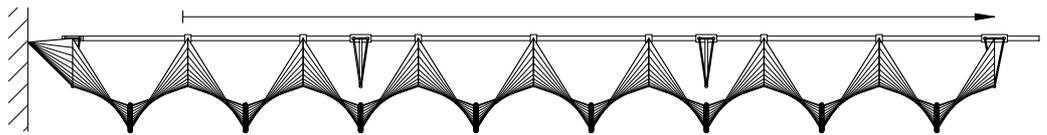

BEWEGLICHE TRAGWERKE

AUS DER SICHT DER TRAGWERKSLEHRE FÜR ARCHITEKTEN

MARKUS WALLNER



Markus Wallner

Bewegliche Tragwerke

Aus der Sicht der Tragwerkslehre für Architekten

© 2017 Verlag der Technischen Universität Graz

www.ub.tugraz.at/Verlag

ISBN (print 2003) 978-3-901351-87-7 (3-901351-87-6)

ISBN (e-book) 978-3-85125-529-4

DOI 10.3217/978-3-85125-529-4



Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz.
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen
Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://www.dnb.de>
abrufbar.

Diese Schrift wurde im Jahr 2003 unter gleichem Titel dem Promotionsprüfungsausschuss der
Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Graz als Dissertation vorgelegt.

VORWORT

Die vorliegende Schrift entstand im Zuge meiner Tätigkeit als Universitätsassistent am Institut für Tragwerkslehre an der Technischen Universität Graz. Ihr Thema erwuchs der Betreuung von Studentenprojekten zu beweglichen Tragwerken und dem eigenen Interesse an beweglichen Konstruktionen. Im Zuge der Abhaltung der Vorlesung ‚Bewegliche Tragwerke‘ konnte ich Erfahrung in der Vermittlung des behandelten Stoffumfanges sammeln und vor allem die Art der Vermittlung verifizieren. Die Vorlesung wird in Form eines Lehrauftrages weitergeführt. Drei Veröffentlichungen zum Thema gaben die Möglichkeit zur öffentlichen Diskussion.

Für die intensive und kritische Betreuung meiner Arbeit und die hilfreichen offenen Diskussionen möchte ich Herrn Professor Harald Egger, emeritierter Vorstand des Institutes für Tragwerkslehre, sehr herzlich danken.

Herrn Professor Rainer Barthel gilt mein besonderer Dank für das Interesse an meiner Arbeit den konstruktiven Anmerkungen und der Diskussion am Lehrstuhl für Tragwerkslehre, an der Technischen Universität in München.

Großer Dank gilt auch meinen Kollegen am Institut für Tragwerkslehre, Jürgen Neugebauer, Gudrun Oswald, Andreas Trummer und Manfred Zellinger die mit kollegialem Umfeld immer hilfreich zur Seite standen und zur Freude an der Arbeit beitrugen. Tobia Zordan, Univ.v.Venedig, Italien und Martin Pircher, Univ. of Western Sydney, Australien, gilt mein besonderer Dank für die Zusammenarbeit im Rahmen zweier Veröffentlichungen. Sonja Brückler möchte ich sehr für die Unterstützung bei der Vervielfältigung der vorliegenden Schrift danken.

Im Zuge der Recherchen zu den behandelten Anwendungsbeispielen wurde ich von folgenden Personen unterstützt, denen ich ebenfalls meinen besonderen Dank aussprechen möchte: Herrn Dr.Ing. Horst Bergermann, SBP Schlaich, Bergermann und Partner, Stuttgart für die Informationen zur Überdachung im Rathaus Wien, Herrn Architekt Siegfried Frank und Jörg Spöttler, Frank+Rieper 2003, Graz für die Baustellenführung und Unterlagen zum Schlossberg-Cafe, Herrn Professor Horst Gamerith, Institut für Hoch- und Industriebau, TU Graz für die Projektunterlagen zum Bad zur Sonne, Herrn Clémens Huang, W+E Wilkinson Eyre Architects für die Unterlagen zur Gateshead Millenium Bridge, Herrn Professor Marti und Herrn Professor Konrad Bergmeister für die Diskussion im Zuge des PhD-Symposiums in München 2002, Frau Architekt Ingrid Mayr, Graz für die Projektbeschreibung und -unterlagen zur Überdachung der Kasematten in Graz, Herrn Professor Pellegrino und Dipl.-Ing. Frank Jansen, dsl Deployable Structures Laboratory, Cambridge für die Aufnahme am Institut, Herrn Dipl.-Ing. Rainer Plösch, Magistrat Graz für Fotos und Unterlagen zur Stadthalle, Graz, Herrn Professor Jörg Schlaich, SBP Schlaich, Bergermann und Partner, Stuttgart für die anregende Diskussion und Informationen zu den Brücken in Duisburg und Kiel, Herrn Professor Werner Sobek und Herrn Architekt Alfred Rain, WSI Werner Sobek Ingenieure, Stuttgart für die Informationen zur Überdachung Rothenbaum in Hamburg und dem Atelier Architekt Sillja Tillner für die Projektunterlagen zur Überdachung im Rathaus Wien.

Abschließend möchte ich Eva besonders danken, die mit viel Verständnis diese intensive Zeit mit mir teilte. Meiner Mutter Ulli gilt besonderer Dank für ihre elterliche Unterstützung.

KURZFASSUNG

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erweiterung der gängigen Tragwerkslehre für Architekten um Inhalte zu beweglichen Baukonstruktionen. Aus der Sicht der Tragwerkslehre wurden die verschiedenen, zugehörigen Fachbereiche, nämlich die Kinematik als Teil der allgemeinen Mechanik und die technische Getriebelehre als Teil des Maschinenbaus, auf die wesentlichen Teile reduziert und zusammengeführt. Der vorliegende Leitfaden soll entwerfenden Architekten und Ingenieuren dienen, welche sich mit der Konzeption und der baulichen Umsetzung beweglicher Baukonstruktionen auseinandersetzen haben.

Eine Auswahl an Anwendungsbeispielen zeigt Tragwerke und hinsichtlich des Tragverhaltens untergeordnete, bewegliche Baukonstruktionen. Dabei werden die typischen Lösungen für Bauaufgaben aus dem Brücken- und Hochbau beschrieben und um Sonderformen ergänzt.

ABSTRACT

The Aim of this book is to extend commonly used structural design for architects by a part about moveable constructions in buildings. Contents of different appertaining subjects, namely Kinematics as part of general mechanics and the interdependent mechanisms and gear trains as part of mechanical engineering, were reduced to vital substance from the point of structural design for architects. The present treatise is intended to be used as a guidebook by designing architects and engineers, who are to examine moveable building-constructions.

A collection of examples of built moveable structures show typical and additionally special solutions in the design of bridges and rising structures.

Um etwas zu erfinden, sind zwei nötig. Der eine stellt Kombinationen her; der andere wählt aus, erkennt, was er wünscht und was für ihn wichtig ist in der Masse der Dinge, die der erste ihm überlassen hat. Was wir Genie nennen, ist nicht so sehr das Werk des ersteren als vielmehr die Bereitschaft des letzteren, den Wert dessen, was ihm vorgelegt wurde, zu erfassen und daraus auszuwählen.

Paul Valéry (1871-1945)

INHALT

1 Einführung

1.1	Ziele, Eingrenzung und Inhalt der Arbeit	1
1.2	Bewegliche Tragwerke	1
1.3	Konzeption und Ausformung beweglicher Tragwerke.....	2

2 Überblick

2.1	Anwendung der Kinematik in Fachbereichen.....	3
2.1.1	Kinematik in der Bautechnik	3
2.1.2	Kinematik im Maschinenbau.....	5
2.1.3	Kinematik in der Biologie	5
2.2	Geschichtlicher Überblick.....	6
2.2.1	Entwicklung der Kinematik.....	6
2.2.2	Entwicklung beweglicher Brücken.....	10
2.2.3	Entwicklung beweglicher Hochbauten.....	17
2.3	Charakterisierung beweglicher Tragwerke.....	24
2.3.1	Hinsichtlich der Art der Bauaufgabe	24
2.3.2	Hinsichtlich der Bewegungsart	24
2.3.3	Hinsichtlich des Antriebes	26
2.3.4	Hinsichtlich der Endlage.....	27
2.4	Zusammenfassung.....	28

3 Kinematik

3.1	Gliederung kinematischer Systeme	29
3.1.1	Elemente	29
3.1.2	Koppelungen und Lagerungen.....	29
3.1.3	Gelenksketten	31
3.1.4	Mechanismen in beweglichen Tragwerken.....	33
3.2	Kinematische Bestimmtheit	35
3.2.1	Ebene Systeme.....	35
3.3	Graphische Kinematik zwangsläufiger Mechanismen	39
3.3.1	Bewegungsgeometrie.....	39
3.3.2	Totlagen von Mechanismen	39
3.3.3	Bewegungszustand	40
3.4	Zusammenfassung.....	47

4 Getriebe

4.1	Aufgabenstellung.....	49
4.2	Grundgetriebe.....	49
4.3	Antriebe.....	50
4.3.1	Zugmittelgetriebe.....	50
4.3.2	Druckmittelgetriebe.....	63
4.3.3	Rädergetriebe.....	68
4.3.4	Schraubengetriebe.....	72
4.4	Führungsgetriebe und -einrichtungen.....	75
4.4.1	Befahrbare Seile.....	75
4.4.2	Rädergetriebe – Laufräder und Schienen.....	77
4.4.3	Gelenkstrieb e.....	80
4.4.4	Kurventriebe.....	84
4.5	Haltungsgetriebe und -einrichtungen.....	87
4.5.1	Sperrtriebe und Hemmtriebe.....	87
4.5.2	Arretierungen.....	87
4.6	Weitere Einrichtungen.....	89
4.6.1	Lager.....	89
4.6.2	Sensoren.....	90
4.7	Zusammenfassung.....	91

5 Anwendungsbeispiele

5.1	Bewegliche Brücken.....	97
5.1.1	Klappbrücken.....	98
	Galata-Brücke, Istanbul, T.....	99
	Deffenè-Brücke, Mannheim, D.....	105
	Sheboygan-Brücke, Wisconsin, USA.....	111
5.1.2	Drehbrücken.....	115
	Drehbrücke Ludwigshafen, D.....	117
	El Ferdan-Brücke, Ägypten.....	121
5.1.3	Hubbrücken.....	125
	Saltinabrücke, CH.....	127
5.1.4	Sonderformen.....	131
	Katzbuckelbrücke, Duisburg, D.....	131
	Schwimmbrücke Lundrim, Genf, CH.....	137

5.2	Hochbauten - Wände	143
	Senkwand, Cafe Schlossberg, Graz, A	143
	Schiebetore Stadthalle, Graz, A	149
	Drehtore Stadthalle, Graz, A.....	153
	System Dreh- und Kippfenster.....	157
	Earnstings Warenhaus, Coesfeld, D	159
	Fassade des Aurora Place, Sydney, AUS.....	161
	Fassade des Arabischen Institutes, Paris, FRA.....	165
5.3	Hochbau - Dächer	169
	Schlossbergkasematten, Graz, A.....	169
	Bad zur Sonne, Graz, A.....	173
	Colonial Stadium, Melbourne, AUS.....	177
	Hofüberdachung im Rathaus, Wien, A	181
	Markisen	187
	Freilichttheater, Bad Hersfeld, D	189
	Rothenbaum, Hamburg, D.....	191
	Werfthalle Cargo Lifter, Brand, D	197
5.4	Bewegliche Sonderbauwerke	201
5.4.1	einmalig bewegt.....	201
	Pantadome System der Convention Hall, Nara, JAP	201
	Systeme mit Scherengittern	207
5.4.2	wiederholt bewegt.....	209
	Riesenrader in Wien, A; London Eye, GB.....	209
6	Conclusio	215
<hr/>		
A.	Literaturverzeichnis	A-1
B.	Abbildungsnachweis	B-1
C.	Anhang	C-1

1 Einführung

1.1 Ziele, Eingrenzung und Inhalt der Arbeit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Erweiterung der gängigen Tragwerkslehre für Architekten um Inhalte zu beweglichen Baukonstruktionen. Aus der Sicht der Tragwerkslehre wurden die verschiedenen, zugehörigen Fachbereiche, nämlich die Kinematik als Teil der allgemeinen Mechanik und die Getriebelehre als Teil des Maschinenbaus auf die wesentlichen Teile reduziert und zusammengeführt. Der vorliegende Leitfaden soll entwerfenden Architekten und Ingenieuren dienen, welche sich mit der Konzeption und der baulichen Umsetzung beweglicher Baukonstruktionen auseinanderzusetzen haben.

Aus der Interaktion zwischen beweglichen Tragwerksteilen und dem stützenden, fixen Tragwerk ergeben sich unter anderem Fragen zur Dichtigkeit, die an anderer Stelle¹ behandelt werden. Die Stützung durch das fixe Tragwerk hat möglichst Verformungsarm zu erfolgen und kann durch Methoden der gängigen Tragwerkslehre nachgewiesen werden.

Der Überblick zu Beginn der Arbeit zeigt die Entwicklung der Kinematik als Wissenschaft, ihre historische Anwendung für Bauaufgaben und die Entwicklung von beweglichen Tragwerken und enthält weiters eine Einteilung der beweglichen Tragwerke anhand gemeinsamer Charakteristika.

Die Kinematik zur Bildung geeigneter Bewegungsmechanismen und der Ermittlung von Bewegungseigenschaften wurde auf die wesentlichen Teile und die Anwendung graphischer Verfahren zurückgeführt. Zur baulichen Umsetzung beweglicher Tragwerke werden Getriebe benötigt, die aus einer begrenzten Zahl von Grundgetrieben zusammengesetzt sind. Diese Grundgetriebe und ihre Teile werden hinsichtlich ihrer Eigenschaften beschrieben und ihr Einsatz in beweglichen Tragwerken untersucht.

Eine Auswahl von Anwendungsbeispielen, die aus der Sicht der vorherigen Kapiteln ihre Zusammenhänge verdeutlichen, schließt die Arbeit ab.

1.2 Bewegliche Tragwerke

Bewegliche Tragwerke sind Baukonstruktionen, die durch mechanischen Antrieb die Lage einzelner Teile zueinander oder des Tragwerks insgesamt verändern können. Die Bewegung folgt dabei bestimmten Anforderungen, wie dem Schutz vor Niederschlag oder Sonneneinstrahlung bei beweglichen Hochbauten oder der Verkehrsführung sich überschneidender Verkehrswege bei beweglichen Brücken. Die Bewegung kann einmalig, wie im Rahmen von Montageabläufen, wie-

¹ Schmid: Schwachstellenanalyse, 1987

derholt, wie bei den meisten Bauaufgaben, oder kontinuierlich erfolgen, wie bei bestimmten Kunstobjekten.

In der vorliegenden Arbeit werden neben den Tragwerken des Brücken- und Hochbaus auch, hinsichtlich der Lastabtragung untergeordnete, Baukonstruktionen des Hochbaus, wie Fenster und Fassadenteile behandelt, da diese in der Regel die selben Bewegungseigenschaften und gleichen Konstruktionsprinzipien aufweisen wie tragende bewegliche Baukonstruktionen.

Die Auswahl der behandelten Anwendungsbeispiele erfolgte nach den unterschiedlichen Bewegungsarten für die verschiedenen Bauaufgaben im Brücken- und Hochbau und deckt die Palette der möglichen Getriebe für Antrieb und Bewegungsführung weitgehend ab. Auf Maschinenkonstruktionen der Fördertechnik, wie beispielsweise Kräne, kann wegen der groben Übereinstimmung ihrer Getriebeelemente, verzichtet werden.

Bei der Auswahl wurde Projekten der Vorzug gegeben, die durch Literatur, Personenbefragung und zusätzlichen Lokalaugenschein am besten zu dokumentieren waren. Aus der Fachliteratur gewählte Projekte wurden nach Möglichkeit durch Befragung und Unterlagen der Planer ergänzt.

1.3 Konzeption und Ausformung beweglicher Tragwerke

Im Zuge des Entwurfsprozesses ist eine Vielzahl von Faktoren zu berücksichtigen und zu einem Gesamtentwurf zu vereinen. Die Tragwerksplanung ist ein Teil dieses Entwurfsprozesses und kann in drei Schritte: Konzeption, Berechnung und Ausformung eingeteilt werden.

Im Falle beweglicher Tragwerke sind im ersten Schritt die Bewegungseigenschaften und ein, der Bewegungsgeometrie entsprechendes, kinematisches Modell mit Führungs- und Antriebsmechanismen festzulegen. Im zweiten Schritt kann aufgrund des kinematischen Modells die statische und dynamische Berechnung erfolgen. Die daraus resultierenden Beanspruchungen dienen der späteren Auslegung der Tragwerks- und Getriebeelemente. Der dritte Schritt beinhaltet die den Entwurfsvorgaben gerecht werdende Ausformung der einzelnen Elemente mit ihren Kopplungen und Lagerungen.

Der Hauptinhalt der Tragwerkslehre liegt in der Konzeption am Beginn und der Ausformung am Ende des Planungsprozesses. Die vorliegende Arbeit führt daher die entsprechenden Inhalte der Kinematik und der technischen Getriebelehre zusammen, ohne auf die Berechnung einzugehen.

2 Überblick

2.1 Anwendung der Kinematik in Fachbereichen

Die Kinematik dient der Bildung von geeigneten Führungsmechanismen und Antrieben und ihrer Analyse. Sie findet im Bauwesen, dem Maschinenbau und anderen Fachbereichen gleichermaßen Anwendung, mit den selben geometrischen Zusammenhängen und Grundelementen für Bewegungsführung und Bewegungsübertragung. Unterschiede liegen in der Komplexität der Bewegungsgeometrie und in der baulichen Ausformung.

2.1.1 Kinematik in der Bautechnik

Wasserbauten

Bewegliche Konstruktionen im konstruktiven Wasserbau werden für die Lösung unterschiedlicher Aufgaben eingesetzt, wie beispielsweise der Überwindung unterschiedlicher Wasserniveaus mittels Schleusen oder der Regulierung von Stauhöhen oder Durchflüssen mittels Wehren und Schützen.

Die beweglichen Tragwerksteile und ihre Antriebe sind wegen der aus Wasserdruck großen aufzunehmenden Kräfte robust ausgeführt und werden relativ langsam bewegt.

Die kinematisch einfachen Mechanismen mit ebener Bewegungsgeometrie entsprechen im Allgemeinen jenen des Brückenbaus.

Brückenbauten

Neben den einmalig für die Montage bewegten Brücken finden sich wiederholt bewegte Brücken, wenn der Aufwand einer fixen Hochbrücke mit ihren Rampen und Nebenbauwerken zu groß wird. Die erforderliche Durchfahrtshöhe wird durch Öffnen und Schließen der Brücke freigegeben. Dabei bedient man sich stets einfacher Kinematik und Mechanik, wie bei den drei am häufigsten ausgeführten Typen, den Klapp-, Dreh- und Hubbrücken. Neuere Fußgängerbrücken wurden als kinematisch aufwendigere Sonderformen mit ebenfalls einfachen Antrieben ausgeführt.

Hochbauten

Bewegliche Tragwerke im Hochbau werden im Allgemeinen durch geringe Einwirkungen belastet und häufig nur temporär genutzt, was eine vielfältigere Ausformung erlaubt.

Für eine dauerhafte und sicher realisierbare Konstruktion von Dächern und Wänden sind auch hier kinematisch einfache meist ebene Mechanismen zu bevorzugen.

Im Bereich von beweglichen Hochbauten werden folgende Begriffe verwendet:

- *wandelbare Architektur*

Als wandelbare Architektur werden all jene Baukonstruktionen bezeichnet, die in gewisser Hinsicht veränderlich sind. Der Begriff ist daher nicht auf bewegliche Tragwerke, mit ihrer Wandelbarkeit durch mechanischen Antrieb, alleine beschränkt.

Ein Wandel kann auch durch chemische oder elektrische Vorgänge, wie bei elektrochromen oder gasochromen Fenstern mit entsprechend veränderbarer Lichtdurchlässigkeit; oder einfach durch bauliche Eingriffe herbeigeführt werden.

- **wandelbare Dächer**

Als wandelbare Dächer werden bewegliche Dächer aus einer faltbaren textilen Dachhaut bezeichnet.

- **bewegliche Tragwerke**

Als bewegliche oder kinematische Tragwerke werden jene, in der vorliegenden Arbeit behandelten Baukonstruktionen bezeichnet, die durch mechanischen Antrieb die Lage einzelner Teile zueinander oder des Tragwerks insgesamt verändern können – wie eingangs beschrieben.

- **adaptive Systeme**

Systeme, die sich mit Hilfe selbstgesteuerter oder selbstorganisierter Vorgänge aktiv verändern können, werden als adaptive Systeme bezeichnet¹. Bewegliche Tragwerke sind nur dann zu dieser Gruppe zu zählen, wenn sie mit einer entsprechenden Sensorik versehen sind.

- **Mobile Architektur**

Mobile *Architektur* bezeichnet bewegliche Tragwerke, die als Ganzes bewegt werden können und daher nicht an einen festen Ort gebunden sind.

- **kinematische Kunstobjekte**

Tatsächlich bewegliche aber auch aus der Abbildung einer Bewegung entstehende Kunstobjekte werden als kinematische (in einigen Fällen als kinetische) Kunst bezeichnet².

Montagekonzepte

Einige Montagekonzepte basieren auf einem kinematischen Vorgang im Montagezustand und stellen somit ein einmalig bewegtes Tragwerk dar. Der Vorteil liegt in der einfacheren Montage der Tragwerksteile zum Tragwerk, das anschließend durch einen Antrieb entlang einer geführten Bewegung in die endgültige Lage gebracht und fixiert wird. Ein Beispiel ist das Taktschiebverfahren von Brücken, bei welchem das Brückentragwerk abschnittsweise im Vorlandbereich betoniert und anschließend schrittweise über die Pfeiler geschoben wird.

Bewegung von Baukonstruktionen durch Verformung

Bewegungen von ruhenden Tragwerken resultieren aus den Verformungen der einzelnen Elemente durch Beanspruchungen. Die Lager des Tragwerks haben diese Bewegungen zu ermögli-

¹ Sobek, Haase, Teuffel: Adaptive Systeme, 2000

² siehe auch Buderer: Kinetische Kunst, 1992

chen und sind entsprechend der Kinematik mit ausreichendem Bewegungsvermögen und einer funktionierenden Lagersicherung auszubilden. Die Unterschiede zu Lagern beweglicher Tragwerke liegen im geringeren Bewegungsvermögen, den größeren tolerierbaren Lagerwiderständen und der meist höheren geforderten Dauerhaftigkeit.

In bestimmten Fällen werden Teile eines beweglichen Tragwerks planmäßig auf Biegung beansprucht und elastisch verformt. In diesem Fall spricht man von hybriden Systemen¹, welche die elastische Verformung vorteilhaft nützen, etwa um das Tragwerk vorzuspannen. In der Kinematik werden in sich starre Elemente vorausgesetzt, was für diese Systeme nicht mehr gilt.

2.1.2 Kinematik im Maschinenbau

Der zunächst in den allgemeinen Ingenieurwissenschaften behandelte Maschinenbau trennte sich als eigenständige technische Disziplin ab. Die technische Getriebelehre behandelt die Ausformung der zur Bewegungsführung bzw. dem Antrieb dienenden Getriebe. Die Bewegungsgeometrie der Maschinenkonstruktionen ist häufig komplexer als in der Bautechnik und die Bauelemente werden wegen der höheren Geschwindigkeiten bei meist geringen Massen unterschiedlich ausgeformt.

Die in der Fördertechnik eingesetzten Mechanismen entsprechen hinsichtlich Kinematik und Ausformung weitgehend jenen von beweglichen Hochbauten. Bei der Entwicklung verfahrbarer Dachkonstruktionen wurde beispielsweise auf Kranbauten und die damit verbundenen Konstruktionen und Erfahrungen zurückgegriffen.

Ein Zweig der Weltraumtechnik befasst sich mit Objekten, die durch Falten von Gelenkstabketten auf ein kleines Volumen gebracht werden können. Diese Systeme entsprechen den so genannten Scherengittersystemen (oder Pantographen) für bewegliche Dächer, die allerdings anderen Anforderungen gerecht werden müssen.

2.1.3 Kinematik in der Biologie

In der Natur finden sich Mechanismen aus Knochen, Muskeln und Sehnen oder Antriebe, die mit Flüssigkeitsdruck oder Luftdruck funktionieren und den gleichen kinematischen Prinzipien folgen wie in der Technik. Sie unterscheiden sich jedoch in ihrer Technologie stark von Mechanismen der Technik und müssen für die technische Umsetzung erst auf diese Technologie übertragen werden².

¹ vgl. Gengnagel: Forschungsprojekt, 1999 und Rückert: Wandelbare hybride Konstruktion, 2001

² Zur Anwendung der Bionik auf bewegliche Tragwerke siehe Merten: Bewegliche Hallen, 1991

2.2 Geschichtlicher Überblick

Der folgende geschichtliche Überblick behandelt die Ursprünge der Kinematik als Wissenschaft, gibt einen kurzen Auszug zu ihrer Anwendung und zeigt die Entwicklung an beweglichen Brücken und Hochbauten in der Bautechnik.

2.2.1 Entwicklung der Kinematik

Die Geschichte der Kinematik wird einerseits in ihrer Entwicklung zur Wissenschaft und andererseits hinsichtlich ihrer praktischen Anwendung für die Bewegung von Bauteilen betrachtet.

2.2.1.1 Die Kinematik als Wissenschaft

Eigenständigkeit erlangt die Kinematik in der ersten, 1747 in Paris gegründeten polytechnischen Schule *Ecole des ponts et chaussées* mit der Abtrennung der *Bewegungsmechanismenlehre* von der allgemeinen Maschinenlehre. Der Lehrzweig wird als Abteilung der darstellenden Geometrie angeboten, von welcher er sich nach und nach hin zur allgemeinen Mechanik abtrennt. Monge lehrt über die grundlegenden *Elemente der Maschine* als die *Mittel zur Verwandlung der Bewegung*, den später als Mechanismen bezeichneten kinematischen Systemen.

Die Kinematik wird von Ampère 1834 mit dem *Essais sur la Philosophie des sciences* in den Rang einer Wissenschaft gehoben, indem er sie in sein Klassifikationsschema aller Wissenschaften einordnet: *„Dieser Wissenschaft, in welcher die Bewegungen an sich betrachtet werden, so wie wir sie an den uns umgebenden Körpern, und insbesondere an den Apparaten beobachten, welche Maschinen genannt werden, habe ich den Namen Kinematik (Cinématique) von κίνημα – Bewegung gegeben“*. Die Kinematik steht also in der Tradition der geometrischen Behandlung von Maschinenproblemen, die von den wirkenden Kräften absieht, um alles auf die Analyse der reinen Bewegungsformen abzustellen.¹

Reuleaux bringt ab 1875 durch sein Werk² die endgültig wissenschaftliche Behandlung der Kinematik. Er bewertet ihre bisherigen Lehren als unzureichend und baut eine in sich geschlossene und deduktive Kinematik als Maschinenwissenschaft auf. Wichtige Begriffsdefinitionen, die Zerlegung von Mechanismen in ihre Elemente und die Analyse der Getriebe gehen auf ihn zurück.

In der gängigen Unterteilung der allgemeinen Mechanik bildet die Kinematik neben der Dynamik einen eigenständigen Teil³ (Tabelle 2-1, S.7).

Die Kinematik behandelt die reinen Bewegungsformen von Körpern, ohne die wirkenden Kräfte zu berücksichtigen. Die Kräfte sind die Ursache der Bewegung, haben aber auf die Bewegungseigenschaften und die Bewegungsgeometrie keinen Einfluss.

¹ nach Pircher: Aufsatz, 2001

² Reuleaux : Kinematik, 1875 und Reuleaux : Kinematik, 1900

³ vgl. Szabo: Technische Mechanik, 1963

Die Dynamik behandelt im einen Teil, der Kinetik die Bewegung eines Körpers zufolge wirkender Kräfte und umgekehrt Kräfte zufolge einer Bewegung; und im anderen Teil, der Statik die Bedingungen und Kräfte unter welchen sich Körper in Ruhe befinden.

Mechanik		
Kinematik	Dynamik	
	Statik	Kinetik

Tabelle 2-1: Einteilung der Mechanik

2.2.1.2 Anwendung der Kinematik für die Bewegung von Bauteilen

Der Begriff Maschine wird erstmals von Vitruvius Polli (88 – 26 v.Chr) im 10. Buch ‚De architectura‘¹ als eine *Kombination von Teilen zum Heben großer Lasten* definiert. Die Wiederentdeckung dieser ‚Maschinen‘ in seinen Aufzeichnungen bringt ab dem 16. Jahrhundert entscheidende Impulse für die technische Weiterentwicklung.

Für den Bau der Florentiner Kuppel (1409-1434), der größten je ohne Gerüst gemauerten Kuppel, entwickelte Filippo Brunelleschi verschiedene Mechanismen als Hebeeinrichtungen, wie eine Hubwinde von 1420. Sie wurde nach Aufzeichnungen von Leonardo Da Vinci als Modell rekonstruiert (Abbildung 2-2, S.9). Das umschaltbare, vorwiegend hölzerne Zahnradgetriebe ermöglicht das Anheben und Absenken schwerer Lasten in drei Übersetzungsverhältnissen, ohne die Ochsen für den Antrieb umspannen zu müssen.

Leonardo Da Vinci (1452-1519) nimmt mit seinen Aufzeichnungen spätere bewegliche Konstruktionen, wie Drehbrücken oder die Montage von Brücken durch Lancieren (Vorschieben auf Rollen) und Konstruktionselemente, wie die Gliederkette oder das Drahtseil, vorweg.

Die Vorteile durch die bewusste Anwendung der Kinematik zeigen zwei unterschiedliche Lösungen zur Ortsveränderung von Obelisk aus dem 16. und 19. Jahrhundert.

Papst Sixtus V gibt 1585 die Verlegung eines Obelisk von Heliopolis auf den Petersplatz in Rom in Auftrag. Aus den eingereichten Vorschlägen wählt ein Ingenieurkongress die Lösung des päpstlichen Baumeisters Domenico Fontana als den besten zur Ausführung aus.

Der Obelisk wird mit Holz verkleidet und zunächst auf einem zweiteiligen Gerüst mittels Flaschenzügen etwas angehoben, der Fuß anschließend mit weiteren Flaschenzügen aus der Mittellage gezogen und der Schaft langsam abgesenkt, um ihn auf einem hölzernen Tragrahmen abzuliegen. Durch den Tragrahmen verstärkt wird der Obelisk auf Walzen gerollt und bis zum Zielort transportiert, wo er auf gleiche Weise aufgestellt wird (Abbildung 2-4, S.9). Der 340 Tonnen schwere Obelisk wurde mit 40 Flaschenzügen und 160 Seilen bei einer durchschnittlichen Hub-

¹ Thayer: Vitruvius, 2003

kraft von je 2,4 t bewegt. Die Aufgabe wird mit 140 Pferden und 800 Mann bewältigt, der große Aufwand an Kraft und Koordination entspricht aber antiken Methoden, die bereits in Ägypten angewandt wurden.

1831 findet der Ingenieur Mimerel eine effektivere Lösung für das Umlegen eines Obelisk in Luxor und dessen spätere Aufstellung 1836 in Paris. Es werden nur 30 Mann und acht Flaschenzüge benötigt, mit einer Seilkraft von jeweils rd. 2 t, also etwa jener Last, die in den 40 Flaschenzügen Fontanas wirkte.

Mimerels Lösung benötigt kein Hubgerüst und verfolgt auf einfache Weise durch Kippen des Obelisk das Ziel, stets nur so viel Last zu heben wie unbedingt notwendig (Abbildung 2-5, S.9). Der Obelisk wird in der Kippkante mittels Holzzapfen in einem Holzlager drehbar gelagert, wie auch ein Holzrahmen am Fuß einer benachbarten Stützmauer. Obelisk und Rahmen werden durch Seile zu einem Führungsmechanismus verbunden, der mittels weiteren Seilen bewegt wird. Zunächst ist dafür Zug in den vorderen Seilen notwendig, die über Flaschenzüge bewegt werden. Ist der Obelisk soweit gekippt, dass sein Schwerpunkt über die Kippachse gewandert ist, bekommen die hinteren, um Pflöcke geschlagenen Seile Zug, die man langsam abrutschen lässt.

Der Obelisk von Luxor ist zwar leichter als der Vatikanische (230 t gegenüber 340 t). Da die Kinematik von den wirkenden Kräften unabhängig ist, wäre das Verfahren jedoch mit den gleichen Vorteilen ohne nennenswerte Modifikationen auch für größere Lasten anwendbar. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Verfahren liegt darin, dass Mimerel Kinematik angewandt hat und Fontana nicht. Mimerel verwendet einen zwangsläufigen Mechanismus zur Bewegungsführung, mit den Seilen als Antrieb (Abbildung 2-6, S.9) und beherrscht damit die Bewegung besser und muss nur etwa ein fünfzehntel der Kräfte aufwenden.

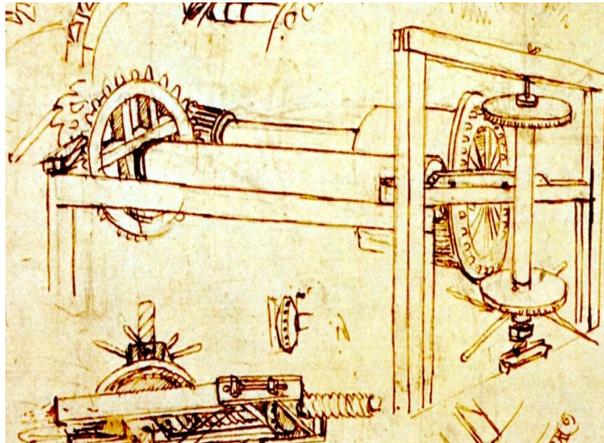


Abbildung 2-1: Hubwinde von Brunelleschi in Leonardo Da Vinci's Aufzeichnungen

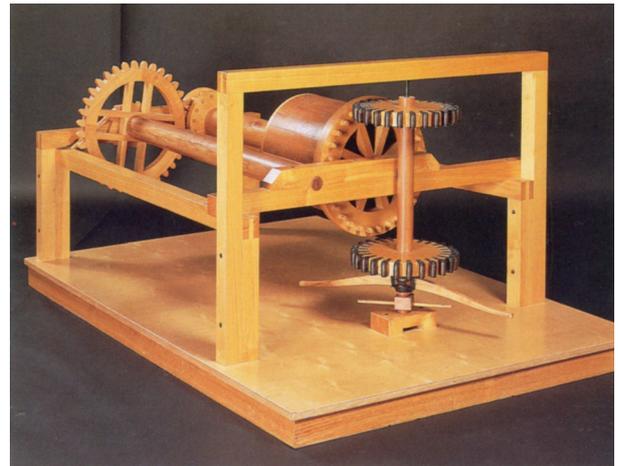


Abbildung 2-2: Hubwinde von Brunelleschi im Modell von Galluzzi

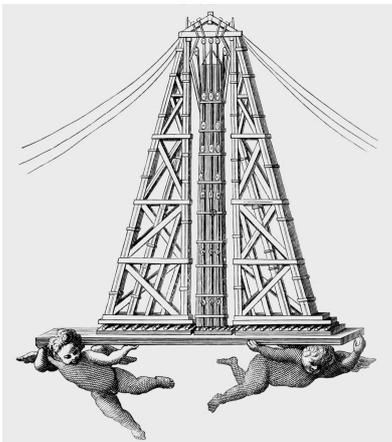


Abbildung 2-3: Fontanas Gerüst für den vatikanischen Obelisken

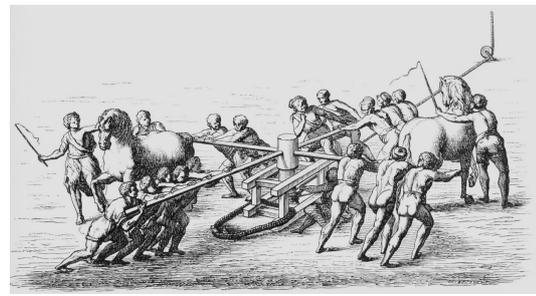


Abbildung 2-4: Erdwinde für das Aufziehen

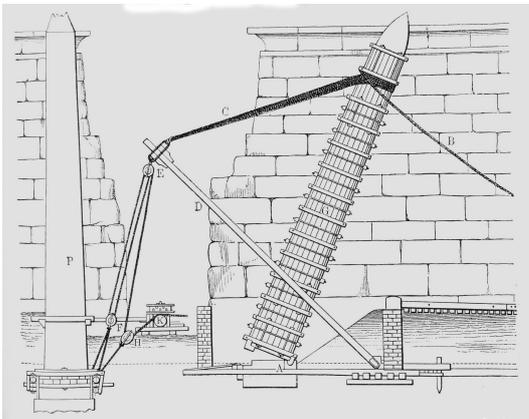


Abbildung 2-5: Mechanismus zum Umlegen des Obelisken von Luxor

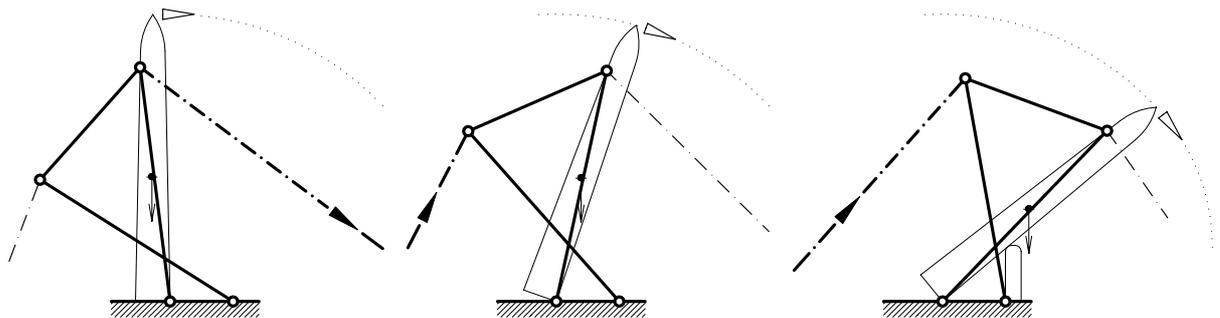


Abbildung 2-6: Der Mechanismus in einzelnen Lagen

2.2.2 Entwicklung beweglicher Brücken

Bereits bei römischen Floßbrücken finden sich bewegliche Felder, die zur Freigabe des Schifffahrtsweges ausgeschwommen werden. Floßbrücken aus Holz wie die 1862 gebaute 64 m lange Brücke über den Fluß Pas bei Renedo¹, werden durch Pontonbrücken mit Schwimmkörpern und Tragwerk aus Eisen bzw. Stahl ersetzt, wie eine um 1900 gebaute 524 m lange Pontonbrücke in Riga, Lettland. Der bewegliche Schwimmkörper wird nicht durch einen Mechanismus geführt, sondern von Hand gesteuert. Die Schwimmbrücken werden daher eher als schnell aufzubauende und von den Gründungsverhältnissen unabhängige Behelfsbrücken, ohne bewegliche Teile eingesetzt.

Als wiederholt und durch einen mechanischen Antrieb bewegte Brücken werden im Allgemeinen Zug- und Klappbrücken, Drehbrücken oder Hubbrücken ausgeführt, die sich gegenüber anderen Typen als wirtschaftlich und zuverlässig erweisen. Rollbrücken, bei welchen der Überbau auf Rollen verfahren wird, wurden zunächst als wiederholt bewegliche Brücke eingesetzt, aber später zum Lancieren und dem Taktschieben als Montageverfahren weiterentwickelt.

Zugbrücken finden sich zunächst zum Schutz von mittelalterlichen Befestigungsanlagen und werden über kurze Spannweiten und noch ohne Gegengewicht zur Klappe ausgeführt. Zum Ausgleich des Klappengewichts wird in der weiteren Entwicklung ein Seil vom freien Klappenende über Rollen auf ein vertikal laufendes Gegengewicht geführt. Dieser Gewichtsausgleich verringert zwar die Antriebskräfte, führt jedoch noch nicht zum erwünschten Gleichgewicht in jeder Lage der Brücke. Bei Zugbrücken mit Ziehbäumen, wie jener in Abbildung 2-7, gelingt dies auf einfache Weise. Das Gegengewicht wird durch einen Führungsmechanismus parallel zur Klappe geführt.

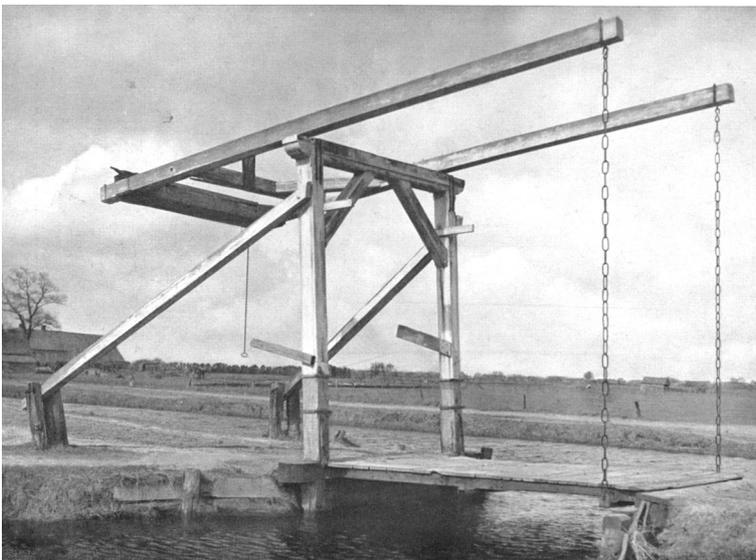


Abbildung 2-7: Zugbrücke bei Grossefehn in Ostfriesland

¹ in Cantabrien, Spanien; vgl. Dietz: Bewegliche Brücken, 1907 S.242

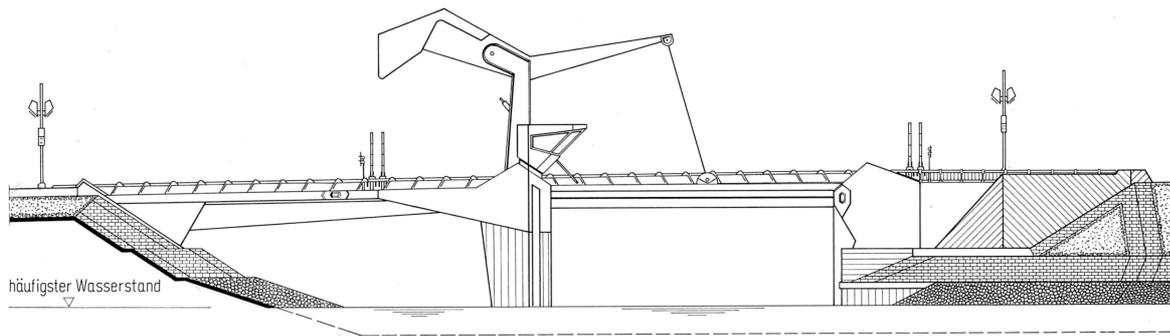


Abbildung 2-10: Waagbalkenbrücke Mannheim

Der Einsatz von Eisen und Stahl macht die Entwicklung von Klappbrücken mit einem Gegengewicht direkt am Brückenüberbau möglich¹. Der Überbau wird in einen kurzen und einen langen Arm geteilt, die jeweils über eine horizontale Drehachse auskragen. Beim Öffnen senkt sich der ballastierte kurze Arm in einen Klappenkeller ab und der lange Arm klappt nach oben. Die Brücke bleibt im Gleichgewicht, da der Schwerpunkt in der Drehachse liegt, welche während der Bewegung ortsfest bleibt oder durch Abrollen der Klappe horizontal wandert.

Ein frühes Beispiel für eine Klappbrücke mit fester Drehachse ist die 1839 gebaute Eisenbahnbrücke in Shelby, England², bei der zwei Klappen eine Durchfahrtsöffnung von insgesamt 14 m freigeben. 1894 wird die erste Rollklappbrücke nach dem Patent Scherzer über die Van Buren Street in Chicago, USA, fertig gestellt (Abbildung 2-11, S.13). Der gesamte Überbau rollt dabei auf einem Kreissegment ab. Diese Brücke mit einer Schifffahrtsöffnung von 33 m steht zusammen mit der, im gleichen Jahr fertig gestellten Tower Bridge (Abbildung 2-12, S.13) am Anfang einer Entwicklung, durch welche Klappbrücken gegenüber anderen Typen zunehmen vorgezogen werden. Als Antriebe kommen Zahnstangen mit Antriebsritzeln und zunächst Presswasser, später Hydraulikzylinder zur Anwendung.

¹ Hawranek: Bewegliche Brücken, 1936

² Hardesty, Fischer, Christie: Moveable Bridge History, 1975

Drehbrücken werden um eine lotrechte Achse über einem massiven Drehpfeiler gedreht.

Leonardo da Vinci skizzierte 1481 eine hölzerne Drehbrücke¹. Gusseiserne Drehbrücken werden in England entwickelt. Der Überbau wird dabei auf einem Drehkranz aus konischen Laufrollen gelagert und gedreht.

Schwedler² entwickelt 1871 für die Peenebrücke bei Anklam, Deutschland, eine Konstruktion, die für die Bewegung auf einen kompakten Drehzapfen gesetzt wird, der Drehkranz ist auf zwei Stützrollen reduziert (Abbildung 2-13). Damit gelingt die Entkoppelung der beweglichen Teile von den Verkehrslasten, die in der Endlage vom Brückenüberbau direkt auf eigene Lager abgegeben werden. Diese Drehbrücken nach dem Prinzip Schwedler setzen sich vor allem in Deutschland und Frankreich, aber auch in England durch. Für den Antrieb werden Seiltriebe oder Zahnradgetriebe verwendet.

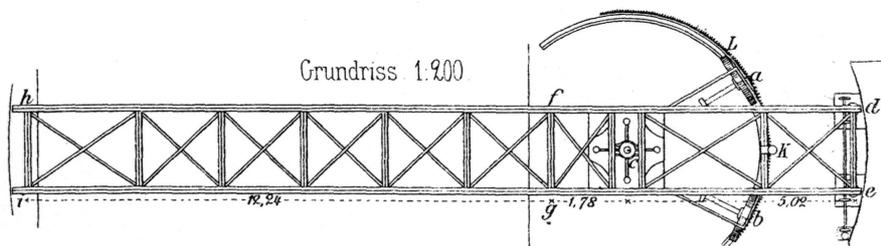


Abbildung 2-13: Peenebrücke, Drehbrücke mit Drehzapfen nach Schwedler, 1871

Die Brücke lagert im Bewegungszustand auf dem Drehzapfen und zwei Laufrädern. Nach dem Schließen wird die Brücke leicht gekippt und für den Endzustand auf eigene Lager abgesetzt, um den Drehzapfen und die stützenden Laufräder zu entlasten.

Die Einengung des Wasserweges durch den, für Rollenkranz bzw. Stützräder breiten Drehpfeiler und der relativ aufwendige Anprallschutz schränken die Schifffahrt ein und bringen einen spürbaren Nachteil der Drehbrücken bei größerem Verkehrsaufkommen. Dies führte zur Entwicklung der Hubbrücken. Bei dieser Konstruktionstyp wird die Brückentafel in den Ecken von Türmen aus vertikal nach oben gehoben. Mit dem Vorteil von kürzeren Öffnungszeiten, geringerem Platzbedarf an den Ufern und freiem Fahrwasser.

Zu den ersten Hubbrücken ist eine rd. 1860 über die Donau in Wien gebaute Brücke zu zählen. Ein 9 m langes Feld des hölzernen Steges konnte um 2 m angehoben werden³. 1885 wird eine eiserne Hubbrücke in Alt-Ofen, dem heutigen Budapest mit 21 m Spannweite gebaut, die um 4 Meter gehoben werden kann.

¹ Codico Atlantico Blatt 312Ra (1481) zeigt eine ungleicharmige Drehbrücke aus einem Holzfachwerk mit einem Steinkasten zum Gewichtsausgleich und Drehzapfen zur beweglichen Lagerung. Die Kanalbrücke wird in eine Nische am Ufer gedreht. Siehe Feldham: Leonardo, 1913, S. 30

² Schwedler: Drehbrücken ohne Rollenkranz, 1871

³ Hardesty, Fischer, Christie: Moveable Bridge History, 1975

2.2.2 Entwicklung beweglicher Brücken

In der Regel wird stets der gesamte Brückenüberbau gehoben, eine Ausnahme bildet die Chitpore-Hubbrücke in Kalkutta aus dem Jahre 1878¹, bei der nur die Fahrbahn gehoben wird.

In den USA werden Ende des 19. Jahrhunderts zahlreiche Hubbrücken mit alleine stehenden oder zu Rahmen verbundenen Hubtürmen ausgeführt, wie eine 1892 in Chicago erbaute Hubbrücke mit 40 m Spannweite und 47 m Hubhöhe. Die 1991 fertig gestellte Hubbrücke über die Gouwe bei Gouda² (Abbildung 2-16) ist ein jüngeres Beispiel einer Hubbrücke mit rahmenartig verbundenen Türmen. Die Hubhöhe beträgt 27 m, die Spannweite des Hubteiles rd. 26 m.

Hubbrücken werden im Allgemeinen mittels Laufrädern und Schienen geführt und zunächst mit Hubketten und Spindeln, später mit Seiltrieben bewegt. Die Parallelbewegung der vier Antriebe in den Ecken wurde bei historischen Brücken durch umlaufende Seile erzwungen (Abbildung 2-14) und geschieht mittlerweile durch mechanische Wellen oder elektrische Gleichschaltung (Abbildung 2-15).

