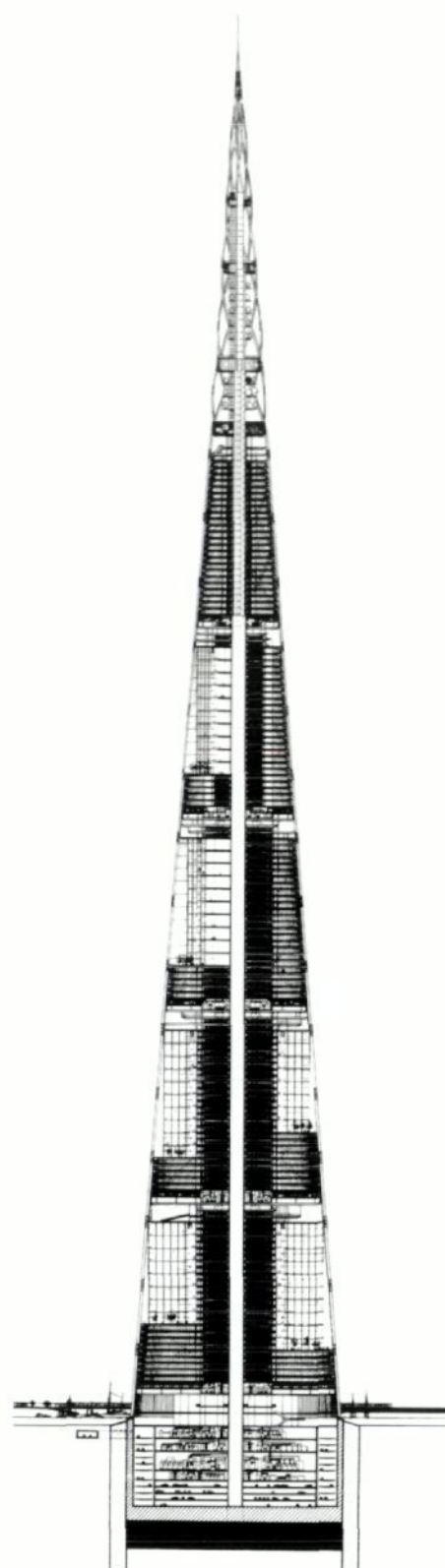
Parabelflug: Bei einem Flug entlang dem Verlauf einer ballistischen Parabel entsteht für die Insassen etwa 28 Sekunden lang der Zustand von Schwerelosigkeit. Am Anfang des Parabelflugmanövers steht die Beschleunigung und ein Steigflug in einem Winkel von etwa 50° . Sobald sich das Flugzeug auf der Bahn der Wurfparabel befindet, werden die Triebwerke gedrosselt, und es bewegt sich auf dieser Bahn wie ein in die Luft geworfener Ball. In dem Moment wirkt auf das Flugzeug lediglich die Gravitation, die es auf der Parabel hält. Für die Personen und Gegenstände im Flugzeug entsteht aufgrund deren eigener Massenträgheit der Zustand von Schwerelosigkeit, da die Massen der alten aufwärtsgerichteten Bahn des Flugzeugs folgen wollen. Beschleunigung des Flugzeugs und Gravitation gleichen sich zu Null aus. Bei einer Anfangsgeschwindigkeit von etwa 980 km/h ist nach etwa 28 Sekunden der Tiefpunkt der Parabel erreicht, die Wirkung der Gravitation wird wieder spürbar und das Flugzeug wird abgefangen. Parabelflüge werden insbesondere in der Mikrogravitationsforschung und für das Training von Weltraumpersonal genutzt.

Reagible Strukturen im Hochbau: Im Bauwesen treten dynamische Effekte durch wechselnde Lasten auf. Beispiele sind Lasten aus Wind oder Erdbeben, aber auch Vibrationen durch wechselnde Verkehrslasten wie zum Beispiel schwingende Maschinen oder U-Bahnverkehr unter dem Gebäude. Solche starken dynamischen Belastungen lassen sich nur durch reaktionsfähige Strukturen effizient abtragen. Im einfachen Fall durch die Einfügung von elastischen Dämpfungselementen. Diese häufig aus Gummimaterialien gefertigten passiven Elemente lassen Bewegungen der Struktur zu, wandeln aber Bewegungsenergien in Verformungsenergien um, wodurch die Schwingung der Struktur gedämpft wird. Die feste Baustruktur muß daher nicht mehr die vollen Bewegungsenergien abtragen und kann geringer dimensioniert werden. Insbesondere zum Schutz vor Erdbebenwirkungen, Vibration, Lärm an Bahnstrecken und Maschinenfundamenten werden solche gummigefederten Vibrationsdämpfer eingesetzt.