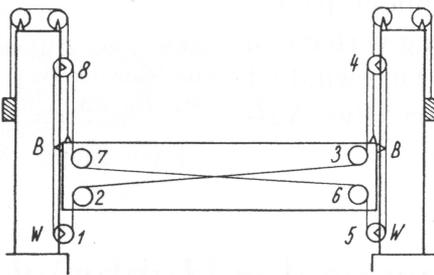


Abbildung 2-14: Seilsystem zur Parallelführung

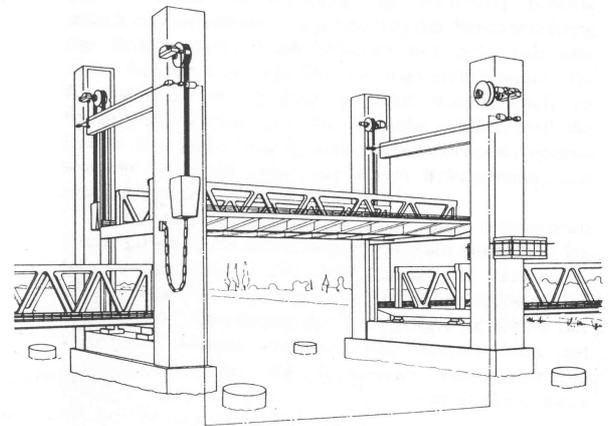


Abbildung 2-15: Calandbrug in Rotterdam, 1969

Das Tragwerk der Brücke wird durch Seiltrommeln an vier Punkten gehoben, die in Querrichtung durch eine Welle mechanisch und in Längsrichtung elektrisch synchronisiert werden.



Abbildung 2-16:
Hubbrücke bei Gouda

¹ Dietz: Bewegliche Brücken, 1907 S. 30

² Anonym: Hubbrücke, 1992

Neben den beschriebenen Haupttypen finden sich neuere Fußgängerbrücken mit komplexerer Bewegungsgeometrie als neuartige Sonderformen, wie die Fußgängerbrücke über den Innerhafen Duisburg¹ (1999) mit der Krümmung des Gehweges nach oben, die Faltbrücke in Kiel-Hörn² (1997) mit einer Faltung des Gehweges entlang von zwei Achsen, die Millenium Bridge in Gateshead³ (2000) aus zwei Bögen, einem liegenden der von einem stehenden abgespannt ist, die zusammen um die horizontale Verbindungsachse der Brückenlager gedreht werden, um die Durchfahrt zu ermöglichen.



Abbildung 2-17: Katzbucketbrücke in Duisburg



Abbildung 2-18: Faltbrücke in Kiel



Abbildung 2-19: Gateshead Millenium Bridge

¹ nähere Beschreibung in Kapitel 4 Anwendungsbeispiele

² Schlaich, Knippers: Dreifeld-Klappbrücke, 1999

³ Buterworth, Carr, Kassabian: Gateshead, 2003

2.2.3 Entwicklung beweglicher Hochbauten

2.2.3.1 Die Entwicklung von beweglichen Wandöffnungen

Nach der Befriedigung des primären Bedürfnis des Menschen nach Raumabgrenzung durch Besiedlung von Höhlen und den Bau einfacher Hütten galt es das Bedürfnis nach Belichtung, Ausblick und Luftaustausch durch Wandöffnungen zu befriedigen.

Fensteröffnungen können schon bei jungsteinzeitlichen Hütten nachgewiesen werden¹ und finden sich bereits in Lehmmauern um 4000 v.Chr. Die zunächst unbeweglichen Füllungen aus Stein, Ziegel oder Holz in griechischen Häusern und im Vorderen Orient werden ab dem 1. Jh.n.Chr. erstmals mit Glas in einem Fensterrahmen ausgeführt. Die ersten beweglichen Fensterläden werden einfach in die Fenster gestellt und durch ein Stück Holz verriegelt.

In der Gotik werden einfache Schiebeflügel und Schiebeläden² mit einem quadratischen Ausschnitt in Blockwänden mit der Höhe eines Blockbalkens (also rd. 25-35 cm) vorgesehen. In Nutleisten sind ein volles Holzbrett und ein bespannter Rahmen verschieblich gelagert, wodurch einen separater Luft- und Lichtabschluss ermöglicht wird. Etwa zeitgleich finden sich kreuzweise geviertelte Fenster, von deren vier Felder ein oberes und das diagonal darunter liegende verschiebbar sind. Eines dieser Schiebefenster aus dem Jahre 1528 ist im Haus Ochsenhof, Hannover versch Münden erhalten. Sie werden im ländlichen Gebiet bis in das 19. Jh. eingesetzt.

In der Renaissance werden Dreh- und Schiebeflügel verwendet. Die Drehflügel werden erstmals durch Beschläge aus Metallbändern angeschlagen und durch einfache Fensterriegel verschlossen. Bereits ab Mitte des 15. Jh. finden sich Triebstangen am Fensterflügel, Blechbänder, die in eine Öffnung im Rahmen geschoben werden.

Das Kastenfenster aus der zweiten Hälfte des 19. Jh. erlangt eine weite Verbreitung. Drehfenster in zwei Ebenen werden mit einem Luftzwischenraum so angeordnet, dass sich die beiden Flügelpaare beim Öffnen nicht behindern. In den 50er und 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts werden Schwingflügel Fenster mit horizontaler und Wendeflügel Fenster mit vertikaler Drehachse jeweils in der Flügelmitte entwickelt. Neu sind Isolierglasfenster und der Einsatz von stranggepresstem Aluminium für die Rahmen, was in den 60er Jahren zur Entwicklung des heute vorherrschenden Drehkippenfensters führte³.

Zur Abdeckung von Fenstern dienen Vorhänge, Jalousien, Rollos und Läden. Die ersten Läden werden einfach ins Fenster gestellt, seit der Antike sind bereits Schiebeläden und Drehläden mit vertikaler Drehachse bekannt. Eher eine Seltenheit ist der Zugladen, der mit Seilen von unten vor das Fenster angehoben wird. Seit dem Hochmittelalter sind Spaetlläden bekannt, bei denen der Laden zur Seite hin zusammengefaltet wird. Klappläden, die um eine horizontale Achse nach oben geklappt werden finden sich vom 12. bis ins 16.Jh. Eine Form des Klappladens für Ge-

¹ Rombock: Fensterkonstruktionen, 1993

² Gerner: Historische Fenster, 1996

³ Meyer-Bohe: Fenster, 1978

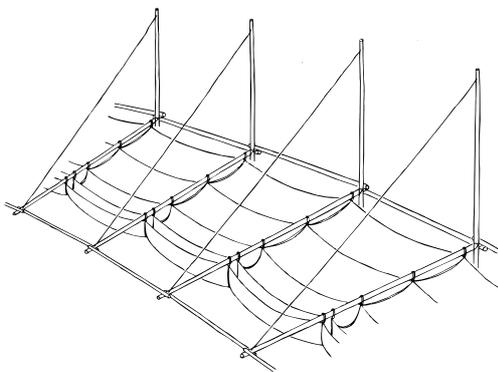
schäftsräume ist horizontal in zwei Teile geteilt, von denen sich der obere Teil als Wetterschutz hochklappen und der untere Teil als Verkaufstheke hinunterklappen lässt. Dieser *Kaufladen* findet sich seit dem späten Mittelalter.

Große Wandöffnungen durch Tore sind in Gebäuden für die Luftfahrt anzutreffen. Luftschiffe mussten wegen ihrer Windanfälligkeit stets auf die windabgewandte Seite ausgeschifft werden, was zwischen 1909 und 1918 zum Bau von schwimmenden Luftschiffhallen führt, die auf dem Wasser leicht in den Wind gedreht und anschließend geöffnet werden können. Neuere Hangars sind mit großen horizontalen oder vertikalen Falttoren und Schiebetoren ausgestattet, um die Öffnung nach einer Richtung zu ermöglichen.

2.2.3.2 Die Entwicklung beweglicher Dächer

Zu den ersten beweglichen Dächern sind Schirme zu zählen. Abbildungen auf ägyptischen Reliefs aus dem 13. Jh.v.Chr und griechische Abbildungen aus dem 5. Jh.v.Chr geben dafür hinweise.

Vela¹ sind große Sonnensegel, die als Schattenspender römische Amphitheater überdachten und in ihrer Größe erst durch heutige wandelbare Dächer übertroffen werden. *Ihr Tragwerk bestand aus senkrechten Masten, die in regelmäßigen Abständen die Außenmauern überragten und aus horizontal über die Innenräume auskragenden Stangen oder Bäumen, die von den Masten abgehängt waren. Unter diesen Tragstangen hing ein raffbares Zeltdach aus einzelnen aneinander gereihten Velumbahnen.*² Die Vela wurden mit Hilfe von Seilen ausgezogen bzw. gerafft (Abbildung 2-20) und mussten bei stärkerem Wind zurückgezogen werden.



Ähnliche Konstruktionen werden seit dem 16.Jh in Spanien, Marokko, Ägypten, Syrien, der Türkei, Mittelamerika und Japan ebenfalls als Sonnenschutz eingesetzt.

Im vorigen Jahrhundert beginnt eine rege Entwicklung von beweglichen Dächern, die von Gengnagel und Barthel³ übersichtlich zusammengefasst wird.

Abbildung 2-20: Rekonstruktion der römischen Vela

¹ auch Velaria

² Graefe: Vela, 1979

³ Gengnagel, Barthel: Bewegliche Dächer, 2001

In der Entwicklung von beweglichen Dächern können drei Typen unterschieden werden:

- Dächer aus verfahrbaren Teilen, die jeweils steif sind und entlang einer Geraden oder einer Kreisbahn, beispielsweise auf Schienen, geführt und durch Seil- oder Rädergetriebe bewegt werden.
- Dächer aus einer, in sich faltbaren Dachhaut die von Schlitten abgehängt wird, welche auf befahrbaren Seilen einer fixen Seilkonstruktion gleitend oder rollend geführt und durch Traktoren oder Seiltriebe angetrieben werden.
- Faltbare Dächer aus Platten oder Stäben, die um Scharniere oder Gelenken faltbar sind und als Ganzes einen Führungsmechanismus bilden.

Die ersten beweglichen Dächer kleiner und mittlerer Spannweite sind Dächer aus verfahrbaren Teilen der 30er Jahre des vorigen Jahrhunderts. Dabei bedient man sich der erprobten Kranbahntechnik (Entwicklung des Laufkrans von Ramsbottom, England 1861 und Brecht, Deutschland 1894/95¹).

1951 wird das bewegliche Dach der Pittsburgh Civic Arena, USA (Abbildung 2-23) als erste Kuppel mit großer Spannweite über einem kreisrunden Grundriss von 127 m Durchmesser gebaut. Sechs bewegliche Dachsegmente werden im Firstpunkt um die vertikale Achse drehbar und entlang des Umfanges auf Schienen fahrbar gelagert. Der Firstpunkt wird durch ein auskragendes Fachwerk gehalten. Die sechs Segmente können auf konzentrischen Schienen unter ein fixes Segment gefahren werden. In den 60er und 70er Jahren werden fahrbare Dächer in großer Zahl für Sportbauten (vor allem Schwimmbäder) in Deutschland und Frankreich gebaut. Als Systeme werden sogenannte *Schwenk-Segment-Hallen* (Abbildung 2-21, S.20) entwickelt, die über einem kreisförmigen Grundriss von rd. 35 m Durchmesser in der Regel aus drei fahrbaren und einem fixen Kuppelsegment bestehen. Weiters *Roll-Teleskop-Hallen* (Abbildung 2-22, S.20) über einem rechteckigen Grundriss mit rd. 65 m Länge und rd. 25 m Breite, der in der Regel durch drei fahrbare Rahmenelemente, die teleskopartig untereinander gefahren werden, überdacht wird². Die Öffnungszeiten dieser Systeme betragen rd. 10-12 Minuten.

Die Hallen aus beweglichen Bogen- oder Rahmensegmenten bzw. –abschnitten bewährten sich bei ähnlichen Spannweiten auch im Industriebau.

Bei Anwendung der Konstruktionsprinzipien aus den 60er Jahren werden beim Bau von verfahrbaren Dächern für Sportstadien in Japan und den USA vorwiegend die Spannweiten vergrößert. Für diese Megadomes sind vier Beispiele zu nennen: der Sky Dome in Toronto, 1989, mit 127 m Durchmesser, der Fukuoka Dome, 1993, mit einer in drei Segmenten geteilten Kuppel über einem kreisförmigen Grundriss von 222 m Durchmesser, das Dach des Ocean Dome aus demselben Jahr (Abbildung 2-24, S.20), mit vier Abschnitten, die in Breitenrichtung 110 m überspannen und von der Mitte aus in beide Richtungen längs über den 300 m langen Grundriss verschoben werden

¹ Kurrer: Geschichte, 2002

² Ideberger: bewegliche Hallen, 1973

und den 1998 erbauten Oita Dome¹ (Abbildung 2-25, S.20), mit zwei beweglichen Kugelsegmenten, die auf einer fixen Konstruktion zur Mitte hin gefahren werden, zu nennen.

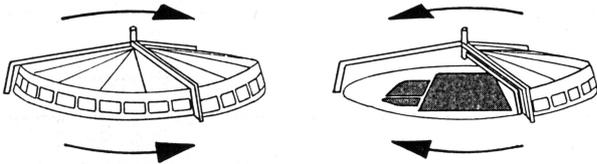


Abbildung 2-21: ‚Schwenk-Segment-Hallen‘

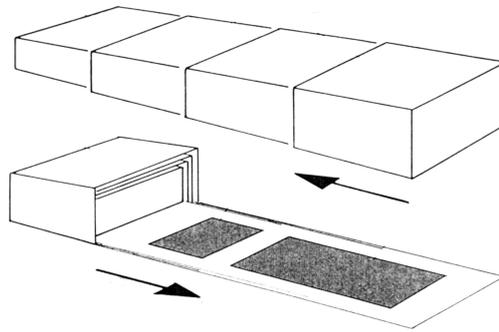


Abbildung 2-22: ‚Roll-Teleskop-Hallen‘



Abbildung 2-23: Pittsburgh Civic Arena



Abbildung 2-24: Ocean Dome, Japan

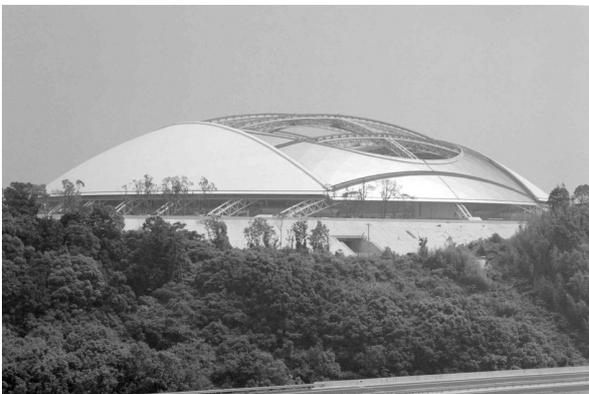


Abbildung 2-25: Oita Dome geöffnet und geschlossen

Der zweite Typ, die textilen beweglichen Dächer, haben ihren Aufschwung in den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts, vor allem Tallibert und Otto zu verdanken. Am Institut für Leichte Flächentragwerke (IL) in Stuttgart werden verschiedene wandelbare Dachsysteme mit Spannweiten bis zu rd. 60 m zur Ausführungsreife entwickelt². Ausgeführt werden vorwiegend Dächer aus radial angeordneten Seilen mit einem Hochpunkt, von dem aus die zentral geraffte Dachhaut

¹ Kurokawa: Oita Stadium, 2002

² IL: 5 Wandelbare Dächer, 1972

nach außen gezogen wird. Sie ist in der Regel von mehreren rollenden Schlitten ab gehängt. Der Antrieb erfolgt zunächst mittels umlaufenden Antriebsseilen für jeden Schlitten. Für die Überdachung in Bad Hersfeld (1968) werden eigene Seiltraktoren für den Antrieb der Aufhängepunkte entwickelt. Der Bau ist ein Vorbild für spätere Konstruktionen und erweist sich als überaus Dauerhaft, erst nach 25 Jahren fast fehlerfreien Betriebes müssen Teile ersetzt werden (Abbildung 2-26, S.21).

1972 legt Architekt Tallibert den Entwurf für die Überdachung des Olympiastadions in Montreal vor. Die gegenüber Bad Hersfeld 10-fache größere textile Dachhaut wird erst 1989 montiert, da der Maßstabssprung eine annähernd unüberwindbare Hürde darstellt.

Die ebenfalls 1989 erbaute, von Bergermann entworfene Überdachung der Arena in Saragossa, stellt eine Weiterentwicklung der textilen beweglichen Dächer dar. Die Seilkonstruktion hat nicht mehr die Form eines Zeltdaches sondern entspricht der Konstruktion eines liegenden Speichenrades. Die textile Dachhaut wird von Gleitschlitten abgehängt, die auf den unteren Speichen, von der zentralen Nabe aus, durch Seiltriebe nach außen gezogen werden. Neu ist ein eigener Mechanismus zum Spannen der Dachhaut am Ende des Schließvorganges. Die Trennung der Antriebe für die Bewegung der Schlitten auf den Fahrseilen einerseits und für das Spannen der Dachhaut durch Schraubenge triebe an der zentralen Nabe andererseits erlaubt eine bauliche und wirtschaftliche Optimierung.

Bei der Überdachung des Center Court von Rothenbaum in Hamburg aus dem Jahre 1997, wendet Werner Sobek das selbe Konstruktionsprinzip an. Es ist das derzeit größte textile bewegliche Dach (Abbildung 2-27) und wird durch Hydraulikstempel am Umfang ähnlich einer Trommel gespannt¹.

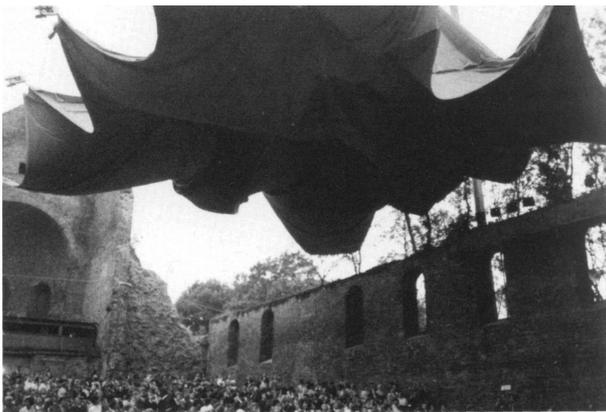


Abbildung 2-26: Überdachung Bad Hersfeld



Abbildung 2-27: Rothenbaum, Hamburg

Faltbare Dächer aus festen Elementen kommen bisher nur zur Anwendung, wenn sie eine einfache Bewegungsgeometrie aufweisen. Als Beispiele sind Schirme zu nennen, mit einer ebenen

¹ nähere Beschreibung im Kapitel 4. Anwendungsbeispiele

Schubkurbel als Bewegungsmechanismus. Zwei Stäbe sind gelenkig gekoppelt und auf einer Seite mit einem Schieber entlang dem Mast beweglich gelagert. Ähnlich einfach sind Markisen mit faltbaren Scheren aus zwei Stäben konstruiert. Calatrava verwendet ähnlich einfache Gelenkketten in verschiedenen Projekten, wie beispielsweise der Überdachung eines Abganges der Alcoy Community Hall¹ von 1995 (Abbildung 2-29, S.23). Mehrere nebeneinander liegende Viergelenkketten werden gekoppelt und beim Öffnen gefaltet.

Eine einmalig bewegte Anwendung zeigt das von Kawaguchi seit 1984 angewandte Pantadomesystem². Bei der Montage einer Kuppel werden Gelenke so eingeführt, dass sich die Kuppel nach innen falten lässt und ihr innerer, beweglicher Teil vertikal geführt wird. Nach dem Zusammenbau in Bodennähe wird durch Heben des inneren Teiles die Kuppel in ihre Endlage gebracht und die Gelenke fixiert (siehe Abbildung 2-28, S.23).

Eine weitere Art faltbarer Dächer entsteht durch die Verwendung von Scherengittersystemen. Das Grundelement, eine Schere aus zwei gelenkig gekoppelten Stäben, wird räumlich kombiniert. Piñero entwirft 1961 ein kuppelförmiges Dach für ein Theater, das mit einer Membran eingedeckt ist³. Die Überdachung eines Ausstellungspavillons wird 1966 mit ebenen Scherengittern ausgeführt⁴. Ziegler, Escrig und Calatrava⁵ erforschen diese Systeme nach Piñero weiter und verfassen Ausführungsvorschläge, wie eine Schwimmbadüberdachung aus einem von einem Bogen abgehängten Scherengitter, das zu einer Kugelfläche entfaltet werden kann⁶. In den USA modifiziert Hobermann⁷ das System durch Verwendung von abgewinkelten Stäben. Pellegrino wendet Scherengitter am deployable structures laboratory in Cambridge (dsl) für die Raumfahrt an⁸.

1996 wird 30 Jahre nach Piñeros Überdachung, ein Scherengittersystem zur Montage einer temporären Schwimmbadüberdachung nach dem Entwurf von Escrig ausgeführt⁹. Rückert¹⁰ befasst sich mit der ‚Versteifung‘ eines Scherengitters durch die Veränderung seiner Geometrie beim Öffnen.

Wiederholt bewegte Dächer aus Scherengittern wurden bisher nicht realisiert, wenngleich diesen Systemen die Aussicht auf eine künftige Anwendung gegeben wird¹¹.

¹ Tzonis: Calatrava, 1999

² nähere Beschreibung im Kapitel 4. Anwendungsbeispiele

³ Robin: Engineering, 1996

⁴ Escrig: Faltbarkeit in der Architektur, 1996

⁵ Calatrava: Faltbarkeit, 1981

⁶ Valcárel, Escrig, Martín, Freire: Expandable Space Structures , 1991

⁷ Hoberman: expandable structure, 1990 und Hoberman: retraction truss structures, 1991

⁸ siehe Kassabian etAl.: Retractable structures, 1997 und Kassabian etAl.: Retractable roofs, 1999

⁹ Sanchez, Escrig, Valcárel: Schwimmbadüberdachung, 1996

¹⁰ Rückert: Wandelbare hybride Konstruktion, 2001

¹¹ Ishii: Retractable Roofs, 2000, S. 5

2.2.3 Entwicklung beweglicher Hochbauten

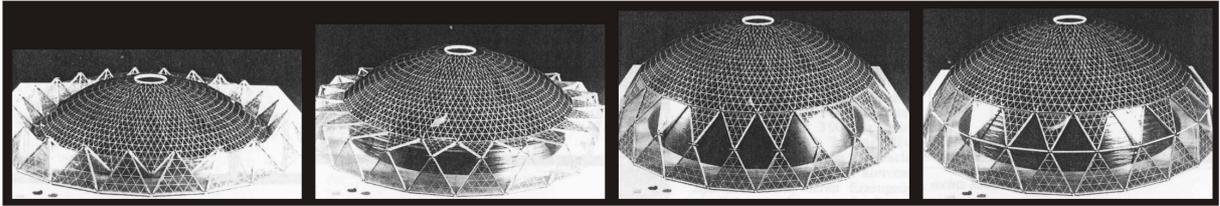


Abbildung 2-28: Modell einer Kuppel nach dem Pantadome-System



Abbildung 2-29: Alcoy Community Hall, Calatrava, 1995

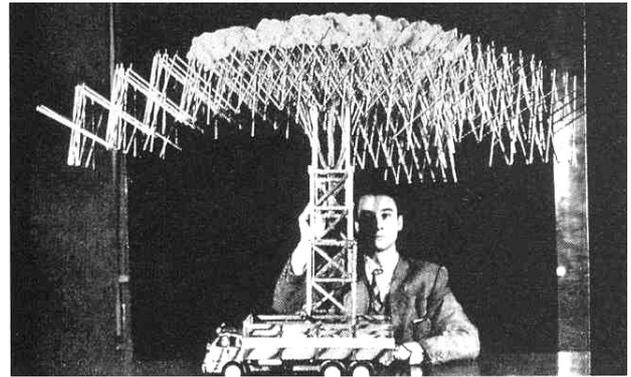


Abbildung 2-30: Pinero, 1961

2.3 Charakterisierung beweglicher Tragwerke

Die an das bewegliche Tragwerk gestellte Bauaufgabe führt zu unterschiedlichen baulichen Ausformungen und dient daher als erstes Unterscheidungsmerkmal. Eine weitere Charakterisierung kann hinsichtlich der Bewegungsart getroffen werden. Zur näheren Beschreibung beweglicher Tragwerke dient die Art des Antriebes.

Fälle, in denen die beweglichen Tragwerksteile in einer Endlage weniger Platz einnehmen als in der anderen Endlage, können durch Art der Lage der einzelnen Tragwerksteile zueinander beschrieben werden.

2.3.1 Hinsichtlich der Art der Bauaufgabe

Bewegliche Tragwerke werden für folgende Bauaufgaben verwendet:

- bewegliche Wasserbauten
- bewegliche Brückenbauten
- bewegliche Wände im Hochbau
- bewegliche Dächer im Hochbau
- bewegliche Sonderbauwerke

2.3.2 Hinsichtlich der Bewegungsart

Die Bewegungsgeometrie von beweglichen Tragwerken ist einfach und entsteht im Allgemeinen durch einen oder mehrere ebene Mechanismen. Der zu bewegende Tragwerksteil beschreibt dabei häufig nur eine Grundbewegung, er wird entlang einer Kurve verschoben oder um eine Achse gedreht. Bei beweglichen Dächern mit einer textilen Dachhaut entsteht durch Verschieben der Aufhängepunkte entlang mehrere Kurven eine flächige Bewegung.

In Tabelle 2-2 sind alle Bewegungsarten angeführt. Tabelle 2-3 zeigt Bewegungsarten für Tragwerke verschiedener Bauaufgaben.

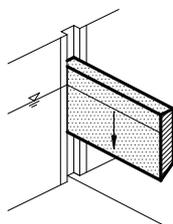
linear	durch Verschieben	entlang einer Geraden
		entlang einer ebenen Kurve
		entlang einer Raumkurve
flächig	durch Drehen	um eine Achse
	durch Verschieben	entlang von zwei oder mehr Kurven einer Ebene
	durch Verschieben	entlang von zwei oder mehr Kurven auf einer gekrümmten Fläche
räumlich	durch Drehen bzw. Verschieben	

Tabelle 2-2: Bewegungsarten

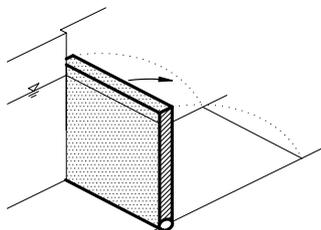
BEWEGUNGSART

linear Durch Verschieben entlang einer Linie	eben durch Drehung um eine horizontale Achse	eben durch Drehung um eine vertikale Achse
--	--	--

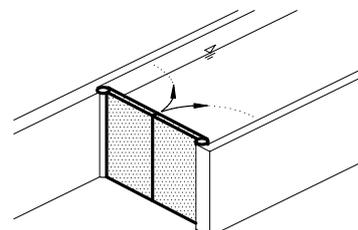
bewegliche Wasserbauten



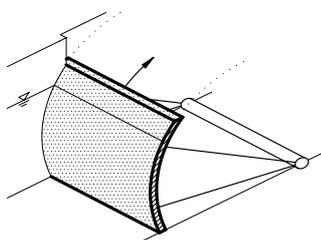
Hubschütze



Klappenwehre

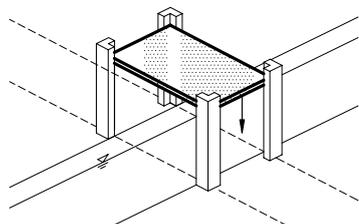


Stemmtore

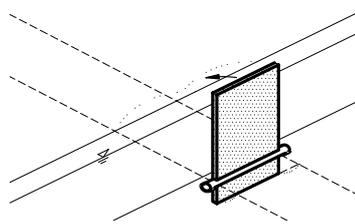


Segmentwehre

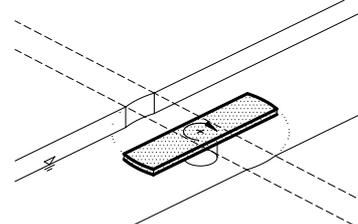
bewegliche Brücken



Hubbrücken

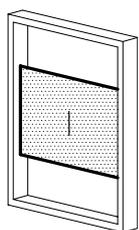


Klappbrücken

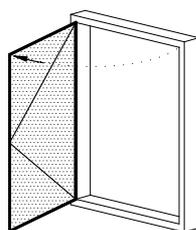


Drehbrücken

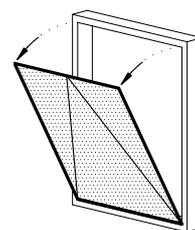
bewegliche Fenster und Tore (am Beispiel von Fenstern)



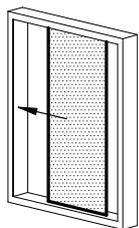
Hubfenster



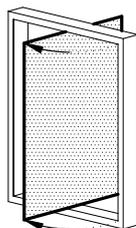
Drehfenster



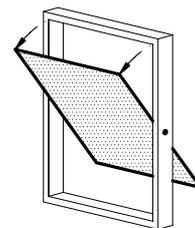
Kippfenster



Schiebefenster



Wendeflügel

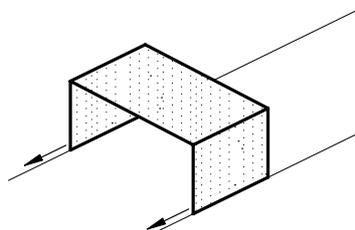


Schwingfenster

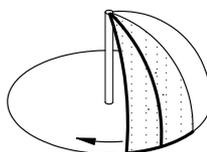
Tabelle 2-3 Bewegungsarten verschiedener Bauaufgaben (fortgesetzt auf nächster Seite)

BEWEGUNGSART

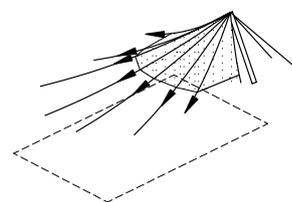
linear	eben	flächig
Durch Verschieben entlang einer Linie	durch Drehung um eine vertikale Achse	durch Verschieben entlang einer Fläche

bewegliche Dächer

Schiebedächer



Segmentdächer



faltbare Dächer

2.3.3 Hinsichtlich des Antriebes

Der Antrieb dient der Bewegung der Tragwerksteile nach der, durch entsprechende Lagerung, eine Führungseinrichtung, wie Schienen oder einen Führungsmechanismus, wie ein Gelenksviereck, vorgegebenen Bewegungsgeometrie.

Der Antrieb lässt sich auf eines der sieben Grundgetriebe zurückführen oder wird in seltenen Fällen durch ihre Kombination gebildet. Die sieben Grundgetriebe sind nach der Häufigkeit ihres Vorkommens in beweglichen Tragwerken geordnet:

Druckmittelgetriebe dienen der Bewegung mittlerer und großer Lasten auf relativ kleinem Weg für Drehbewegungen und kleinere Translationsbewegungen.

Als Beispiel sind Klappbrücken zu nennen, die mittels Hydraulikzylindern hochgeklappt werden.

Zugmittelgetriebe dienen in der Regel Translationsbewegungen über längere Strecken.

Als Beispiele sind umlaufende Seiltriebe wandelbarer Dächer zu nennen, welche Schlitten entlang von befahrbaren Seilen bewegen.

Rädergetriebe werden für die Translation von schienengeführten Tragwerken in der Paarung Reibrad – Schiene oder als Zahnräder mit einer Zahnstange verwendet. Drehbewegungen werden durch die Paarung von zwei Zahnrädern erzeugt. Die Verzahnung kann zur Arretierung des beweglichen Tragwerkes in der Endlage genutzt werden.

Beispiele sind Drehtore mit einem liegenden Zahnrad auf der fixen Drehachse und einem umlaufenden Antriebsritzeln am Torflügel.

Schraubenge triebe werden für die Bewegung großer Kräfte oder für präzise Bewegungsabläufe verwendet. Sie können eine Alternative zu Druck- und Zugmitteln beim Heben

oder Spannen von Tragwerken darstellen. Die Selbsthemmung bei Schrauben mit geringer Gewindeneigung wird vorteilhaft als Sicherung und Arretierung genützt.

Als Beispiel sind Spindelpressen zum Verspannen von Tragwerksteilen oder zum Heben zu nennen.

Kurbelgetriebe werden in der Regel nur zur Bewegungsführung eingesetzt.

Beispielsweise wird bei Zugbrücken das Ausgleichsgewicht durch ein Viergelenksgetriebe parallel zur Klappe geführt.

Sperrgetriebe dienen weniger dem Antrieb als der Sperre einer Bewegung in die ungewollte Richtung. Für bewegliche Tragwerke kommen dabei in der Regel Klinkengesperre mit Sägezahnbesetzten Rädern oder Stangen zum Einsatz.

Als Beispiel ist die Südbahnwinde zu nennen. Die Winde wird durch Ausfahren einer Zahnstange über ein Zahnradgetriebe mit Handkurbel verlängert. Das unbeabsichtigte Zurückfahren der Zahnstange wird durch ein Klinkengesperre verhindert, das entriegelt werden kann.

Kurvengetriebe werden nur selten in beweglichen Tragwerken eingesetzt. Sie dienen der Erzeugung ungleichmäßiger Bewegung durch Abtasten einer gleichmäßig bewegten Kurvenscheibe durch einen Abnehmer.

Antriebe und Führungsgetriebe werden im Kapitel 3 näher behandelt.

2.3.4 Hinsichtlich der Endlage

An die Beweglichkeit eines Tragwerks wird im Hochbau häufig auch die Forderung nach seinem geringen Platzbedarf im unbenützten Zustand geknüpft. In Tabelle 2-4 sind solche Endlagen mit der Art der relativen Lage der einzelnen Tragwerksteile zueinander angeführt.

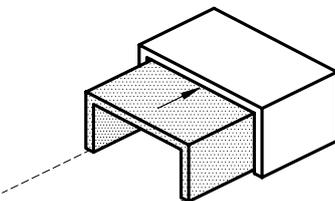
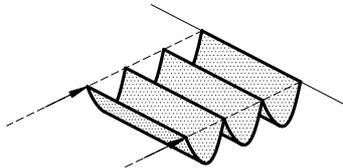
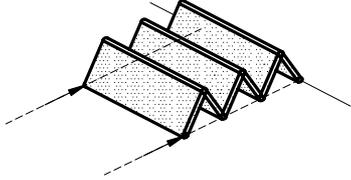
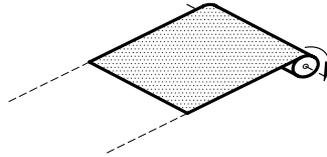
Endlagen steifer Tragwerksteile	Endlagen in sich beweglicher Tragwerksteile
 <p data-bbox="391 582 502 616">überlappt</p>	 <p data-bbox="1029 582 1109 616">gerafft</p>
 <p data-bbox="399 840 494 873">gefaltet</p>	 <p data-bbox="1013 840 1125 873">aufgerollt</p>

Tabelle 2-4: Mögliche Endlagen auf engerem Raum

2.4 Zusammenfassung

In der Konzeption am Beginn und der Ausformung am Ende des Planungsprozesses liegt der Hauptinhalt der Tragwerkslehre, aus deren Sicht in der vorliegenden Arbeit bewegliche Tragwerke behandelt werden. Die dafür erforderlichen Inhalte zur Bewegungsgeometrie werden in der Kinematik, dem rein geometrischen Teil der allgemeinen Mechanik behandelt. Die unterschiedlichen Elemente zur Ausformung beweglicher Baukonstruktionen sind Teil der technischen Getriebelehre.

Bewegliche Tragwerke sind Baukonstruktionen, die durch mechanischen Antrieb die Lage einzelner Teile zueinander oder des Tragwerks insgesamt verändern können. Die unterschiedlichen Entwicklungen im Brückenbau und Hochbau zeigen, dass sich jene Bauweisen durchsetzen konnten, die auf ebener Kinematik und einfachen Mechanismen basieren.

Zur Charakterisierung beweglicher Tragwerke werden gemeinsame Unterscheidungsmerkmale angeführt.

3 Kinematik

Der Entwurf beweglicher Tragwerke besteht im ersten Schritt aus der Wahl eines geeigneten kinematischen Systems. Dazu wird die Gliederung dieser Systeme und ihre Ausformung als Mechanismen für Führung und Antrieb behandelt. Der Grad der kinematischen Bestimmtheit gibt Auskunft über die Bewegungseigenschaften der Mechanismen, die mit Hilfe der graphischen Kinematik ermittelt werden können.

Die Kinematik behandelt allgemein die Bewegung von Körpern, ohne die wirkenden Kräfte zu berücksichtigen. Diese Reduktion auf eine rein geometrische Behandlung von Problemen der allgemeinen Mechanik ist durch die in der Kinematik getroffenen Voraussetzungen möglich. Die Elemente und alle in den Koppelungen und Lagerungen gesperrten Bewegungen werden als starr angesehen, wodurch die Kräfte keinen Einfluss auf die Bewegungsgeometrie und Bewegungseigenschaften mehr haben.

3.1 Gliederung kinematischer Systeme

Jedes kinematische System besteht aus Körpern, die im weiteren als Elemente bezeichnet werden, welche gegenseitig durch Koppelungen zu Gelenksketten verbunden werden. Diese kinematischen Ketten können durch eine oder mehrere Lagerungen mit der Erdscheibe verbunden sein.

Mechanismen sind hinsichtlich Zusammensetzung und Lagerung spezielle kinematische Ketten.

3.1.1 Elemente

Die Elemente von kinematischen Ketten werden nach ihren Eigenschaften in:

- allseitig feste Elemente,
- in sich bewegliche und ausschließlich zugfeste Elemente und
- in sich bewegliche und ausschließlich druckfeste Elemente

eingeteilt.

Stäbe, Scheiben oder Platten zählen zu den allseitig festen Elementen, Ketten oder textile Membranen sind Beispiele für ausschließlich zugfeste Elemente; Gase und Flüssigkeiten bilden ausschließlich druckfeste Elemente. Für alle Elemente gilt die Voraussetzung eines starren Verhaltens für die jeweilige Beanspruchung.

3.1.2 Koppelungen und Lagerungen

Koppelungen verbinden die Elemente untereinander zu einer kinematischen Kette, die ihrerseits durch Lagerungen mit der Erdscheibe verbunden sein kann.

Durch die Koppelung zweier Elemente werden ihre gegenseitigen Bewegungen voneinander abhängig. Ein Element kann in der Ebene zunächst drei Bewegungen gegenüber einem zweiten

Element beschreiben, zwei Translationen und eine Rotation. Durch eine Koppelung wird nun eine bestimmte Anzahl von Bewegungsgrößen gesperrt und die Anzahl der möglichen gegenseitigen Bewegungen, der Freiheitsgrad der Bewegung zwischen den Elementen reduziert.

Auch hier gilt die Voraussetzung, dass gesperrte Bewegungen starr gekoppelt und freie Bewegungen reibungsfrei übertragen werden.

Die einzelnen Freiheitsgrade in den Koppelungen und Lagerungen bestimmen die Beweglichkeit der gesamten kinematischen Kette und ihre Bewegungsgeometrie.

Bei der späteren baulichen Durchbildung sind die Koppelungen und Lagerungen entsprechend dem erforderlichen Bewegungsvermögen und den aufzunehmenden Übertragungskräften auszubilden.

Tabelle 3-1 zeigt die symbolische Darstellung ebener Kopplungen und Lagerungen mit der Angabe der im Knoten gesperrten Freiheitsgrade der Bewegung.

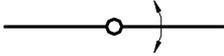
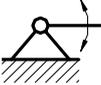
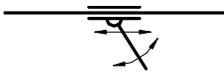
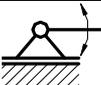
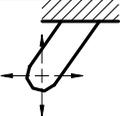
Koppelungen	Lagerungen	gesperrte Bewegungs- freiheitsgrade
	 Einspannung	3
 Drehgelenk	 Gelenkige Lagerung	2
 biegesteifes Schubgelenk		2
 Schubgelenk	 verschiebliche Lagerung	1
	 Lagerung durch eine Drehfessel	1

Tabelle 3-1: Ebene Koppelungen und Lagerungen

3.1.3 Gelenksketten

Gelenksketten können offen oder durch Verbinden des ersten mit dem letzten Glied der Kette geschlossen sein, wie in Abbildung 3-1 dargestellt. Als Mechanismus werden all jene geschlossenen und beweglichen Gelenksketten aus drei oder mehr Elementen bezeichnet, die durch Lagerung eines Elements fix mit der Erdscheibe verbunden sind. Ein Mechanismus ist zwangsläufig, wenn durch die Vorgabe der Bewegung eines Elements die Bewegung aller anderen Elemente geometrisch eindeutig bestimmt ist. Der Freiheitsgrad der Bewegung ist dann eins und der Mechanismus beschreibt eine geführte Bewegung.

Wird die freie Bewegung eines zwangsläufigen Mechanismus gesperrt, beispielsweise durch Arretieren eines Drehgelenkes, so geht der Mechanismus in eine unverschiebliche Kette über, die als Struktur bezeichnet wird (Abbildung 3-2).

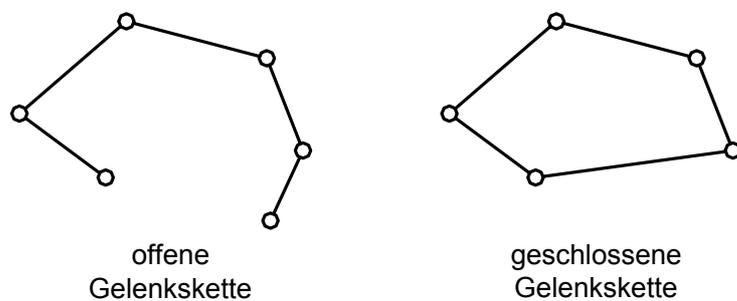


Abbildung 3-1: Gelenksketten

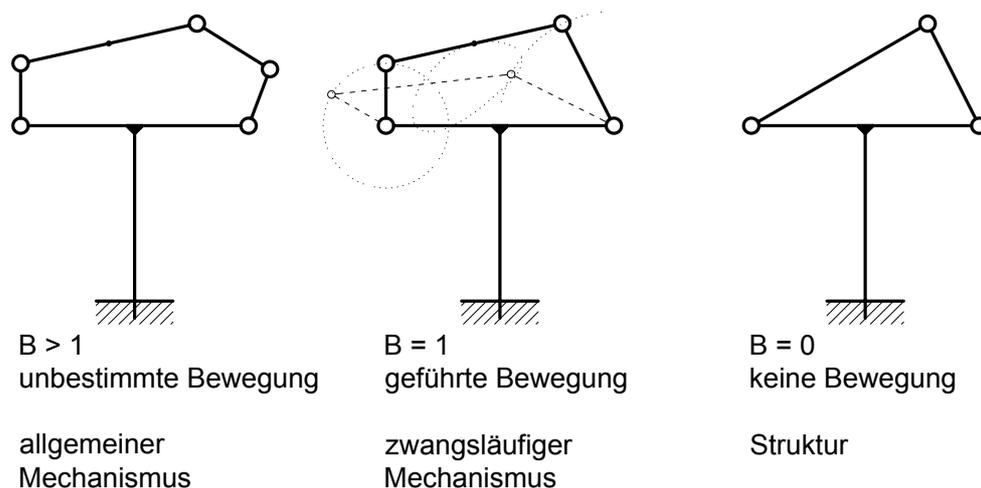


Abbildung 3-2: Bezeichnung von kinematischen Ketten nach ihren Freiheitsgraden der Bewegung B

Gelenksketten werden abhängig von ihrer Zusammensetzung in Geräte, Mechanismen und Strukturen eingeteilt, wie in Abbildung 3-3 dargestellt.

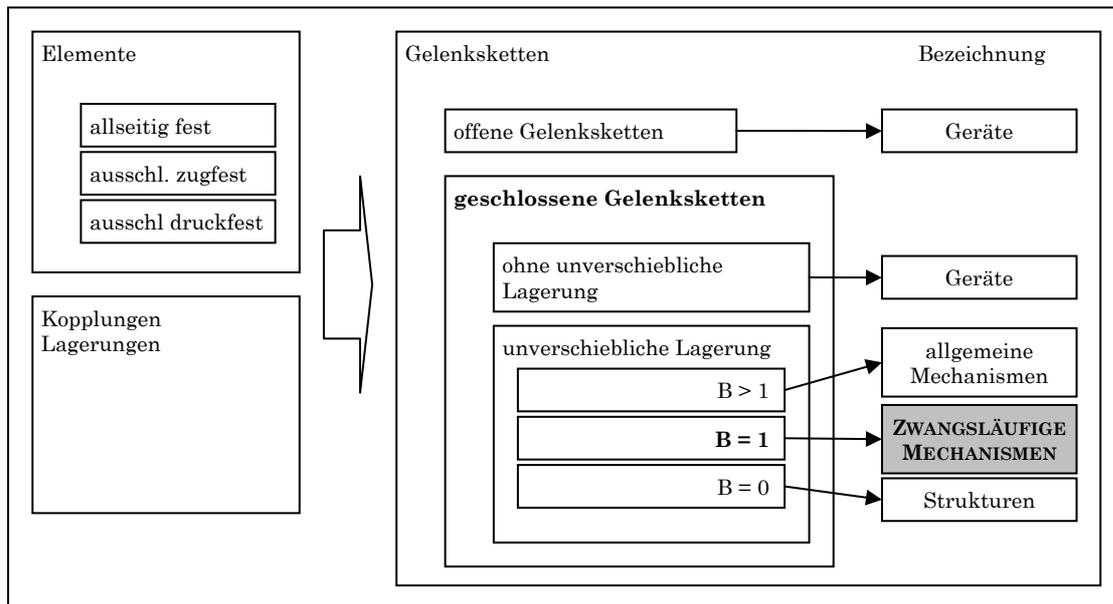


Abbildung 3-3: Übersicht über die Arten von Gelenksketten und ihre Bezeichnungen



Als Gerät werden jene Gelenksketten bezeichnet, die nicht fix gelagert sind. Als einfaches Beispiel sind Scheren zu nennen, zwei Elemente welche eine offene nicht gelagerte Gelenkskette bilden (Abbildung 3-4).

Abbildung 3-4:
Scheren als einfache
Geräte

Die einzelnen Elemente eines Mechanismus übernehmen unterschiedliche Aufgaben bei der Bewegungsübertragung und werden daher nach ihrer Aufgabe als Gestell, Abtriebselement, Antriebselement oder Übertragungsmittel bezeichnet.

Das Gestell ist das fix gelagerte Element, die Antriebselemente werden von einem Antrieb bewegt, wie beispielsweise einem Getriebemotor. Die Antriebsbewegung wird durch Übertragungsmittel auf Abtriebselemente geleitet, welche die gewünschte Bewegung ausführen (Abbildung 3-5).

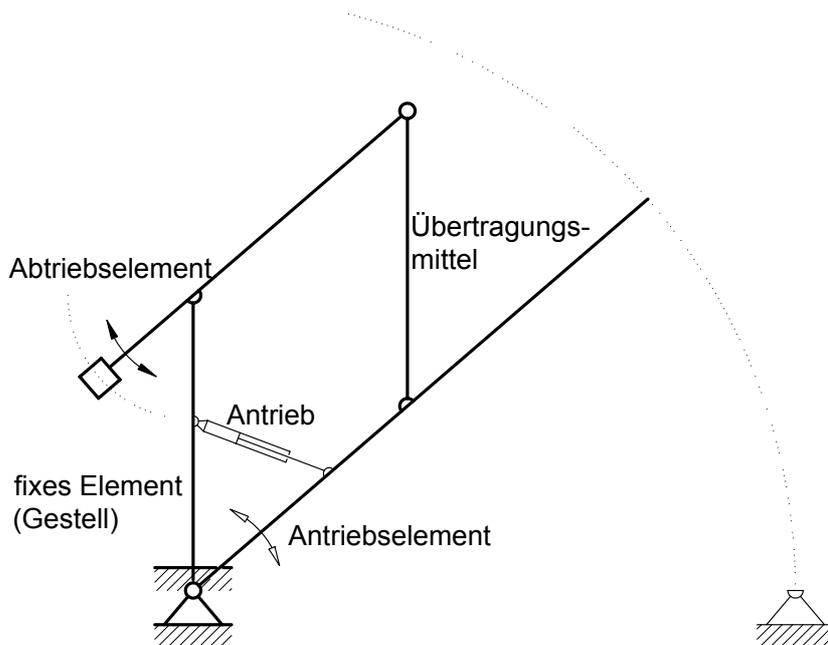


Abbildung 3-5: Bezeichnung der Elemente nach ihrer Aufgabe am Beispiel des Führungsmechanismus einer Waagbalkenklappbrücke

3.1.4 Mechanismen in beweglichen Tragwerken

Mechanismen in beweglichen Tragwerken dienen der Führung der Bewegung als Führungsgetriebe und der Erzeugung der Bewegung als Antriebe. Diese Mechanismen erfüllen bestimmte Aufgaben und werden als Getriebe bezeichnet. Sie werden hinsichtlich ihrer baulichen Ausformung im Kapitel 3 behandelt.

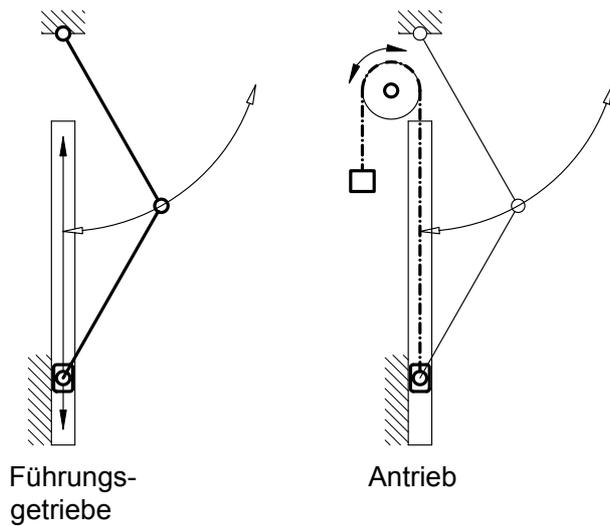


Abbildung 3-6: Führungsmechanismus und Antrieb am Beispiel eines Faltores

In beweglichen Tragwerken wird das Führungsgetriebe von einem oder mehr Antrieben so bewegt, dass das Tragwerk bei angehaltenen Antrieben unverschieblich ist. Die Antriebe geben also im Bewegungszustand genau so viele Bewegungen vor, wie im Führungsgetriebe frei sind und sperren diese wenn sie angehalten werden.

Ein zwangsläufiges Führungsgetriebe wird durch genau einen Antrieb bewegt, Mechanismen mit mehreren Freiheitsgraden von Antrieben in entsprechender Anzahl, die dann mechanisch oder elektronisch synchronisiert werden.

3.2 Kinematische Bestimmtheit

Ein Mechanismus ist kinematisch bestimmt, wenn gerade so viele Bewegungen gesperrt sind, dass die Lage aller seiner Elemente fixiert und eindeutig bestimmt ist. Im Allgemeinen wird für ein bewegliches Tragwerk aus der Kombination von Führungsgetrieben und Antrieben bei angehaltenen Antrieben gefordert, dass es gänzlich unbeweglich ist. Das kinematisch verschiebbliche Führungsgetriebe wird von einem oder mehreren Antrieben kinematisch bestimmt gemacht, indem seine freien Bewegungen kontrolliert vorgegeben werden.

Die Forderung nach konstruktiv einfachen beweglichen Tragwerken führt zu einfachen Mechanismen mit ebener Kinematik und im Allgemeinen Führungsgetrieben mit nur einem Freiheitsgrad der Bewegung und entsprechend nur einem Antrieb.

Neben der kinematischen Bestimmtheit ebener Systeme werden die räumlichen Systeme daher nur zur Vervollständigung behandelt. Die Ermittlung der kinematischen Bestimmtheit erfolgt aus kinematisch-geometrischer Sicht¹.

3.2.1 Ebene Systeme

Das Einscheibenproblem, die kinematisch bestimmte Lagerung einer Scheibe

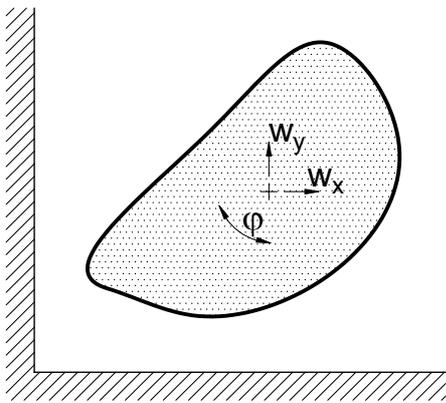


Abbildung 3-7: mögliche Bewegungen in der Ebene

Eine Scheibe ist kinematisch bestimmt gelagert, wenn gerade so viele Bewegungen gesperrt sind, dass ihre Lage eindeutig bestimmt ist und keine Bewegungen möglich sind.

Die drei in der Ebene möglichen Bewegungen (zwei Translationen und eine Rotation) sind durch drei voneinander unabhängige Lagerbedingungen zu sperren.

Das heißt die Wirkungslinien gesperrter Verschiebungen dürfen keinen gemeinsamen Schnittpunkt im Endlichen oder Unendlichen haben. Bei einer gesperrten Rotation als Lagerbedingung müssen die Wirkungslinien der gesperrten Verschiebungen einen Schnittpunkt im Endlichen haben.

Abbildung 3-8 zeigt Beispiele für kinematisch bestimmte und kinematisch unterbestimmte Lagerungen.

¹ Zur analytischen Ermittlung durch Rückführung auf die Matrizenrechnung siehe Föppl: Fachwerk, 1880, S. 7ff bzw. Föppl: Fachwerk im Raume, 1892, S. 6 ff und Pellegrino: Kinetically Indeterminate Structures, 1986.

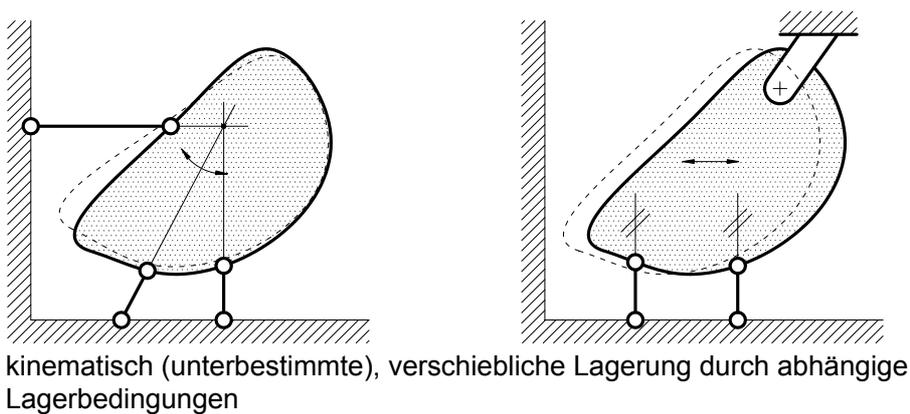
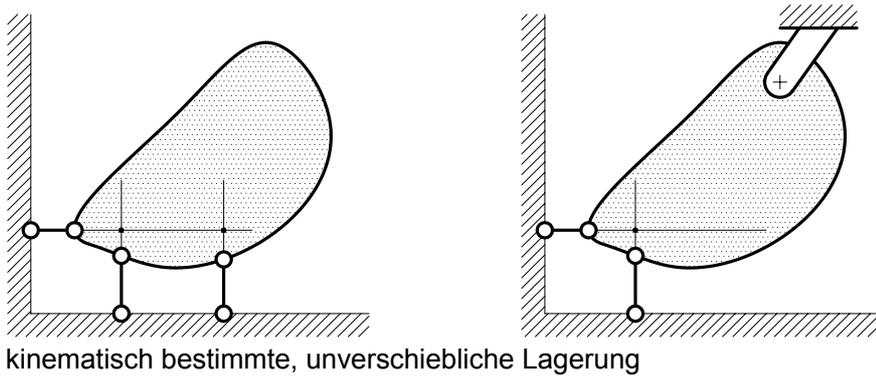


Abbildung 3-8: Lagerung einer Scheibe

Das Mehrscheibenproblem, die kinematisch bestimmte Koppelung von Scheiben

Von einer kinematisch bestimmt gelagerten Scheibe ausgehend, kann jede weitere Scheibe mit dieser unverschieblich gekoppelt werden, wenn die Koppelungen drei voneinander unabhängige Bewegungen sperren. Die Koppelungen haben die selben Voraussetzungen zu erfüllen, wie die Lagerungen beim Einscheibenproblem. Daraus lässt sich ein Abzählkriterium aus der Anzahl der Scheiben und Lager- bzw. Koppelungsbedingungen für eine kinematisch bestimmte Kette aufstellen (Formel 3-1 mit $B = 0$).

Der Freiheitsgrad der Bewegung (B nach Tabelle 3-2) wird durch Entfernen einer beliebigen Bewegungsbedingung jeweils um eins erhöht und bleibt gleich, wenn die Bedingung an anderer Stelle (oder anderer Art) wieder eingesetzt wird. Es ist stets darauf zu achten, dass die gesperrten Bewegungen zwischen zwei Scheiben voneinander unabhängig sind.

$$B = 3 \cdot s - a - b$$

- B Freiheitsgrad der Bewegung
 s Anzahl der Scheiben (ohne die Erdscheibe)
 a Anzahl der Lagerungsbedingungen
 (voneinander unabhängige gesperrte Bewegungen zur Erdscheibe)
 b Anzahl der Koppelungsbedingungen
 (voneinander unabhängige gesperrte Bewegungen zwischen den Scheiben)

Formel 3-1: Abzählkriterium für ebene Systeme

Dabei bedeutet :

$B < 0$	unverschieblich, kinematisch überbestimmt (mehr Bewegungsbedingungen als mögliche Bewegungen)
$B = 0$	unverschieblich, kinematisch bestimmt (gleich viele Bewegungsbedingungen wie mögliche Bewegungen)
$B = 1$	einfach verschieblich, einfach kinematisch unterbestimmt (eine Bewegungsbedingung weniger als mögliche Bewegungen) Mechanismus mit zwangsläufiger Bewegung
$B > 1$	verschieblich, mehrfach kinematisch unterbestimmt (Die Anzahl der Bewegungsbedingung ist geringer als die möglichen Bewegungen)

Tabelle 3-2: Freiheitsgrad der Bewegung (B)

3.2.1.1 Räumliche Systeme

Das Einkörperproblem, die kinematisch bestimmte Stützung eines Körpers

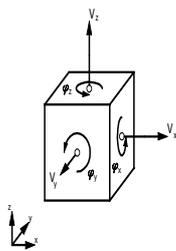


Abbildung 3-9: Mögliche Bewegungen im Raum

Die Bewegung eines Körpers im Raum kann im Allgemeinen in sechs unabhängige Bewegungen zerlegt werden (drei Translationen und drei Rotationen, Abbildung 3-9). Es sind daher sechs unabhängige Lagerungsbedingungen notwendig um den Körper unverschieblich, also kinematisch bestimmt zu lagern.

Wirken auf einen Körper beliebig viele Kräfte ein, die eine Verschiebung verursachen könnten, so können diese stets auf eine einzelne Kraft (mit drei Richtungskomponenten) und ein einzelnes Moment (mit drei Richtungskomponenten) zusammengefasst werden. Wird nun der Körper durch Sperren der Bewegungen entlang von sechs Wirkungslinien gelagert, so kann diese Kraft nur dann eindeutig in sechs Richtungen im Raum zerlegt werden, wenn es weder im Endlichen noch im Unendlichen eine Gerade gibt, die alle sechs Wirkungslinien schneidet.

Für die kinematisch bestimmte Lagerung eines Körpers folgt daher:

1. es dürfen sich nicht mehr als drei der Wirkungslinien in einem Punkt schneiden und somit auch nicht mehr als drei zueinander parallel sein,
2. es dürfen nicht mehr als drei Wirkungslinien in einer Ebene liegen,
3. es dürfen nicht mehr als vier der Wirkungslinien der gleichen windschiefen Fläche angehören.

Das Mehrkörperproblem

Das Mehrkörperproblem lässt sich, wie schon das Mehrscheibenproblem, auf das Einkörperproblem zurückführen.

Um einen Körper mit einem unverschieblichen Körper unbeweglich zu koppeln sind sechs unabhängige Bewegungen zu sperren, die den gleichen Gesetzmäßigkeiten folgen, wie die Lagerungen beim Einkörperproblem.

Der Freiheitsgrad der Bewegung einer räumlichen kinematischen Kette kann nach Formel 3-2, dem räumlichen Abzählkriterium ermittelt werden. Das Ergebnis ist der Freiheitsgrad der Bewegung B nach Tabelle 3-2, S. 37. Auf die geometrisch unabhängige Anordnung der Koppelungsbedingungen zwischen je zwei Körpern ist zu achten.

$$B = 6 \cdot k - a - b$$

B Freiheitsgrad der Bewegung (Bewegungsfreiheit)

k Anzahl der Körper (ohne dem Erdkörper)

a Anzahl der Lagerungsbedingungen
(voneinander unabhängige gesperrte Bewegungen zum Erdkörper)

b Anzahl der Koppelungsbedingungen
(voneinander unabhängige gesperrte Bewegungen zwischen den Körpern)

Formel 3-2: Abzählkriterium für räumliche Systeme

3.3 graphische Kinematik zwangsläufiger Mechanismen

Die Bewegungseigenschaften eines Mechanismus lassen sich in die zeitunabhängige Bewegungsgeometrie und den zeitabhängigen Bewegungszustand mit den kinematischen Größen Geschwindigkeit und Beschleunigung aufteilen. Die Bewegungsgeometrie ist für zwangsläufige Mechanismen eindeutig bestimmt und kann in Form von Lagenabfolgen und Bahnkurven einfach konstruiert werden. Die kinematischen Größen können für jeden Punkt ebenfalls graphisch aus den bekannten Bahnkurven ermittelt werden.

3.3.1 Bewegungsgeometrie

Die Bewegungsgeometrie einer Scheibe ist durch die Bahnkurven von zwei ihrer Punkte bestimmt. Um Bahnkurven für alle Elemente eines Mechanismus zu konstruieren, werden zunächst von einem Element mögliche Lagen in einer Abfolge während der Bewegung festgelegt. Die jeweils korrespondierenden Lagen aller anderen Elemente können durch Abschlagen ihrer Längen konstruiert werden, wodurch Punkte der jeweiligen Bahnkurven bestimmt sind.

Im Allgemeinen werden Lagen des Antriebselementes in konstanten Zeitschritten vorgegeben und Bahnkurven der jeweiligen Koppelpunkte ermittelt.

Abbildung 3-10 zeigt die Konstruktion einzelner Lagen und Bahnkurven am Beispiel des Führungsmechanismus eines Falttores.

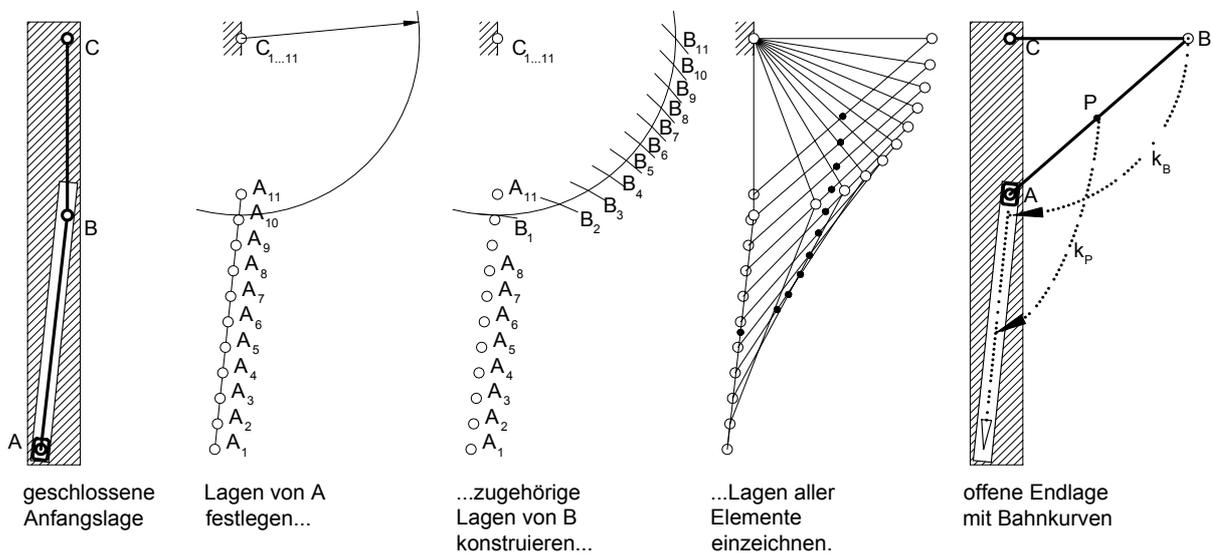


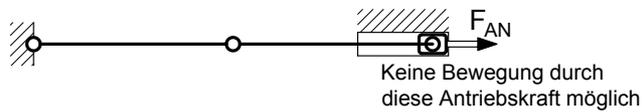
Abbildung 3-10: Konstruktion einzelner Lagen und Bahnkurven

3.3.2 Totlagen von Mechanismen

Mechanismen mit schwingend bewegten Gliedern weisen besondere Lagen auf, die als Totlagen bezeichnet werden. In der Totlage befindet sich eines der Elemente gerade in seiner Umkehrlage. Handelt es sich bei diesem in Umkehrlage befindlichen Element um ein Antriebselement, so kann der Mechanismus durch eine dort wirkende Antriebskraft nicht aus der Totlage bewegt werden.

Handelt es sich um ein Abtriebsglied, so kann bei Mechanismen nahe der Totlage die so genannte Kniehebelwirkung vorteilhaft genutzt werden: eine kleine Kraft am Antriebsglied führt zu einer großen Kraft am Abtriebsglied.

Mechanismus in Totlage



Kniehebel, Mechanismus nahe der Totlage

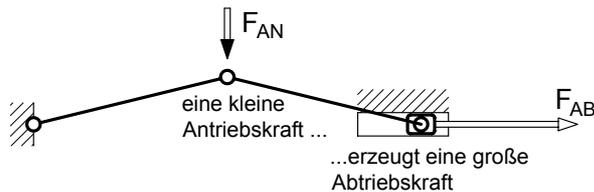


Abbildung 3-11: Mechanismen in und nahe der Totlage mit unterschiedlicher Position des Antriebes

Für bewegliche Tragwerke sind Totlagen dann zu untersuchen, wenn der Antrieb über ein schwingendes Element erfolgt. Totlagen sind dann zu meiden oder durch konstruktive Maßnahmen, wie Federn oder eigene Hilfsantriebe zu überwinden.

Die Konstruktion der Umkehrlagen erfolgt aus einfachen geometrischen Überlegungen und wird in Kapitel 4 für die Gruppe der Gelenkstrieb behandelt.

3.3.3 Bewegungszustand

Der Bewegungszustand eines Mechanismus lässt sich durch die Geschwindigkeit und die Beschleunigung aller Punkte ausdrücken. Diese kinematischen Größen sind im Allgemeinen über die Zeit veränderlich und werden für die Auslegung des beweglichen Tragwerkes benötigt. Sie werden in der Regel für einzelne Punkte ermittelt, da der gesamte Bewegungszustand einer Scheibe durch jenen von zwei Punkten bestimmt ist.

Wenn die Bahnkurven mit den einzelnen Wegabschnitten der jeweiligen Bahnkurve als der kinematischen Grundgröße Weg und ein gewählter Zeitverlauf, also die Grundgröße Zeit, bekannt sind, so können die Geschwindigkeit und die Beschleunigung daraus ermittelt werden. Die Geschwindigkeit ist die Veränderung der Lage über die Zeit, also ein pro Zeiteinheit zurückgelegter Weg, die Beschleunigung ergibt sich als die Veränderung der Geschwindigkeit über die Zeit.

Die beschriebenen Größen können graphisch ermittelt werden, insbesondere wenn die Bewegung in Zeitschritte zerlegt wird. Die Anwendung der graphischen Kinematik¹ führt im Allgemeinen zu

¹ vgl. Wittenbauer: Grafische Dynamik, 1923

einfachen Lösungen in der ebenen Kinematik, wie sie für Mechanismen in beweglichen Tragwerken notwendig sind.

Der Zeitverlauf wird durch Angabe von Zeitschritten, die in der Regel als konstant gewählt werden, vorgegeben. Die Bewegungsmaße Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung sind Vektoren, die jeweils in einem geeigneten Maßstab dargestellt werden.

3.3.3.1 Geschwindigkeit eines Punktes

Der Punkt A bewegt sich auf einer Bahnkurve k_A in einem Bezugssystem (E_0 , Abbildung 3-12). In einem Zeitschritt Δt verändert der Punkt seine Lage von A_1 nach A_2 und legt dabei ein Wegstück $\Delta \vec{s} = \overline{A_1 A_2}$ zurück. Die gekrümmte Bahnkurve wird durch die Zerlegung in Zeitschritte zu einem Polygon.

Der Punkt A legt im betrachteten Zeitabschnitt Δt ein Wegstück $\Delta \vec{s}$ zurück und hat damit eine Geschwindigkeit \vec{v}_A , die als $\vec{v}_A = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}$ definiert ist. Der Geschwindigkeitsvektor \vec{v}_A hat die gleiche Richtung wie der Wegvektor und kann für den bekannten Zeitschritt Δt direkt ermittelt und in einem geeigneten Geschwindigkeitsmaßstab M_v dargestellt werden. Im Geschwindigkeitsplan werden die Geschwindigkeitsvektoren der betrachteten Lagen eines Punktes auf seiner Bahn in einem Punkt eingetragen.

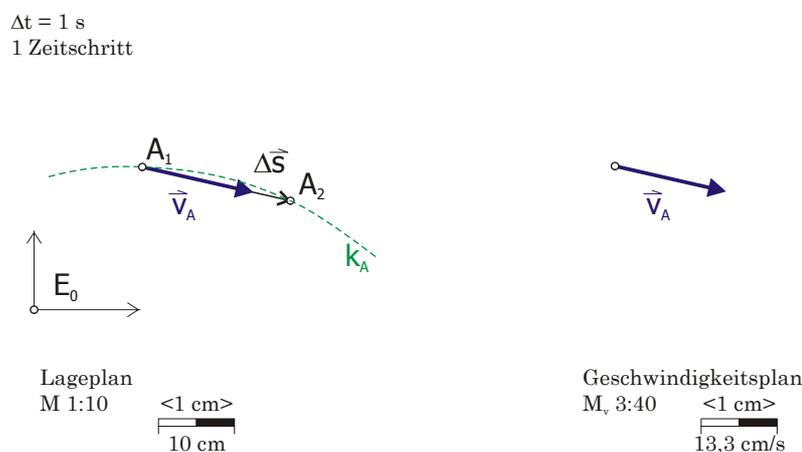


Abbildung 3-12: Geschwindigkeit eines Punktes

3.3.3.2 Beschleunigung eines Punktes

Betrachtet man ein weiteres Zeitelement Δt , so bewegt sich der Punkt A auf der Bahnkurve k_A von A_2 nach A_3 . Fände keine Störung der Geschwindigkeit \vec{v}_A statt, so würde der Punkt seine Bewegung in der einmal angenommenen Richtung $\overline{A_1 A_2}$ mit der gleichen Geschwindigkeit fortsetzen. Tritt jedoch eine Störung dieser Geschwindigkeit auf, so wird diese im Allgemeinen

ihre Richtung und Größe ändern. Der Punkt wird, statt seinen Weg in Richtung $\overline{A_1A_2}$ fortzusetzen, eine etwas geänderte Richtung einschlagen und im zweiten Zeitschritt nach A_3 kommen. Dabei kann der Weg $\overline{\Delta s_2}$ vom früheren Weg $\overline{\Delta s_1}$ auch der Größe nach verschieden, also ebenso die Geschwindigkeit in der neuen Richtung $\vec{v}_{A2} = \frac{\overline{\Delta s_2}}{\Delta t}$ von der bisherigen \vec{v}_A auch der Größe nach verschieden sein.

Die Geschwindigkeitsänderung $\Delta \vec{v}_A$ lässt sich im Geschwindigkeitsplan ermitteln. Es gilt $\vec{v}_{A2} = \vec{v}_{A1} + \Delta \vec{v}_A$. Aus der Änderung der Geschwindigkeit über die Zeit lässt sich die Beschleunigung $\vec{a}_A = \frac{\Delta \vec{v}_A}{\Delta t}$ ermitteln.

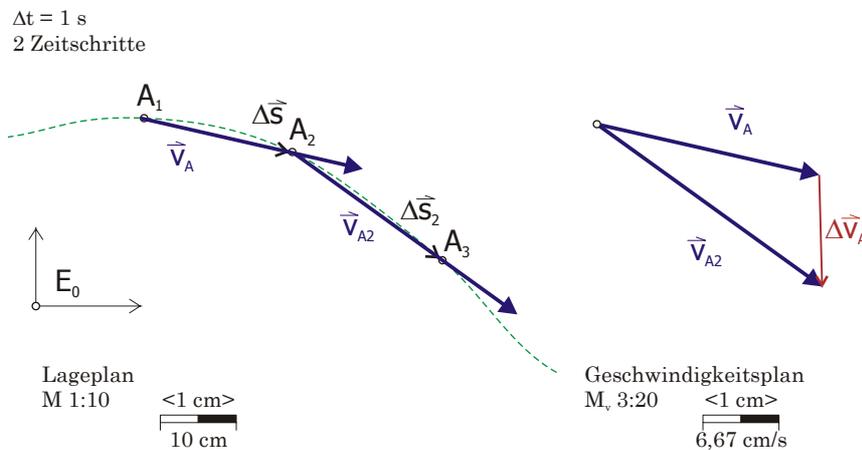


Abbildung 3-13: Beschleunigung eines Punktes

Durch drei benachbarte Lagen A_1, A_2, A_3 des Punktes A lässt sich immer der aktuelle Krümmungskreis der Bahnkurve von A mit dem Krümmungsradius ρ_A legen. Der Mittelpunkt des Krümmungskreises ist der Schnittpunkt der beiden Streckenhalbierenden zwischen den drei Punkten (siehe Abbildung 3-14).

Bezogen auf den Krümmungskreis lässt sich die Beschleunigung in die zwei natürlichen Beschleunigungskomponenten zerlegen: in die Tangentialbeschleunigung \vec{a}_{At} in Richtung des Geschwindigkeitsvektors und die Normalbeschleunigung \vec{a}_{An} in Richtung des Krümmungskreismittelpunktes.

In diesen Komponenten ausgedrückt ist die Beschleunigung :

$$\vec{a}_A = \vec{a}_{An} + \vec{a}_{At}, \text{ die Komponenten ergeben sich zu}^1 : a_{At} = \frac{\Delta v_A}{\Delta t}, a_{An} = \frac{v_A^2}{\rho_A}.$$

¹ zur Ableitung siehe Volmer: Getriebetechnik, 1987, S.120

3.3.3 Bewegungszustand

Die Tangentialbeschleunigung bewirkt eine Größenänderung der Geschwindigkeit während die Normalbeschleunigung zur Richtungsänderung der Geschwindigkeit führt.

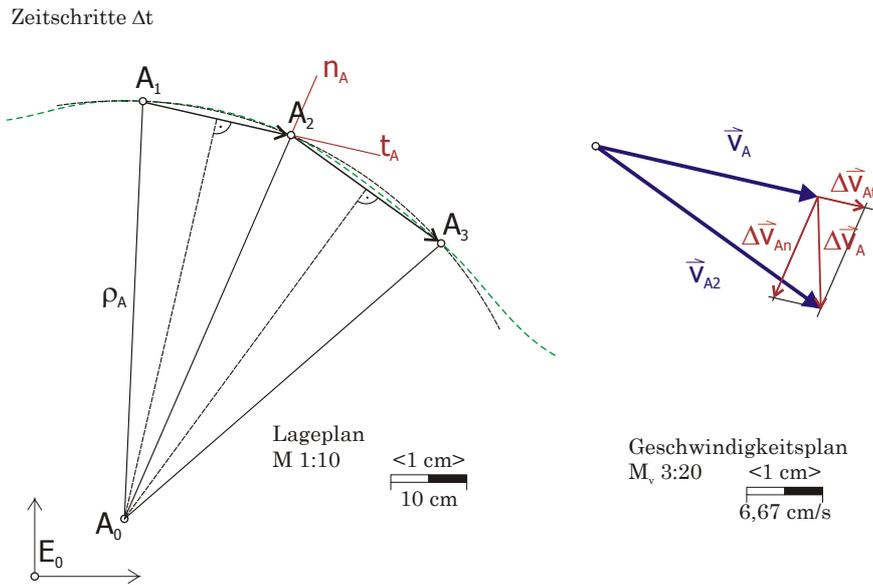


Abbildung 3-14: Krümmungskreis durch 3 benachbarte Lagen und Geschwindigkeitsverhältnisse

Lässt man die bisher als endlich groß betrachteten Zeitschritte in infinitesimal kleine Zeiteilchen übergehen, so geht das Bahnpolygon aus den einzelnen Lagen in die Bahnkurve über. Der Geschwindigkeitsvektor steht dann in jedem Punkt tangential auf die Bahnkurve und die Beschleunigungskomponenten entsprechend tangential und normal.

Beispiel

Abbildung 3-15 zeigt ein Beispiel für die Darstellung des Bewegungszustandes eines Mechanismus. Im Lageplan ist der Mechanismus in mehreren zeitlich benachbarten Lagen und dargestellt. Die Wegvektoren der Punkte A und B sind nebenstehend dargestellt.

Im Geschwindigkeitsplan sind die Geschwindigkeitsvektoren für jeden Zeitschritt eingetragen. Sie ergeben für jeden Punkt ein Vektorenbüschel, das in einem geeigneten Geschwindigkeitsmaßstab M_v dargestellt ist. Die Veränderung der Geschwindigkeit von einem Zeitschritt zum nächsten ergibt die Beschleunigung, die im Beschleunigungsplan für den ersten Zeitschritt in Tangential und Normalbeschleunigung zerlegt wurde.

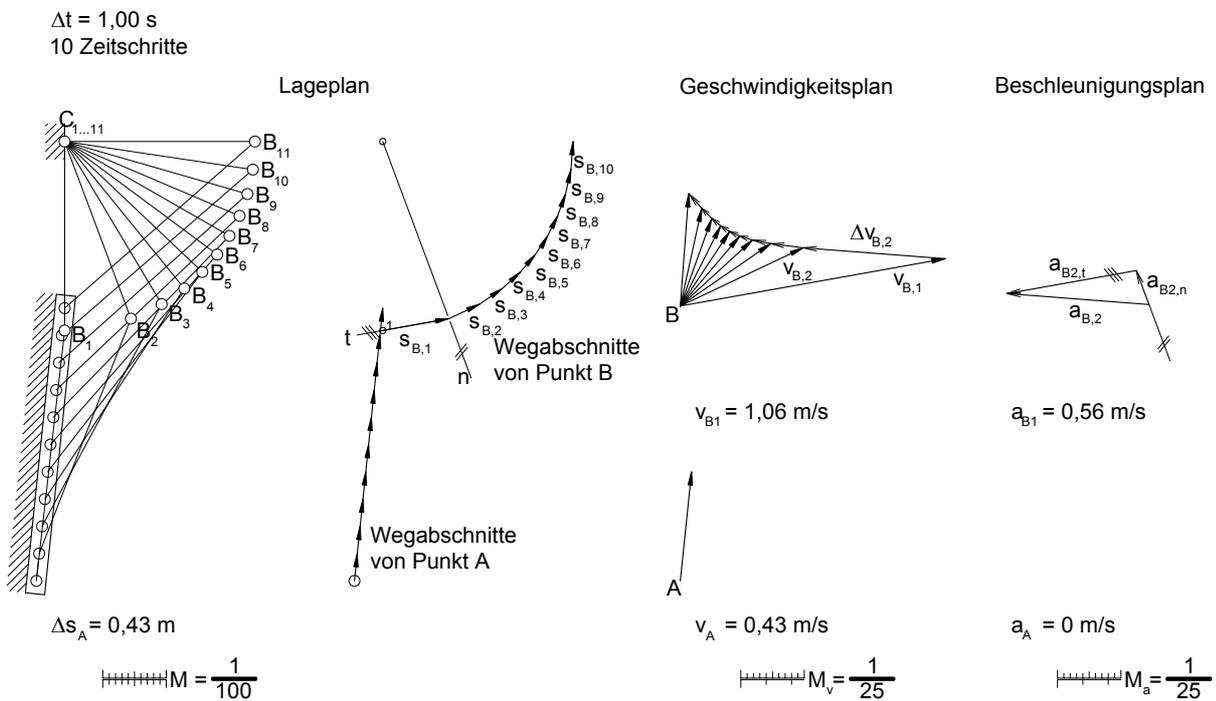


Abbildung 3-15: Beispiel für den Bewegungszustand

Lageplan und Bahnen mit Wegvektoren, Geschwindigkeitsplan, Beschleunigungsplan.

3.3.3.3 Geschwindigkeit einer Scheibe

Die Bewegung einer Scheibe ist durch die Bewegung von zwei ihrer Punkte vollständig beschrieben und lässt sich somit auf zwei Punktbewegungen zurückführen.

Der aktuelle Bewegungszustand einer Scheibe kann auch in eine reine Rotation um einen Punkt, den Momentandrehpol und seine Translation zurückgeführt werden.

Den Momentandrehpol erhält man, indem die Bahnnormalen von zwei Punkten der Scheibe zum Schnitt gebracht werden. Vom Momentandrehpol aus lassen sich vom aktuellen Geschwindigkeitsvektor in einem Punkt die Geschwindigkeitsvektoren aller verbleibenden Punkte bestimmen. Sie stehen jeweils in Normalenrichtung zum Momentandrehpol und verhalten sich untereinander wie ihre Abstände zu diesem. Aus dem Momentandrehpol und dem für alle Punkte gleichen Winkel ϑ lässt sich die Geschwindigkeit eines beliebigen Punktes P aus der bekannten Geschwindigkeit in A bestimmen.

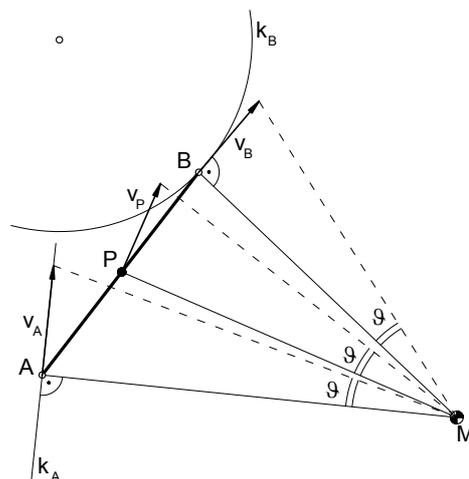


Abbildung 3-16: Beispiel zum Momentandrehpol

3.3.3.4 Übersetzungsverhältnis

Das Übersetzungsverhältnis i ist das Verhältnis von Antriebsbewegung zu Abtriebsbewegung. Als Bewegungsmaße werden Drehzahl, Winkel- bzw. Translationsgeschwindigkeit oder der Weg von Antrieb und Abtrieb zueinander ins Verhältnis gesetzt.

$$i = \frac{v_{\text{Antrieb}}}{v_{\text{Abtrieb}}} = \frac{s_{\text{Antrieb}}}{s_{\text{Abtrieb}}}$$

Ein Flaschenzug mit n Seilsträngen zwischen den oben und unten liegenden Rollen, die in einer „Flasche“ zusammengefasst werden, besitzt ein Übersetzungsverhältnis von $n:1$. Die Antriebsbewegung beträgt das n -fache der Abtriebsbewegung. Dabei ist nur der n -te Teil der Abtriebskraft vom Antrieb aufzubringen.

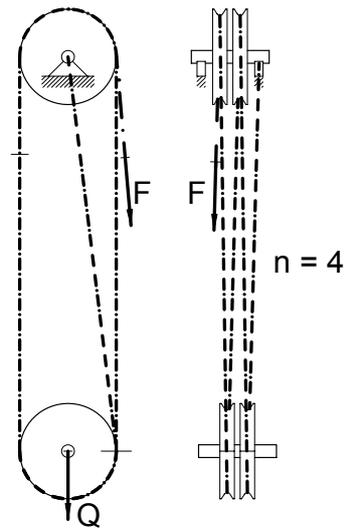


Abbildung 3-17: Flaschenzug

3.4 Zusammenfassung

Kinematische Systeme bilden die Grundlage der beweglichen Tragwerke und entstehen durch Koppelung und Lagerung von Elementen zu Mechanismen. Diese werden in der Kombination aus Führungsmechanismen und Antrieben verwendet und setzen die Kenntnis der Freiheitsgrade der Bewegung des Führungsmechanismus und die entsprechende Vorgabe der freien Bewegungen durch die Antriebe voraus. Die Bewegungseigenschaften, also die Bewegungsgeometrie und der Bewegungszustand können mit Hilfe der graphischen Kinematik ermittelt werden.

4 Getriebe

Getriebe sind Sonderformen von Mechanismen und über die Bewegungsübertragung hinaus mit einer bestimmten Aufgabenstellung im beweglichen Tragwerk verknüpft. Sie können auf eine Anzahl von Grundgetrieben zurückgeführt werden, die als Grundelemente für die Anwendung in beweglichen Tragwerken dienen können.

4.1 Aufgabenstellung

Getriebe können hinsichtlich ihrer Aufgabe in beweglichen Tragwerken unterschieden werden in:

- **Antriebe** dienen der Erzeugung einer Bewegung, wie beispielsweise Reibräder zum Antrieb entlang von Schienen. Historisch wurde dafür der Begriff *Treibung* verwendet.
- **Führungsgetriebe und -einrichtungen** dienen der Führung einer Bewegung, wie Laufräder und Schienen. Historisch wird der Begriff *Leitung* verwendet.
- **Haltungsgetriebe und -einrichtungen** dienen dem zeitweiligen Speichern von Arbeitsvermögen, wie durch Federn oder Ausgleichsgewichte, dem Sperren von Bewegungen in ungewollte Richtungen, wie durch Klinkengesperre oder dem Abbau von Stößen, wie durch Puffer. Historisch als *Haltung* bezeichnet.
- **Gestaltänderungsgetriebe** dienen der gezielten Gestaltänderung von Werkstücken und finden in beweglichen Tragwerken keinen Einsatz. Historisch als *Gestaltung* bezeichnet.

4.2 Grundgetriebe

Die Kombination der drei Elementarten (allseitig fest, ausschließlich zugfest und ausschließlich druckfest) durch Koppelungen zu ebenen Mechanismen ergeben sieben mögliche Grundgetriebe. Sie können in ihrer Grundform eingesetzt werden, wie im Allgemeinen in beweglichen Tragwerken oder um zwischengeschaltete Übertragungsmittel erweitert und untereinander kombiniert angeordnet werden.

Die Grundgetriebe sind

- Zugmittelgetriebe
- Druckmittelgetriebe
- Rädergetriebe
- Schraubengetriebe
- Kurbelgetriebe
- Kurvengetriebe
- Sperrgetriebe

und werden in den nächsten Abschnitten nach der Art der Aufgabenstellung in beweglichen Tragwerken näher behandelt.

4.3 Antriebe

4.3.1 Zugmittelgetriebe

Zugmittelgetriebe besitzen ein ausschließlich zugsteifes Element, das biegsam oder in sich beweglich ist. Biegsame Elemente sind Seile oder Riemen, Ketten aus gelenkig verbundenen Gliedern sind um die Gelenke beweglich.

Zugmittel werden durch Scheiben oder Trommeln angetrieben, die vom Zugmittel teilweise oder ganz umhüllt werden, woher auch die Bezeichnung Hülltrieb stammt. Bei Seil- und Riemetrieben wird die Antriebsbewegung kraftschlüssig über Umschlingungsreibung übertragen, bei Kettentrieben formschlüssig durch die Verzahnung von Kette und Ritzel.

In beweglichen Tragwerken werden Zugmittelgetriebe in der Regel als Antrieb in Kombination mit einem Führungsgetriebe verwendet. Seiltriebe weisen dabei eine hohe Tragfähigkeit und Laufruhe auf und benötigen keine äußere Schmierung. Sie werden über relativ große Längen eingesetzt und besitzen vergleichbar große Antriebsscheiben und Trommeln. Kettengeräte können platzsparend angetrieben werden, weisen allerdings wegen ihres Aufbaues und des größeren Eigengewichts eine geringere Tragfähigkeit auf und werden über kürzere Strecken eingesetzt. Der Formschluss zwischen Kette und Antriebsritzel kann vorteilhaft für die Arretierung genutzt werden.

4.3.1.1 Seiltriebe

a. Konstruktionselemente

Allgemein sind vorwiegend Stahlseile in Verwendung, während Seile aus Kunststofffasern in der Aufzugtechnik in Erprobung sind. Kunststoffseile weisen wegen der großen Zahl sehr dünner und hochfester Fasern günstige Eigenschaften hinsichtlich Biegsamkeit und Überwachung des Seilzustandes auf¹.

Nach dem Einsatz im Tragwerk werden stehende Seile, befahrbare Seile und laufende Seile unterschieden.

Stehende Seile dienen der Aufnahme von Zugkräften und werden nicht bewegt.

Befahrbare Seile sind ebenfalls unbewegt und werden von Rollen oder Gleitschritten befahren. Sie haben die Aufgabe bewegte Tragwerksteile zu tragen und dienen der Bewegungsführung. Beim Überfahren nimmt das befahrbare Seil eine Krümmung ein, die kleiner ist als jene der Lauffläche des bewegten Teiles.

¹ In einem Projekt der Aufzugsfirma Schindler sind Seile aus Aramidfasern in 70 Liftanlagen in Erprobung. Sehr dünne Filamente werden zu einem biegefreudigen Seil verarbeitet, das zum Schutz gegen UV-Strahlung, Feuchtigkeit und Querpressung mit Kunststoff ummantelt ist. Die Materialkosten liegen etwa drei mal höher als bei einem konventionellen Aufzugsseil aus Stahldrähten. Der kompakte Antrieb und die einfache Überwachung des Seilzustandes während dem Betrieb sollen dies kompensieren. (Schindler: Medienmitteilung, Ebikon, 2.5.2000)

Laufende Seile werden bewegt. Sie dienen der Bewegungsübertragung und werden über Umlenkrollen geführt und durch Treibscheiben und andere Antriebselemente angetrieben. Sie nehmen deren Krümmung an.

Die drei unterschiedlichen Einsatzgebiete der Seile verlangen entsprechend unterschiedliche Eigenschaften, denen durch Aufbau und Machart der Seile entsprochen werden kann. Stehende Seile benötigen eine hohe Dehnsteifigkeit und Zugfestigkeit, befahrbare Seile sollten eine glatte Oberfläche aufweisen und laufende Seile eine hohe Biiegsamkeit.

Stahlseile werden aus Rund- oder Profildrähten verseilt. Die Drähte hoher Festigkeit (über $1\,770\text{ N/mm}^2$) werden aus wärmebehandeltem, legiertem oder niedriglegiertem Kohlenstoffstahl gezogen und anschließend verzinkt, um die Korrosionsbeständigkeit des Seiles zu erhöhen. Sie werden im Verseilvorgang mittels Verseilmaschinen schraubenförmig um eine Einlage geschlagen und können in weiteren Verseilvorgängen verarbeitet werden. Je nach der Anzahl der aufeinander folgenden Verseilvorgänge werden ein-, zwei- oder dreifach verseilte Drahtseile unterschieden.

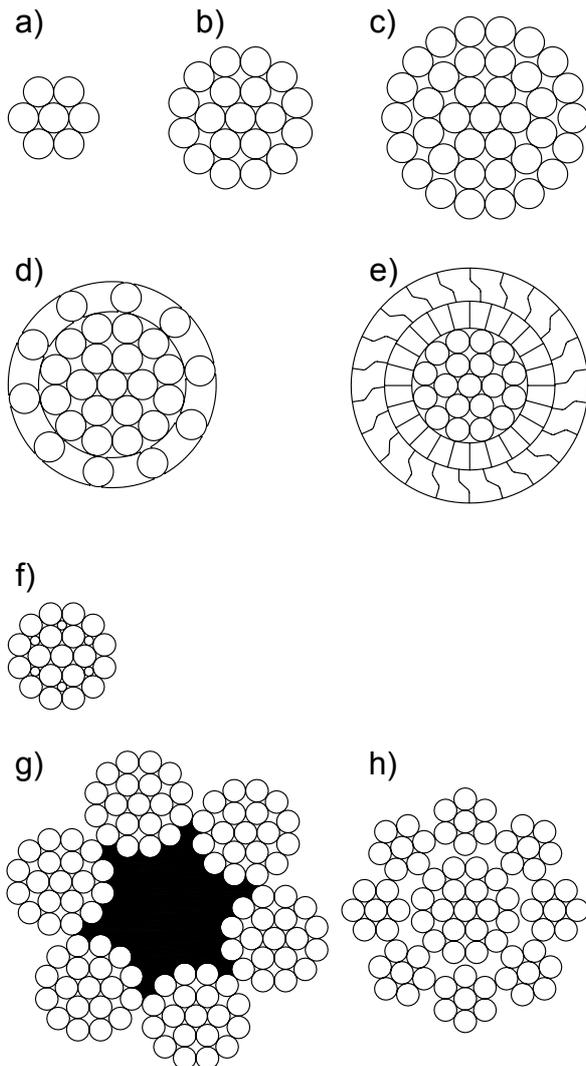


Abbildung 4-1: Drahtseile -

- a), b), c) offene Spiralseile (ein-, zwei-, dreilagig)
 d) verschlossenes Spiralseil, e) vollverschlossenes Spiralseil
 f) Litze (Fülllitze)
 g) Litzenseil mit Kunststoffeinlage
 h) Litzenseil mit Stahleinlage

(Abbildung 4-1 g). Die weiche Einlage erhöht die Flexibilität des Seiles und ermöglicht die Speicherung von Schmierstoff für eine innere Schmierung. Der Einsatz einer Stahleinlage erhöht die Festigkeit des Seiles bei verringerter Flexibilität und Verlust der Innenschmierung.

Um die Pressung zwischen den einzelnen Drähten und damit den Verschleiß des Seiles zu minimieren werden Litzen aus Drähten mit unterschiedlichen Durchmessern verseilt (Abbildung 4-1 f).

Die biegsamen Litzenseile mit geringerer Zugsteifigkeit werden vorwiegend als laufende Seile eingesetzt. Um ein Aufdrehen der Litzenseile bei Belastung zu vermeiden sollten sie drallarm sein. Dazu werden sie im Kreuzschlag mit unterschiedlicher Schlagrichtung von Litzen und Seil

Durch einmaliges Verseilen von Drähten in einer oder mehreren Lagen entstehen Spiralseile (Abbildung 4-1 a, b, c). Sie bestehen aus Drähten gleichen Durchmessers, die um einen Kerndraht als Einlage geschlagen werden. Sie können dabei im Normalschlag mit parallelen Schlagrichtungen aller Lagen oder für dreiarmlige Seile im Gegenschlag mit entgegengesetzter Schlagrichtung der einzelnen Lagen verseilt werden.

Offene Seile bestehen nur aus Runddrähten, die durch den Einsatz von I-förmigen Profildrähten in den äußeren Lagen zu verschlossenen (VS) und mit Keil- und z-förmigen Profildrähten zu vollverschlossenen (VVS) Seilen verseilt werden (Abbildung 4-1 c, d, e). Spiralseile sind wegen ihres hohen Füllungsgrades¹ wenig biegsam. Sie eignen sich zur Übertragung großer Zugkräfte bei relativ großer Zugsteifigkeit und werden daher als stehende Seile oder befahrbare Seile verwendet. Verschlossene Seile weisen neben dem Korrosionsschutz eine erhöhte Laufruhe beim Befahren der glatten Oberfläche auf.

Zweifach verseilte Drahtseile werden aus Litzen gebildet, die im ersten Verseilvorgang hergestellt und im zweiten Verseilvorgang um eine Einlage aus Natur- oder Kunstfasern zu einem Litzenseil geschlagen werden

¹ dem Verhältnis aus metallischer Querschnittsfläche zur Fläche des umschriebenen Kreises

verseilt. Seile im Gleichschlag mit gleicher Schlagrichtung von Litze und Seil sind drallanfällig und werden in Paarung mit einem zweiten, gegensinnig geschlagenen Seil eingesetzt.

Dreifach verseilte Drahtseile – so genannte Kabelschlagseile – werden als sehr biegsame Seile zum Umschlingen von Hebegut verwendet. Für bewegliche Tragwerke finden sie keinen nennenswerten Einsatz.

Richtwerte für Umlenkradien von Spiral- und Litzenseilen sind in Tabelle 4-1 angeführt¹.

Verseilung	Seilart	Umlenkradien	E-Modul
einfach, Spiralseile	stehende Seile, befahrbare Seile	Umlenkradius für Seilsättel : $R > 20 d_s$	150 000 N/mm ²
zweifach, Litzenseile	laufende Seile	Treibscheibenradien: $R > 20 d_s$ Radien für Seiltrommeln und Umlenkrollen: $R > 15 d_s$	90 000 – 120 000 N/mm ²

Tabelle 4-1: Richtmaße für Umlenkradien und Elastizitätsmodulen von einfach und zweifach verseilten Drahtseilen (R...Krümmungsradius, d_s...Nenndurchmesser des Seiles)

b. Bewegungsübertragung

Für den Antrieb werden Treibscheiben, Treibtrommeln oder Seiltrommeln verwendet.

Treibscheiben und –trommeln geben immer gleich viel Seil ab wie aufgenommen wird. Sie dienen ausschließlich dem Antrieb des Seiles, während mit Seiltrommeln das Seil angetrieben und auf der Trommel gespeichert wird. Treibscheiben werden vom Seil nur teilweise, Treib- und Seiltrommeln in mehreren Windungen umhüllt.

Treibscheiben besitzen einen U-förmig profilierten Rand in dem das Seil geführt wird und der zur gleichmäßigen Bettung des Seiles mit einem Futter aus Weichmetall oder Kunststoff versehen ist (Abbildung 4-3 a, S.55). Die Bewegungsübertragung erfolgt über Seilreibung. Das vorgespannte Seil wird über die Scheibe gelenkt und gegen ihren Umfang gepresst, wodurch Reibungskräfte in Umfangsrichtung für die Bewegungsübertragung wirksam werden. Ein schlaff aufgelegtes Seil würde durchrutschen, da keine Übertragungskräfte geweckt werden könnten.

Der Zusammenhang zwischen Vorspannkraft, Reibungskoeffizienten und Umschlingungswinkel für die Seilreibung ist in Tabelle 4-2 angegeben. Die Grenzlast des Antriebes ist erreicht wenn die nutzbaren Seilreibungskräfte überschritten werden und das Seil durchrutscht.

¹ vgl. Scheffler: Fördertechnik, 1994, S.35 ff

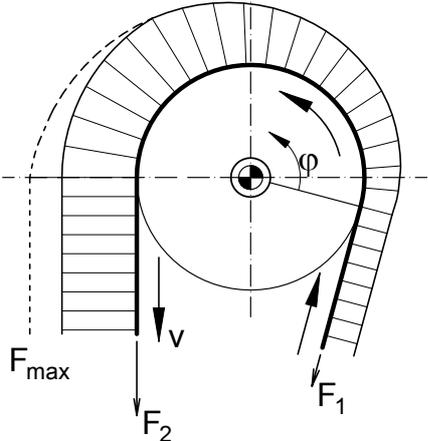
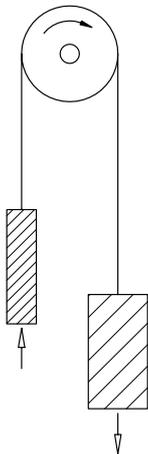
Verlauf der Seilkraft bei der Bewegungsübertragung	Seilreibungsgleichung	Rechenwerte für den Reibungskoeffizienten zwischen Drahtseilen und Treibscheiben	
	<p>Die Seilreibung folgt der Gleichung nach Eytelwein :</p> $F_{\varphi} = F_1 \cdot e^{\mu\varphi}$ <p> F_1Kraft im auflaufenden Seil F_{φ}Seilkraft an der Stelle φ F_2Kraft im ablaufenden Seil μReibungskoeffizient φUmschlingungswinkel F_{\max}durch den Antrieb maximal übertragbare Kraft </p>		
		Rillenwerkstoff	rechnerischer Reibungskoeffizient μ
		Stahl, Grauguß	0,12
		Leder	0,13
		Gummi mit Gewebe	0,22
		PVC	0,25
		Leichtmetall	0,35

Tabelle 4-2: Bewegungsübertragung durch Seilreibung

Das Spannen laufender Seile geschieht in der Regel durch Gewichte. Diese können mit dem bewegten Seil direkt verbunden sein, wie Kabine und Gegengewicht am Hubseil von Aufzügen, oder in einer eigenen Spannvorrichtung angeordnet werden, welche das Seilsystem vorspannt, wie bei Seilbahnen und anderen umlaufend bewegten Seilschleifen (Abbildung 4-2).