Beim Entwurf von Baukonstruktionen für hohe Gebäude sind die großen auftretenden Windlasten häufig eines der Hauptprobleme für die Dimensionierung der Struktur. Sie induzieren durch Böen und Wirbel um das Gebäude herum Schwingungen, die eine starke dynamische Belastung für die Struktur bedeuten. Es entsteht das Problem, daß die Konstruktion einerseits ausreichend beweglich sein muß, um einen Dauerbruch aufgrund der ständigen Lastwechsel zu verhindern, andererseits aber ihre Bewegung ausreichend ge-

dämpft sein muß, um das Wohlbefinden der Gebäudenutzer in den oberen Stockwerken zu gewährleisten. Es muß also die Bewegungsenergie der angreifenden Wind- und Erdbebenkräfte in der Struktur in unschädliche Formen umgesetzt werden. Elastische Vibrationsdämpfer alleine sind dabei häufig nicht ausreichend. Wesentlich effektiver sind für diesen speziellen Einsatzzweck in hohen Gebäuden Systeme, die sich die Trägheit großer Massen zunutze machen. Die Auslenkung dieser Massen erfolgt aktiv oder passiv entgegen der Richtung der angreifenden Kräfte. Dadurch daß die Wind- oder Erdbebenkräfte in der Struktur die bewegliche Dämpfungsmasse bewegen müssen, verlieren sie einen Großteil ihrer Beschleunigungsenergie, und die Belastung der Struktur sinkt. Bei besonders starker Belastung kann durch den Einsatz aktiver Antriebe die Auslenkung der Massen verstärkt werden, was in einer noch größeren Dämpfungswirkung resultiert.

Als Beispiel für die Anwendung aktiver und passiver Dämpfungssysteme kann der ca. 840 m hohe Millenium Tower dienen, der von Norman Foster für die erdbeben- und windgefährdete Bucht von Tokyo entworfen wurde. Eine erste Reduzierung der Windlasten wird durch die kegelförmige Form erreicht, die mit steigender Höhe eine immer geringere Windangriffsfläche bietet. An der Spitze des Turms haben die Konstruktionsingenieure der japanischen Firma Obayashi sogenannte Active Vibration Control Systems (AVICS) vorgesehen. Diese nach dem Prinzip der beweglichen, gegenwirkenden Masse arbeitenden Systeme erzeugen auf aktive Weise Horizontalkräfte gegen die Wind- und Erdbebenkräfte, die die Spitze verformen wollen. Sie funktionieren durch einen elektrischen Servomotor, der eine Gewindewelle antreibt, auf der sich ein Stahlkörper mit hoher Masse befindet. Mittels des Motors kann das Gewicht entlang einer horizontalen Führungsschiene verschoben werden und dadurch einen horizontalen Kraftimpuls erzeugen. Von diesen Systemen sind drei Stück in Dreiecksanordnung vorhanden, um Kräfte aus allen horizontalen Richtungen dämpfen zu können. Je nach Richtung der angreifenden Kräfte sind immer zwei Systeme gleichzeitig im Einsatz. Ebenso in Dreiecksform sind die Zwillingsstanksysteme angeordnet, die sich im Bereich des 123. und des 153. Stockwerk befinden sollen. Sie bestehen aus zwei über Rohrleitungen verbundenen wassergefüllten Behältern und vertikal beweglichen Schiebern, die über ein Getriebe von Elektromotoren angetrieben werden können, wenn das System in aktiver Funktion ist. Im Normalbetrieb soll das System jedoch passiv auf Basis der Trägheitskraft des Wassers arbeiten, das zwischen den Tanks zirkuliert und damit den Bewegungskräften des Gebäudes entgegenwirkt. Bei stärkeren Vibrationskräften kann das System auf aktiven Betrieb umgestellt werden. Dabei werden die Schieber so angesteuert, daß sie die Trägheitsbewegung des Wassers periodisch verstärken.