Seilvorspannung

a) durch Eigengewicht



b) mittels Spannvorrichtung

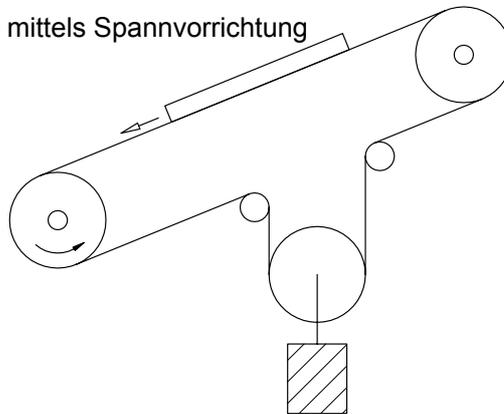


Abbildung 4-2: Prinzipielle Anordnungen von Gewichten zum Spannen laufender Seile

Treibtrommeln sind mit halbrunden Rillen versehen, in denen das Seil geführt wird. Der Umschlingungswinkel des Seiles wird gegenüber der Treibscheibe durch Aufwickeln in mehreren Windungen vergrößert (Abbildung 4-3 b, S.55). Durch diese Maßnahme wird eine ausreichende Bewegungsübertragung bei geringer Seilvorspannung möglich.

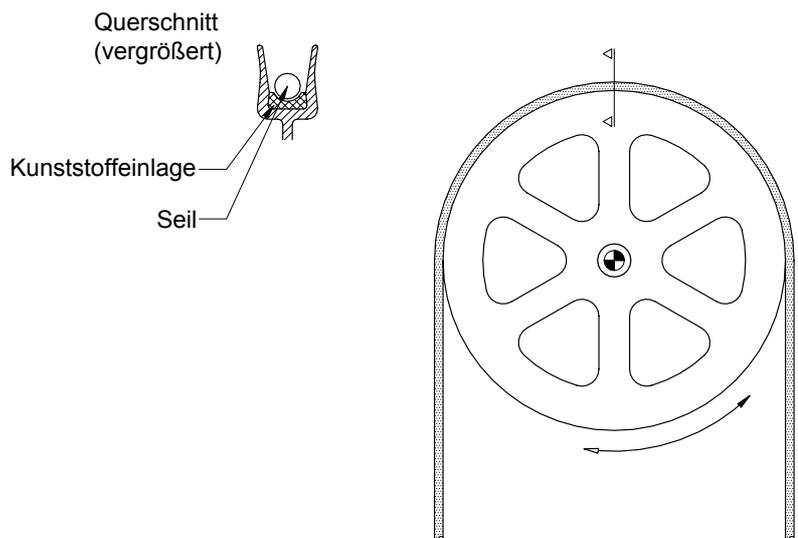
Auf der Trommel bleibt stets eine konstante Seillänge gespeichert, die während des Bewegungsvorganges entlang der Rille von einer Seite der Trommel auf die andere wandert. Die Seillänge, die von der Treibtrommel bewegt werden kann ist daher durch die Gesamtlänge der Rille begrenzt.

Bei **Seiltrommeln** wird ein Ende des Seiles mittels Klemmbacken auf der Trommel befestigt und das Seil in einer oder mehreren Lagen aufgewickelt (Abbildung 4-3 c, S.55). Um die Klemmbacken nicht zu überlasten, wird das Seil nur soweit abgerollt, dass mindestens zwei Reservewicklungen auf der Seiltrommel verbleiben. Die bewegbare Seillänge wird vom Speichervermögen der Seiltrommel bestimmt.

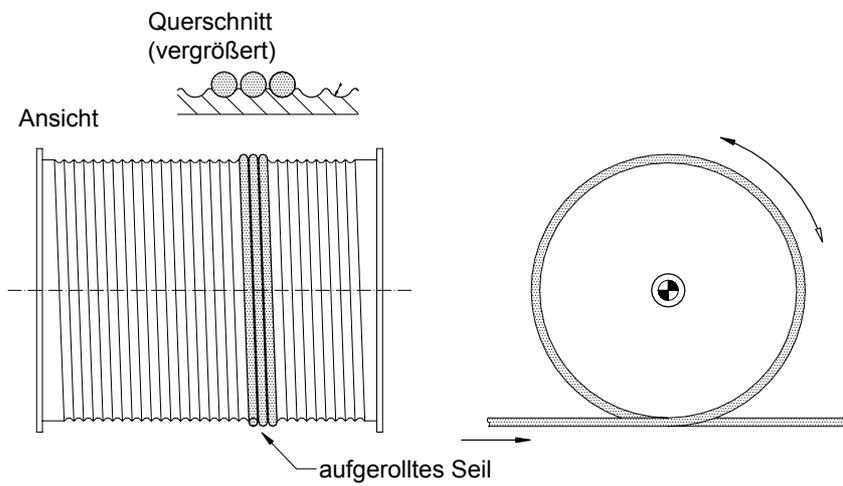
Abbildung 4-3 (nächste Seite): Bewegungsübertragung in Seiltrieben

a) Treibscheibe, b) Treibtrommel, c) Seiltrommel

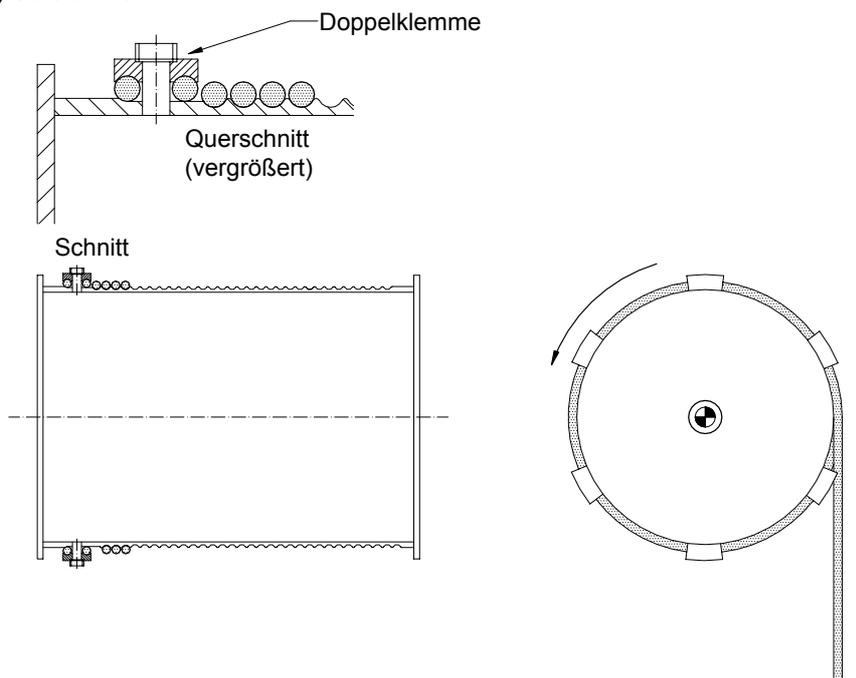
a) Treibscheibe



b) Treibtrommel



c) Seiltrommel



c. Einsatz in beweglichen Tragwerken

Treibtrommeln werden für den Antrieb von beweglichen Tragwerken eingesetzt, die auf Schienen oder befahrbaren Seilen geführt werden. Das Seil wird in einer Schleife über Umlenkrollen vom bewegten Tragwerksteil auf die Treibtrommel geführt. Durch den Antrieb der Trommel in eine der beiden möglichen Richtungen wird das Seil in diese Richtung eingezogen und der zu bewegende Tragwerksteil entlang der Führung bewegt.

Dieser Antrieb ist entlang einer geraden, ebenen oder räumlich gekrümmten Bahn möglich. In der Regel erfolgt der Antrieb elektrisch mit dem Motor am ortsfesten Tragwerk. Der Antrieb über Treibtrommeln erfordert eine geringe Vorspannkraft im Seil und ermöglicht die Bewegung entlang relativ langer Strecken. Abbildung 4-4 zeigt eine mögliche Anordnung eines Seiltriebes mit Treibtrommel für ein bewegliches Dach.

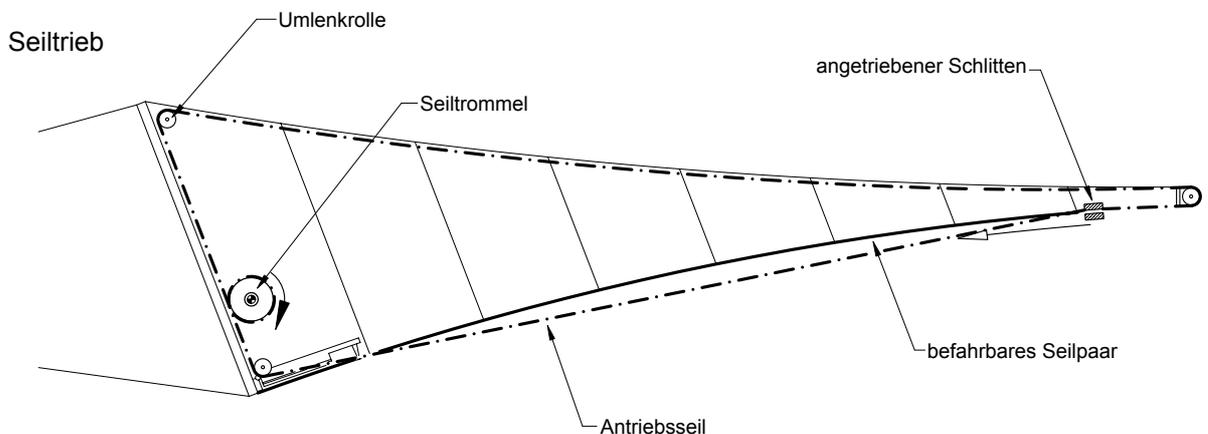


Abbildung 4-4: Prinzipskizze eines umlaufenden Seiltriebes mit Treibtrommel

Ein Gleitschlitten wird auf dem befahrbaren Untergurt eines Seilbinders geführt. Die Bewegung wird durch den umlaufenden Seiltrieb mit Treibtrommel auf den Schlitten übertragen (vgl. Kap. 5 Anwendungsbeispiele – Dächer – Rothenbaum).

Treibscheiben werden für den Antrieb von Seilen und Seilschleifen verwendet, wenn eine ausreichende Seilvorspannung vorhanden ist. Beispiele sind Aufzüge, Seilbahnen und Riesenräder¹. Bei seilgetriebenen Aufzügen wird die Kabine auf mehrere Litzenseilen aufgehängt, die über eine Gruppe von Treibscheiben gelenkt werden und am anderen Ende mit einem Gegengewicht verbunden sind. Der aus Platzgründen beschränkte Treibscheibendurchmesser bestimmt den größtmöglichen Seildurchmesser, aus dem Kabinengewicht plus Nutzlast ergibt sich die Anzahl der Seile.

Seiltrommeln werden für den Antrieb in eine Richtung verwendet, wie beim Heben von Tragwerksteilen. Um eine ungewollte Bewegung gegen die Antriebsrichtung zu vermeiden, wird

¹ vgl. Kap. 5 Anwendungsbeispiele – bewegliche Sonderbauwerke – Riesenräder

ein Klinkengesperre neben der Seiltrommel angeordnet. Die kontrollierte Bewegung entgegen der Antriebsrichtung erfolgt durch Bremsen ebenfalls auf der Trommel.

Als einfaches Beispiel für einen Seiltrieb mit Seiltrommel kann eine in Abbildung 4-5 gezeigte Dachdeckerwinde angeführt werden. Durch eine Handkurbel wird die Seiltrommel über ein Zahnradvorgelege bewegt. Das Seil wird auf der Trommel gespeichert, die während des Hebens durch ein Klinkengesperre gesichert ist. Zum kontrollierten Absenken dient eine einfache Bandreibringbremse.

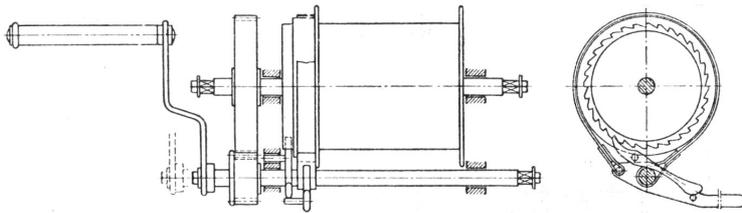


Abbildung 4-5: Handkabelwinde¹

mit Antriebskurbel, Zahnradvorgelege, Seiltrommel, Klinkengesperre, Bandreibringbremse

4.3.1.2 Riementriebe

a. Konstruktionselemente

Für Riementrieben kommen Flachriemen, trapezförmig profilierte Keilriemen oder Zahnriemen als Zugmittel in Form von geschlossenen endlosen Bändern zur Anwendung. In der Regel werden diese aus Kunststoffen hergestellt, in einigen Fällen aus Stahl und selten aus natürlichen Materialien wie Leder. Zur Erhöhung der Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit kann das Riemenmaterial durch dünne, parallel liegende Stahldrähte oder Kunststofffasern verstärkt werden.

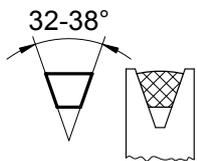


Abbildung 4-6: Keilriemen und Keilrillenscheibe

¹ Vierling: Maschinenkunde, 1943, Abb. 98, S 1855

b. Bewegungsübertragung

Die Bewegungsübertragung von der Treibscheibe auf den Riemen basiert – analog zu den Seiltrieben – auf Kraftschluss durch Reibung. Die Vorspannung des Riemens wird durch gegenseitiges Verspannen der beiden Riemenscheiben erzeugt.

Keilriemengetriebe weisen durch die zusätzliche Keilreibung in den Flanken des trapezförmigen Riemens verbesserte Übertragungseigenschaften auf. Zahnriemengetriebe besitzen durch den zusätzlichen Formschluss in der Verzahnung von Riemen und Treibscheibe eine Sicherung gegen durchrutschen.

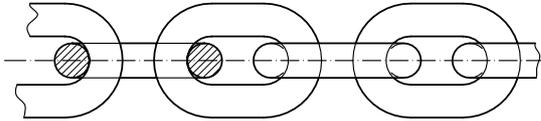
c. Anordnung als Bewegungsgetriebe

Die Vorteile der Riemengetriebe liegen in der elastischen Kraftübertragung, dem geräuscharmen Lauf und der annähernden Wartungsfreiheit während des Betriebes. Die Tragfähigkeit der Riemen begrenzt ihren Einsatz in beweglichen Tragwerken auf kleinere Anwendungen, wie beispielsweise Schiebetüren von Aufzügen.

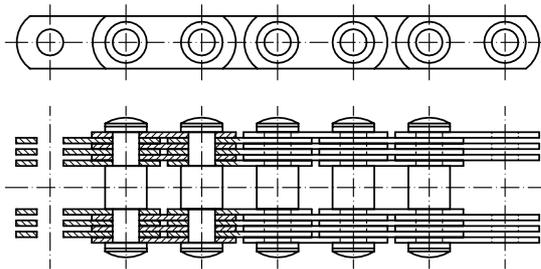
4.3.1.3 Kettentriebe

a. Konstruktionselemente

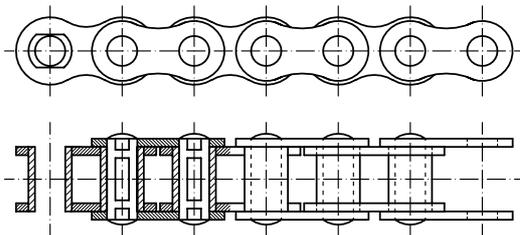
a) Rundstahlkette



b) Laschenkette (Gall'sche Kette)



c) Bolzenkette



d) Rollenkette

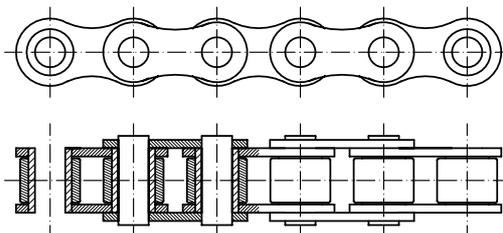


Abbildung 4-7: Ketten

Bolzenketten sind die innen liegenden Laschen fest mit einer Hülse verbunden, die äußeren Laschen mit einem Bolzen. Der Bolzen lagert drehbar in der Hülse und kann sich in dieser abwälzen (Abbildung 4-7 c).

Bei Rollenketten wird die Hülse zusätzlich durch eine drehbare Rolle umgeben (Abbildung 4-7 d), um den Verschleiß durch eingreifende Antriebsritzel zu reduzieren.

Ketten werden aus kurzen Gliedern durch Formschluss gebildet.

Rundstahlketten bestehen aus lose ineinander greifenden Kettengliedern. Die Glieder aus maschinell gebogenem Rundstahl werden ineinander gesteckt und verschweißt (Abbildung 4-7 a). Rundstahlketten können wegen des losen Ineinandergreifens räumlich geführt und einfach abgelegt werden.

Stahlgelenkketten bestehen aus Gliedern, die gelenkig mittels Bolzen verbunden sind. Die Drehachse der Bolzengelenke ist räumlich festgelegt und die Kettenführung nur in einer Ebene möglich.

Für Laschenketten werden als Stahllaschen durch Bolzen drehbar gekoppelt (Abbildung 4-7 b). Die Anordnung mehrerer Laschen erlaubt zwar große Zugkräfte, die kleinen Berührungsflächen zwischen den Blechlaschen und den Bolzen führt jedoch zu einer hohen Beanspruchung des Kettengelenks und entsprechend erhöhtem Verschleiß durch eine Bewegung. Laschenketten (wie die Gall'sche Kette) werden daher bevorzugt als wenig bewegte Lastketten eingesetzt.

Der Verschleiß kann durch Vergrößern der Kontaktfläche im Gelenk und durch Schmierung der Kette reduziert werden. Bei

Für eine höhere Tragfähigkeit können zwei oder mehrere nebeneinander liegende Kettenstränge über gemeinsame Bolzen zu Mehrfachketten verbunden und durch nebeneinander liegende Ritzeln angetrieben werden.

Die Glieder der Ketten können den jeweiligen Anforderungen entsprechend geformt werden, wie beispielsweise die zahnbesetzten Glieder von Kettensägen.

b. Bewegungsübertragung

Die formschlüssige Bewegungsübertragung erfolgt bei Rundstahlketten über eine entsprechend geformte Kettennuss und bei Stahlgelenkketten über Kettenritzel.

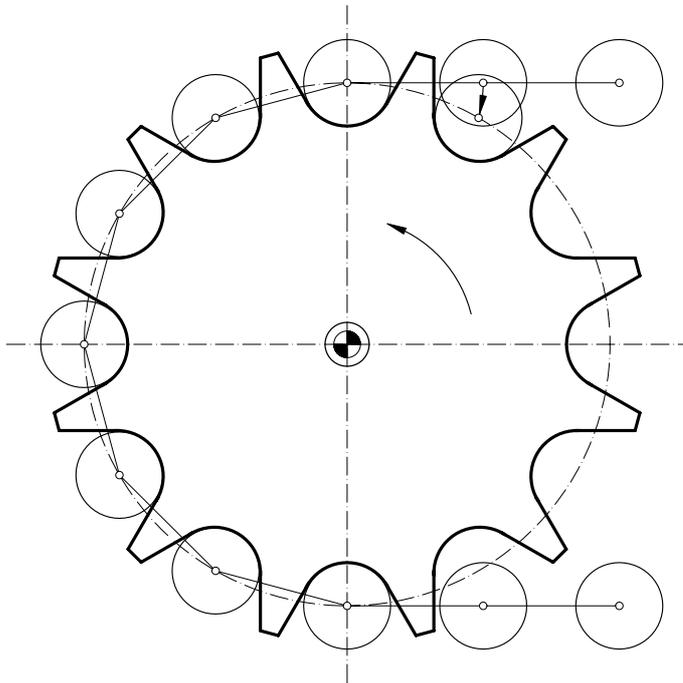


Abbildung 4-8: Kettenritzel für Stahlgelenkketten

Die Kettenritzel sind mit Zähnen versehen, die zwischen die Kettenbolzen eingreifen und die Kette antreiben. Das Verzahnungsprofil wird so ausgebildet, dass der Zahnkopf auch nach einer gewissen Verlängerung der Kettenglieder nicht zum Tragen kommt (Abbildung 4-8). Der Durchmesser der Kettenritzel kann auf Grund der guten Drehbarkeit der Gelenkkette klein gehalten werden, die Anzahl der Zähne sollte jedoch mindestens zehn betragen und der Umschlingungswinkel der Kette größer als 120° sein. Ketten werden nur mit geringer Vorspannung aufgelegt. Um einen ausreichenden Kontakt zwischen Kette und Ritzel zu ermöglichen, ist daher eine Anordnung nach Abbildung 4-9 mit der Neigung der Achsline bis maximal 60° gegenüber der Horizontalen günstig

Die Vorteile der Kettentriebe gegenüber den Seiltrieben liegen im geringen Durchmesser der Antriebsscheibe und dem formschlüssigen Antrieb. Nachteile ergeben sich aus der geringeren Tragfähigkeit, weniger Laufruhe und der erforderlichen Schmierung der Kette¹.

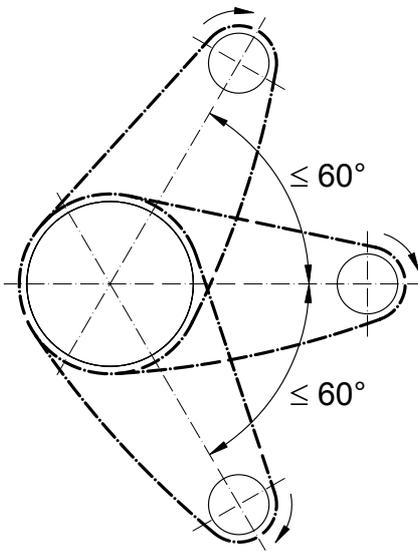


Abbildung 4-9: Günstige Anordnung von Gelenkkettentrieben

c. Anordnung als Bewegungsgetriebe

Zum Heben und Senken von beweglichen Tragwerken über geringere Strecken werden Ketten wegen des geringeren Platzbedarfs bevorzugt. Der bewegliche Tragwerksteil wird in einer Führungseinrichtung vertikal gelagert und mit Hubketten über ein Umlenkritzel mit einem Gegengewicht verbunden. Der Antrieb erfolgt in der Regel über eine eigene Antriebskette die einen Getriebemotor mit einer Antriebswelle verbindet, über welche die Hubketten synchron bewegt werden.

Für kontinuierliche Bewegungen finden umlaufende Ketten Einsatz, die ähnlich umlaufenden Seiltrieben angeordnet sind. Wegen des relativ hohen Eigengewichts der Kette ist der Einsatz umlaufender Ketten aber auf kleinere Anwendungen beschränkt.

Eine Sonderform eines Kettentriebes findet sich in Seiltraktoren, die als Antriebe für ein wandelbares Dach entwickelt wurden (vgl. Kap.5, Dächer – Bad Hersfeld, Entwurf: Frei Otto). Ein befahrbares Seil wird von zwei gegeneinander verspannten Kettenraupen eingeklemmt. Durch Antrieb einer Kette über ein Ritzel wird der Traktor entlang des eingeklemmten Seiles bewegt.

¹ Für die Betriebsgeschwindigkeiten in beweglichen Tragwerken (bis ca. 1 m/s) reicht die periodische Schmierung von Hand aus.

4.3.2 Druckmittelgetriebe

In Druckmittelgetrieben erfolgt die Bewegungsübertragung durch ein ausschließlich druckfestes Element, dem Druckmittel, das in Form einer Flüssigkeit für Hydraulikgetriebe, eines Gases für Pneumatikgetriebe oder fester Körper für Druckmittelgetriebe mit festen Druckmitteln Einsatz findet.

Flüssige und gasförmige Druckmittel sind in einen Behälter eingeschlossen. Nach der Ausformung des Behälters können zwei Gruppen von Druckmittelgetrieben unterschieden werden. Zur ersten Gruppe zählen die eigentlichen Druckmittelgetriebe mit einem Hohlkörper, meist zylindrischer Form und entsprechend geformtem Kolben, der durch das Druckmittel in der Zylinderkammer bewegt wird. Die zweite Gruppe bilden Membrankonstruktionen, die durch das Druckmittel gespannt und bewegt werden. Sie stellen eine Sonderform dar, da sie nur selbst bewegt werden und nicht dem Bewegungsantrieb von Tragwerksteilen dienen.

Als Druckflüssigkeit in Arbeitszylindern wird vorwiegend Hydrauliköl eingesetzt, welches das früher verwendete Presswasser ablöst, während Druckluft als gasförmiges Druckmittel verwendet wird. Als feste Druckmittel sind Stahlkugeln, Stahlbänder oder besondere Gliederketten mit kontinuierlicher Führung möglich.

Hydraulikzylinder stellen mit Abstand die wichtigsten Druckmittelgetriebe dar. Ihre Vorteile liegen in der weitestgehend starren Bewegungsübertragung, der Dauerhaftigkeit, den geringen Abmessungen bei großer Leistung, der einfachen Bewegungsübertragung durch Rohrleitungen und Schläuche und der einfachen Messbarkeit des Weges und der Kraft im Betriebszustand.

4.3.2.1 Hydraulikgetriebe

Aus der untergeordneten Gruppe der durch Flüssigkeit bewegten Membrankonstruktionen sind Schlauchwehre zu erwähnen. Die Wehre werden jeweils aus einem Schlauch gebildet, der allseitig dicht mit der Flusssohle abschließt. Durch Steuerung der Druckwassermenge im elastischen Schlauch wird die Wehrhöhe reguliert (Abbildung 4-10).

Die kontinuierliche Weiterentwicklung der Hydraulikzylinder führte zu weitestgehend typisierten Baugruppen, die entsprechend den Anforderungen im Tragwerk zusammengestellt und universell eingesetzt werden können.

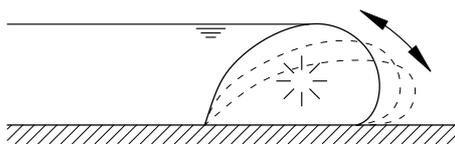


Abbildung 4-10: Schlauchwehr : Prinzipskizze Querschnitt

a. Konstruktionselemente

Arbeitszylinder bestehen aus einem Hohlzylinder und einem Kolben. Der Kolben ist gegenüber dem Zylinder verschieblich gelagert und taucht in die abgedichtete Zylinderkammer ein oder erschließt die Zylinderkammer mit der Kolbenscheibe ab. Über eine Zuleitung wird Hydrauliköl in die Zylinderkammer gedrückt und der Kolben bewegt (Abbildung 4-11).

Einfachwirkende Zylinder besitzen eine Kammer. Der Kolben wird in eine Richtung angetrieben und aus dem Zylinder gedrückt oder bei entsprechender Anordnung der Kammer in den Zylinder eingezogen. Für die Rückstellbewegung ist eine äußere Kraft notwendig. Tauchkolben führen zu einfachen und wirtschaftlichen Arbeitszylindern, da die Kolbenstange in die Zylinderkammer taucht ohne die Zylinderinnenwand zu berühren, wodurch die Bearbeitung der Zylinderinnenseite entfallen kann und nur eine Dichtung zwischen Kolbenstange und Zylinder notwendig ist (Abbildung 4-11 a).

Scheibenkolben werden eingesetzt, um eine bessere Kraftübertragung durch die vergrößerte Kolbenfläche zu erreichen (Abbildung 4-11 b) oder um den Zylinder in zwei Kammern zu teilen und als zweifachwirkende Zylinder den Antrieb in beide Richtungen zu ermöglichen (Abbildung 4-11 d). Die Kolbenstange kann je nach Erfordernis ein- oder zweiseitig angeordnet werden (Abbildung 4-11 e und f).

Der Hub herkömmlicher Hydraulikzylinder ist durch die Länge der Zylinderkammer beschränkt. Teleskopkolben, mit ineinander greifenden Hohlzylindern, finden daher in Fällen beengter Platzverhältnisse Einsatz (Abbildung 4-11 c).

Wegen der Empfindlichkeit gegen Querkräfte sind Hydraulikzylinder gelenkig zu lagern. Für die wirkenden Axialkräfte ist er auf Zug bzw. Druck und Ausknicken auszulegen. Die häufigsten Lagerungen und zugehörige Knickfälle sind in Abbildung 4-12 dargestellt.

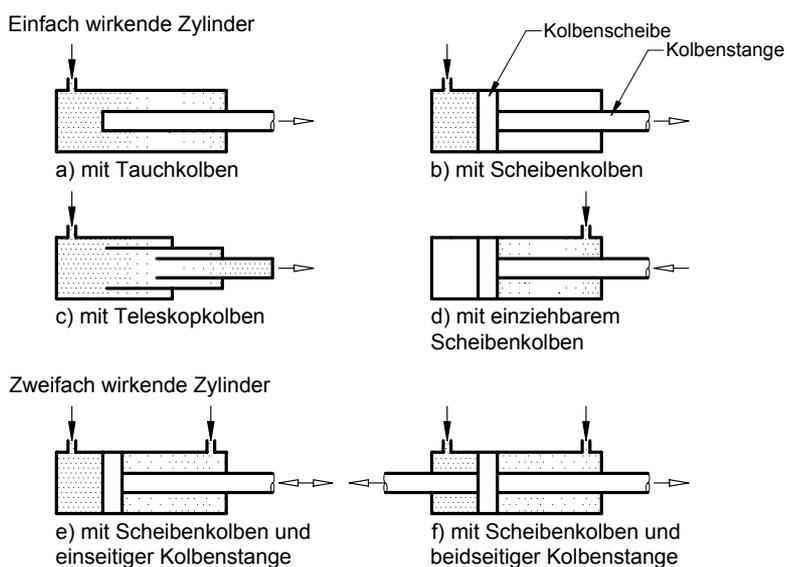


Abbildung 4-11: Arbeitszylinder

4.3.2.2 Pneumatikgetriebe

Pneumatikzylinder finden für den Antrieb von Türen und Klappen oder anderen Objekten Einsatz. Sie weisen gegenüber den Hydraulikzylindern ein elastisches Verhalten auf, das aus der Kompressibilität der Druckluft resultiert. Zum Schutz gegen Überlastung kann ein Ventil angeordnet werden, das überschüssige Druckluft entweichen lässt. Pneumatikzylinder werden auch als Haltungetriebe in der Funktion als Federn und Dämpfer eingesetzt.

Zur Sonderform der pneumatischen bewegten Membrankonstruktionen zählen Traglufthallen, deren Dachmembran durch einen Überdruck im Innenraum gespannt wird und pneumatische Konstruktionselemente oder Pneus aus schlauch- oder kissenförmigen Membranen, die durch Innendruck gespannt und versteift werden.

4.3.2.3 Druckmittelgetriebe mit festen Druckmitteln

a. Konstruktionselemente

Feste Druckmittel bilden durch losen Kontakt oder formschlüssige Verbindung eine biegsame Kette oder bestehen aus einem biegsamen Band mit ausreichender Elastizität. Um das seitliche Ausweichen des Druckmittels zu verhindern muss es in einer entsprechenden Führung bewegt werden (Abbildung 4-13).

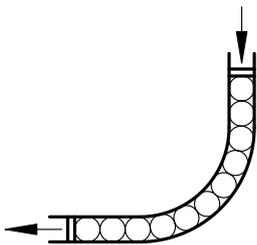


Abbildung 4-13: Beispiel für ein Druckmittelgetriebe mit Kugeln

b. Anordnung als Bewegungsgetriebe

Stahlbänder werden in Dreh-Kippfenstern zur Übertragung der Bewegung vom Kipphebel auf die Arretierungen eingesetzt¹. Sie laufen in einer Führungsschiene und können in einer Ebene umgelenkt werden. Die Anwendung ist auf kleinere Maßstäbe und Kräfte beschränkt, da der Kontakt mit der Führung, vor allem an der Umlenkstelle, zu Reibungsverlusten führt.

Eine Sonderform der Stahlgliederketten findet ebenfalls als Druckmittel Einsatz. Die Kettenglieder sind derart geformt, dass sie nur auf eine Seite um die Bolzen drehbar sind. Durch die Anordnung von zwei Ketten, die sich beim Ausfahren ineinander Verzahnen und gegeneinander abstützen, ist der Einsatz als Druckmittel ohne fixe Führungseinrichtung möglich (Abbildung 4-14). Dieser als Druckmittelgetriebe verwendete Kettentrieb, findet sich als Antrieb

¹ vgl. Kap.5, Anwendungsbeispiele – Wände – Dreh-Kippfenster

von Klappfenstern¹. Die Lösung ist platzsparend, die Ketten werden durch kleine Ritzel aus dem Fensterrahmen geschoben bzw. in diesen eingezogen.

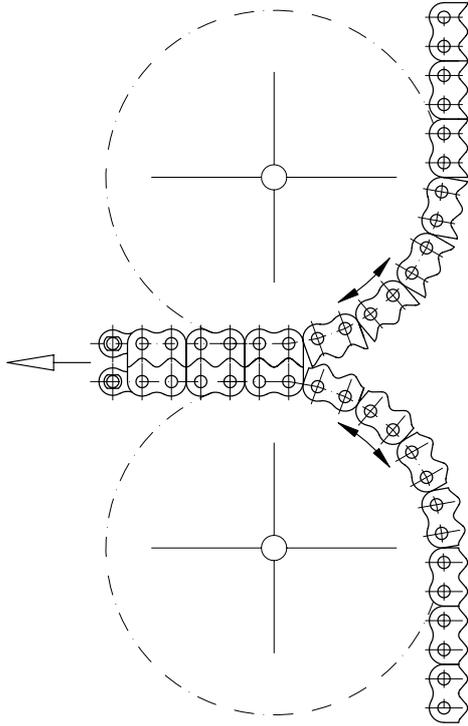


Abbildung 4-14: Stahlgliederketten als Druckmittel

¹ z.B. für Klappfenster der Pinakothek der Moderne, München (Entwurf: Braunfels)

4.3.3 Rädergetriebe

Rädergetriebe übertragen Bewegungen durch Abrollen eines Rades auf einem weiteren Rad oder einer Schiene bzw. Stange. Abhängig vom Verhältnis der Raddurchmesser steht die Abtriebsbewegung in einem Übersetzungsverhältnis zur Antriebsbewegung.

Die Bewegungsübertragung erfolgt entweder durch formschlüssige Verzahnung in Zahnradgetrieben oder durch kraftschlüssige Reibungsverbindung in Reibradgetrieben.

In der Regel dienen Zahnräder dem Antrieb, während die Reibradgetriebe aus Laufrad und Schiene der Bewegungsführung dienen. Bei ausreichendem Raddruck eignen sich Reibräder auch zur Bewegungsübertragung.

4.3.3.1 Zahnradtriebe

Das Ineinandergreifen der Zahnräder ermöglicht eine formschlüssige, schlupffreie Bewegungsübertragung und erlaubt hohe Übertragungskräfte. Die Arretierung kann bis zu einem bestimmten Lastniveau direkt durch die Verzahnung erfolgen.

a. Konstruktionselemente

Nach der geometrischen Lage der Radachsen werden verschiedene Anordnungen von Zahnradpaaren unterschieden.

Liegen die Radachsen parallel zueinander, so berühren sich die Zahnräder auf ihrer Stirnseite, die Zahnräder bilden ein Stirnradpaar (Abbildung 4-15 a). Ein außenverzahntes Stirnrad kann für Drehbewegungen mit einem zweiten aussenverzahnten oder einem innenverzahnten Stirnrad kombiniert werden oder für Translationsbewegung mit einer Zahnstange. Die Zahngeometrie wird dabei derart gewählt, dass die Zahnflanken immer gegenseitig abrollen ohne aneinander zu gleiten, was zu unerwünschtem höherem Verschleiß führen würde. Die häufigste Zahnform für Stirnräder ist die Evolventenverzahnung¹. Eine Sonderform ist die Triebstockverzahnung, bei der die Zähne eines Zahnrades in ein zweites mit drehbaren Bolzen versehenes Rad oder eine Stange eingreifen. Triebstockverzahnungen stellen eine günstige und dauerhafte Lösung dar, werden für schwere Ausführungen, beispielsweise Hubeinrichtungen im Wasserbau eingesetzt und finden sich in historischen Zahnradtrieben.

Schneiden sich die Radachsen, so liegt ein Kegelradpaar vor. Die Walzflächen sind Kegel und übertragen die Drehbewegung von der Antriebswelle auf die in einem Winkel zu ihr stehende Abtriebswelle (Abbildung 4-15 b).

Ein Schneckenradpaar liegt vor, wenn die Achsen windschief zueinander stehen (Abbildung 4-15 c). Die Schnecke ist eine Schraube, ihre Zähne beschreiben eine Kombination aus Rollen und Gleiten in der Kontaktfläche. Wird das Schneckengewinde entsprechend flach gewählt, so tritt

¹ Weiterführend zu Zahnradgetrieben siehe : Niemann, Winter: Zahnradgetriebe, 1983, Zirpke: Zahnräder, 1964 und Volmer: Getriebetechnik, 1987, S.304

durch die Gleitreibung Selbsthemmung ein. Das heißt, die Bewegungsübertragung ist nur mehr in eine Richtung, von der Schnecke auf das Zahnrad möglich und wird in die Gegenrichtung gehemmt. Diese Selbsthemmung wird zur Arretierung genützt.

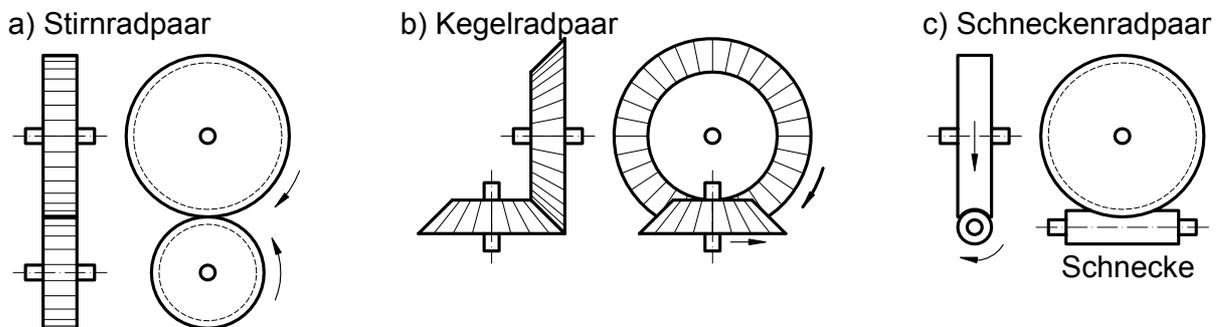


Abbildung 4-15: Zahnradpaare

b. Bewegungsübertragung

Der Antrieb der Zahnräder erfolgt im Allgemeinen durch Elektromotoren. Zur Verbesserung der Verschleißigenschaften werden langsam laufende Zahnradtriebe mit Fett und schnell laufende mit Öl geschmiert.

c. Anordnung als Bewegungsgetriebe

Eine häufige Anwendung von Zahnradtrieben findet sich in Kombination mit Laufrädern, welche der Bewegungsführung dienen. Die Bewegungsübertragung vom Antriebsritzel erfolgt entweder auf eine Zahnstange, die parallel zur Führungsschiene angeordnet ist¹ (Abbildung 4-16 a) oder auf ein zweites Zahnrad, das ein Laufrad antreibt, welches durch Reibung auf der Schiene abrollt² (Abbildung 4-16 c). Der Antrieb befindet sich in diesen Fällen am beweglichen Tragwerk.

Für Hubbewegungen kann das Antriebsritzel am ortsfesten Tragwerk angeordnet werden um das bewegliche Tragwerk über eine Zahnstange anzutreiben³ (Abbildung 4-16 b).

Eine Rotationsbewegung wird mit zwei Stirnrädern erzeugt. Ein umlaufendes Ritzel rollt gegenüber einem fixen Zahnrad ab und erzeugt eine Drehung. Das fixe Zahnrad kann dabei mit Außenverzahnung⁴ (Abbildung 4-16 d) oder mit Innenverzahnung (Abbildung 4-16 e) ausgeführt sein.

¹ vgl. Kap.5 Anwendungsbeispiele – Dächer – Rathaus Wien

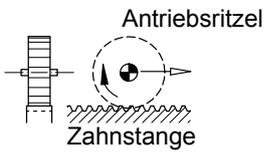
² vgl. Kap.5 Anwendungsbeispiele – Dächer – Collonial Stadium

³ vgl. Kap.5 Anwendungsbeispiele – Brücken – Waagbalken-Klappbrücken, Mannheim

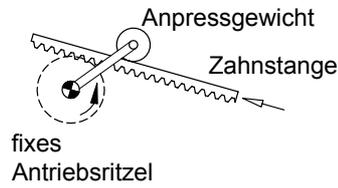
⁴ vgl. Kap.5 Anwendungsbeispiele – Wände – Stadthalle Graz, Drehtore

Translation

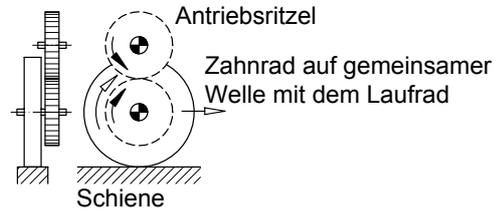
a) mittels fixer Zahnstange



b) mittels beweglicher Zahnstange

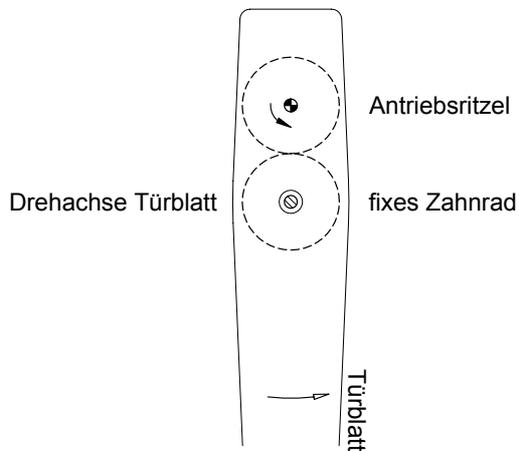


c) über Laufrad und Schiene



Rotation

d) mittels aussenverzahnten Zahnrädern



e) mittels innenverzahnten Zahnrädern

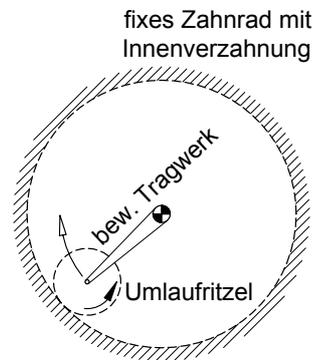


Abbildung 4-16: Mögliche Anordnungen von Stirnradpaaren

4.3.3.2 Reibradgetriebe

Reibräder für den Antrieb werden in der Regel über Zahnräder angetrieben und wurden daher im vorigen Abschnitt behandelt.

Für Reibräder zur Bewegungsführung siehe Abschnitt 4.4.2 Rädergetriebe – Laufräder und Schienen (s.S. 77ff).

4.3.4 Schraubenge triebe

a. Konstruktionselemente

Schraubenge triebe weisen eine Paarung aus Schraube und Mutter mit entsprechendem Gewinde auf. Die beiden Elemente gleiten während der Bewegung mit ihren Gewindeflanken aneinander. Das eine Element beschreibt eine Drehung, während das zweite in axiale Richtung verschoben wird. Von der Gewindeneigung hängt einerseits das Übersetzungsverhältnis dieser beiden Bewegungen ab und andererseits die Bewegungsmöglichkeiten zwischen Mutter und Schraube.

In Steilschrauben kann der Antrieb sowohl durch Drehung als auch durch Verschiebung eines der beiden Elemente erfolgen. Beispielsweise führt eine Drehung der Spindel zur Verschiebung der Mutter und umgekehrt.

Schrauben mit flachem Gewinde¹ sind selbsthemmend. Ihr Antrieb ist nur mehr durch Drehen eines Elements möglich. Die Reibungskräfte im Gewinde verhindern einen Antrieb durch Verschieben. Eine Drehung der Spindel führt zur Verschiebung der Mutter, aber umgekehrt kann durch Verschieben der Mutter in diesem Fall keine Bewegung mehr erzeugt werden. Die Bewegungsübertragung ist in eine Richtung gesperrt.

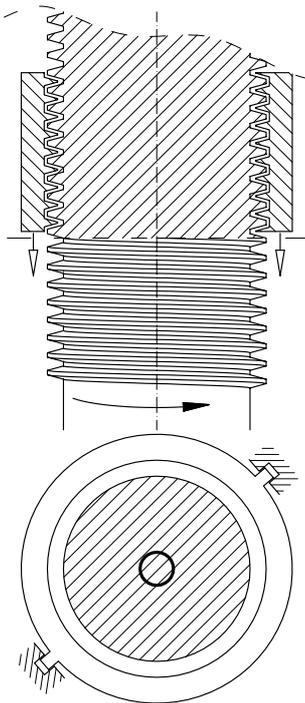
Diese Selbsthemmung wirkt bei allen Befestigungsschrauben und kann für die selbsttätige Arretierung der Schraubenge triebe genützt werden.

b. Bewegungsübertragung

Der Antrieb erfolgt in der Regel über Zahnradge triebe, welche die Schraube oder selten die Mutter in Drehung versetzen. Bewegungsschrauben werden zur Reduktion der Reibungswiderstände mit Fett geschmiert. Die Wahl der Gewindeneigung richtet sich nach den Kräfteverhältnissen, dem Übersetzungsverhältnis und dem Wunsch nach Selbsthemmung.

¹ Die Gewindeneigung α für Selbsthemmung ergibt sich bei einem Reibungskoeffizienten μ zu $\alpha = \arcsin(\mu)$ (Für $\mu = 0,1$ ist $\alpha = 5,7^\circ$)

a) flaches Gewinde
Der Antrieb ist nur durch Drehung möglich



b) steiles Gewinde
Der Antrieb ist auch über Verschiebung möglich

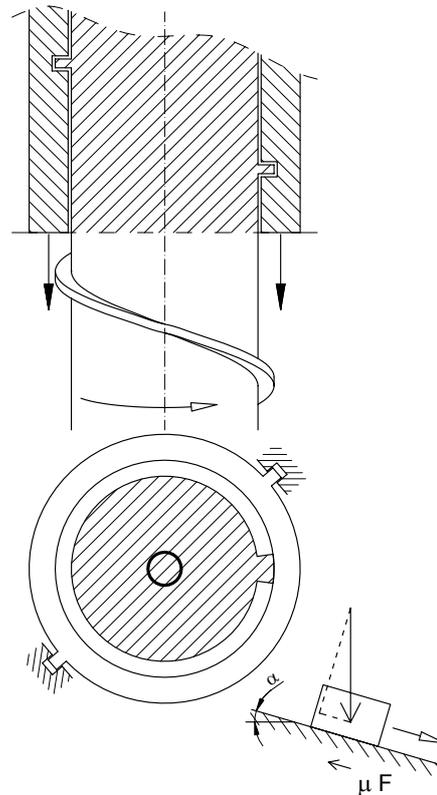


Abbildung 4-17: Schraubentriebe mit unterschiedlichen Gewindeneigungen

c. Anordnung als Bewegungsgetriebe

Als Hubeinrichtung können synchronisierte Schraubentriebe einen vertikal geführten Tragwerksteil antreiben, wie in Abbildung 4-18.

Spindelpressen können gleich wie Hydraulikzylinder verkürzt und verlängert werden, indem eine Schraube mit zwei gegenläufigen Gewinden elektrisch angetrieben wird.

Anordnung eines Schraubentriebes

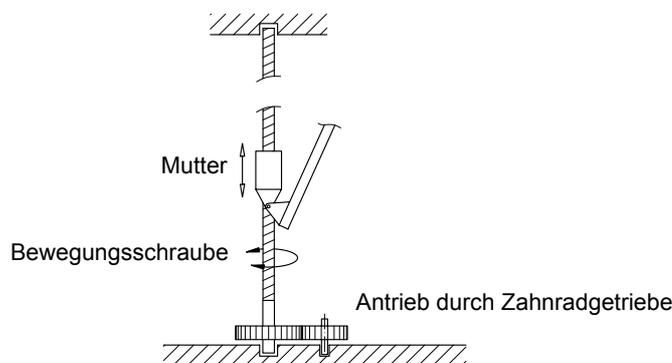


Abbildung 4-18: Beispiel für den Antrieb durch ein Schraubenge triebe

4.4 Führungsgetriebe und -einrichtungen

4.4.1 Befahrbare Seile

Befahrbare Seile werden von beweglichen Tragwerksteilen durch Rollen oder Gleitschlitten befahren. Sie dienen, wie auf S. 50 beschrieben, der Lastabtragung und der Bewegungsführung. Befahrbare Seile sollten ausreichend tragfähig sein und einen stabilen Querschnittsaufbau mit vorzugsweise glatter Oberfläche für bessere Laufruhe aufweisen und müssen nur in geringem Maß biegsam sein. Im Allgemeinen werden daher vollverschlossene Spiralseile mit Stahleinlage verwendet.

a. Anordnung als Führungseinrichtung

Die Lagerung und Führung des zu bewegenden Tragwerksteiles kann über Wagen mit entsprechend geformten Laufrollen oder Gleitschlitten mit einer Schicht aus Teflon¹ oder weichem Metall erfolgen. In jedem Fall ist der Wagen oder Schlitten konstruktiv gegen ein abkommen vom Seil zu sichern.

Der Antrieb der Wagen entlang des Fahrseiles erfolgt entweder über jeweils einen Seiltrieb oder über Seiltraktoren direkt am Wagen. Als Seiltrieb kommt ein umlaufendes Seil für die Bewegung in beide Richtungen über eine Treibtrommel in Frage. Als Traktoren wurden Kettenraupen ausgeführt, die auf das Fahrseil geklemmt werden².

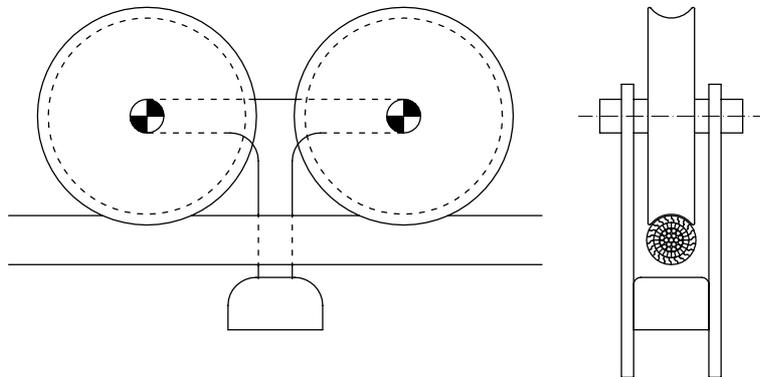
Im Falle größerer Spannweiten sind befahrbare Seile entlang der Fahrstrecke mit weiteren Seilen in Querrichtung verbunden. Um es dennoch mit Schlitten befahrbar zu machen, werden zwei nebeneinander liegende Fahrseile angeordnet (Abbildung 4-19 b).

¹ Teflon = PTFE, Polytetrafluorethylen ist ein außerordentlich temperaturbeständiger und reaktionsarmer Thermoplast. Teflon wird aus Pulver unter hohem Druck in die gewünschte Form gebracht und bei 380°C gesintert. Es ist wasserabweisend, nicht brennbar und behält seine Eigenschaften im Bereich von -200 bis + 250°C.

² vgl. Kap.5 Anwendungsbeispiele – Dächer – Überdachung in Bad Hersfeld

Befahrbare Seile - Prinzipskizzen

a) mit Rollen



b) mit Gleitschlitten

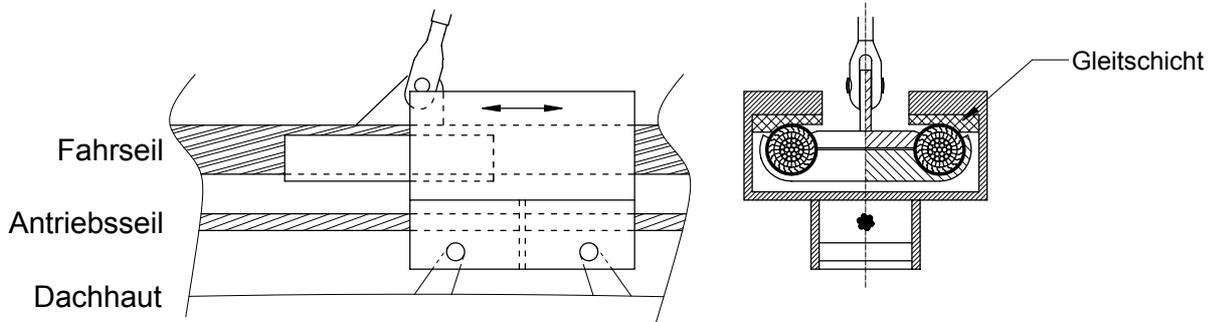


Abbildung 4-19: Befahrbare Seile

4.4.2 Rädergetriebe – Laufräder und Schienen

Laufräder dienen der vertikalen Lagerung eines Bauteiles und der Bewegungsführung entlang von Schienen. Im Bewegungszustand ist nur eine reine Abwälzbewegung zwischen Rad und Schiene erwünscht. Alle anderen Relativbewegungen zwischen Rad und Schiene werden verhindert, die vertikale Verschiebung durch Kontakt, die Verschiebung des Rades in Fahrtrichtung durch Reibschluss, die Verschiebung quer zur Schiene, eine ungewollte Verdrehung aus der Fahrtrichtung und das Kippen des Rades durch geeignete Lagerung in einem Radkasten (Abbildung 4-20).

Schienefahrwerke sind hinsichtlich Festigkeit, Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit und vor allem der Bewegungsführung den Reifenfahrwerken, mit einem auf einer Felge aufgezogenen elastischen Wulst überlegen.

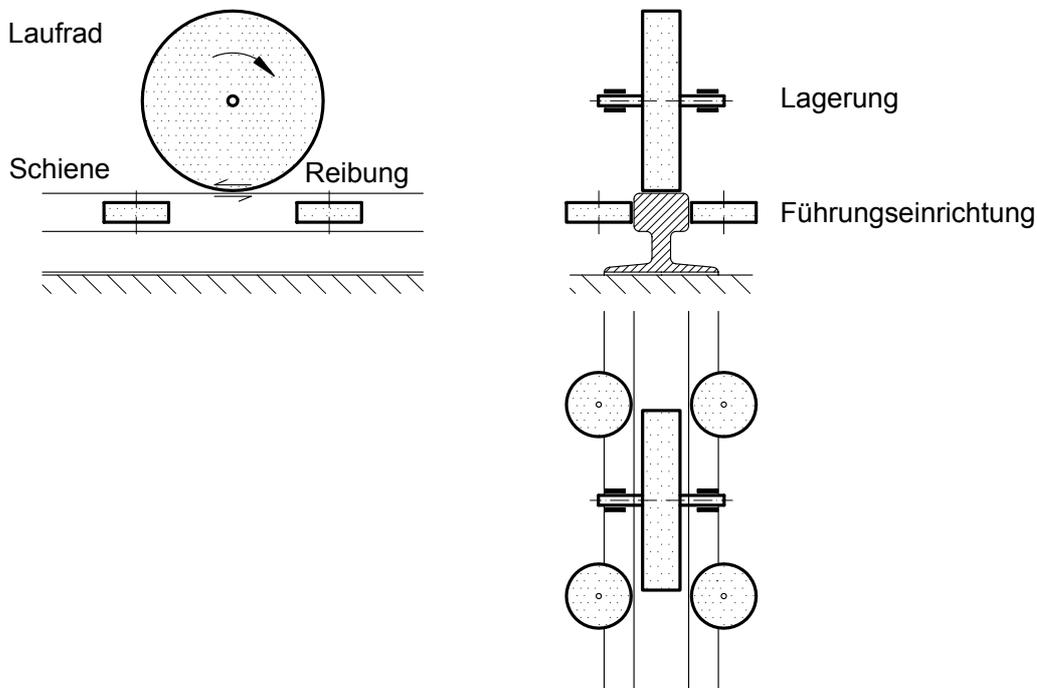


Abbildung 4-20: Laufrad und Schiene

a. Konstruktionselemente

Anordnungen für Laufrad und Schiene

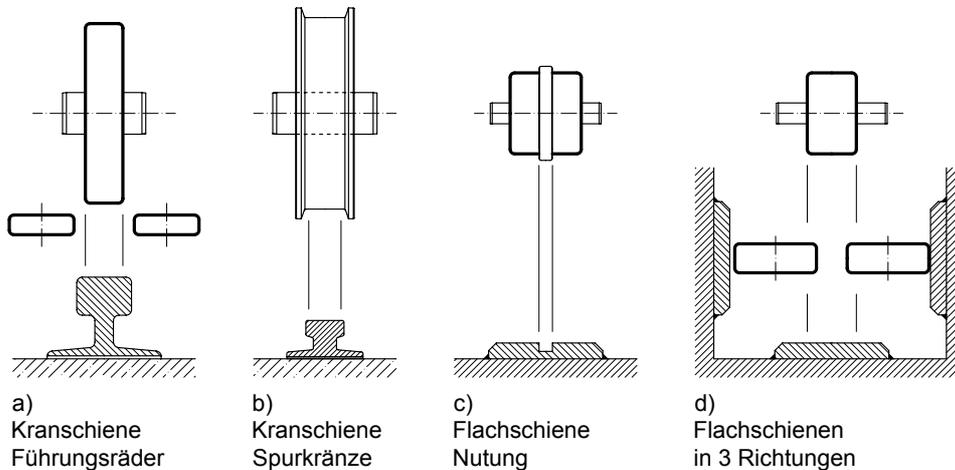


Abbildung 4-21: Anordnungen für Laufräder und Schienen

Als Schienen werden profilierte Kranschienen oder Flachschienen verwendet. Kranschienen sind mit einem massiven Kopf, breitem Steg und unterem Flansch versehen. Sie werden in der Regel mit einer elastischen Einlage unterlegt und mittels Schrauben auf den Untergrund geklemmt. Flachschienen sind seitlich angefastete Bleche, die direkt auf einen Stahluntergrund geschweißt werden. Ein Nachrichten oder ein Austausch der Schienen ist in diesem Fall nicht möglich.

Die Spurführung erfolgt mittels Spurkränzen (15-40 mm), die bei Kranschienen ein- oder beidseitig am Rand, bei Flachschienen mittig in einer Nut laufen. Zylindrische Laufräder ohne Spurkränze werden in der Regel ballig ausgeführt, um erhöhte Kantenpressungen zu vermeiden. Sind horizontale Lasten aufzunehmen, werden statt der Spurkränze horizontale Führungsrollen angeordnet.

Für Drehbewegungen werden die Laufflächen kegelförmig und die Schienen keilförmig ausgebildet, wie im Rollenkranz von Drehbrücken.

Die Pressung in der Kontaktfläche hängt vom Profil und dem Durchmesser des Laufrades ab. Der linienförmige Kontakt bei zylindrischer Lauffläche ist wegen der größeren Pressungsfläche günstiger als ein punktförmiger Kontakt zwischen einem kegeligen Rad und dem gekrümmten Querschnitt einer Profilschiene. Die Druckspannung in der nach Herz benannten Pressungsfläche kann bei Linienberührung zweier Stahlflächen vereinfacht aus

$$\sigma = 268 \sqrt{\frac{F}{d \cdot b}} \quad (\text{mit } F \dots \text{Radkraft [N], } d \dots \text{Raddurchmesser [mm], } b \dots \text{Kontaktbreite [mm]})$$

errechnet werden. Die zulässige Spannung kann für Stahlräder vereinfacht zu 500 N/mm^2 angenommen werden. Sie ist im Allgemeinen von der Werkstoffhärte und anderen Faktoren

abhängig¹. Neben Rädern aus gewalztem oder im Gesenk geschmiedetem Stahl werden Kunststoffräder, beispielsweise aus Teflon eingesetzt.

b. Anordnung als Führungsgetriebe

Für die Lagerung und Bewegungsführung von verschiebbaren Dachabschnitten und Segmenten werden in der Regel Kranschienen mit flachem Kopf und zylindrischen Laufrädern mit seitlichen Führungsrollen verwendet² (Abbildung 4-21 a). Bei großen Dächern werden die Laufräder zusammen mit seitlichen Führungsrädern auf Flachschielen in großen U-förmigen Ausnehmungen angeordnet (Abbildung 4-21 d).

Bei geringeren Lasten reichen genutete Flachschielen und Laufräder mit mittigem Spurkranz aus³ (Abbildung 4-21 c).

Zur besseren Lastverteilung werden Rollenwägen (engl. bogies) eingesetzt. Die Rollen werden durch die Lagerung mittels Verteilerbalken gleichmäßig belastet und als Ganzes in einem Radkasten auf die Baustelle geliefert. Das Dachtragwerk kann anschließend auf die vorbereiteten Lager der Wagen gesetzt werden.

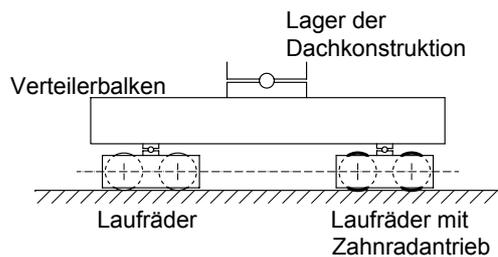


Abbildung 4-22: Aufriss eines Rollenwagens

¹ Für detaillierte Spannungsermittlung siehe Scheffler: Fördertechnik, 1994, S.120 ff

² vgl. Kap.5 Anwendungsbeispiele – Dächer – Kasematten, Graz

³ vgl. Kap.5 Anwendungsbeispiele – Wände – Schiebewände der Stadthalle, Graz

4.4.3 Gelenktriebe

Gelenktriebe werden aus Stäben oder anderen allseitig festen Elementen durch gelenkiges Koppeln gebildet und werden auch als Koppeltriebe bezeichnet.

Für bewegliche Tragwerke werden ebene Gelenktriebe zur Kurvenführung von Punkten, zur Parallelführung oder für Faltbewegungen eingesetzt. In Abbildung 4-25 sind einige Gelenktriebe dargestellt, von denen Parallelkurbeln (a) und Schubkurbeln (e) am häufigsten anzutreffen sind.

Gelenkig gelagerte An- und Abtriebselemente werden je nach Umlauffähigkeit als Kurbel bzw. Schwinge bezeichnet, dazwischen liegende Elemente dienen als Koppel der Bewegungsübertragung und beschreiben Koppelkurven (Abbildung 4-23). Ein Schieber besteht aus einem Gleitstein, der in einer geraden Kulisse hin und her gleiten kann.

Wird ein schwingendes Element als Antriebselement verwendet, so sind die Totlagen des Mechanismus zu beachten. Durch Abschlagen der Summe bzw. der Differenz der beiden anderen Elementlängen können diese leicht ermittelt werden, wie Abbildung 4-24 zeigt.

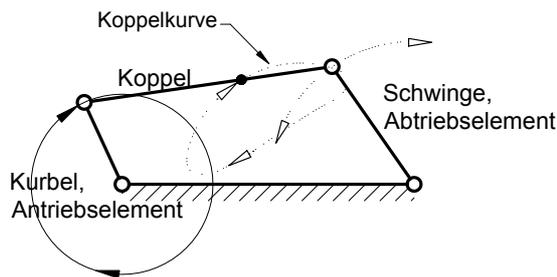


Abbildung 4-23: Elemente einer Kurbelschwinge

Totlagenkonstruktion

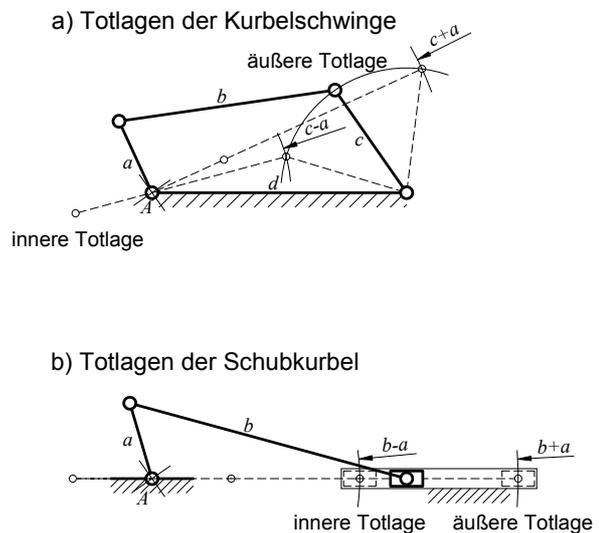
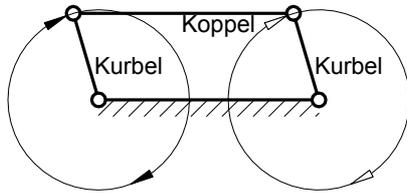


Abbildung 4-24: Totlagenkonstruktion

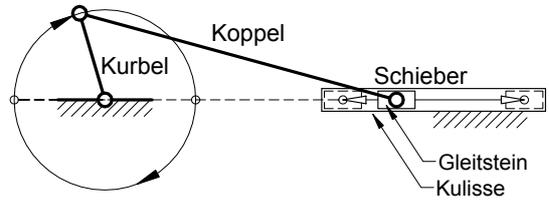
Viergelenksketten

Schubkurbelketten

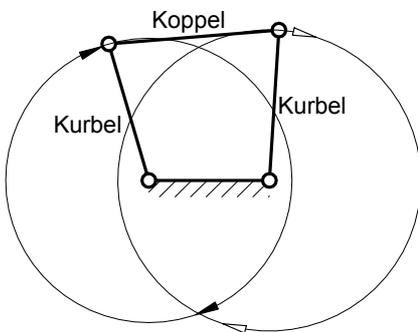
a) Doppelkurbel - Parallelkurbel



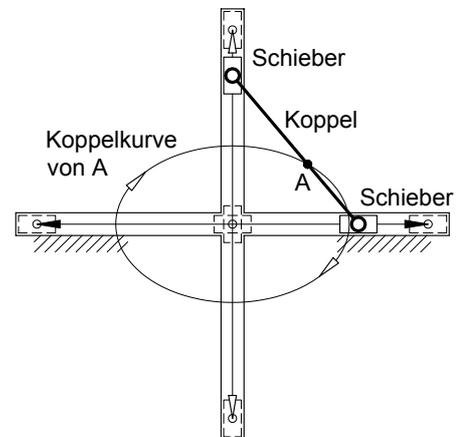
e) Schubkurbel (zentrise)



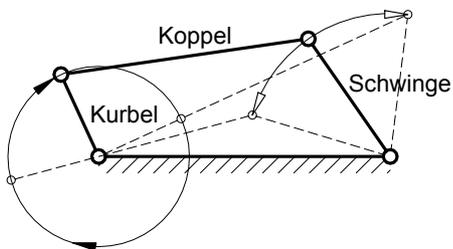
b) allgemeine Doppelkurbel



f) Doppelschieber (Ellipsenzirkel)



c) Kurbelschwinge



d) Doppelschwinge (mit schwingender Koppel)

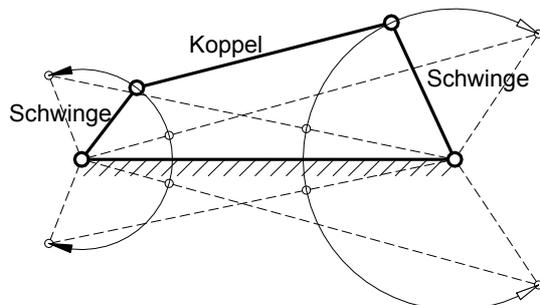


Abbildung 4-25: Gelenktriebe in unterschiedlichen Ausformungen

a. Anordnung als Führungsgetriebe

Parallelkurbeln dienen der synchronen Drehbewegung durch parallel schalten von zwei oder mehr Elementen oder der Führung eines Elements in parallelen Lagen entlang einer Kreisbahn.

Beispiele für eine synchrone Drehbewegung sind Zugbrücken, deren Gegengewicht auf dem Waagbalken parallel zur Klappe bewegt wird, um die Brücke in jeder Lage auszubalancieren¹.

Weiters sind Lamellen einer Fassade, die durch verbinden zu Parallelkurbeln synchronisiert werden, zu nennen².

Die Führung eines Elements in parallelen Lagen wird für das Heben einer historischen Sonderform einer Hubbrücke verwendet. Der Überbau der Friedrichsbrücke in Dresden³ wird an beiden Enden durch Parallelkurbeln gelagert. Die als Winkelhebel mit Radkranz ausgeführten Kurbeln werden durch eine Zahnstange angetrieben, um den Brückenüberbau auf einer Kreisbahn um 1,60 m parallel nach oben zu heben. Der Querschnitt der Brücke ist in Abbildung 4-27 dargestellt.

Gelenkstriebre können auch zur streckenweise angenäherten Geradeführung verwendet werden, wie bei dem in Abbildung 4-26 dargestellten Wippkran

Schubkurbeln werden für Falttore und ähnliche Konstruktionen eingesetzt. Abbildung 4-28 zeigt eine Anwendung für ein Industrietor, das horizontal gefaltet wird⁴.

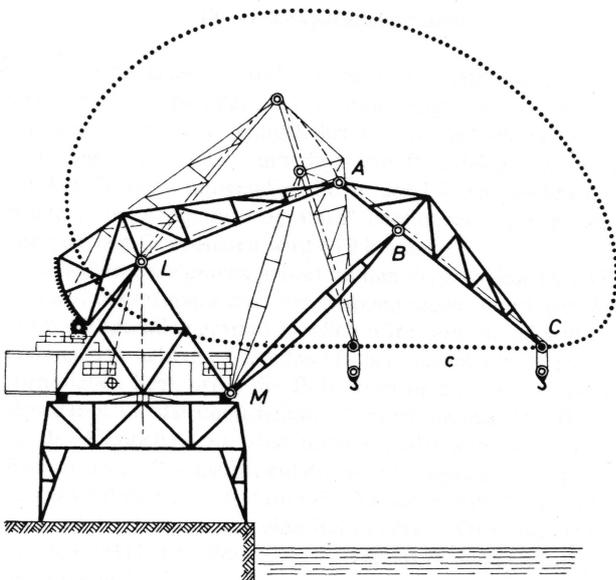


Abbildung 4-26: Doppelkurbel eines Wippkrans zur Geradeführung

¹ vgl. Kap.5 Anwendungsbeispiele – Brücken – Waagbalken-Klappbrücken, Mannheim

² vgl. Kap.5 Anwendungsbeispiele – Wände – Aurora Palace, Sydney

³ Bau der Brücke um 1900. aus Dietz: Bewegliche Brücken, 1907, S. 29

⁴ vgl. Kap.5 Anwendungsbeispiele – Wände – Earnstings Warenhaus, Coesfeld

4.4.3 Gelenkstriebe

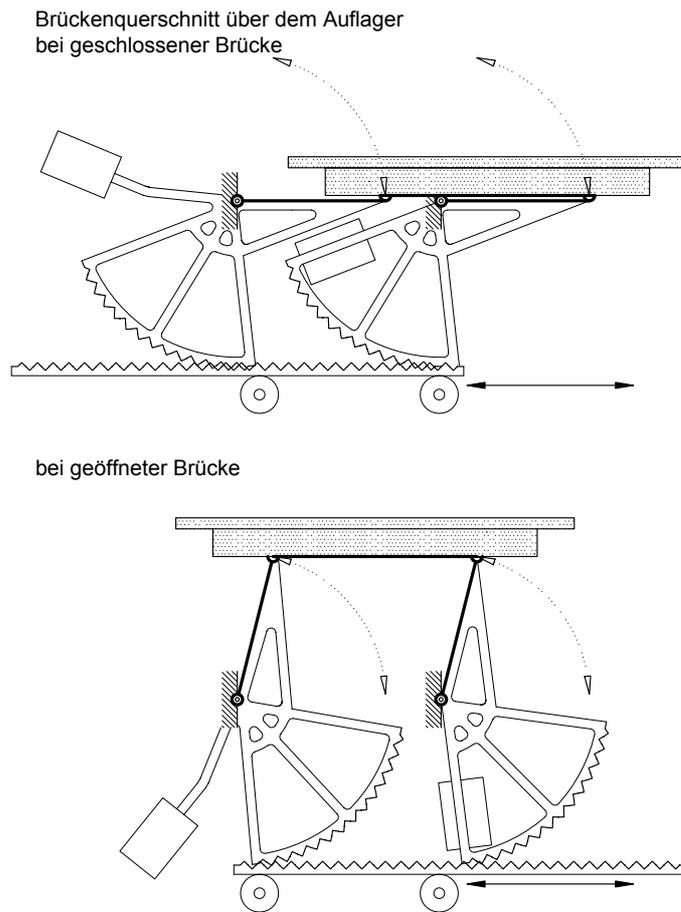


Abbildung 4-27: Parallelkurbel einer historischen Hubbrücke

Vertikalschnitt eines Faltores

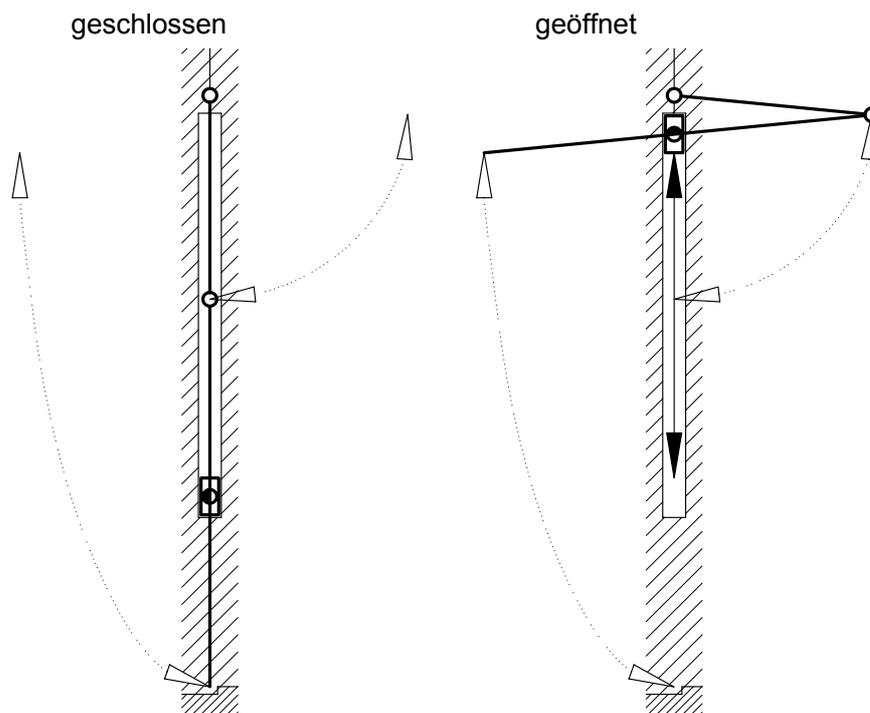


Abbildung 4-28: Schubkurbel für ein Faltdoor

4.4.4 Kurventriebe

Kurvengetriebe bestehen aus drei Gliedern, dem Steg (1), einem Kurvenglied (2) und einem Eingriffsglied (3). Die Relativbewegung von Kurvenglied und Eingriffsglied wird durch die Form der Kurvenscheibe bestimmt. Der Antrieb erfolgt in der Regel über das Kurvenglied und nur in wenigen Fällen über das Eingriffsglied. Je nach Ausführung können Kurven- und Eingriffsglied jeweils eine Rotation oder eine Translation beschreiben, wie in Abbildung 4-30 dargestellt.

Das Eingriffsglied wird als Rolle oder Gleitstück ausgeführt und ist gegen Kontaktverlust gesichert.

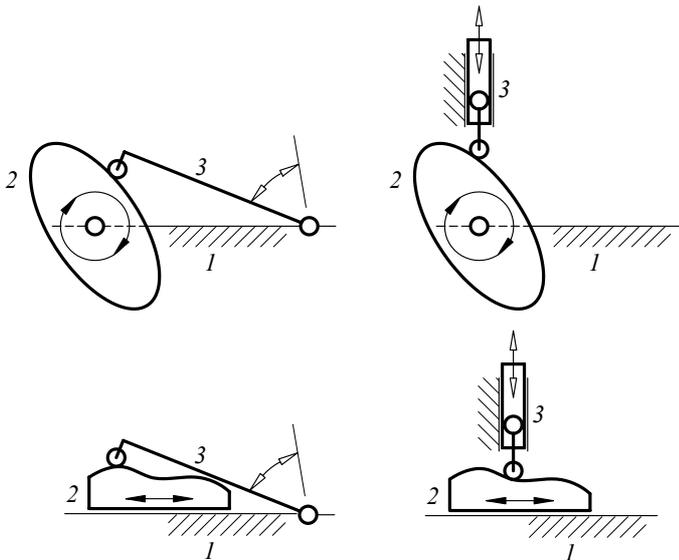


Abbildung 4-29: Mögliche Formen von Kurventrieben

Kurventriebe eignen sich für bewegliche Tragwerke wegen der ungleichmäßigen Kräfteverhältnisse und der Störungsanfälligkeit nur bedingt. Andere Getriebe entsprechen den Anforderungen im beweglichen Tragwerk in der Regel besser.

a. Anordnung als Führungsgetriebe

Als ein Anwendungsbeispiel für ein Kurvengetriebe ist ein Fassadensystem mit Blenden zu nennen¹. Jede Blende kann durch Verdrehen eines Stellringes geöffnet und geschlossen werden. Einzelne Lamellen sind drehbar gelagert und greifen jeweils mittels Eingriffsglied in eine Kurve am Stellring. Durch Verdrehen dieses Ringes werden auch die Lamellen verdreht. Die einer Kamerablende nachempfundene Konstruktion ist in Abbildung 4-30 dargestellt.

¹ vgl. Kap.5 Anwendungsbeispiele – Wände – Fassade des Arabischen Instituts, Nouvell

4.4.4 Kurventriebe

Bewegungsübertragung durch
Kurventriebe

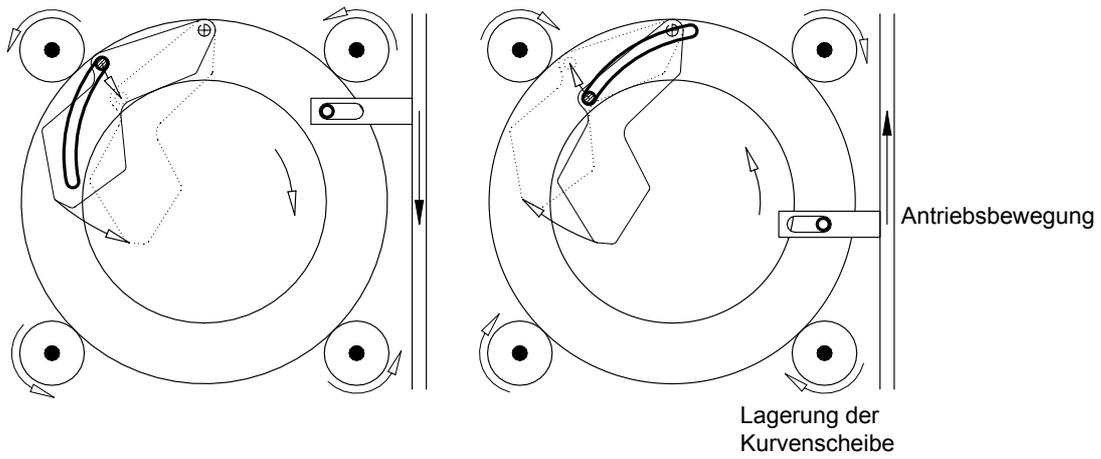


Abbildung 4-30: Bewegliche Blende für ein Fassadensystem zur Lichtsteuerung

4.5 Haltungsgetriebe und -einrichtungen

4.5.1 Spertrriebe und Hemmtriebe

Um ungewollte Bewegung gegen die Antriebsrichtung zu verhindern, werden Spertrriebe eingesetzt. Über ein Klinkengesperre wird die Bewegung nach einer Richtung formschlüssig gesperrt, indem eine Klinke mittels Feder in eine Verzahnung mit Sägezahnform greift.

Die Verzahnung kann sich auf einem Zahnrad oder einer Zahnstange befinden, die Klinke ist meist drehbar gelagert oder wird als Schieber ausgeführt, wie in Abbildung 4-31 dargestellt.

Als Hemmtriebe oder auch Bremsen funktionieren über Reibschluss und erlauben eine Regulierung der Bewegung. In einer einfachen Riemenbremse wird eine glatte Trommel von einem Riemen umschlungen, der je nach Spannung die Bewegung der Trommel durch Umfangsreibung hemmt (siehe auch Abbildung 4-5, S. 58).

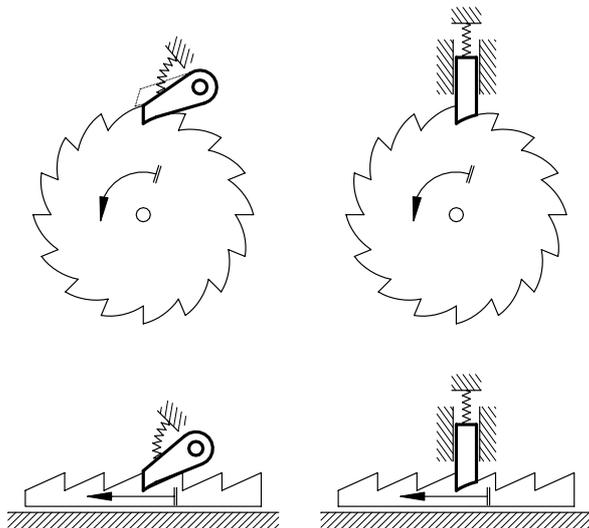


Abbildung 4-31: Anordnung von Spertrrieben

4.5.2 Arretierungen

Arretierungen dienen der Lagesicherung beweglicher Tragwerke in ihrer Parkposition als Sicherheitseinrichtungen, wenn das bewegliche Tragwerk unvorhergesehen angehalten werden muss oder zur Aufnahme von Toleranzen beim zusammentreffen beweglicher Tragwerksteile.

Die häufigste Art der Arretierung ist eine formschlüssige Verbindung durch einen ausfahrbaren Verschlussbolzen, der in der Regel elektrisch bzw. hydraulisch aus einem Köcher in eine Buchse oder Nische geschoben wird. Zur Aufnahme von Toleranzen ist der Bolzen mit rundem oder rechteckigem Querschnitt meist konisch geformt.

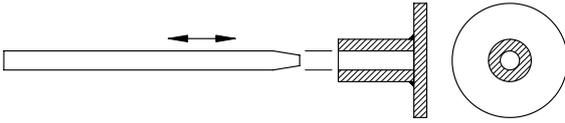


Abbildung 4-32: Arretierbolzen und Buchse

Bei schienengeführten Objekten werden zur Sicherung Klemmvorrichtung (engl. rail-clamps) vorgesehen, deren Klemmbacken nach Lösen einer Arretierung durch Federn seitlich auf die Schienen geklemmt werden, um eine unerwünschte Bewegung zu behindern.

4.6 Weitere Einrichtungen

4.6.1 Lager

Im kinematischen System wurden die Koppelungen und Lagerungen idealisiert betrachtet. Bei der baulichen Durchbildung zum beweglichen Tragwerk ist diese Idealisierung durch Lager zu realisieren.

Zwei Bauteile können im Raum allgemein sechs gegenseitige Relativbewegungen beschreiben. Ein Lager ist als Konstruktionsglied zwischen diesen Bauteilen angeordnet. Es dient dazu, einzelne Relativbewegungen zu ermöglichen und die restlichen Relativbewegungen durch die Übertragung von Kräften in ihre jeweilige Richtung zu sperren.

Die Lager für bewegliche Tragwerkselemente haben große Relativbewegungen aufzunehmen und um sind möglichst reibungsarm auszubilden um den Verschleiß gering zu halten. Lager sind Maschinenelemente, die gegenüber den Tragwerksteilen eine kürzere Haltbarkeit aufweisen und daher auswechselbar zu gestalten sind.

Die Bewegungen im Lager werden jeweils durch Dreh- und Verschiebungsmechanismen ermöglicht. Diese sind a) Verformen einer elastischen Schicht zwischen zwei Lagerkörpern, b) gegenseitiges Abwälzen zweier Lagerkörper oder c) gegenseitiges Gleiten zweier Lagerkörper. Wegen der größeren Bewegungskapazität werden für bewegliche Tragwerksteile im Allgemeinen nur Wälz- und Gleitlager eingesetzt und untereinander kombiniert.

Als Verschiebungsmechanismen zwischen zwei Lagerteilen werden für Wälzlager in der Regel Rollen oder Rädern am beweglichen Teil angeordnet und für Gleitlager eine Teflonschicht in Gleitpaarung mit einer Stahlfläche aufgebracht.

Als Verdrehungsmechanismen zwischen zwei Lagerteilen werden für Wälzlager mehrere Wälzkörper in Form von Zylindern, Kugeln oder Kegeln zwischen Lagerringen angeordnet und durch einen so genannten Käfig gegen ausweichen gehalten. Für Gleitlager wird eine Paarung von zylindrischen oder kugelförmigen Gleitflächen mit Teflonbeschichtung verwendet.

Um Fluchtungsfehler und Schiefstellungen der Drehachse aufzunehmen, werden Pendellager verwendet, deren Kugelflächen sich durch entsprechende Wälzkörper gegeneinander abwälzen oder durch eine Gleitschicht aneinander gleiten.

Die Bezeichnung Radiallager und Axiallager bezieht sich auf die Kraftübertragung im Lager. Radiallager sind in der Lage radial zur Drehachse gerichtete Kräfte zu übertragen, Axiallager solche in Achsrichtung.

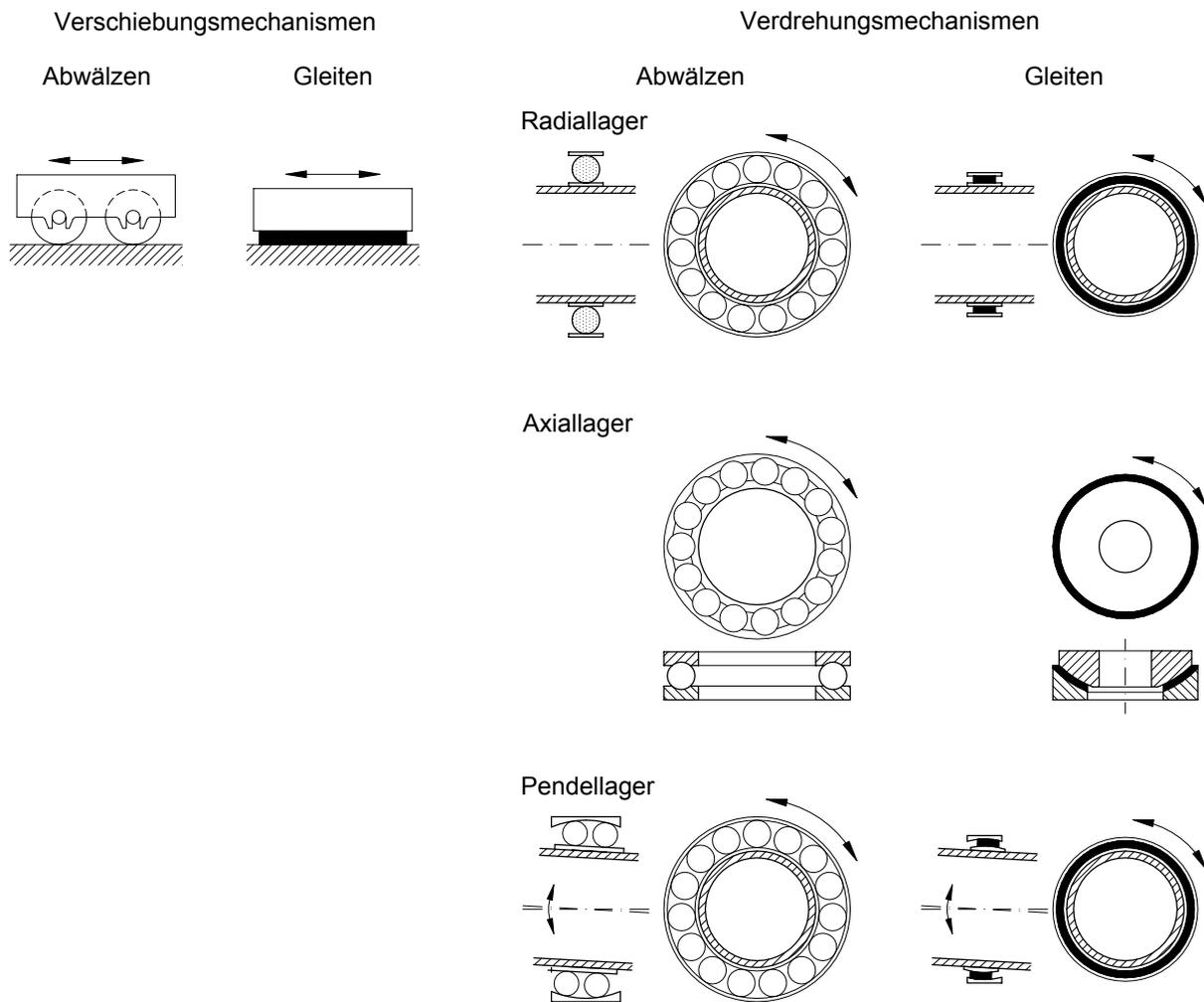


Abbildung 4-33: Bewegungsmechanismen für Wälz- und Gleitlager

4.6.2 Sensoren

Der Antrieb beweglicher Tragwerke erfolgt in der Regel nach einem zeitlichen Programm, das zusätzlich durch Sensoren an Kontrollpunkten gesteuert wird. Die Sensoren in beweglichen Tragwerken haben daher im Allgemeinen nur der Positionsbestimmung zu dienen.

Unterschiedliche Ausführungen, wie Kontaktschalter oder berührungslose Sensoren sind möglich.

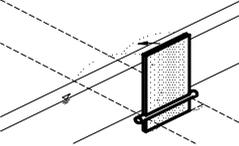
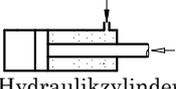
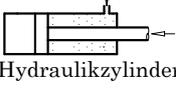
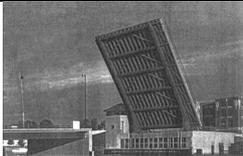
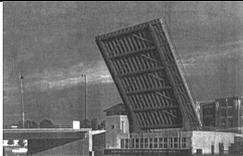
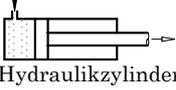
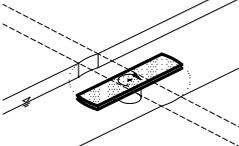
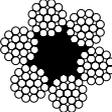
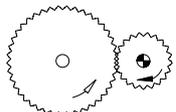
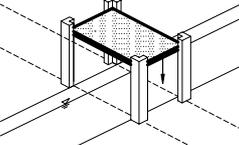
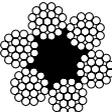
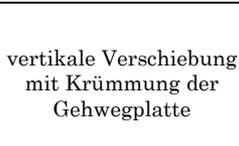
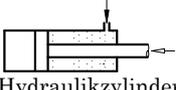
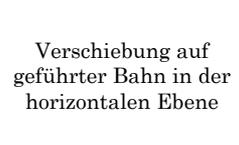
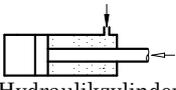
4.7 Zusammenfassung

Aus den möglichen Elementpaarungen lassen sich ganz allgemein sieben Grundgetriebe bilden, für deren Bewegungsübertragung im Antrieb und im Führungsgetriebe formschlüssige oder kraftschlüssige Paarungen zwischen den einzelnen Elementen möglich sind. Zu den formschlüssigen Getrieben, mit ineinander greifenden Elementen, zählen Kettentriebe, Druckmittelgetriebe, Zahnradtriebe, Gelenktriebe, Schraubentriebe, Kurventriebe und Klinkengesperre. Zu den kraftschlüssigen Getrieben, mit der Bewegungsübertragung durch Reibung zwischen den Elementen, zählen Seiltriebe, Riementriebe, Reibradgetriebe und Hemmwerke, wie Reibungsbremsen.

Die Beschreibung der einzelnen Getriebe erfolgt aus der Sicht der Tragwerkslehre mit der Beschreibung ihres Einsatzes in beweglichen Tragwerken.

5. ANWENDUNGSBEISPIELE

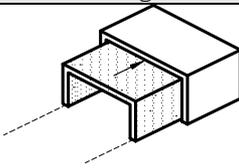
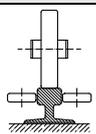
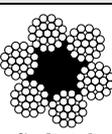
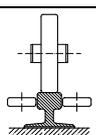
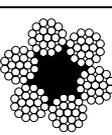
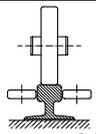
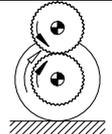
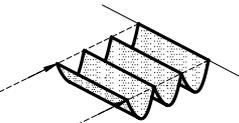
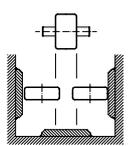
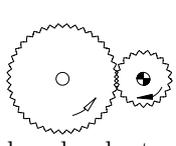
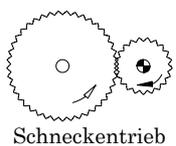
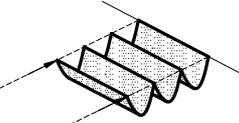
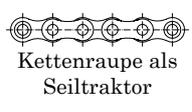
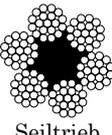
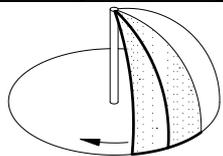
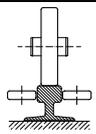
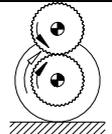
BRÜCKENBAUTEN

Bewegungsart			Führungs- einrichtung, Führungs- getriebe	Antrieb
Klappbrücken				
Drehung um eine horizontale Achse		 <p>Galata Brücke, Istanbul, T 1992 <i>Gegengewicht am Tragwerk</i></p>	Drehbare Lagerung	 Hydraulikzylinder
		 <p>Deffenè-Brücke, Mannheim, D 1988 <i>Gegengewicht geführt</i></p>	Gelenkgetriebe	 Hydraulikzylinder
		 <p>Sheboygan-Brücke, Wisconsin, USA 1995 <i>ohne Gegengewicht</i></p>	Drehbare Lagerung	 Hydraulikzylinder
Drehbrücken				
Drehung um eine vertikale Achse		 <p>Drehbrücke Ludwigshafen, D 1984 <i>nach dem Kippsystem Prinzip Schwedler</i></p>	Lagerung auf Drehzapfen	 Seiltrieb
		 <p>El Ferdan-Brücke, Ägypten 2001 <i>mit Rollenkranz</i></p>	Lagerung mittels Rollenkranz	 Zahnradgetriebe
Hubbrücken				
vertikale Verschiebung		 <p>Saltinabrücke, Brig, CH 1997 Vertikal verschiebliche Lagerung in vier Ecktürmen</p>		 Seiltrieb
Sonderformen				
vertikale Verschiebung mit Krümmung der Gehwegplatte		 <p>Katzbuckelbrücke, Duisburg 1999 Gelenkskette als Führungsmechanismus</p>		 Hydraulikzylinder
Verschiebung auf geführter Bahn in der horizontalen Ebene		 <p>Projekt Schwimmbrücke Lundrim, Genéve 2003 Gelenkgetriebe</p>	Gelenkgetriebe	 Hydraulikzylinder

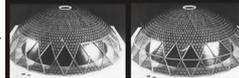
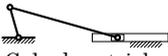
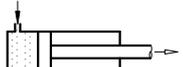
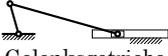
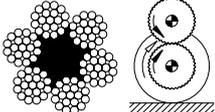
HOCHBAUTEN – FENSTER UND TORE

Bewegungsart			Führungseinrichtung, Führungsgetriebe	Antrieb
Verschiebung				
		Senkwand, Cafe Schlossberg, Graz, A 2003	Laufräder	Kettentrieb
		Schiebetore, Stadthalle, Graz, A 2003	Laufrad und Schiene	Reibradantrieb
Drehung				
		Drehtore, Stadthalle, Graz, A 2003	Drehbare Lagerung um vertikale Achse	Zahnradgetriebe
		System Dreh- und Kippfenster –	Verstellbare Lagerung um horizontale bzw. vertikale Achse	Druckmittelgetriebe
Sonderformen				
		Falttore Earnstings Warenhaus, Coesfeld, D 1985	Gelenksgetriebe	Zugmittelgetriebe
		Fassade, Aurora Place, Sydney 2000	Gelenksgetriebe	Zahnradgetriebe
Drehung um eine horizontale Achse		Fassade des Arabischen Institutes, Paris, F 1988	Lagerung	Kurvengetriebe

HOCHBAUTEN – DÄCHER

Bewegungsart				Führungseinrichtung, Führungsgetriebe	Antrieb
Verschiebung steifer Tragwerksteile					
linear			Schlossbergkasematten, Graz, A 1987		
			Bad zur Sonne, Graz, A 2001		
			Collonial Stadium, Melbourne, AUS 2000		
textile Dächer					
Verschiebung linear gefaltet			Hofüberdachung im Rathaus, Wien, A 2000		
			System Markisen -		
Verschiebung flächig gefaltet			Freilichttheater, Bad Hersfeld, D 1968		
			Rothenbaum, Hamburg, D 1997		
Drehung steifer Tragwerksteile					
			Werthalle Cargo-Lifter Brand, D 2002		

SONDERFORMEN

Bewegungsart			Führungseinrichtung, Führungsgetriebe	Antrieb
Verschiebung – mit gefalteter Ausgangslage				
 vertikale Verschiebung		Pantadome System der Convention Hall, Nara, Jap 1998	 Gelenksgetriebe	 Hydraulikzylinder
Scherengitter Systeme				
 Verschiebung entlang einer Fläche		San Pablo Sortzenrum, Sevilla, ESP 1996	 Gelenksgetriebe	(Montagekran)
Drehung				
Drehung um eine horizontale Achse		Riesenräder Wien, A London Eye 1897 1999	Lagerung um horizontale Achse	 Seiltrieb, Rädertrieb

5.1 Bewegliche Brücken

Bewegliche Brücken ermöglichen kreuzende Verkehrswege zu führen, auch wenn deren Lichträume sich mehr oder weniger überschneiden. Dies geschieht durch Öffnen oder Schließen der Brücke an der Kreuzungsstelle zweier Verkehrswege. Je nach Anlageverhältnis oder Verkehrsaufkommen kann eine bewegliche Brücke gegenüber einer Hochbrücke, mit entsprechenden Rampen und Nebenöffnungen zur Erhaltung des Lichtraumes, wirtschaftlicher sein. Die Öffnungszeiten sind selbst für große Brücken sehr gering und betragen in der Regel zwischen 2 und 3 Minuten.