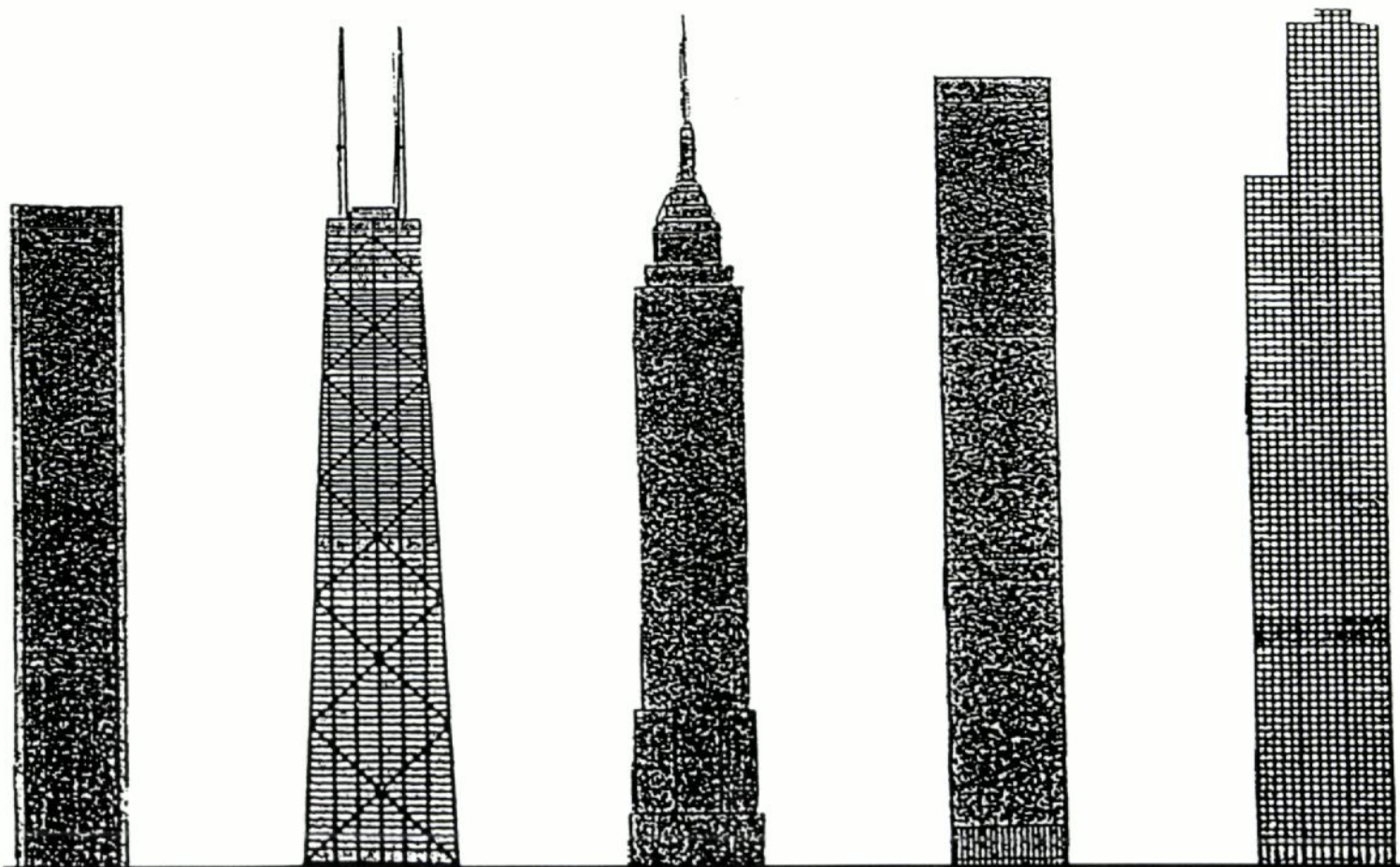
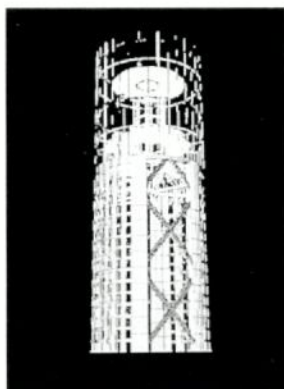
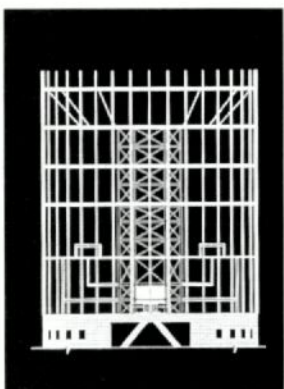
Ein ähnlich wirkendes Vibrationsdämpfungssystem besitzt der Tour Sans Fin, entworfen von Jean Nouvel für die Pariser Bürovorstadt La Defense. Ab einer Höhe von 372 m wird der über 400 m hoch geplante Turm nicht mehr von einer festen Umhüllung, sondern einer offenen Stahlgitterkonstruktion begrenzt, um über die Windangriffsfläche auch die Windlast zu verringern. Die durch den Wind erzeugten Vibrationen sollen durch ein System mit beweglicher Masse (Tuned Mass Damper) deutlich reduziert werden. Da der obere Teil des Turms keine Funktionen außer Aussicht enthält, konnte dieses vom Büro Ove Arup entworfene System sehr groß dimensioniert werden und soll daher vollständig passiv arbeiten. In der Form eines gigantischen Pendels soll es zu einem bestimmten architektonischen Element im oberen Bereich des Turms werden. Die Funktion ist analog zu der des AVICS im Millenium Tower: Eine große Masse ist an etwa 20 m langen vertikalen Ketten aufgehängt und kann sich in einer viskosen Flüssigkeit horizontal in alle Richtungen bewegen. Wenn Windkräfte auftreten, die die Gebäudestruktur bewegen, schwingt das Pendel aufgrund seiner großen Massenträgheit aus und wirkt der Kraft entgegen. Durch Aufhängung des Pendels weit über dessen Schwerpunkt kann auf zusätzliche Antriebsenergie verzichtet werden, zumal keine genaue und vollständige Dämpfung aller Vibrationen angestrebt wird, sondern lediglich eine Begrenzung der Beschleunigungsamplituden und eine Entlastung der Struktur von dynamischen Kräften. Dabei soll das System bei einer Eigenmasse von nur 2 % der Gesamtmasse des Turms die gesamten auf die Gebäudenutzer wirkenden Beschleunigungen um 50 % reduzieren. Weitergehende Vorstellungen von aktiven Gebäudestrukturen