Man unterscheidet :

1. **Klappbrücken** (Aufklappen des Brückentragwerks um eine horizontale Achse)
2. **Hubbrücken** (Anheben des gesamten Brückentragwerks)
3. **Drehbrücken** (Drehen des Brückentragwerks um eine vertikale Achse)

4. **Rollbrücken** (Verschieben des Brückentragwerks auf einer horizontalen Bahn längs der Brückenachse oder in einem spitzen Winkel dazu)
5. **Schiffbrücken** (Wegschwimmen des Brückentragwerkes zur Öffnung des Wasserweges)
6. **Schwebefähren** (Kabinen, die auf einem über dem erforderlichen Lichtraum liegenden Brückentragwerk hängend von einem Ufer zum anderen verschoben werden)

Sind Wasserwege und Landwege zu verbinden, so ist ein Ausgleich zwischen dem veränderlichen Niveau des Wasserspiegels und dem konstanten Niveau des Ufers zu schaffen. Dazu dienen :

- Landebrücken** (zur Verbindung von Wasserfläche und Ufer) bzw.
- Anlegebrücken** (sie schwimmen zur Gänze auf der Wasserfläche und entsprechen ortsfesten aber vertikal verschieblichen Schiffbrücken)

5.1.1 Klappbrücken

Klappbrücken basieren auf der Drehung des Haupttragwerks um eine horizontale Achse quer zur Brückenlängsachse. Man unterscheidet :

- Klappbrücken mit Gegengewicht am Überbau,
- Klappbrücken mit einem geführten Gegengewicht
- Klappbrücken ohne Gegengewicht

Klappbrücken mit Gegengewicht am Überbau

Der Brückenüberbau besteht aus einem kurzen und einem langen Arm. Beim öffnen wird der lange Arm hochgeklappt, während sich der, durch ein Gegengewicht ausbalancierte kurze Arm nach unten dreht. Die Brücke wird um eine ortsfeste horizontale Achse geklappt (Abbildung 5-1 a) oder auf einer horizontalen Bahn abgerollt und dabei nach oben gedreht – Bauart Scherzer (Abbildung 5-1 b). Der Antrieb erfolgt durch Hydraulikzylinder oder Zahnstangen mit Ritzel.

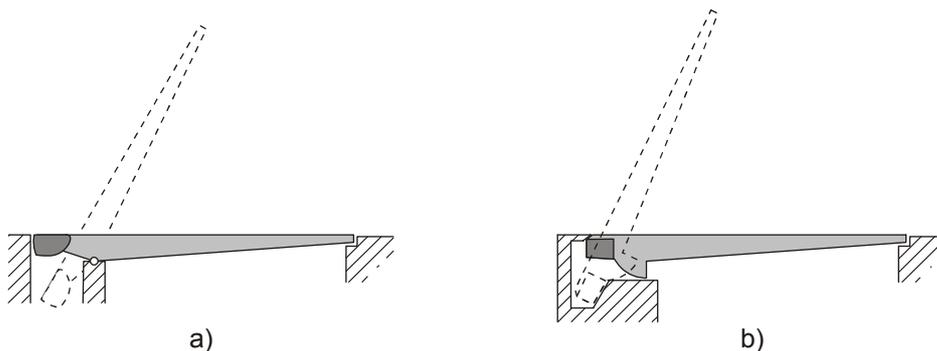


Abbildung 5-1: Klappbrücken a) mit ortsfester Drehachse b) mit wandernder Drehachse (Typ Scherzer)

Galata-Brücke, Istanbul, T

Entwurf : Leonhardt, Andrä u. Partner, Stuttgart;

Temel Mühendislik, Istanbul

Die neue Galata-Brücke in Istanbul ersetzt die Schwimmbrücke¹ aus dem Jahre 1912. Sie verbindet das Zentrum Istanbuls mit der Halbinsel Galata und schlägt damit eine Verbindung vom südöstlichsten Punkt Europas nach Asien.

Sie besteht aus zwei Vorlandbrücken mit einer Gesamtlänge von je 178,4 m bei Regelöffnungen von 22,3 m und den Doppelklappbrücken über der 80 m breiten Mittelöffnung. Die beiden übereinander liegenden Brückendecks haben eine Breite von 42 m mit je drei Fahrspuren in jede Richtung, eine Zusatzspur für Busse und 6 m bzw. 8 m breite Gehwege für den starken Fußgängerverkehr.

Die Mittelöffnung von 80 m wird durch zwei Doppelklappbrücken überspannt. Die Zeit für das Öffnen der Klappen beträgt rd. 3 Minuten.

¹ mit einem 62,5 m langen Mittelteil der ausgeschwommen wurde

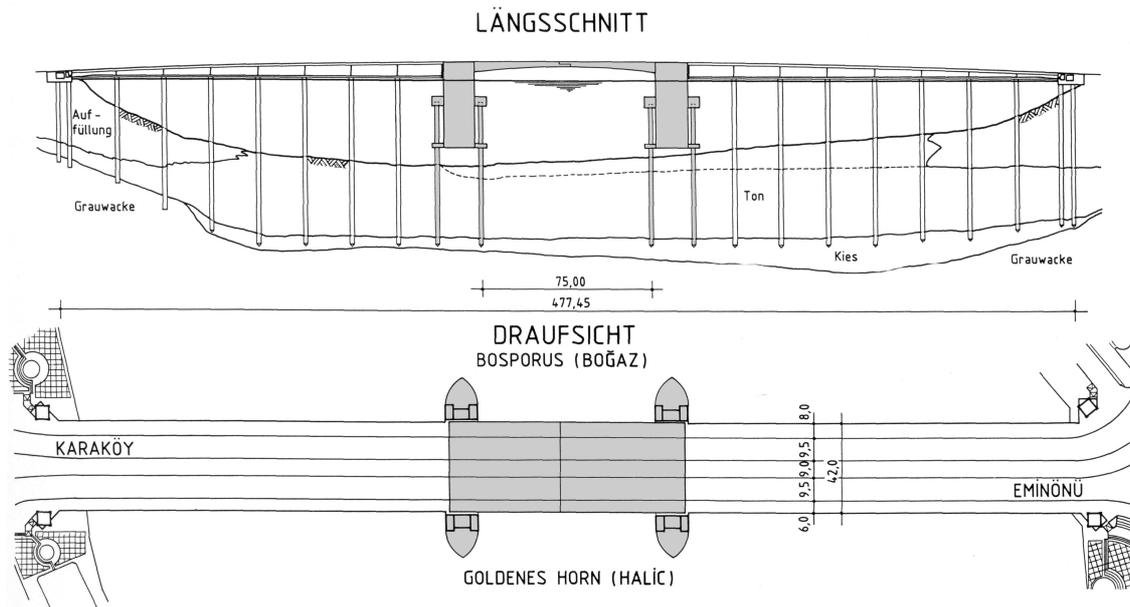


Abbildung 5-2: Grund- und Aufriss des gesamten Brückentragwerks

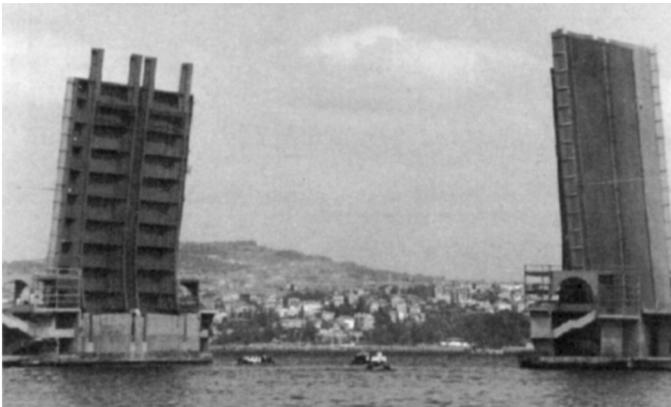
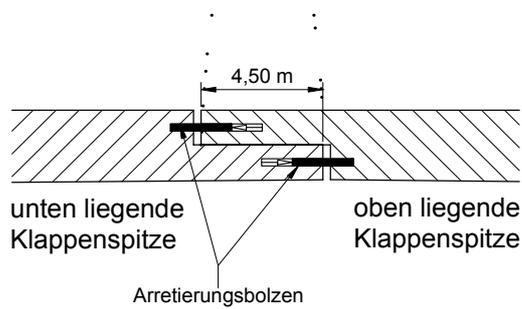
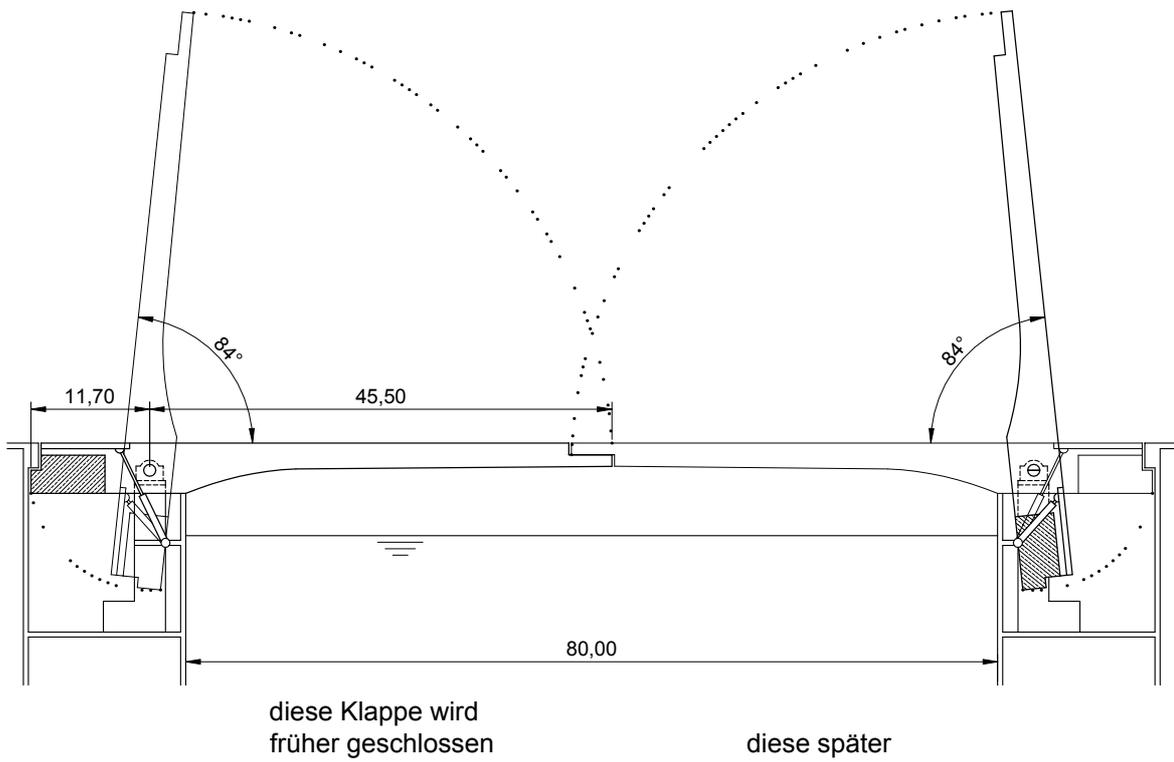
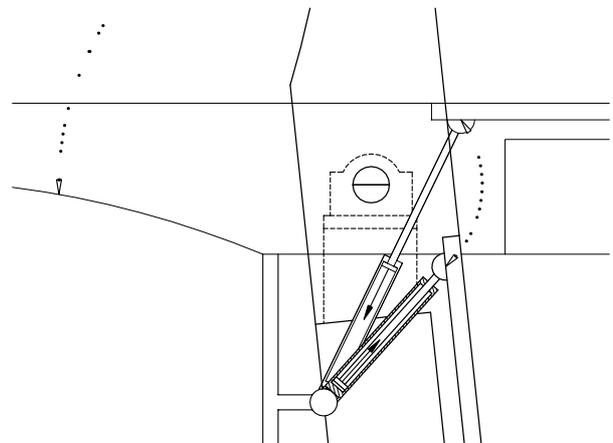


Abbildung 5-3: Abbildung der geöffneten Doppelklappbrücken

a) Schnitt durch die Klappen



b) Prinzip der Arretierung in Brückenmitte



c) Prinzip des Hydraulikantriebes

Abbildung 5-4: Schnitt durch die Klappen und Prinzipskizzen zur Arretierung und zum Antrieb

Das bewegbare Tragwerk

Die Gesamtlänge jeder Klappe von 57,2 m wird durch die Drehachse in den langen Arm mit 45,5 m Länge und den kurzen Arm mit 11,7 m Länge unterteilt. Die Klappen bestehen aus einer orthotropen Platte aus Stahl mit zwei Hauptträgern im Abstand von 14,8 m. Das Gegengewicht ist direkt mit den Hauptträgern verbunden und besteht aus Stahlschrott-Schwerbeton. Bei Abmessungen von rd. 7,3 m × 3,8 m × 9,8 m und einem spezifischen Gewicht von 35 kN/m³ beträgt das Gegengewicht pro Klappe 1 000 t.

Dem Antrieb dienen hydraulische Zylinder seitlich der Hauptträger. Die Kolbenstangen greifen an der Unterseite des kurzen Klappenarmes an und werden für das Öffnen der Brücke eingezogen und für das Schließen ausgefahren (Abbildung 5-4 c).

Zur Erzeugung der Hubkraft ist ein Kolbendurchmesser von 650 mm und zum Öffnen der Klappen einen Hub von rd. 4,4 m erforderlich. Für das Öffnen der Brücke innerhalb der geplanten Zeit von 3 Minuten sind die Ölpumpen auf eine Förderleistung von 5 l/sec ausgelegt.

Jeder der beiden Hauptträger einer Klappe ist mittels einer Welle in zwei Gleitlagerschalen links und rechts des Hauptträgers drehbar gelagert.

Für die geschlossene Endlage werden die Doppelklappen durch Arretierungsvorrichtungen biege- und schubsteif miteinander verbunden, um Querkräfte und Biegemomente aus Verkehrslasten zu übertragen (Abbildung 5-4 b). Die hinteren Enden der kurzen Arme werden ebenfalls arretiert um zusammen mit der biegesteifen Verbindung in der Mitte der Brücke eine Tragwirkung als Durchlaufträger über drei Felder (das 80 m lange Mittelfeld und die beiden kurzen Arme) zu erreichen. Der kurze Arm jeder Klappe kommt beim Schließen mit seinem Ende auf einem oben angeordneten Neoprenelager zu liegen. Um zusätzlich nach unten gerichtete Verkehrslasten übertragen zu können, wird ein Arretierungsbolzen in eine Konsole am Widerlager geschoben.

Klappbrücken mit einem geführtem Gegengewicht

Abhängig von den verfügbaren Platzverhältnissen kann es vorteilhaft sein, das Gegengewicht an anderer Stelle als am kurzen Arm der Brückenklappe anzuordnen, wie beispielsweise über der Fahrbahn auf einem Waagbalken. Der oft aufwendig herzustellende, in der Regel unter dem Wasserspiegel liegende Klappenkeller für den Antrieb und den Rückarm der aufgeklappten Brücke, kann dann kleiner ausgeführt werden oder ganz entfallen.

Das Gegengewicht ist mit der Klappe durch einen Führungsmechanismus verbunden. Prinzipiell sind alle Arten und Anordnungen von Führungsmechanismen denkbar, häufig sind Ausführungen mit Parallelogrammführung. In einigen Fällen wurde eine Schienenführung des Gegengewichts mit einem Zugmittel zur Klappe eingesetzt. Zugbrücken mit oben liegendem Waagbalken, kurz Waagbalkenbrücken, stellen mit bestimmten Modifikationen günstige und zeitgemäße Lösungen dar.

Der Antrieb erfolgt in der Regel durch Hydraulikstempel oder Zahnstangen an der Klappe. Für die Klappbrücken a) und b) in Abbildung 5-5 ist der Antrieb über die Umlenkrolle des Zugseiles möglich.

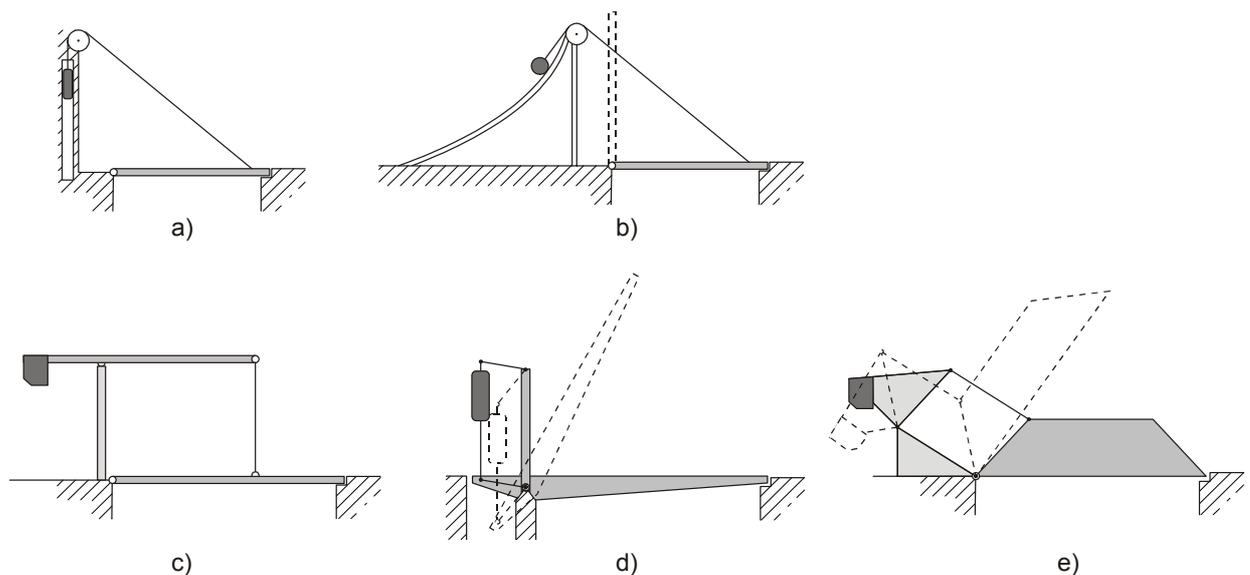


Abbildung 5-5: Klappbrücken mit geführtem Gegengewicht

a) und b) Gegengewicht auf Leitlinie, c) Zugbrücke oder Waagbalkenklappbrücke; c), d) und e) Gegengewicht Parallelogrammgeführt

Deffenè-Brücke, Mannheim, D

Entwurf : Jux, Freudenburg, D

Die zweiarmige Drehbrücke über den Altrhein aus dem Jahre 1903 wurde 1988 durch zwei nebeneinander liegende Klappbrücken für den Straßen- bzw. Schienenverkehr ersetzt.

Die Forderung nach einer möglichst geringen Bauhöhe des Überbaus führte zur Wahl von Waagbalken-Klappbrücken (Abbildung 5-6).

Die beiden im Abstand von rd. 2 Metern gelegenen Klappbrücken sind gestalterisch als eine Einheit entworfen, hinsichtlich ihrer Antriebsanordnung jedoch unterschiedlich gelöst. Die lichte Breite der Schifffahrtsöffnung beträgt 26,0 m. Für das Öffnen der Klappen wurde eine Dauer von 160 Sekunden vorgegeben.

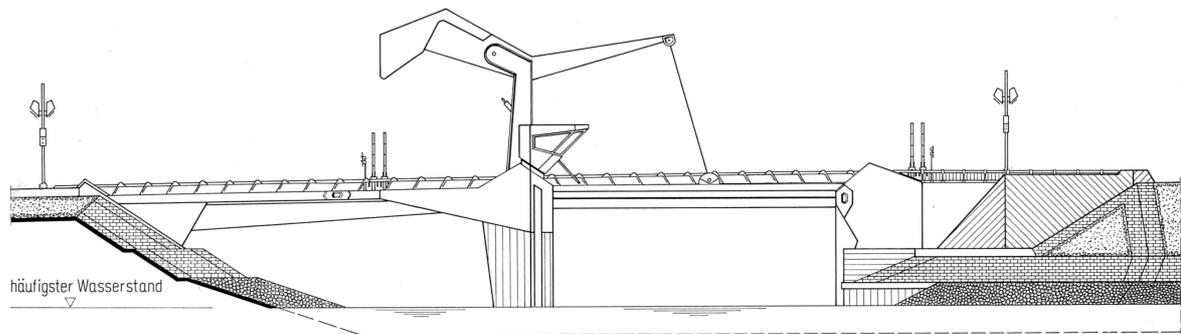
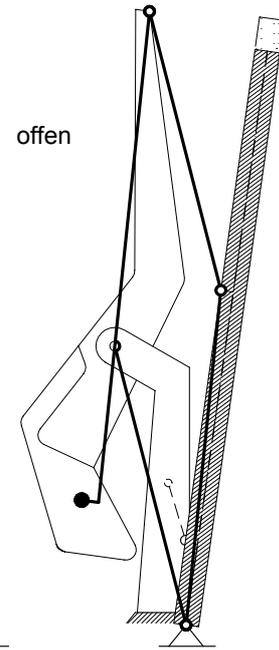
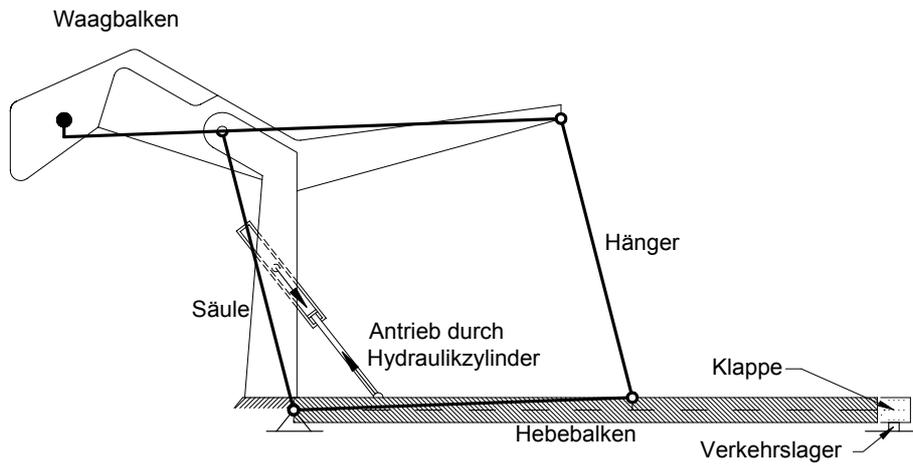


Abbildung 5-6: Ansicht der Brücke

Aufriss mit Führungsmechanismus und Antrieb geschlossen



Grundriss

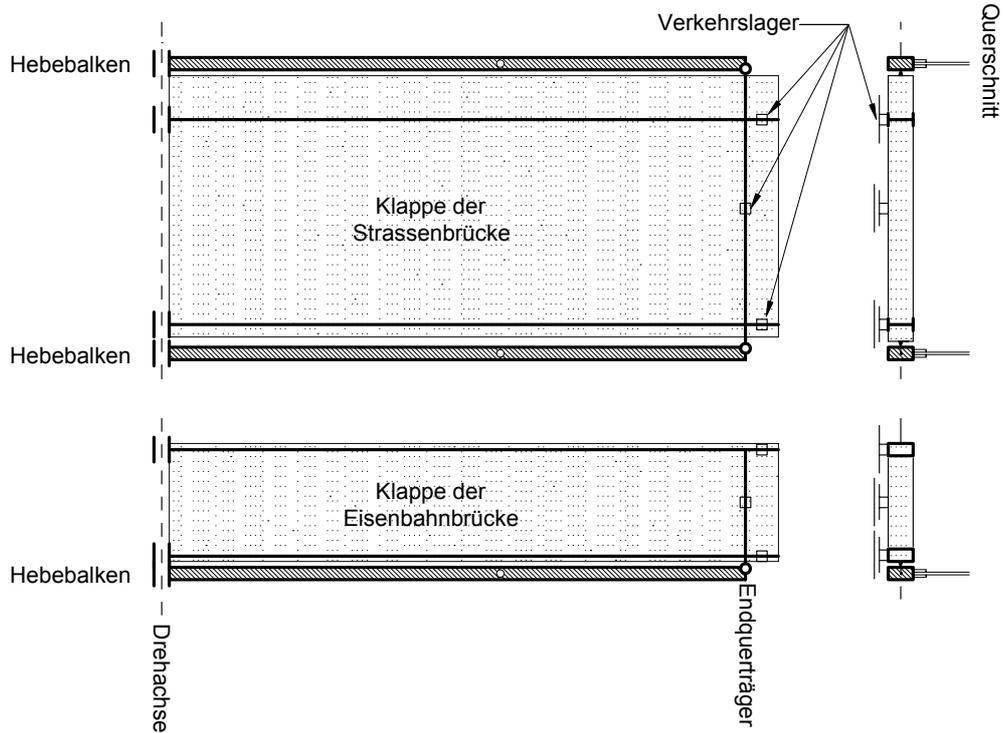


Abbildung 5-7: Schematische Darstellung der Straßenbrücke mit Federbalken



Abbildung 5-8: Ansicht der beiden Brücken mit den drei Waagbalken

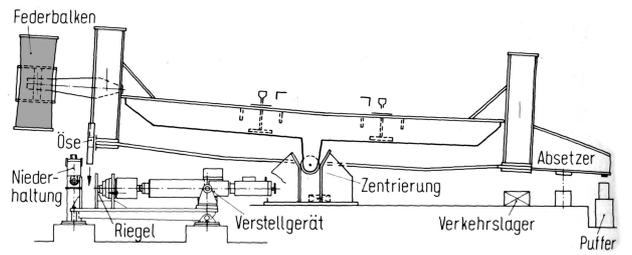


Abbildung 5-9: Endauflager der Eisenbahnklappe



Abbildung 5-10: Montage der Waagbalken

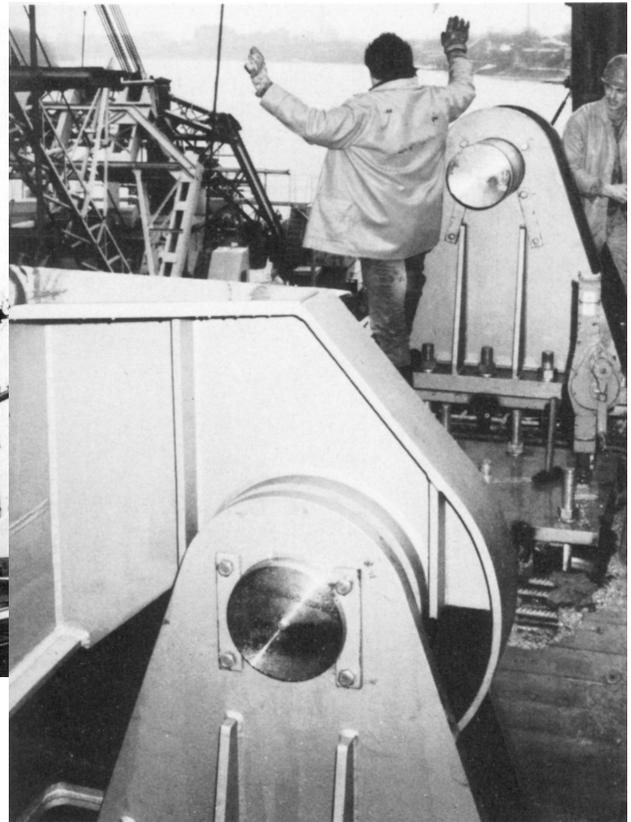


Abbildung 5-11: Drehlager in der Drehachse der Klappen

Das bewegbare Tragwerk

Waagbalken-Klappbrücken besitzen eine Klappe – als solche wird das Brückendeck bezeichnet – die an einem Ende entlang der horizontalen Achse drehbar gelagert ist und hochgeklappt werden kann. Damit die Brücke in jeder Lage ausbalanciert ist, wird ein Gegengewicht am Waagbalken über der Klappe angeordnet. Der jeweils auf einer Säule gelagerte Waagbalken trägt das Gegengewicht am Rückarm und ist über einen Hänger am vorderen Arm mit der Klappe verbunden. Klappe, Säule, Waagbalken und Hänger bilden ein Parallelogramm zur Parallelbewegung von Klappe und Waagbalken mit Gegengewicht.

Dieser Führungsmechanismus stellt das Prinzip der Waagbalken-Klappbrücken dar und wird im vorliegenden angewandt.

Ein eigener Hebebalken¹ seitlich der Klappe übernimmt als Teil des Führungsmechanismus die Bewegungsübertragung. Der Hebebalken ist über einen Endquerträger am vorderen Ende mit der Klappe verbunden. Dadurch wird es möglich, den Führungsmechanismus mit dem Antrieb vom eigentlichen Tragwerk zu entkoppeln. Die Verkehrslasten im geschlossenen Zustand werden von der Klappe auf eigene Verkehrslager übertragen. Die empfindlichen Maschinenteile und Lager des Führungsmechanismus sind von den Verkehrseinwirkungen entlastet.

Die Klappbrücke für Straßenverkehr wird beidseitig durch Hebebalken mit zugehörigem Antrieb bewegt, die schmalere Eisenbahnbrücke wegen der geringen Platzverhältnisse nur mit einem einseitigen Hebebalken und entsprechend einseitigem Antrieb. Ihre Klappe ist wegen dieser einseitigen Anordnung mit kastenförmigen Hauptträgern ausgeführt.

Die Hebebalken sind für beide Klappen gleich als rechteckiges Hohlprofil ausgeführt, um die mit der Klappe gemeinsame Achse drehbar gelagert und durch einen Hänger in der Mitte mit dem Waagbalken verbunden. Der im Bewegungszustand zugbeanspruchte Hänger ist als Rohr ausgebildet, da bei geöffneter Klappe auch Druckkräfte aus Wind zu übertragen sind.

Die Form der Säule und des Waagbalkens ist aus gestalterischen Gründen geknickt und zur einfacheren Lagerung des Waagbalkens am Kopf gabelförmig ausgebildet. Für die Kinematik des Führungsmechanismus ist nur das Parallelogramm der Gelenkspunkte wichtig.

Das Gegengewicht am hinteren Ende des Waagbalkens wird in einem rund 17 m³ fassenden Füllraum untergebracht und im Tariervorgang für die praktisch fertig gestellte Brücke entsprechend vorgerechneter Auflagerkräfte bestimmt und beträgt rd. 1 000 kN.

Bei der Straßenbrücke sind die beidseitig angeordneten Führungsmechanismen (hauptsächlich aus gestalterischen Gründen) nicht durch Querverbindungen gekoppelt.

¹ auch als Federbalken bezeichnet

Für den Antrieb wurden die Varianten mechanisch-elektrisch mittels Zahnstangen und hydraulisch mittels Zylinder untersucht und gleich bewertet. Die Entscheidung viel aus räumlichen und gestalterischen Gründen auf den Antrieb mittels Hydraulikzylindern, die zwischen Säule und Hebebalken angeordnet sind. Etwa auf halber Höhe jeder Säule wird ein Zylinder mittels Schwenkzapfen in einem geneigten Schacht gelagert und ist am anderen Ende mit der Kolbenstange gelenkig am Hebebalken angeschlossen. Für das Öffnen der Brücke wird der Doppelkammerzylinder verkürzt, um den Hebebalken nach oben zu klappen, beim Schließen verlängert.

Bei der Straßenbrücke werden die beidseits angeordneten Antriebe mittels einer Ventilsteuerung synchronisiert.

Die Drehlager der Klappen und Hebebalken sind als Gleitlager mit einer Buntmetallpaarung ausgeführt. Bei der Straßenbrücke sind vier Lager, zwei für die Hauptträger der Klappe und zwei für die Hebebalken angeordnet. Bei der Eisenbahnbrücke wurde aus Platzgründen ein Doppellager für den Hebebalken und den benachbarten Hauptträger der Klappe vorgesehen und ein zweites Lager für den anderen Hauptträger. Alle Drehlager sind auswechselbar konzipiert und an die Zentralschmierung angeschlossen. Die Lager der steifen Endquerträger am Hebebalken sind um zwei Achsen drehbar ausgeführt.

Die Klappen werden mit den beiden Hauptträgern und dem Endquerträger auf Elastomerlager abgesetzt. Durch ein Übergewicht auf der Klappenseite wird ein Abheben von den Lagern verhindert. Eine zusätzliche Arretierung der Endquerträger mittels Bolzen soll ein ungewolltes Öffnen aus einem Steuerungsfehler verhindern.

Beim Aufsetzen der Eisenbahnbrücke auf die Lager ist die Verdrehung der einseitig gehaltenen Klappe zu berücksichtigen. Dies geschieht konstruktiv durch einen Puffer und eine Zentrierfalle, in welche der Zentrierbolzen am Klappenende fährt, um die Klappe in der richtigen Position auf den Lagern abzusetzen. Da die Eisenbahnbrücke nur einen Waagbalken besitzt ist die Überlast der Klappe geringer und ein sattes Aufliegen auf den Verkehrslagern nicht garantiert. Aus diesem Grund wurde eine verstärkte Verriegelung zur Aufnahme abhebender Kräfte eingebaut (Abbildung 5-9).

Zur Arretierung der geöffneten Brücke werden Arretierungsbolzen jeweils am Fuß der Säule hydraulisch verriegelt.

Vergleichbare Bauwerke

Die Reiherstiegklappbrücke im Hamburger Hafen wird in Kindmann, Sass: Reiherstiegklappbrücke , 1985 behandelt.

Klappbrücken ohne Gegengewicht

Sheboygan-Brücke, Wisconsin, USA

Entwurf:

Teng & Associates, Inc., Chicago, USA

Die 1995 fertig gestellte Klappbrücke wurde im Gegensatz zum gängigen Bauprinzip von Klappbrücken ohne Gegengewicht ausgeführt. Der Antrieb hat dementsprechend das gesamte Gewicht der Klappe zu bewegen. Die Argumente für die Ausführung ohne Gegengewicht sind der geringere bauliche Aufwand, wegen des fehlenden Klappenkellers und der Gewässerschutz, aus der Reduktion der baulichen Maßnahmen unter dem Wasserspiegel. Der Einsatz von Hydraulikzylindern ist dank ihrer Standardisierung auch für die großen erforderlichen Hubkräfte der vorliegenden Klappe möglich.

Die Spannweite der Klappe beträgt 29,0 m, die Breite der Schifffahrtsöffnung 23,6 m. Die 21,0 m breite Klappe bietet 4 Fahrstreifen und 2 Gehwegen Platz.

Das Öffnen beziehungsweise Schließen der Brücke ist in 115 sec möglich.

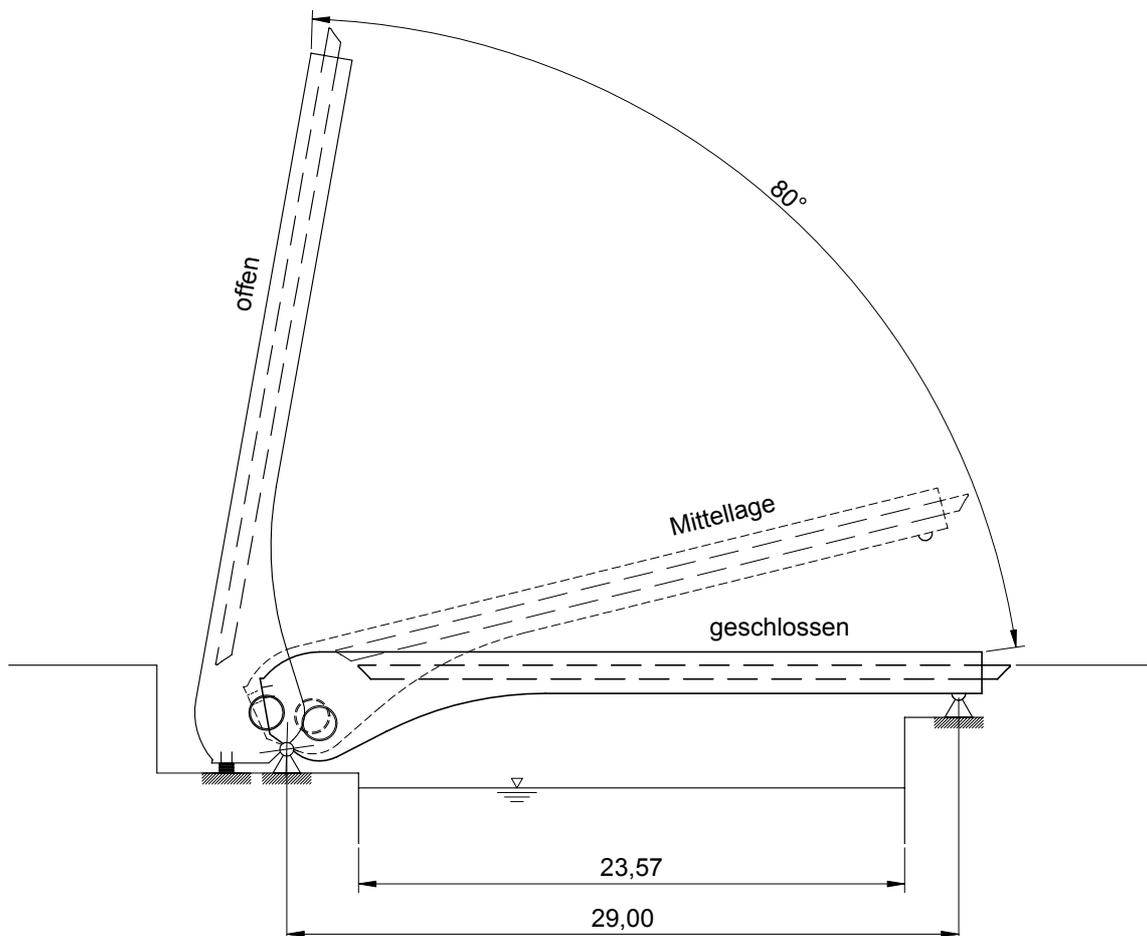


Abbildung 5-12: Ansicht der Klappbrücke : geschlossen, in Zwischenlage, geöffnet



Abbildung 5-13: Brücke im geöffneten Ruhelage

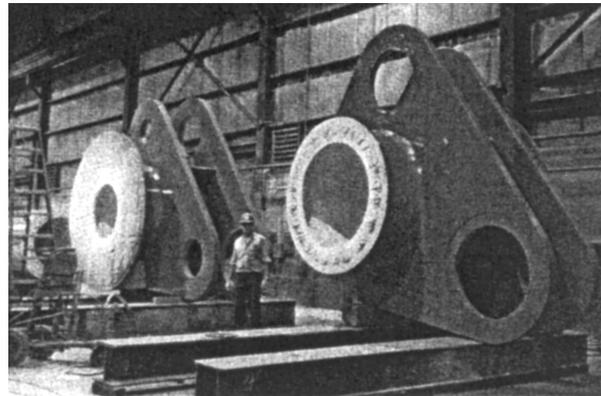
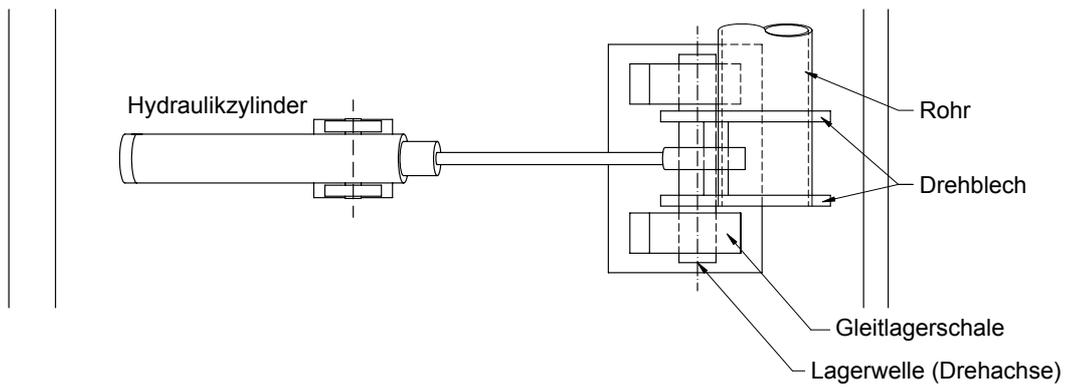
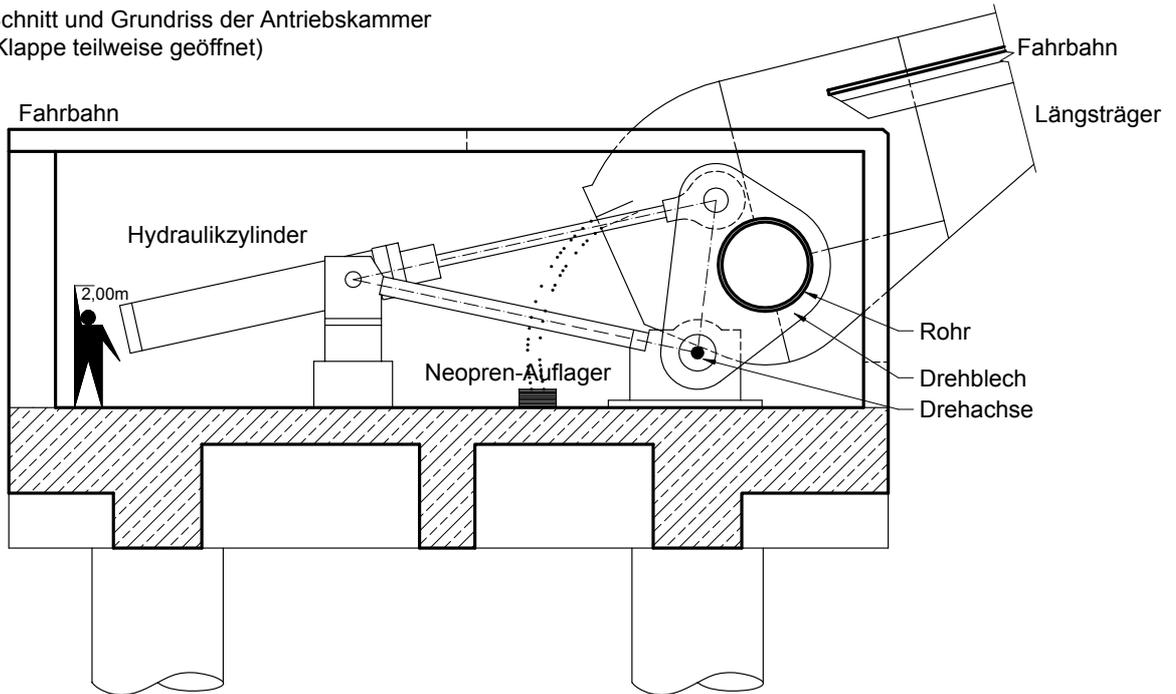


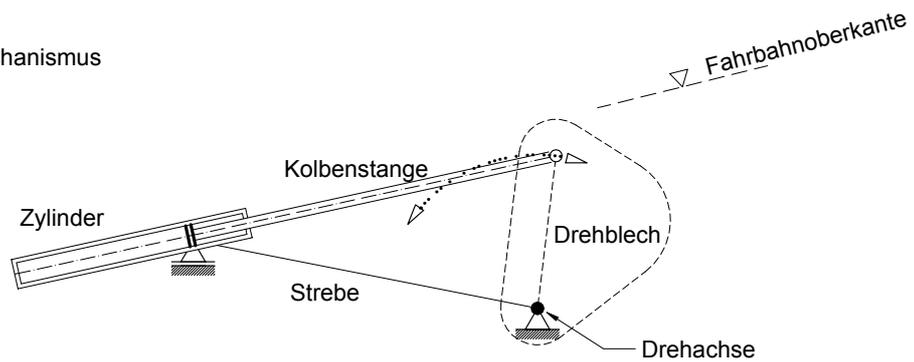
Abbildung 5-14: Drehbleche im Werk

Abbildung 5-15 (nächste Seite): a) Schnitt und Grundriss der Antriebskammer, b) zugehöriger Antriebsmechanismus und c) dessen Endlagen

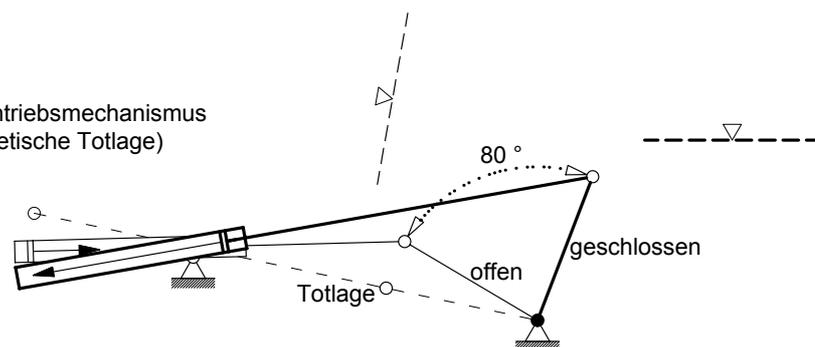
a) Schnitt und Grundriss der Antriebskammer
(Klappe teilweise geöffnet)



b) zugehöriger Mechanismus



c) Endlagen des Antriebsmechanismus
(und seine theoretische Totlage)



Das bewegbare Tragwerk

Die Klappe besteht aus zwei seitlich angeordneten, gevouteten Längsträgern mit I-förmigem Querschnitt und einer darüber liegenden Leichtbeton-Verbundplatte. Die beiden Längsträger sind über ein Rohr miteinander Verbunden, das beidseits der Längsträger mit Blechen versehen ist. Die Bleche dienen der Lagerung der Klappe und der Bewegungsübertragung vom Antrieb auf das Rohr und damit die Klappe. Sie lagern Paarweise mittels einer Welle in einer Gleitlagerschale und sind mit der Kolbenstange des Hydraulikzylinders gelenkig verbunden.

Der Zylinder ist mittels Zapfen drehbar gelagert.

Zylinder mit Kolbenstange und das Drehblechpaar bilden zusammen den Antriebsmechanismus in Form einer Schubkurbel. Um Horizontalkräfte in den Auflagern des Zylinders und der Drehbleche zu vermeiden, werden diese über eine Strebe kurzgeschlossen.

Zum Öffnen der Brücke wird die Kolbenstange in den Zylinder eingezogen und zum Schließen ausgefahren. Der Öldruck in der Zylinderkammer wird für den erforderlichen Hub von 3,20 m in der vorgesehenen Zeit durch jeweils zwei elektrische Hydraulikpumpen (150 PS) erzeugt. Die für den Antrieb über den Zylinder kritische Totlage des Mechanismus wird nicht erreicht (siehe Abbildung 5-15).

In Endlage kommt das vordere Klappenende mit den beiden Längsträgern auf Neoprenelagern zu liegen. Für die geöffnete Klappe sind am rückwärtigen Klappenende ebenfalls Neoprenelager angeordnet, die zur temporären Lagerung dienen.

Wegen des Gewichtes der Brückenklappe sind keine Arretierungseinrichtungen gegen abhebende Kräfte an den Lagern notwendig. Beim Öffnen wird die Klappe so weit hochgeklappt, dass ihr Schwerpunkt zwischen der Drehachse und dem temporären Lager zu liegen kommt.

5.1.2 Drehbrücken

Drehbrücken sind durch, meist im Wasser stehende, massive Drehpfeiler gekennzeichnet, auf welchen der Überbau um eine vertikale Achse gedreht wird.

Sie können bei einer Schifffahrtsöffnung als ungleicharmige Drehbrücken mit einem kurzen Rückarm mit Gegengewicht ausgeführt werden oder bei zwei Schifffahrtsöffnungen links und rechts des mittig angeordneten Pfeilers als gleicharmige Drehbrücke. Doppelte Drehbrücken mit zwei sich drehenden Überbauten werden zur Überbrückung besonders breiter Schifffahrtswege ausgeführt. Der Überbau doppelter Drehbrücken kann ungleicharmig oder gleicharmig ausgeführt sein und wird im Allgemeinen durch eine Arretierung gekoppelt, um eine Durchlaufwirkung zu erzielen.

Hinsichtlich des Drehsystems werden zwei Typen unterschieden :

- Drehbrücken auf einem Drehzapfen

Die Brücke lagert in der geschlossenen Lage an den Dreharmenden und über dem mittigen Drehpfeiler. Um die Brücke zu drehen wird sie auf Bewegungslager abgesetzt. Dazu wird der Überbau aus der Endlage geringfügig um die horizontale Achse im Mittelaufleger geklappt. Dabei werden die Lager an den Enden frei gegeben und der gesamte Überbau kommt auf dem Drehzapfen (oder Königsstuhl) und auf Stützrollen über dem Drehpfeiler zu liegen. Damit ist die Brücke um die vertikale Achse des Drehzapfens drehbar und wird durch einen Antrieb in Form eines Zahnradtriebes, Seiltriebes oder Hydrauliktriebes in die geöffnete Lage gedreht. Dieses System wurde von Schwedler entwickelt und ist daher als Drehbrücke nach dem Prinzip Schwedler bekannt oder wird als Drehbrücke mit Kippsystem bezeichnet. Der große Vorteil dieses Systems liegt in der vollen Entlastung der Bewegungslager von den Verkehrslasten.

- Drehbrücken auf einem Rollenkranz

Der Überbau wird auf einem Rollenkranz über dem Drehpfeiler gedreht. Er bleibt dabei in der Horizontalen.

Drehbrücke Ludwigshafen, D

Entwurf und Ingenieur :
Freudenberg, Weisenheim, D

Drehbrücke nach dem Prinzip Schwedler

Bei der 1984 erbauten Drehbrücke orientierte man sich weitgehend an der Vorgängerbrücke aus dem Jahr 1894 – eine Drehbrücke nach dem Prinzip Schwedler – und verwendete die bestehenden und teilweise verbesserten Unterbauten. Der rd. 46 m lange Überbau wird in einen 25,4 m langen vorderen Arm über der Schifffahrtsöffnung und einen 20,0 m langen Rückarm geteilt. Die Brücke ist 10,8 m breit und kann in 3 Minuten geöffnet bzw. geschlossen werden.

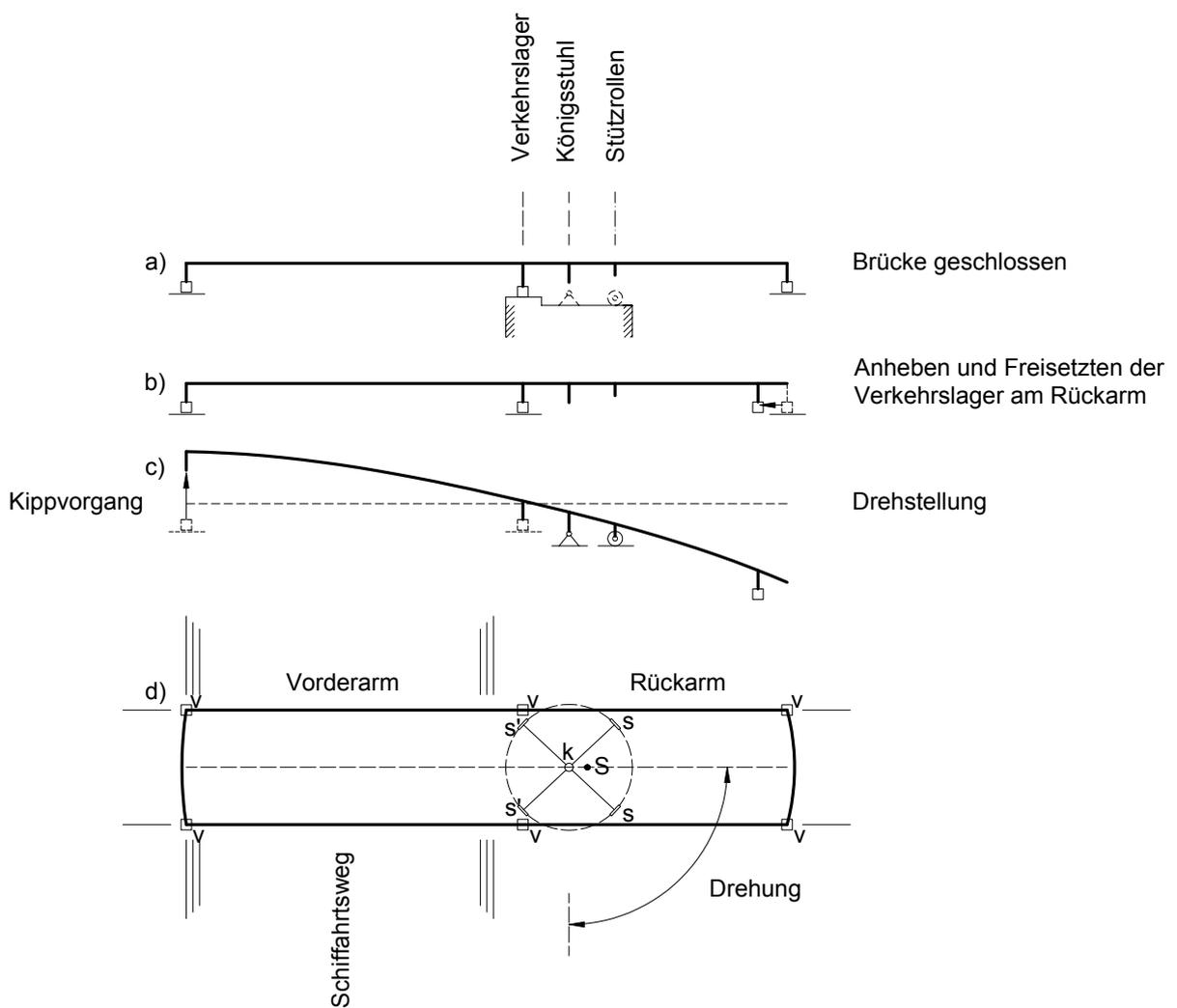


Abbildung 5-16: Bewegung und Verformung der Drehbrücke auf einem Drehzapfen



Abbildung 5-17: Ansicht der Drehbrücke

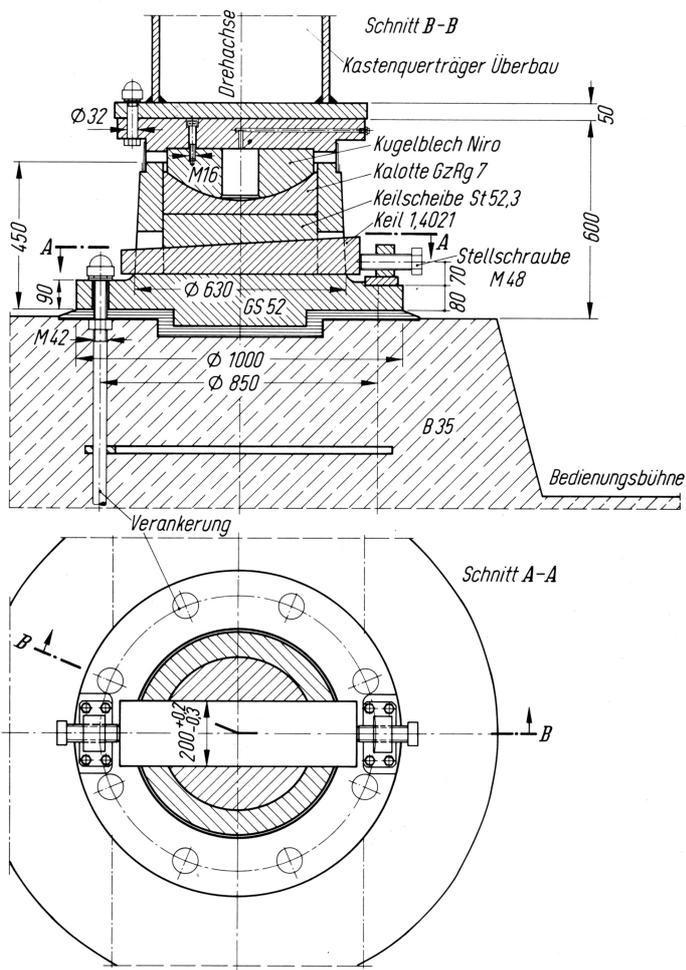


Abbildung 5-18: Drehzapfen

Das bewegbare Tragwerk

Nachdem die Brücke für Verkehr gesperrt ist, wird die Arretierung an den Verkehrslagern freigegeben. Für die Bewegung wird der Überbau von den Verkehrslagern auf eigene Bewegungslager gekippt und anschließend durch den Antrieb bewegt.

Die Verkehrslager des Rückarmes werden zunächst durch leichtes Anheben des Überbaus entlastet und durch horizontales Verschieben freigesetzt, sodass der Kippvorgang durch Absenken des Rückarmes eingeleitet werden kann. Durch das Kippen kommt der Überbau von allen Verkehrslagern frei und auf dem zentralen Drehzapfen (k) und zwei hinteren Stützrollen (s) am Drehpfeiler zu liegen. Das kinematische System der Drehbrücke wurde so vom Durchlaufträger auf drei Stützen auf einen beidseitigen Kragarm auf zwei Stützen gewechselt.

Durch einen Seiltrieb wird der Überbau um den Drehzapfen (Lagerung im Dreieck aus Drehzapfen und Stützrollen (k, s, s) gedreht bis er parallel zum Schifffahrtsweg liegt. Die vorderen Stützrollen (s') dienen der Sicherung gegen etwaiges Vorkippen des Überbaus und kommen normalerweise nicht zum Tragen.

Am massiven Drehpfeiler befinden sich das Steuerhaus mit dem Antrieb, der Drehzapfen, eine Lauffläche für die Stützrollen und Verkehrslager. Der Überbau ist als Deckbrücke mit zwei Hauptträgern im Abstand von 7,5 m ausgeführt. Auf Grund des kürzeren Rückarms ist dieser mit einem gelenkig aufgehängten Gewichtskasten versehen – und zwar so, dass der Schwerpunkt der Brücke zwischen Drehzapfen und Stützrollen liegt (S in Abbildung 5-16 d).

Der Seiltrieb besteht aus einem Litzenseil, das mit beiden Enden am Laufring der Drehbrücke angeschlagen ist und auf eine Treibtrommel mit vertikaler Achse geführt wird, die von einem Gleichstrommotor angetrieben ist.

Das Heben des Rückarms erfolgt über Spindelpressen. Zum anschließenden Freisetzen vom Lager ist der obere Teil des Lagers als Schlitten am Rückarm hängend montiert, der elektrisch verschoben wird. Durch Einfahren der Spindelpressen wird die Brücke mit einem Senkweg von rd. 27 cm gekippt.

Der Drehzapfen hat einerseits das Kippen der Brücke um die horizontale Achse zu ermöglichen und andererseits das Drehen des Überbaus um die vertikale Achse, was konstruktiv durch eine Kugelkalotte erreicht wird. Die für den Kippvorgang wichtige exakte Höhenregulierung des Drehzapfens und der Verkehrslager wird mit Keilen bewerkstelligt.

El Ferdan-Brücke, Ägypten

Entwurf :
Krupp Bau Hannover, ORASCOM

eine ungleicharmige Doppel-
drehbrücke mit Rollenkranz

Bauwerksbeschreibung

Bei dem 2001 erbauten Brückenbauwerk handelt es sich um eine doppelte Drehbrücke mit zwei ungleicharmigen Überbauten. Jeder der Überbauten besteht aus einem kürzeren Arm über Land mit 150 m Länge und einem längeren Arm über dem Kanal mit 170 m Länge. Die Brücke ist für die wechselweise Benutzung durch eine Eisenbahnlinie und eine zweispurige Strasse konzipiert. In der geöffneten Lage werden die Überbauten parallel zum Ufer fixiert während sie in der geschlossenen Lage in der Kanalmitte durch Arretierungseinrichtungen biegesteif gekoppelt und die rückwärtigen Arme an ihrem Ende vertikal gelagert werden, um eine Tragwirkung als Durchlaufträger zu bewirken.

Das täglich mehrmalige Schließen bzw. Öffnen der Brücke dauert jeweils 18 Minuten inklusive Arretierung.



Abbildung 5-19: Brücke im offener Endlage

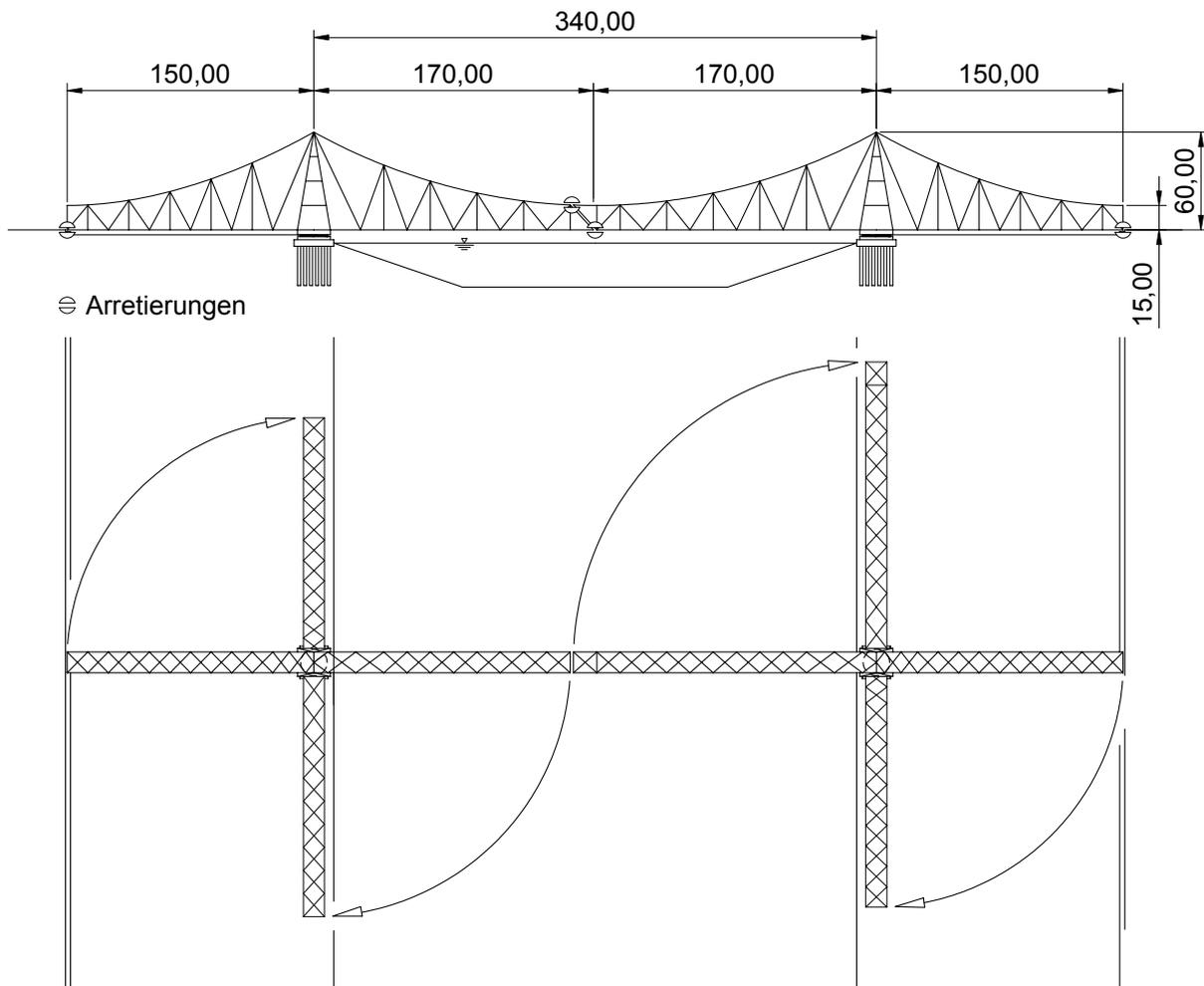


Abbildung 5-20: Brücke in Grund und Aufriss mit den Stellen der Arretierungseinrichtungen

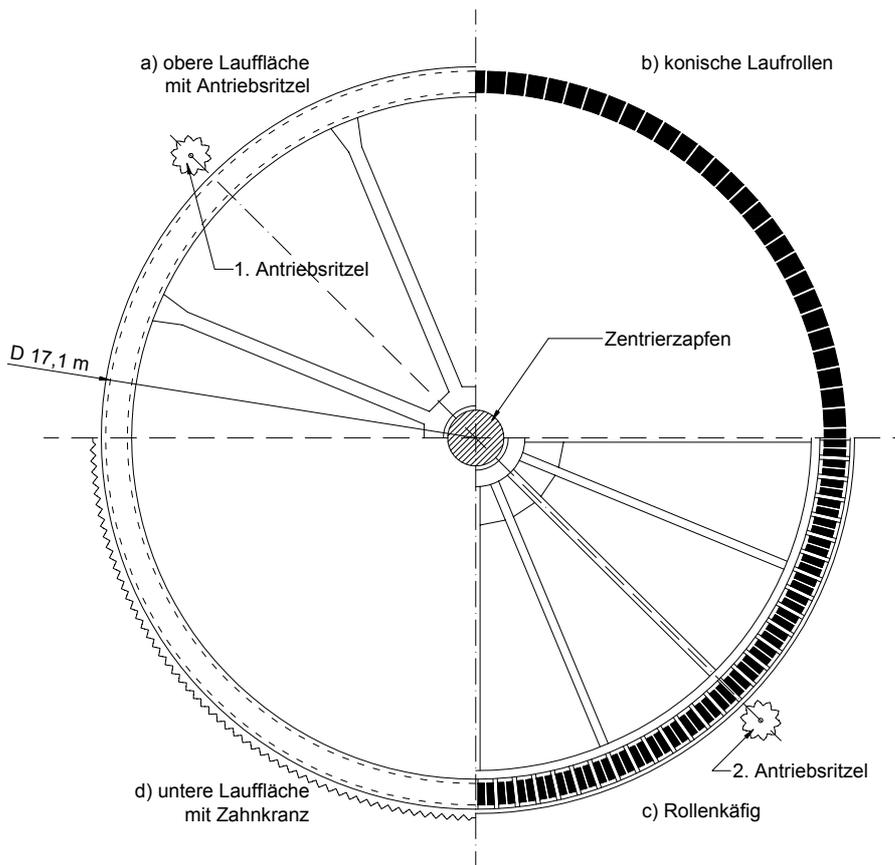


Abbildung 5-21: Schematische Aufbau des Rollenkranzlagers in horizontalen Schnitten

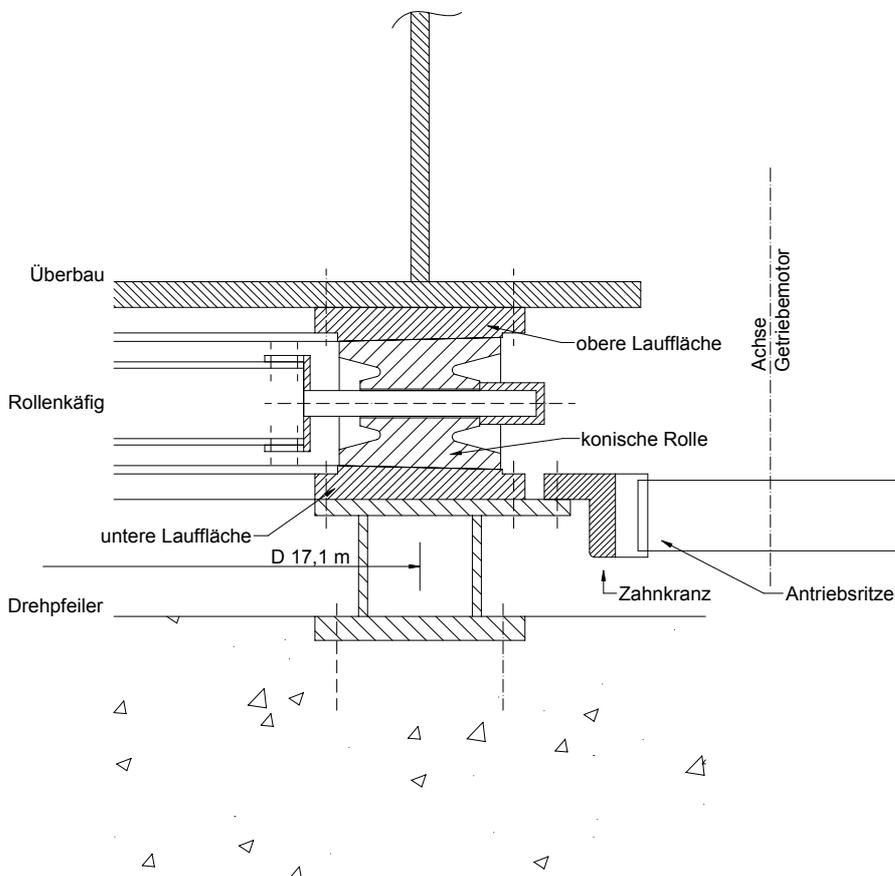


Abbildung 5-22: vertikaler Schnitt durch das Rollenkranzlager

Das bewegbare Tragwerk

Die ungleicharmigen Drehbrücken sind 12,8 m breite Fachwerkkastenbrücken, die von 60 m hohen Pylonen über den Drehpfeilern nach zwei Seiten auskragen. Um die Tragwerke auszubalancieren sind die jeweils kürzeren Arme mit einem Gegengewicht versehen (Abbildung 5-20).

Die Lagerung der beiden drehbaren Tragwerke auf den Drehpfeilern erfolgt jeweils durch einen Rollenkranz, der im Bewegungszustand durch Eigengewichtslasten und im geschlossenen Zustand zusätzlich durch Verkehrslasten belastet wird.

Das Rollenkranzlager ist auf dem Fundamentpfeiler durch einen Zentrierzapfen in seiner Lage fixiert. Er besteht im vorliegenden Beispiel aus 112 konischen Laufrollen mit 400 mm Nenndurchmesser und 500 mm Länge, die zwischen zwei kegeligen Laufbahnen angeordnet sind und auf diesen abrollen. Der Durchmesser der Laufbahnen beträgt 17,1 m. Die untere Lauffläche ist fix mit dem Pfeiler verbunden und mit einem äußeren Zahnkranz versehen. Die obere Lauffläche am lastverteilenden Ringträger des Überbaus ist durch acht Speichenträger im Zentrierzapfen gelagert. Die radiale Verschiebung der Rollen nach außen wird durch einen Käfig verhindert. Der Käfig besteht aus einem Rollenträger, der ebenfalls durch Speichen mit dem Zentrierzapfen verbunden ist. Von diesem aus verhindern drehbar in jeder Rollenachse gelagerte radiale Rundstangen die ungewollte Rollenverschiebung.

Die Drehbewegung bedingt eine Kegelform der Rollen, deren Kontaktfläche linienförmig und deren Rand ballig ausgeführt ist, um erhöhte Kantenpressungen zu vermeiden.

Bei Drehbrücken mit Drehkranzlösung ist besonders auf lastverteilende Tragwerksteile und eine maßgenaue Ausführung des Drehwerks für eine gleichmäßige Belastung aller Rollen zu achten.

Der Antrieb erfolgt elektrisch über einen Zahnradtrieb mit umlaufenden, außenverzahnten Stirnrädern. Die Antriebsritzeln des Überbaus greifen in die fixe Außenverzahnung des Drehpfeilers ein, laufen um diese um und drehen den gesamten Überbau. Die beiden Antriebsritzeln sind diametral gegenüberliegend angeordnet und jeweils durch einen Getriebemotor elektrisch synchron angetrieben. Zusätzlich können alle Bewegungsfunktionen von mobilen Hilfsantrieben (mobile elektrische Schraubgeräte oder Handantrieb) übernommen werden.

Zur Sicherung der Brücke im geöffneten Zustand befinden sich an den Enden der landseitigen Brückenarme Verriegelungen. Für den Verkehr im geschlossenen Zustand werden die beiden Drehbrücken in der Mitte verbunden und die hinteren Enden für die Durchlaufträgerwirkung arretiert. Die Verriegelung in Kanalmitte ist so ausgeführt, dass für die Zugüberfahrt eine kontinuierliche Biegelinie entsteht. Die Arretierungen bestehen jeweils aus einem rechteckigen Verschlussriegel, der elektrisch in eine gegenüberliegende Riegeltasche gefahren wird.

5.1.3 Hubbrücken

Bei Hubbrücken wird das Tragwerk über die Durchfahrtshöhe des kreuzenden Verkehrsweges bewegt, indem es vertikal geführt und in den Ecken durch einen Antrieb angehoben wird. Es werden folgende Typen unterschieden:

- Hubbrücken mit fixen Türmen in den vier Ecken der Brückentafel, die freistehend oder durch Riegel in Längs- und/oder Querrichtung verbunden sein können und
- Hubbrücken mit versenkbarer Hubeinrichtung

Um ein Versacken der Brücke, also ein Schiefstellen beim Heben zu vermeiden, werden die Antriebe in den vier Ecken für eine Parallelverschiebung des Brückentragwerks über eine mechanische Welle oder elektronisch synchronisiert. Die früher angewendete Parallelführung durch ein Seilsystem als Führungsgetriebe ist wegen des konstruktiven Aufwandes kaum mehr in Verwendung.

Saltinabrücke, CH

Entwurf :

IAG Saltinabrücke, Brig, CH

Bei der vorliegenden Brücke handelt es sich um eine Hubbrücke mit feststehenden Türmen, die im Falle eines Hochwassers aus dessen Gefahrenbereich gehoben wird.

Die 1997 erbaute Brücke folgt der Idee, die Kraft des Hochwassers als Antrieb zu Nützen und somit die Brücke ohne Fremdenergie zu sichern, da die rechtzeitige Vorhersage des Hochwassers schwierig ist. Planungsziel waren eine einfache und zuverlässige Mechanik und eine weitestgehend unterhaltsfreie Konstruktion.

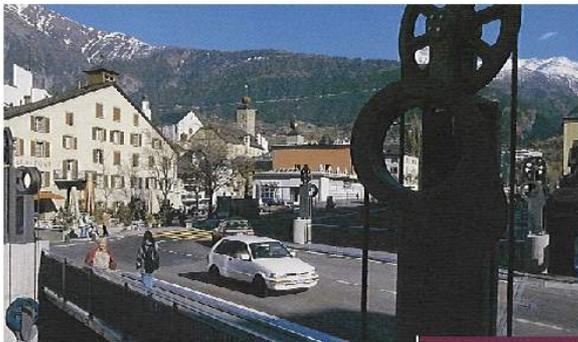
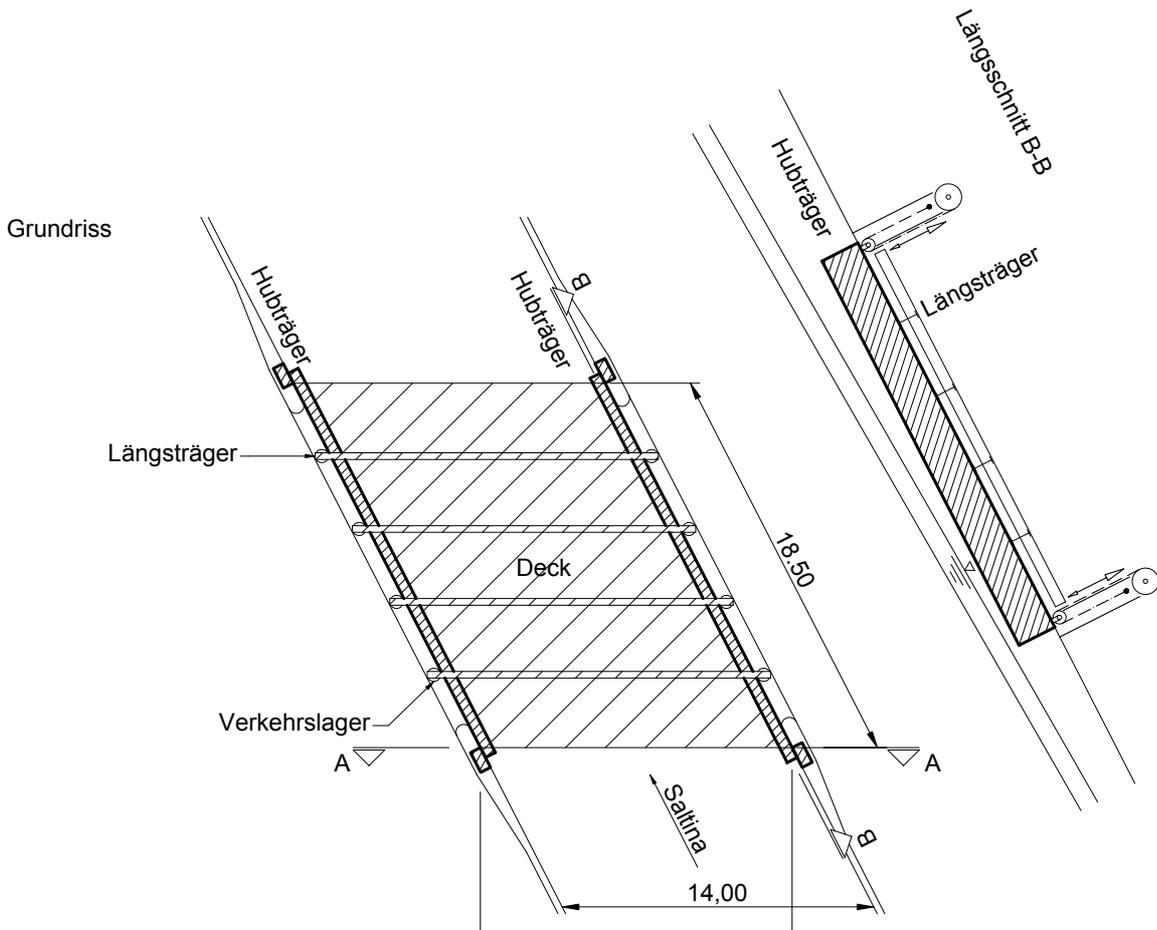
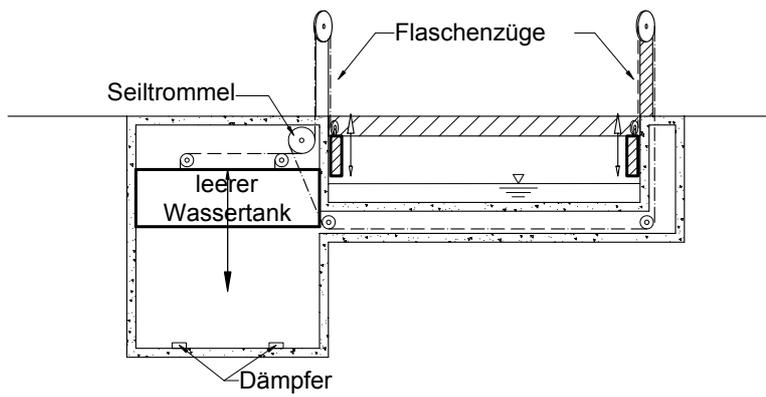


Abbildung 5-23: Ansicht der Brücke mit Hubtürmen in den Ecken

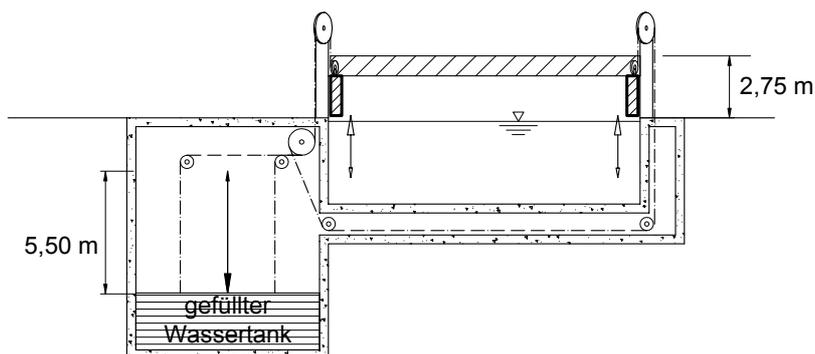
Abbildung 5-24 (nächste Seite): Grundriss und Schnitte der geöffneten und der geschlossenen Brücke



Schnitt A-A in Tieflage



Schnitt A-A in Hochlage



Das bewegbare Tragwerk

Die 18,50 m breite Brückenplatte überspannt 14,00 m und wird aus einem Stahldeck¹ mit vier Längsträgern gebildet. In der geschlossenen Lage wird die Brücke auf Elastomerelagern abgesetzt und unverschieblich gelagert, um Verkehrslasten aufzunehmen. Für das Anheben des Überbaus sind unter den Längsträgern zwei Hubträger angeordnet, die parallel zum Ufer liegen und an ihren Enden mit vertikalen Hubseilen von Säulen abgehängt sind.

Der gesamte Überbau hat ein Gewicht von 152 Tonnen, der Brückenhub beträgt 2,8 m, das Öffnen dauert rd. 6 Minuten. Bei gehobener Brücke dienen die Hubträger zur Absturzsicherung vom Ufer.

Sobald das Hochwasser einen kritischen Pegel erreicht, wird die Brücke durch Wasserkraft gehoben. Dies geschieht über ein Seilgetriebe, das den Brückenüberbau mit einem vertikal verschieblichen Wassertank in einem Spannschacht neben dem Ufer verbindet. Durch einen Überlauf wird der Tank befüllt bis sein kritisches Gewicht erreicht ist und er sich abzusenken beginnt. Die mit dem Wassertank verbundenen Seile treiben eine Seiltrommel an, auf der die vier Hubseile der Brücke für eine synchrone Bewegung zusammengeführt sind. Durch Flaschenzüge an den vier Hubpunkten wird das kritische Tankgewicht gegenüber dem Brückengewicht halbiert und der Absenkweg verdoppelt. Um mit dem Wassertank das halbe Brückengewicht mit ausreichender Sicherheit zu erreichen, ist bei einem Leergewicht des Behälters von 37,5 t, ein Wasservolumen von 50 m³ notwendig.

Die Geschwindigkeit der Hubbewegung wird durch eine hydraulische Vorrichtung auf der Seiltrommel mit Ventilen für konstanten Öldurchfluss reguliert. Die Seiltrommel wird weiters mit einem Klinkengesperre gesichert, um ein ungewolltes Absenken zu vermeiden und die Brücke in der Hochlage zu arretieren. Am Boden des Spannschachtes sind Dämpfer angebracht, die den Tank bei der Abwärtsbewegung bremsen.

Die Zeit bis zum Füllen des Wasserbehälters beträgt 3,50 min, die anschließende reine Hubdauer 2,50 min. Neben dem selbsttätigen Antrieb durch die Hochwasserfassung kann die Brücke auch durch Wasser aus einem flussaufwärts gelegenen Vorratstank oder dem Trinkwassernetz gehoben werden.

Das Absenken der angehobenen Brücke erfolgt nach Lösen der Arretierung durch das Auspumpen des Gegengewichtstanks.

¹ eine im Winkel von 63° schiefe orthotrope Stahlplatte

5.1.4 Sonderformen

Katzbuckelbrücke, Duisburg, D

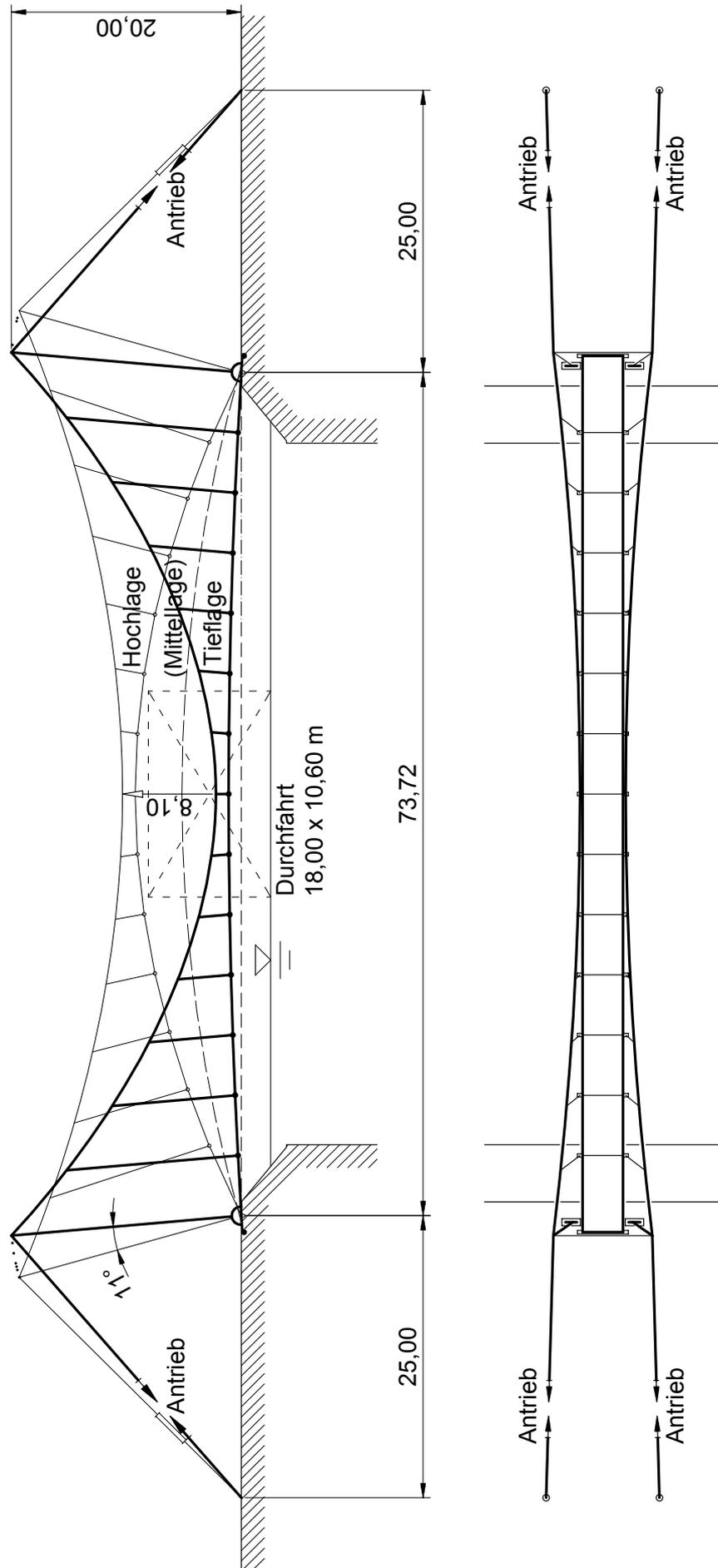
Entwurf :

Schlaich, Bergemann und Partner, Stuttgart, D

Die Fußgängerbrücke aus dem Jahre 1999 dient der Querung des heute stillgelegten Innerhafens von Duisburg. Die rückverankerte Hängebrücke überspannt das 74 m breite Hafenbecken mit zunächst flach über dem Wasser liegendem Gehweg, der sich durch einen Mechanismus nach oben krümmen lässt um Schiffe passieren zu lassen.

Der Gehweg ist mit Hängern von zwei Tragseilen abgehängt, die zwischen den rückverankerten Masten gespannt sind. Für das Heben des Gehweges werden die Rückverankerungsseile durch einen hydraulischen Antrieb verkürzt, die Masten neigen sich nach außen und der Durchhang der Tragseile verringert sich. Der angehängte Gehweg wird dadurch nach oben gekrümmt. Die Brücke ‚katzbuckelt‘ in der Mitte um 8,10 m, wodurch in der Hochlage eine Durchfahrt von 10,60 m Höhe und 18,00 m Breite frei wird. In 90 % der Fälle reicht bereits die Durchfahrtshöhe der Mittellage aus. Das Öffnen und Schließen dauert jeweils rd. 5 Minuten.

Abbildung 5-25 (nächste Seite): Grundriss und Aufriss in Tief- und Hochlage



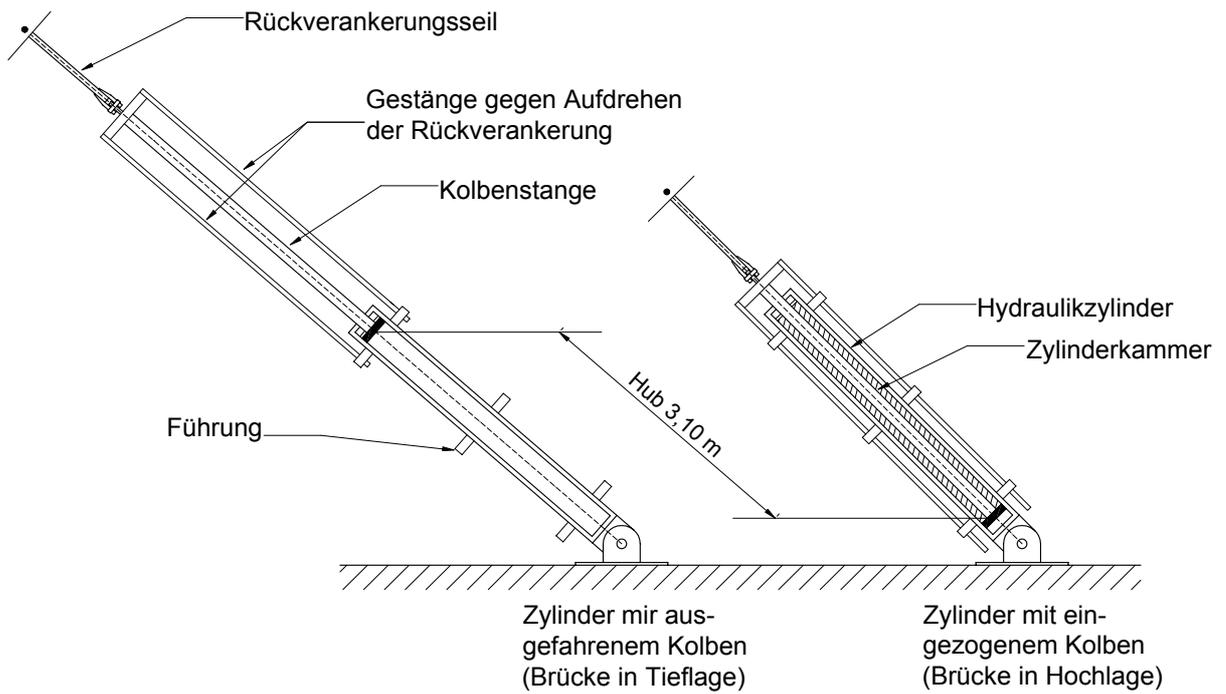


Abbildung 5-26: hydraulischer Antrieb an den Rückverankerungen

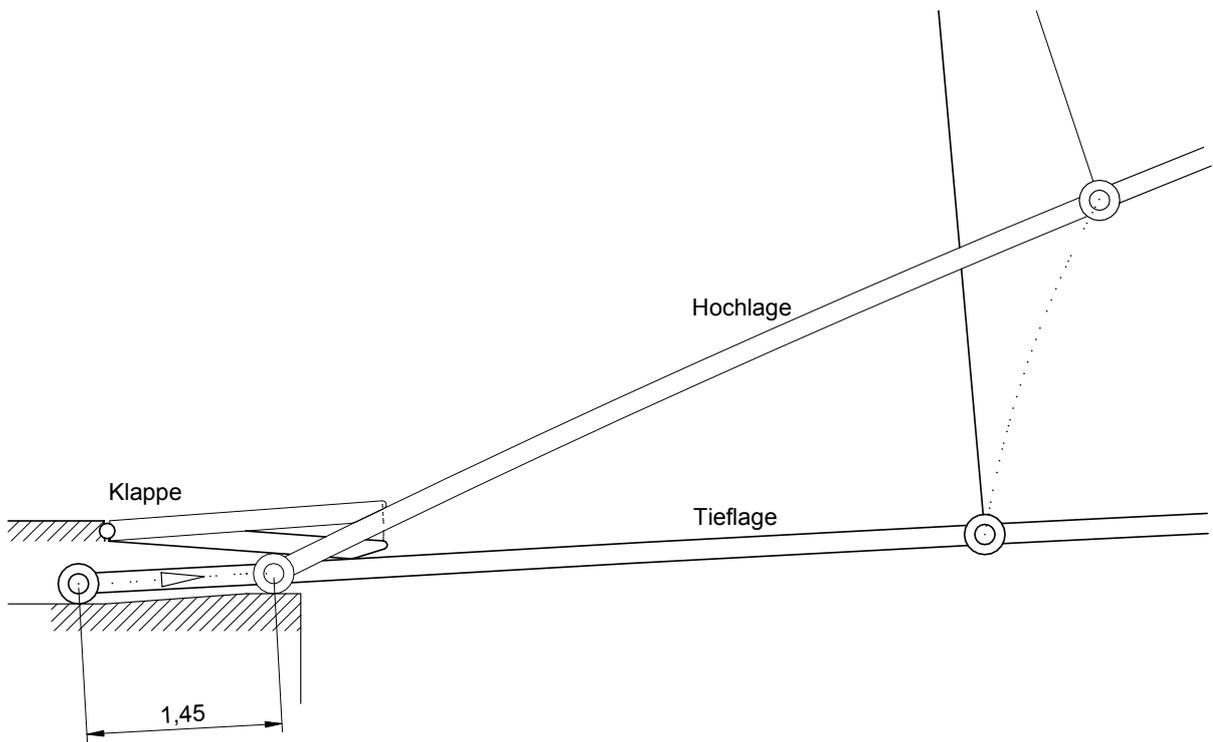


Abbildung 5-27: Prinzipskizze des Gehwegauszuges



Abbildung 5-28: Langzeitbelichtung des Bewegungsvorganges



Abbildung 5-29: Brücke in Hoch- und Tieflage



Abbildung 5-30: Ansicht der Brücke mit Hydraulikzylindern an den Rückverankerungen

Das bewegbare Tragwerk

Der Gehweg ist als Gelenkskette ausgeführt, um der stärkeren Krümmung in der Hochlage spannungsfrei folgen zu können¹. Die Kette wird aus 5,30 m lange Stahlbetonplatten gebildet, die über seitliche Stahllaschen mittels Gelenksbolzen drehbar gekoppelt werden und wird von diesen Koppelstellen nach oben auf das Tragseil gehängt. Der Gehweg muss für die Verbindung der Ufer in der Hochlage rd. 3,00 m länger sein, als in der Tieflage. Dazu wird an beiden Ufern ein Gehwegauszug vorgesehen. Die für die Hochlage benötigte Überlänge liegt in einer Tasche und wird unter einer Klappe hervorgezogen, wie in Abbildung 5-27 dargestellt.

Die Benutzung der Brücke durch Fußgänger wäre auch in der Mittellage denkbar, ließ sich aber auf Grund behördlicher Vorschriften wegen der größeren Gehwegsneigung nicht durchsetzen.

Der Antrieb erfolgt über Hydraulikzylinder an den vier Rückverankerungen, die zum Heben der Brücke durch Einziehen des Kolbens verkürzt werden und für eine zwangsläufige Bewegung, des von der Brücke gebildeten Mechanismus, synchronisiert sind.

Die Spiralseile der Rückverankerung sind jeweils am Zylinderkolben angeschlossen und gegen ihre Aufdrehneigung durch zwei Stangen gehalten, die in Führungen am Zylinder laufen.

Die 20 m hohen Masten sind als Stahlrohre ausgeführt und lagern mit einem Bolzen quer zur Brückenachse drehbar in einem Lager, um der Bewegung beim Neigen zu folgen.

Eigene Arretierungseinrichtungen für die Endlagen sind nicht notwendig, da der Ölfluss in den Zylindern über ein Ventil gesperrt werden kann, womit ihre Länge fixiert ist.

Vergleichbare Bauwerke

Dietz berichtet von einer Hubbrücke, bei der nur die Fahrbahn vom fixen Tragwerk abgehängt und mittels Zahnstangen angehoben wurde.²

¹ In der Planungsphase wurde die Ausführung als durchlaufende Stahlbetonplatte untersucht. Die schlanke Platte würde die Krümmung in der Hochlage durch Biegung aufnehmen, was zu verhältnismäßig geringen Zusatzbeanspruchungen der Tragwerksteile aber zu Rissen an der Plattenoberseite führen würde (Frage der Dauerhaftigkeit).

² Dietz: Bewegliche Brücken, 1907 – Chitpore-Hubbrücke (1878).

Schwimmbrücke Lundrim, Genf, CH

Entwurf : Nik Nikmengajaj

bewegliche Schwimmbrücke
mit Bewegungsführung durch Gelenkstrieb

Das Projekt der beweglichen Schwimmbrücke in Genf ging aus einem Ideenwettbewerb hervor, mit der Aufgabe, zwei Wohngebiete beidseits der Arve unter Einbeziehung eines 4,0 m tiefer gelegenen Erholungsgebietes am Wasserlauf fußläufig zu verbinden und wurde nicht realisiert.

Der Entwurf sieht eine dreiteilige Brücke über den, in diesem Bereich aufgestauten Fluss vor. Durch zwei Landebrücken, die von den befestigten Ufern aus auf einen schwimmenden Mittelteil laufen, wird der Gehweg nahe ans Wasser geführt und der Höhensprung zwischen Wohngebiet und Flussufer überwunden.

Um die beiden Uferbänke zu erreichen, wird die Brücke beweglich gemacht. Die drei Brückenteile werden dazu gelenkig zu einem Viergelenksmechanismus gekoppelt. Dadurch wird der Schwimmkörper in der Mitte auf einer zwangsläufigen Bahn in der Form einer Achterschleife geführt, während die beiden Landebrücken um ihr Auflager am Ufer eine Pendelbewegung beschreiben. Durch die Wahl der Abmessungen wurde die Bewegungsgeometrie derart festgelegt, dass der Mittelteil an zwei Zustiegsplattformen am Ufer vorbeiläuft. Die Schwimmbrücke bekommt damit zusätzlich die Funktion einer Fähre, durch welche die Uferbänke auf Wasserniveau verbunden werden (Abbildung 5-31).

Die Brücke wird durch einen Antrieb kontinuierlich bewegt, wobei die Dauer eines Bewegungszyklus mit 12 Minuten festgelegt wurde. Die gesamte Gehweglänge über die Landebrücken und den schwimmenden Mittelteil beträgt rd. 110 m.