sehen die Einbeziehung von hydraulischen Elementen in die tragende Konstruktion vor. In einem Vorschlag von Arup soll die primäre Struktur bewegliche Lager aufweisen und über Hydraulikzylinder ausgesteift werden. Die durch eine Belastung hervorgerufene Bewegung der Lager sowie eine vertikale Verschiebung der Konstruktionselemente sollen über Lasersensoren aufgenommen und in Steueranweisungen an die Hydraulikzylinder umgesetzt werden. Dadurch kann das Bauwerk flexibel mit wechselnden Lasten interagieren. Wenn große Veränderungen der Strukturbelastung auftreten, wie z.B. beim Aufbau der Struktur, sollen diese Strukturen die Berechnung der temporären Belastung vereinfachen. Auch temporäre Überlastungen der Struktur wie z.B. bei Erdbeben soll die Struktur durch eine Veränderung ihrer Steifigkeit über die Hydraulikzylinder wesentlich besser überstehen können als eine konventionelle steife Struktur. Ein weiterer Vorteil dieser aktiven Struktur liegt in der Vereinfachung des Steifigkeitsnachweises. Da eine Verformung der Struktur über die Hydraulikzylinder ausgeglichen werden kann, spielt bei der Auslegung der Gebäudestruktur im wesentlichen nur die Spannungsbelastung der Struktur eine Rolle.

Diese Formen des aktiven Leichtbaus werden auch für die Konstruktion von Satelliten diskutiert. Durch den Einbau von piezoelektrischen Keramikelementen, die ihre Form und Länge elektrisch gesteuert verändern können, sollen hier Belastungen und unerwünschte Verformungen ausgeglichen werden. Wenn beispielsweise infolge Sonneneinstrahlung sich eine Seite des Satelliten ausdehnt, können die Piezoelemente sich computergesteuert so verformen, daß diese Dehnung neutralisiert wird. Ebenso sind elektronisch gesteuerte Schwingungselemente denkbar, die bei Vibrationen der Struktur zu entgegengesetzten Schwingungsbewegungen angeregt werden, wodurch die Vibrationen neutralisiert werden. Derartige aktive Elemente könnten in größerem Maßstab auch in Gebäuden installiert werden, um z.B. den Schwingungen aus einem Erdbeben entgegenzuwirken.

Literatur:

Spektrum der Wissenschaft: Verständliche Forschung, Gravitation; Heidelberg 1989
 Stephen W. Hawking, Eine kurze Geschichte der Zeit, rororo science 1290, Reinbek 1991
 Istvan Szabo, Geschichte der mechanischen Prinzipien, Basel 1976



Von links nach rechts:
 Barcelona Tower
 Eiffel Tower
 Tokyo Tower
 Hongkong Bank
 Bank of China
 Chrysler Building
 Standard Oil
 Hancock Tower
 Empire State
 World Trade
 Sears Tower