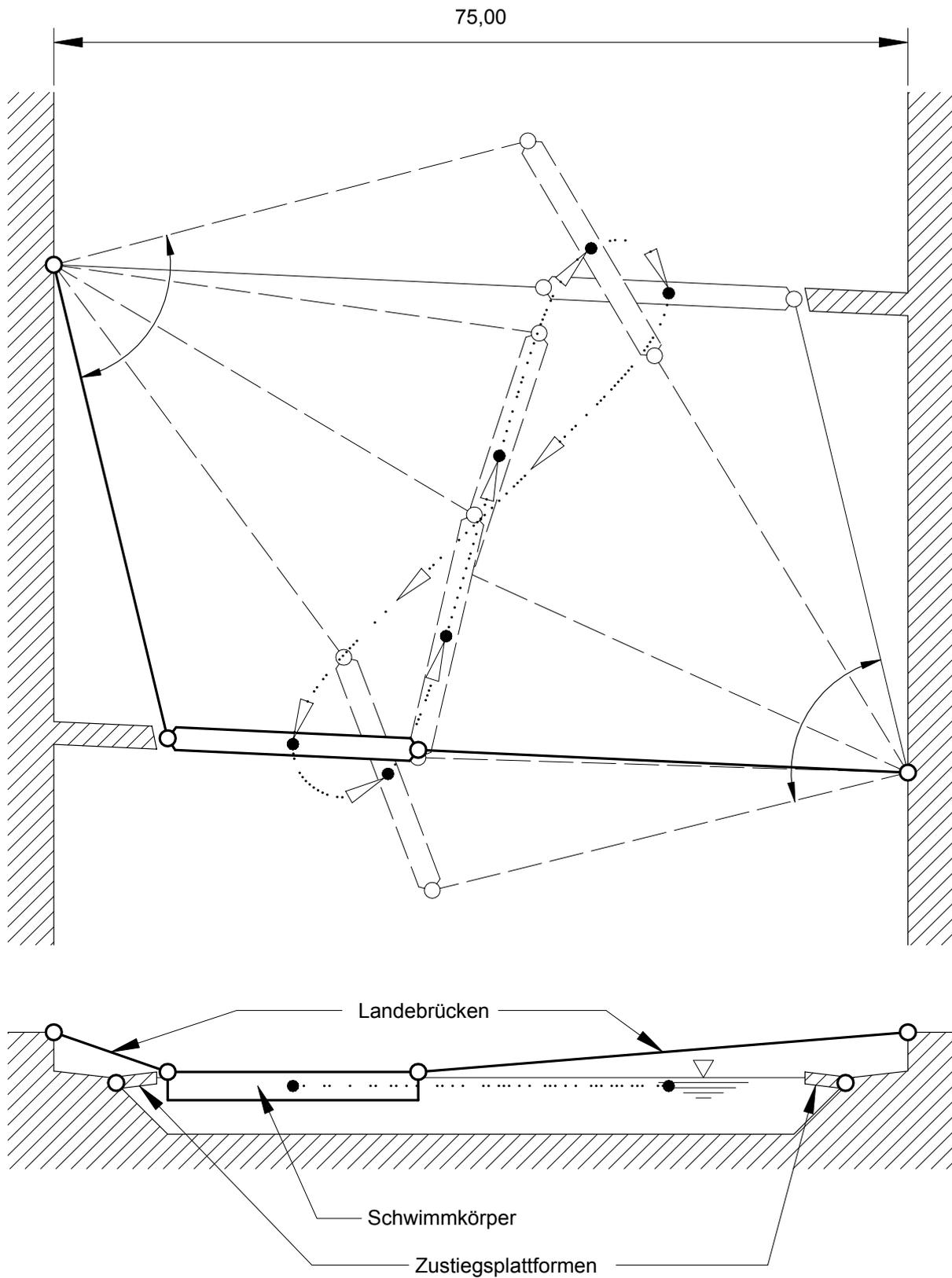


Abbildung 5-31: Grund- und Aufriss der beweglichen Schwimmbrücke in verschiedenen Lagen

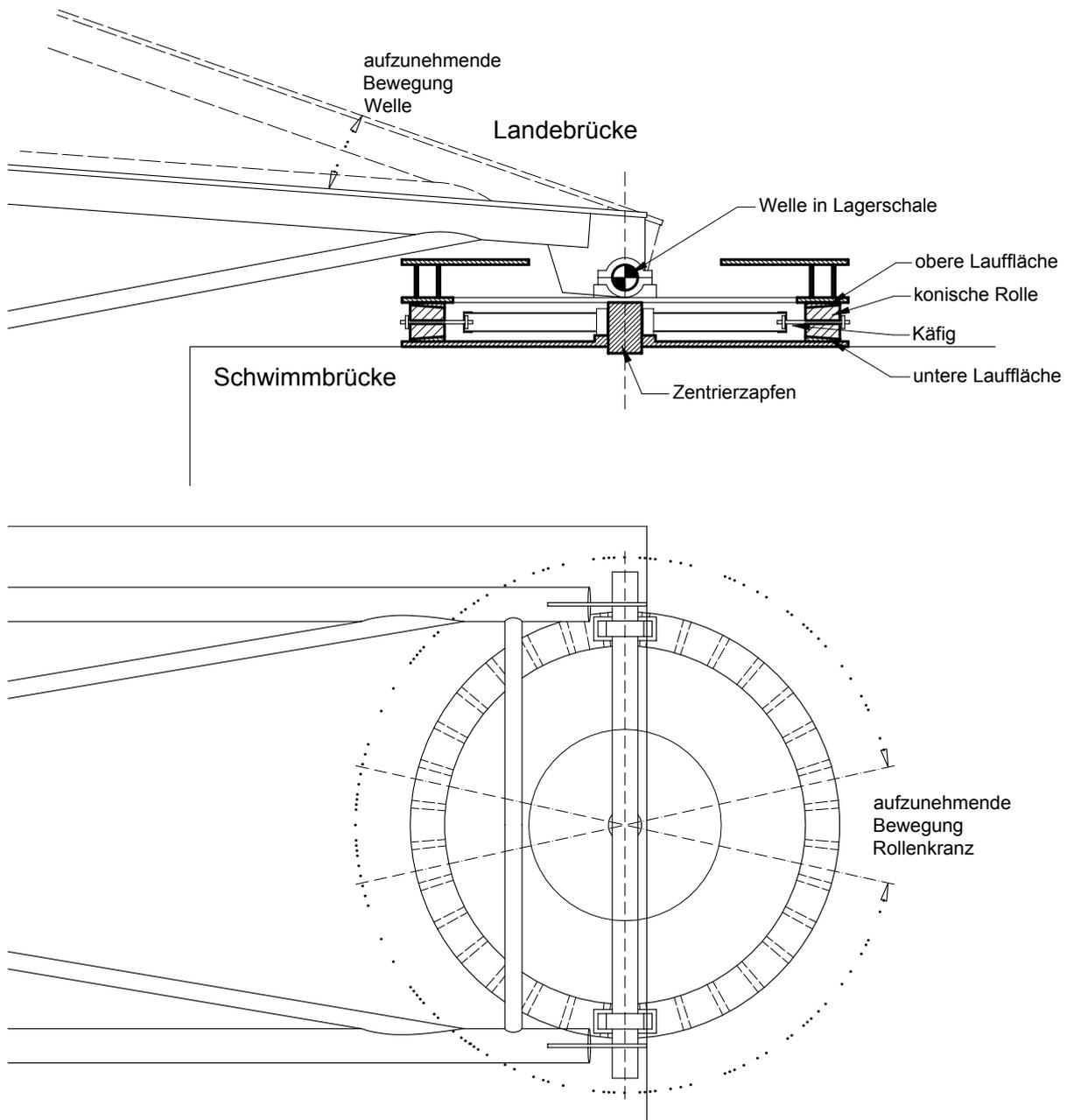


Abbildung 5-32: Mögliche Ausführung des Gelenks zwischen Schwimmkörper und Landebrücke als Kardangeln mit Rollenkranz und horizontaler Welle

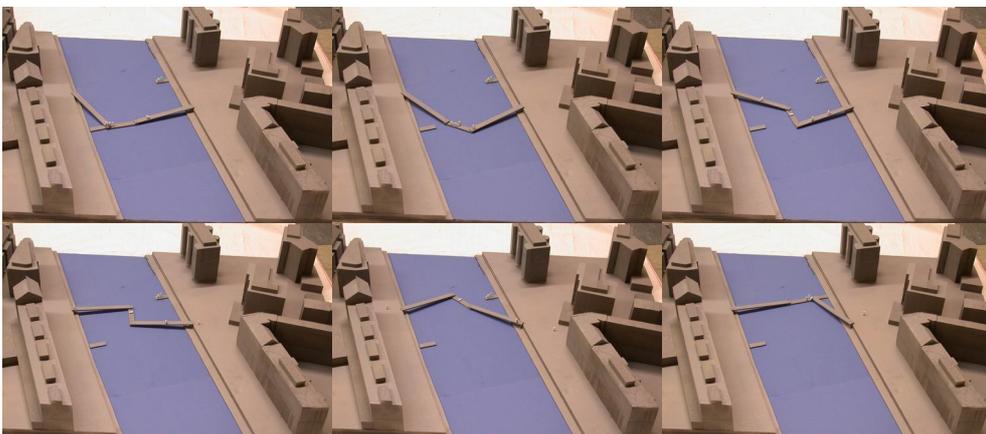


Abbildung 5-33: Brückenmodell in verschiedenen Lagen

Das bewegbare Tragwerk

Der Hohlkörper der Schwimmbrücke wird aus Blechen zusammengesetzt und verschweißt. Die Landebrücken sind als Dreigurttfachwerke mit Stahldeck konzipiert. Die Achslängen der Landebrücken sind 43 m, jene des Mittelteils 22 m. Die Breite des Gehweges beträgt 3,5 m und weitet sich im Bereich der Schwimmbrücke auf.

Der Mittelteil wird auf Wasserebene durch den zwangsläufigen Viergelenksmechanismus geführt (eine Doppelschwinge mit den Landebrücken als Schwingen und dem Schwimmkörper als Koppel). Die gegenseitigen Verdrehungen der Brückenteile um zwei Achsen werden mittels Kardangelenken aufgenommen. Abbildung 5-32 zeigt eine Ausführung mit einem Rollenkranz für die Drehung um die vertikale Achse und einer Welle für die Drehung um eine horizontale Achse.

Für den Antrieb wurden zwei Varianten untersucht: ein Antrieb der Schwingen der Landebrücken und ein Antrieb des Schwimmkörpers.

Beim Antrieb der Landebrücken sind, zur Überwindung der Totlagen, zwei Antriebe vorzusehen. Die Antriebsbewegung müsste ungleichförmig erfolgen, damit sich der Schwimmkörper gleichförmig bewegt. Als Antriebe wären sowohl Hydraulikzylinder, als auch Zahntriebe denkbar. Der Antrieb des Schwimmkörpers könnte – den Entwurfsgedanken folgend – durch mehrere verstellbare Ruder am Mittelteil erfolgen.

Die maximale Relativgeschwindigkeit zwischen den Zustiegsplattformen und der Brücke wurde mit 0,75 m/sec begrenzt.

Vergleichbare Bauwerke

Die 2003 erbaute Murinsel in Graz (Abbildung 5-34) entspricht ihrer Anordnung nach der vorgestellten Schwimmbrücke. Eine planmäßige Bewegung der Brücke ist jedoch unerwünscht, der Schwimmkörper wird durch ein Seil gehalten, das an einem Pfeiler in Flussmitte befestigt ist.

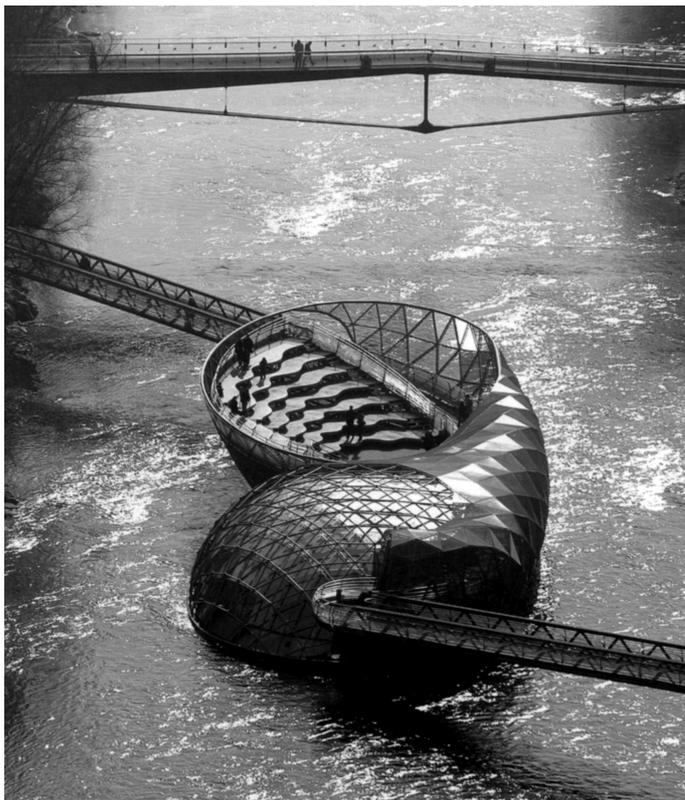


Abbildung 5-34: Murinsel, Graz

5.2 Hochbauten - Wände

Senkwand, Cafe Schlossberg, Graz, A

Entwurf: Rieper, Frank, Graz

Das 2003 erbaute Cafe direkt neben dem Wahrzeichen der Stadt mit einem Ausblick in drei Richtungen lässt sich nach diesen drei Seiten öffnen. Der überdachte Raum ist dazu mit vertikal beweglichen Isolierglaspanelen umschlossen, die sich in den Keller absenken lassen. Das Cafe wird dadurch zu einem Flugdach und der Innenraum bildet eine Einheit mit der umgebenden Terrasse.

Die Senkwand mit einer Gesamtlänge von rd. 30 m ist in 5 Segmente unterteilt, wobei die Unterteilung in der Wandfläche und nicht am Eck erfolgte, um Probleme hinsichtlich der vertikalen Führung und der Dichtigkeit zu vermeiden.

Die Decke über dem Keller wird von 6 Stahlbetonstützen getragen und trägt an ihrer dreiseitigen Auskragung die Aufhängungen der Senkwände.

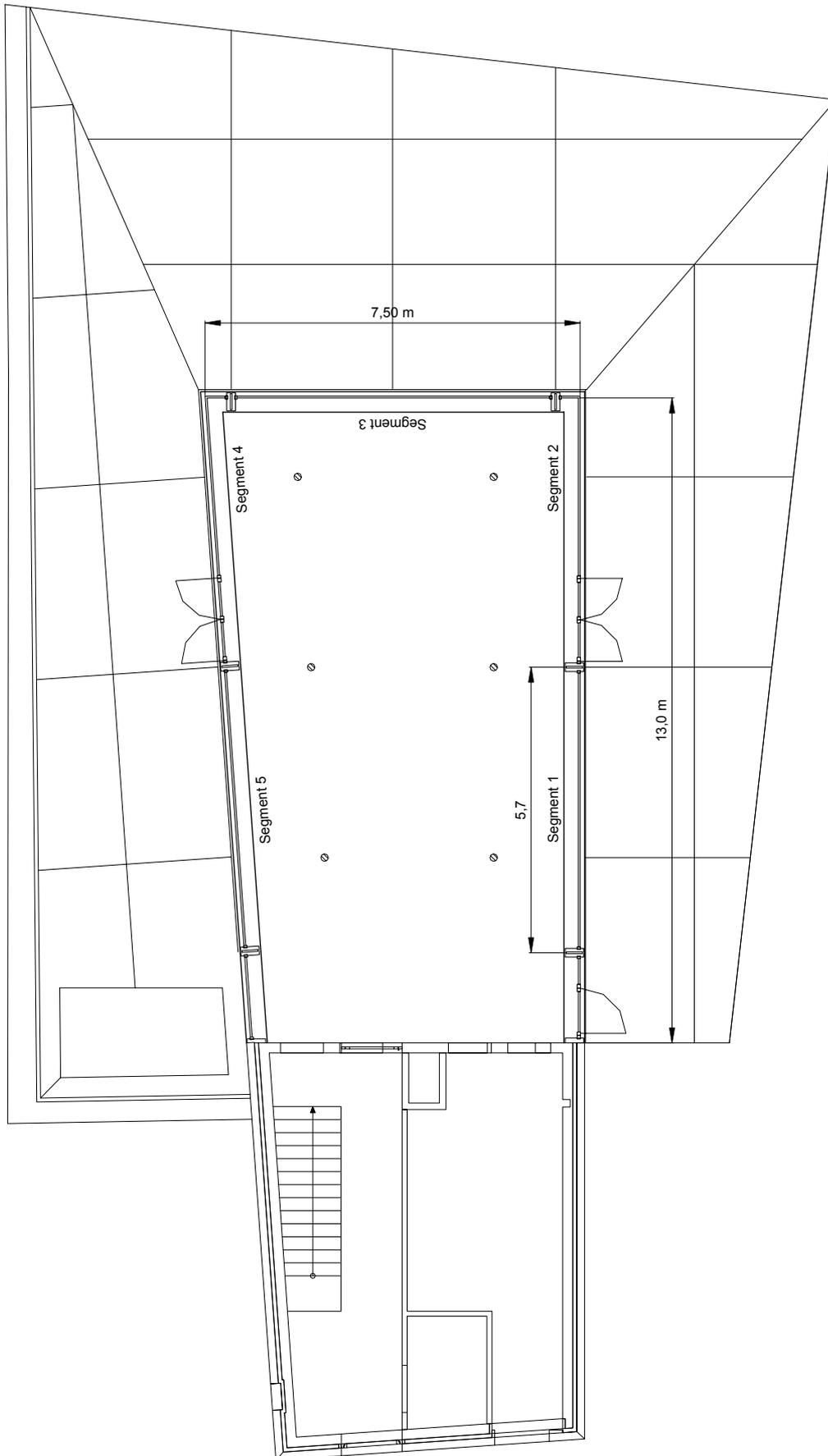
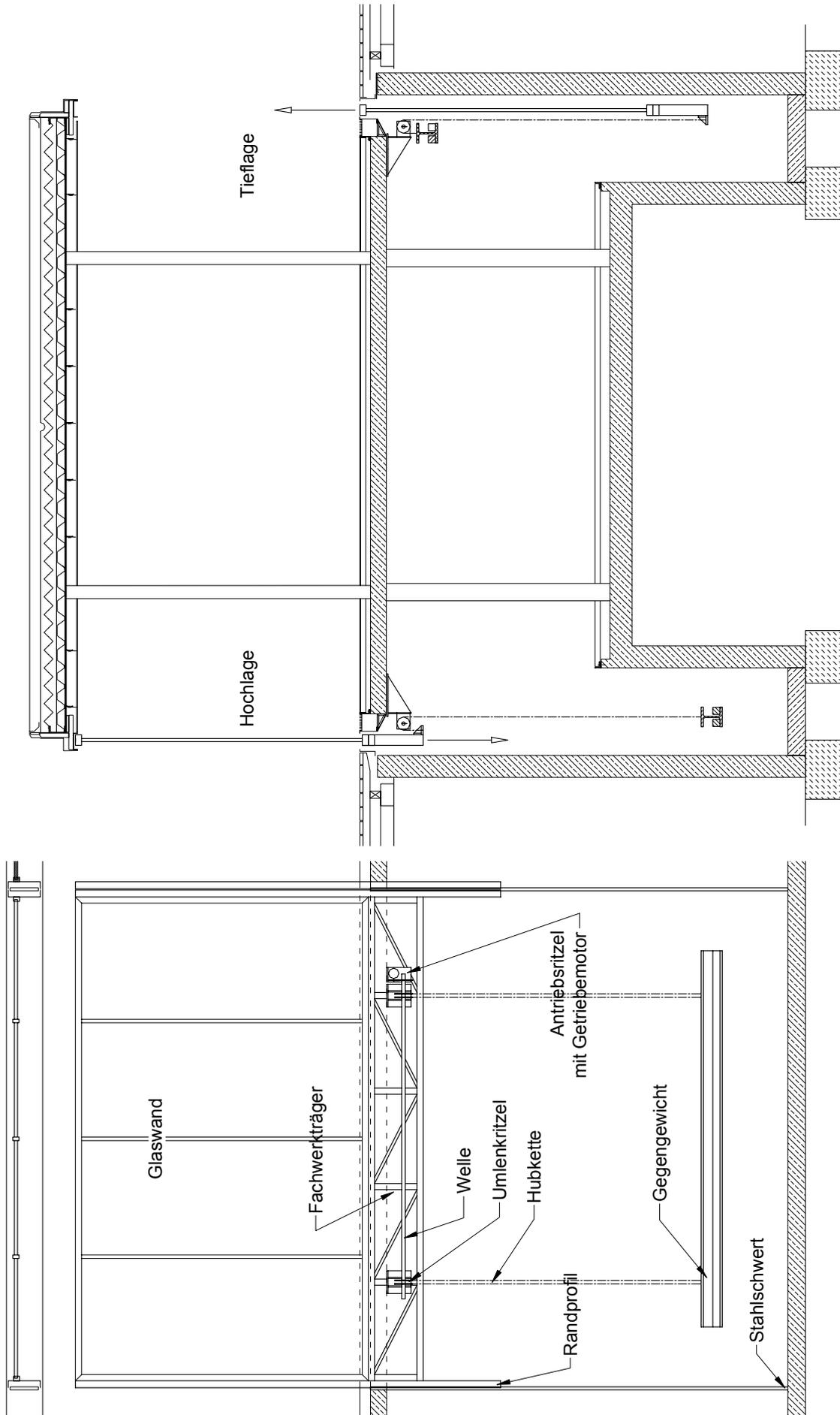


Abbildung 5-35: Grundriss EG mit den beweglichen Wandsegmenten

Abbildung 5-36 (nächste Seite): Aufriss und Seitenriss eines Wandsegments



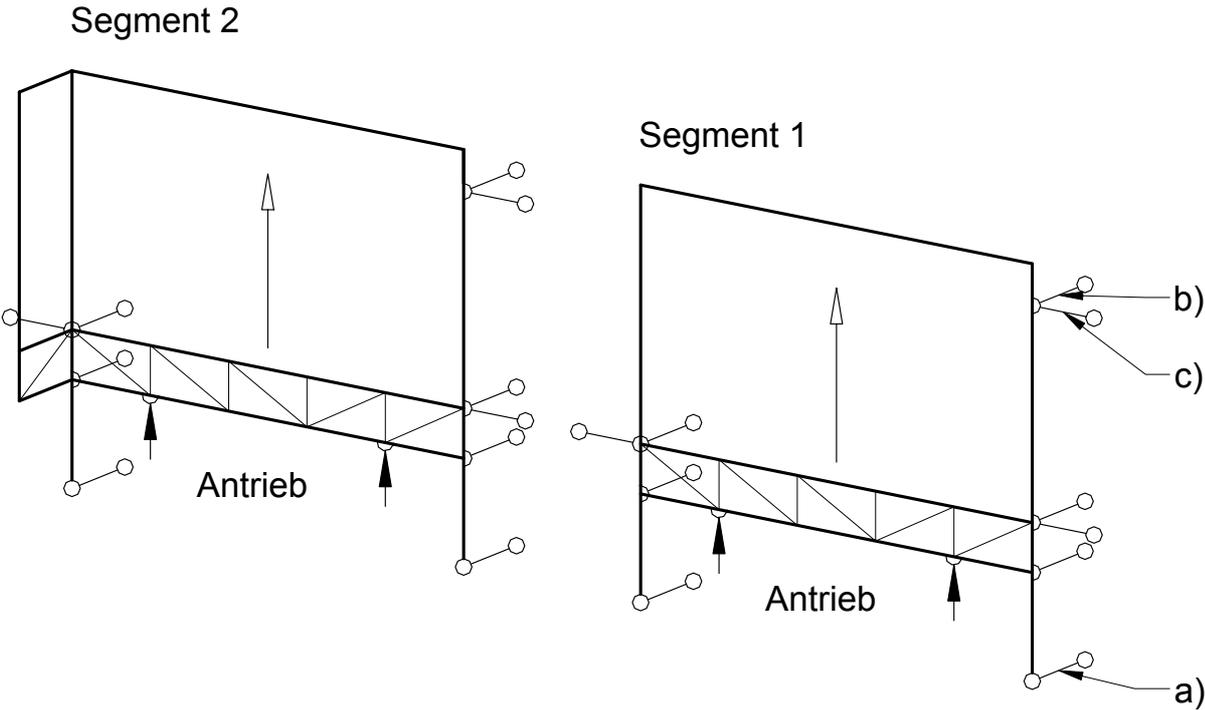


Abbildung 5-37: vertikal verschiebliche Lagerung der Segmente 1 und 2

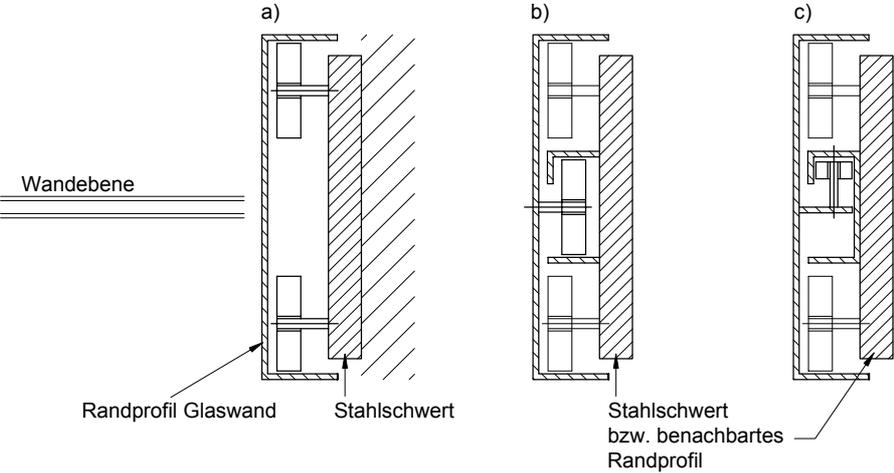


Abbildung 5-38: Typische Lagerausbildungen



Abbildung 5-39: Computeranimation des Cafes



Abbildung 5-40: Cafe im Bauzustand



Abbildung 5-41: Aufhängung des Fachwerkträgers im Keller (Hubketten mit Umlenkritzel, Welle, Antriebsritzel und Getriebemotor mit ausgehängter Antriebskette)



Abbildung 5-42: Aufhängung des Gegengewichts (mit Hubkette)

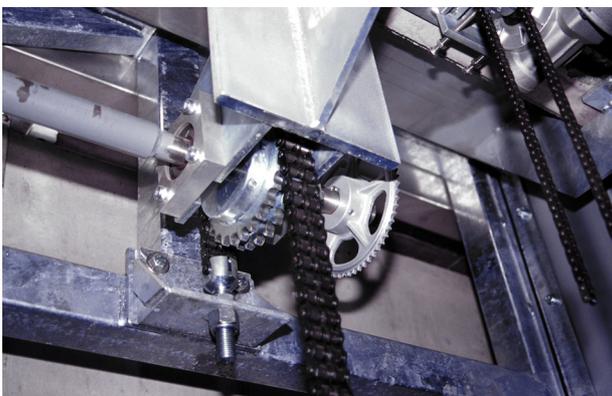


Abbildung 5-43: Welle, Umlenkritzel und Antriebsritzel (mit ausgehängter Antriebskette, ganz rechts im Bild)

Das bewegbare Tragwerk

Die 3,20 m hohen Senkwände sind als Isolierglasfassade mit Stahlrahmen konstruiert. Jede Wand wird an der Unterseite von einem Stahlfachwerk aus rechteckigen Hohlprofilen getragen, das mittels Hubketten an zwei Punkten aufgehängt ist. Die Hubketten laufen über Umlenkritzel auf einen I-Träger mit Stahlballast als Ausgleichsgewicht und sind als Zweifachketten ausgebildet.

Die Besonderheit der Senkwände in diesem Beispiel ist das Fehlen von fixen vertikalen Führungsschienen über die gesamte Hubhöhe. Die Führung der vertikal verschieblichen Senkwände erfolgt über Stahlschwerter im Keller und durch das benachbarte, bereits in Hochlage befindliche Segment auf einer Seite. Die augenscheinlich abgeleitete Lagerung ist in Abbildung 5-37 prinzipiell dargestellt, die Ausformung der einzelnen Lager in Abbildung 5-38.

Der Antrieb jedes der, im Gleichgewicht mit dem Ballast befindlichen, Wandsegmente erfolgt mittels Kettengeräte. Die beiden Umlenkritzel der Hubkette sind durch eine gemeinsame Welle verbunden und werden durch das Antriebsritzel des Kettentriebes synchron bewegt. Der Kettentrieb aus Getriebemotor mit Ritzel, Antriebskette und Antriebsritzel ist mit einer Rutschkupplung versehen.

Der Antrieb durch jeweils zwei hydraulische Teleskopzylinder ohne Gegengewicht wurde als Alternative untersucht. Die Schwierigkeiten bei der Synchronisation der beiden Teleskopstempel, das höhere Last- und Energieniveau und das Fehlen eines Handbetriebes für Notfälle sprach gegen diese Lösung.

Die Arretierung der Wandsegmente in den Hoch- und Tieflagen erfolgt über den Formschluss im Kettentrieb. Drucksensoren an der Unterseite des oberen Abschlussbleches verhindern das Einklemmen von Gegenständen und Personen beim Absenken der Wand. Weitere Kontaktsensoren in den Türen der Wandsegmente geben den Antrieb erst frei, wenn alle Türen geschlossen sind.

Vergleichbare Bauwerke

Mies van der Rohe sah im Haus Tugendhat in Brünn bereits 1928 eine Senkwand nach dem selben Prinzip vor.

Schiebetore Stadthalle, Graz, A

Entwurf : Klaus Kada, Graz, A

Die Dachkonstruktion der Halle ist eine Fachwerkrost auf vier Betonsäulen. Die Dachplatte kragt über ihre Auflager in Längs und Querrichtung aus, sodass auf die Wände der Halle keine vertikalen Lasten wirken können.

Die seitlichen Wände können im hinteren Bereich in Längsrichtung verschoben werden und sind über eine Länge von 45 m als Schiebesegmente geteilt ausgeführt.

Die Halle ist 153,5 m lang und 70 m breit, die Höhe der Wände beträgt 16,0 m.

Lagerung eines Schiebewandsegments

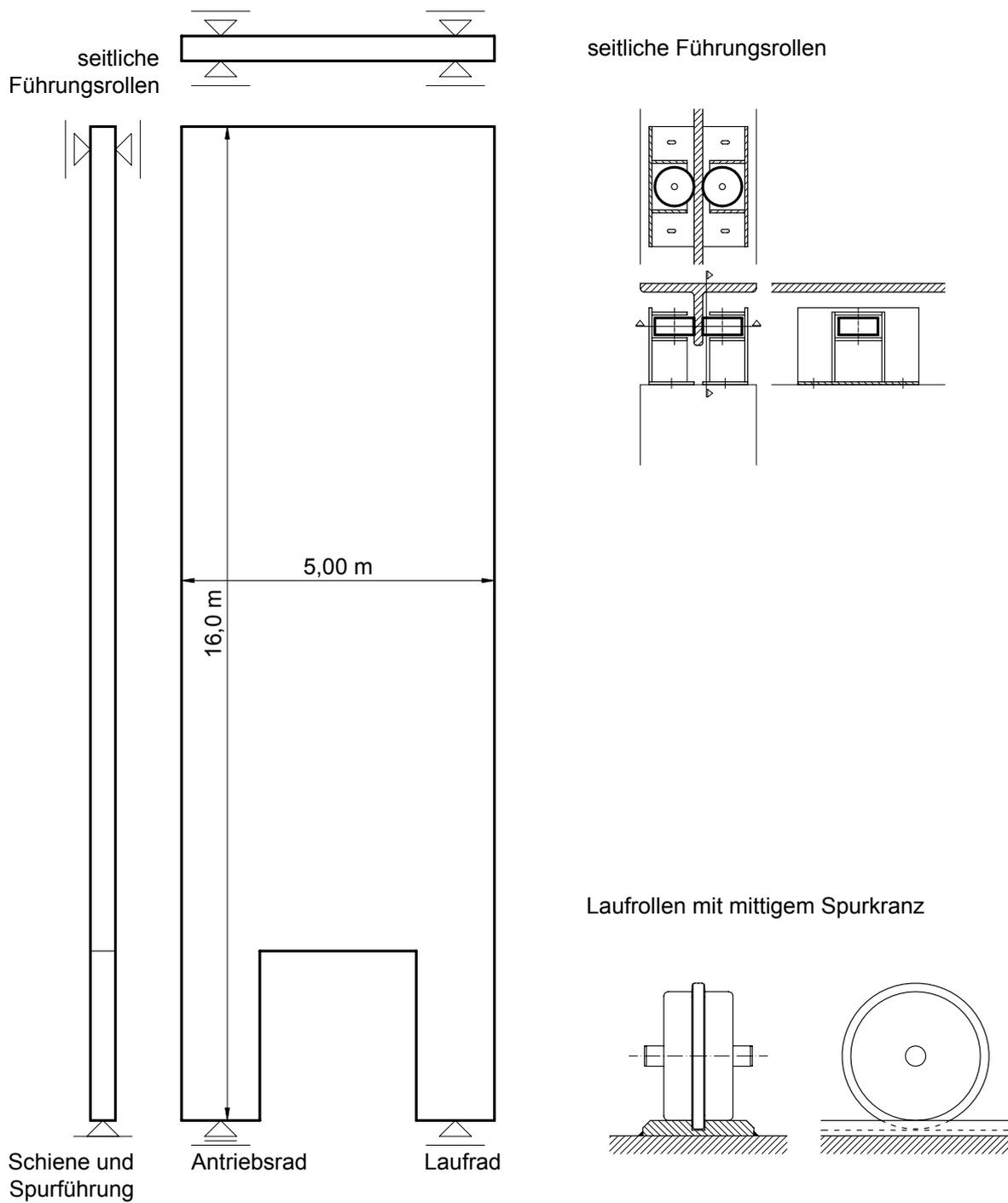


Abbildung 5-44: Lagerung eines Schiebewandsegments, Details der Führungsrollen und der Laufrolle



Abbildung 5-45: Schiebewandsegmente von Innen

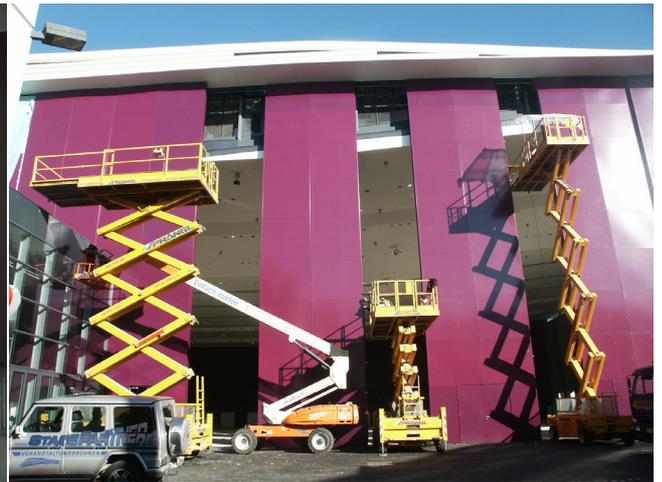


Abbildung 5-46: Schiebewandsegmente von Aussen



Abbildung 5-47: Schiene



Abbildung 5-48: Laufrad

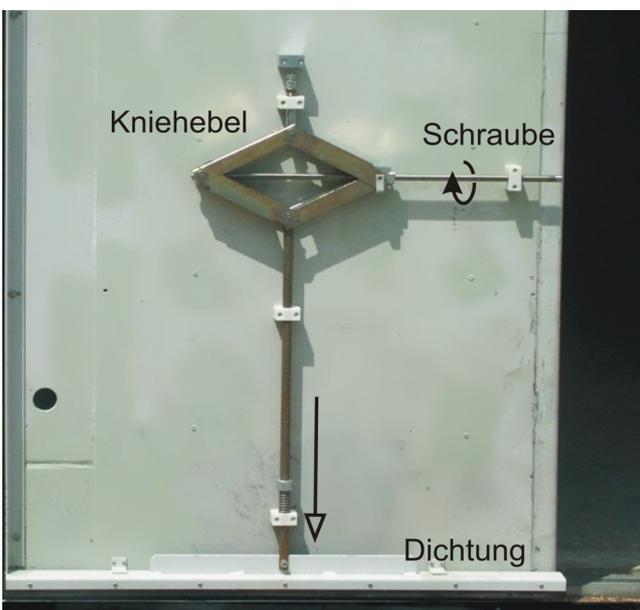


Abbildung 5-49: Dichtung

Bewegliches Tragwerk

Die 5 m breiten Schiebewand-Elemente sind 40 cm dicke Sandwichelemente mit 3 mm dicken Stahlblechen, die im Verbund mit der Dämmung wirken und mit 1,5 mm dicken Stegen versteift und am Rand umlaufend durch Walzprofile abgeschlossen sind.

Die Schiebetore sind in Hallenlängsrichtung fahrbar mit zwei Laufrädern in der am Boden befestigten Laufschiene und mittels Führungsrollen an einer oberen Führungsschiene gelagert. Zur Aufnahme von Windkräften laufen die Räder mit ihrem mittigen Spurkranz in einer genuteten Flachschiene. An der Oberseite sind die Schiebetore mittels Führungsrollen, die beidseits des Steges eines T-förmigen Profils laufen, seitlich gehalten.

Der Antrieb erfolgt durch eines der beiden Laufräder über die Paarung Reibrad und Schiene mittels Elektromotor mit Zahnradgetriebe. Zur Aufnahme von Toleranzen beim Zusammenfahren sind die Schiebeelemente mit Justierbolzen versehen.

Um die Bodenfuge abzuschließen wird eine Dichtung mittels einer Kniehebelkonstruktion durch Schraubetrieb manuell nach unten bewegt (Abbildung 5-49).

Drehtore Stadthalle, Graz, A

Entwurf: Klaus Kada, Graz, A

Bei dem bereits auf Seite 149 beschriebenen Objekt besteht die hintere Querwand der Halle aus elf Drehtoren mit einer Höhe von rd. 16,00 m und einer Breite von jeweils 6,60 m.

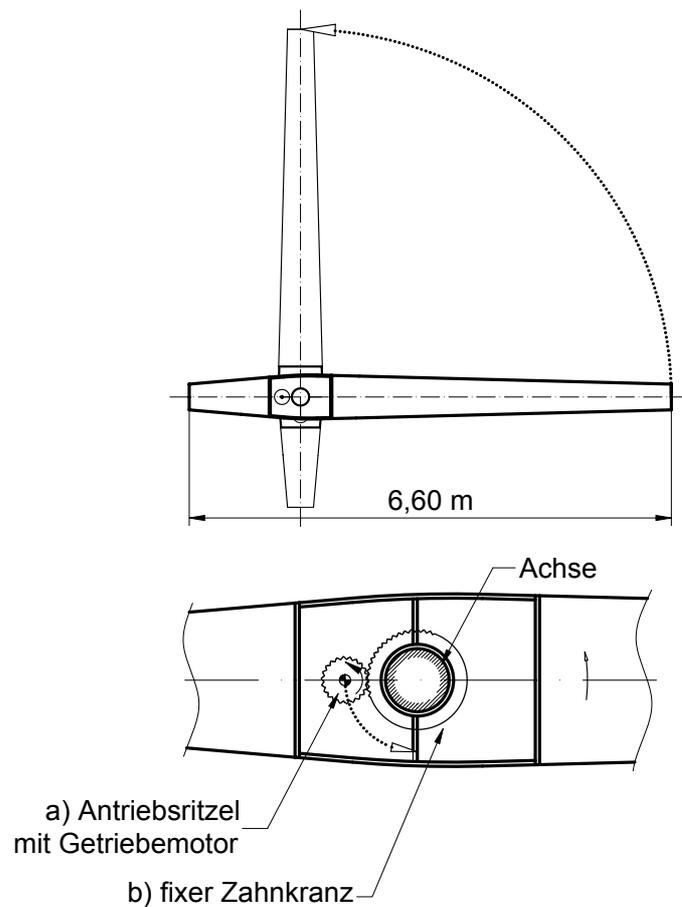


Abbildung 5-50: Horizontalschnitt durch das Drehtor mit dem unteren Lagerblech und Zahntrieb



Abbildung 5-51: Angeln der Drehtore mit unteren Lagerblechen



Abbildung 5-52: Torflügel nach der Montage



Abbildung 5-53: Innenansicht der Tore



Abbildung 5-54: Lagerbleche und Zahnräder



Abbildung 5-55: drehbares Lager mit fixer Drehachse und Bohrungen für den Getriebemotor



Abbildung 5-56: Lager des Drehtores mit montiertem Getriebemotor



Abbildung 5-57: Getriebemotor mit Antriebsritzel



Abbildung 5-58: Achse und Torflügel Blick nach oben

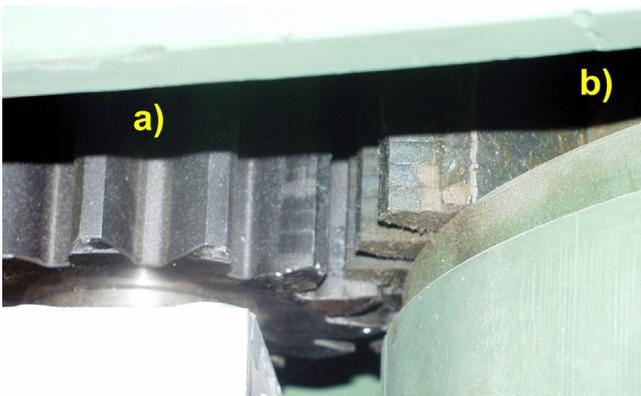


Abbildung 5-59: a) Antriebsritzel des Getriebemotors, b) fixer Zahnkranz am Fuß der Achse



Abbildung 5-60: fixer Zahnkranz mit Gleitschale für das Lager des Drehtores



Abbildung 5-61: Arretierungsbolzen mit Winkelhebel

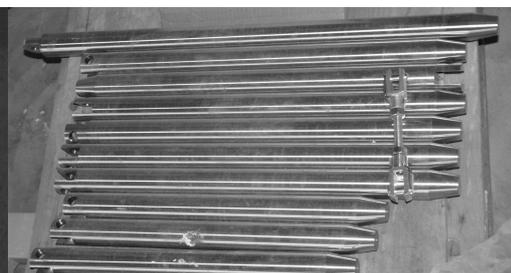


Abbildung 5-62: Arretierungsbolzen vor dem Einbau

Bewegliches Tragwerk

Die Flügel der Drehtore sind aus Stahlprofilen und Blechen zusammengesetzt, ihr Gesamtgewicht beträgt jeweils 20 t.

Auf die vertikale Rohrstütze, welche die unbewegliche Angel des Drehtores bildet, werden oben und unten teflonbeschichtete Gleitlagerschalen von kombinierten Radial-Axiallagern angeschweißt. Die drehbaren Lager des Drehtores übernehmen die vertikalen Gewichtskräfte und die horizontalen Kräfte aus dem Ungleichgewicht des unsymmetrischen Flügels.

Der Antrieb erfolgt über ein Zahnradgetriebe mit außen liegender Stirnradverzahnung. Der Getriebemotor ist seitlich der Achse am unteren Lager des Torflügels untergebracht und treibt das Antriebsritzeln an, das gegenüber dem, auf der fixen Torachse montierten Zahnkranz abrollt und den Flügel in Drehung versetzt.

Die Arretierung des Tores erfolgt mittels drei über die Höhe verteilten seitlichen Arretierbolzen, die über Winkelhebel elektrisch bewegt werden und in entsprechende Buchsen eingreifen (Abbildung 5-61, Abbildung 5-62).

Die Dichtlippen an der Unterseite der Tore können nach dem Schließen und Arretieren der Drehflügel von Hand gegen den Boden gepresst werden, dabei wird mittels einer Drehkurbel über ein Zahnritzeln eine vertikale Zahnstange mit der Dichtung nach unten bewegt.

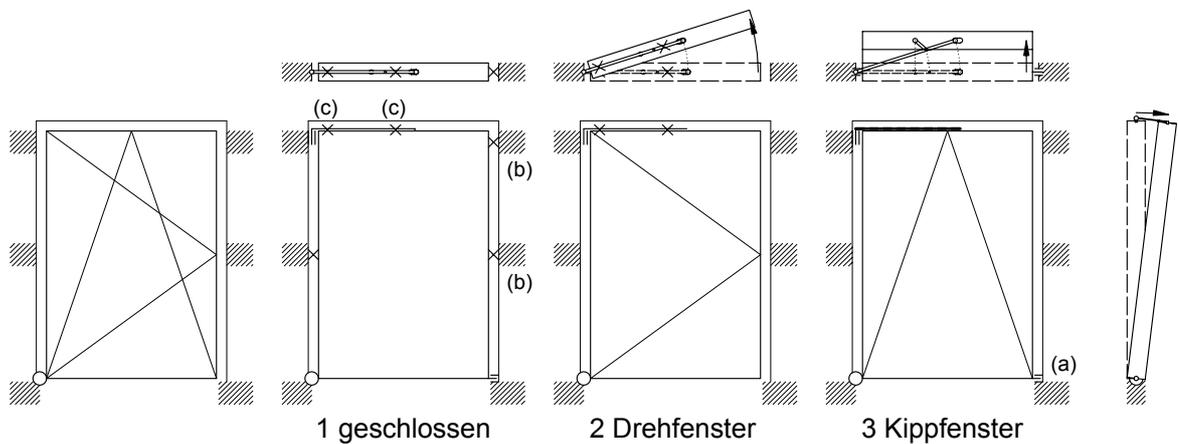
System Dreh- und Kipfenster

Allgemeines

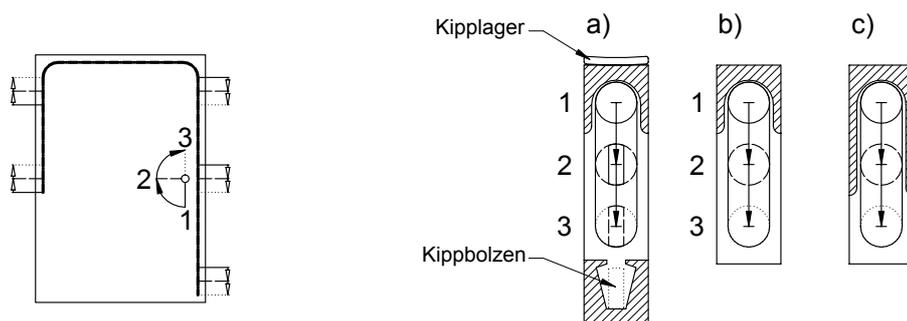
Das System des Dreh-Kipfensters mit einer Fensterebene aus Isolierglas ersetzt ab den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts im Allgemeinen das Kastenfenster aus zweiflügeligen Drehfenstern mit dazwischen liegendem Luftraum.

Das Dreh-Kipfenster ermöglicht den Raumabschluss bei geschlossenem Flügel, eine Gesamtöffnung als Drehfenster und eine Lüftungsöffnung als Kipfenster. Diese Funktionen werden mittels Drehhebel umgestellt. In Kippstellung wird die Neigung durch eine oben liegende Schere begrenzt.

Dreh-Kipfenster



Getriebe zur Änderung der Lagerbedingungen



Druckmittel mit elastischem Band

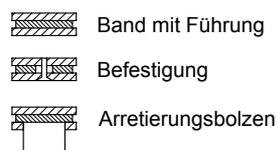


Abbildung 5-63: Dreh-Kipfenster, Prinzipskizzen

Bewegliche Teile

a. Konstruktion

Der Fensterflügel lagert im unteren Eck allseitig drehbar. Für die Funktionen (1) geschlossenes Fenster, (2) Drehfenster und (3) Kippfenster werden entsprechend zusätzliche Lagerbedingungen gesperrt, wie in Abbildung 5-63 dargestellt.

Der Wechsel der Lagerbedingung erfolgt durch einen Drehhebel über ein Druckmittelgetriebe. Die Antriebsdrehung des Hebels wird mittels eines Stahlbandes als Druckmittel übertragen, das gegen Ausweichen zwischen Blechen geführt ist und an den oberen Ecken umgelenkt wird. Am Band sind Arretierungsbolzen montiert, die in U-förmige Vertiefungen der Beschläge am Rahmen greifen und so die Lagerbedingungen für die jeweilige Funktion freigeben oder sperren.

In der vertikalen Drehachse des Fensters ist am oberen Eck ein Scharniergelenk angeordnet, in welchem der Fensterflügel über eine Schere gelagert ist.

b. Geschlossenes Fenster

Die Schere wird für das geschlossene Fenster über Arretierungen fest mit dem Rahmen verbunden. Weiters greifen die seitlich angeordneten Arretierungsbolzen in die Beschläge am Rahmen ein um das Fenster gegen alle Bewegungen zu halten.

c. Drehfenster

Die Schere ist – wie beim geschlossenen Fenster – mit dem Flügel fest verbunden, die seitlichen Arretierungen sind nicht aktiv. Das Fenster ist folglich um die vertikale Achse drehbar gelagert und kann durch Schwenken geöffnet werden.

d. Kippfenster

Die Arretierung zwischen Flügel und Schere wird freigegeben, die seitlichen Arretierungen sind ebenfalls gelöst, nur der Kippbolzen in (a) ist arretiert.

Die Lagerung des Flügels ermöglicht das Kippen um den unteren Rahmenrand. Das Kipplager ist so ausgebildet, dass ein Blech des Flügels bei der Kippbewegung auf diesem gleitet und die vertikalen Lasten überträgt. Der Kippbolzen dient nur der Aktivierung des Gelenks.

Die Neigung des Fensters wird durch die oben angeordnete Schere begrenzt. Das Gelenksgetriebe der Schere besteht aus zwei Stangen, die gelenkig gekoppelt und drehbar bzw. mittels Schieber gelagert sind. Bei der Kippbewegung des Fensters fährt der Gleitstein in der Kulisse am Fensterflügel. Die Länge der Kulisse ist nun so begrenzt, dass sich die gewünschte Kippneigung des Flügels einstellt und das Fenster in der Kippendlage arretiert ist.

Earnstings Warenhaus, Coesfeld, D

Entwurf: Santiago Calatrava, Spanien

(in Zusammenarbeit mit Architekten BSA/SIA, B. Reichlin, F. Reinhart, Lugano, CH)

Im Zuge der Neugestaltung einer Fassade wurden drei um die horizontale Achse faltbare Tore mit jeweils 13,50 m Breite und 7,00 m Höhe ausgeführt.

Jedes Tor wird der Breite nach in 17 cm breite Streifen geteilt. Die Streifen sind als Scheren ausgebildet, mit jeweils zwei durch ein Mittelgelenk gekoppelten Stäben, die am oberen Ende unverschieblich um eine gemeinsame Achse drehbar gelagert und am unteren Ende über einen gemeinsamen Querträger verbunden sind. Der Querträger ist in einer Schiene vertikal fahrbar gelagert und angetrieben. Jede Schere bildet damit eine einfache Schubkurbel.

Durch das Heben des Querträgers falten sich die Scheren um die horizontale Achse nach außen. Um der wellenförmigen Ausbildung der Fassade zu entsprechen, werden die Mittelgelenke der nebeneinander liegenden Scheren in ihrer Höhenlage parabelförmig verlaufend angeordnet. Dadurch befinden sich in der geschlossenen Endlage alle Scheren annähernd in einer Ebene, während die einzelnen Stäbe bei geöffnetem Tor nebeneinander auf einer windschiefen Fläche liegen und die Mittelgelenke eine Welle bilden.

Um beim Antrieb über den Schieber eine Totlage zu vermeiden, wurden die Führungsschienen etwas aus der Vertikalen geneigt.

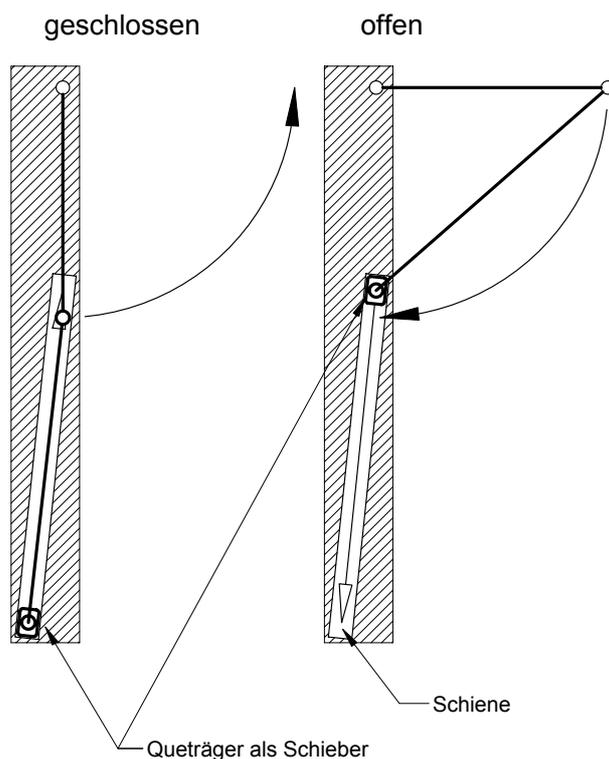
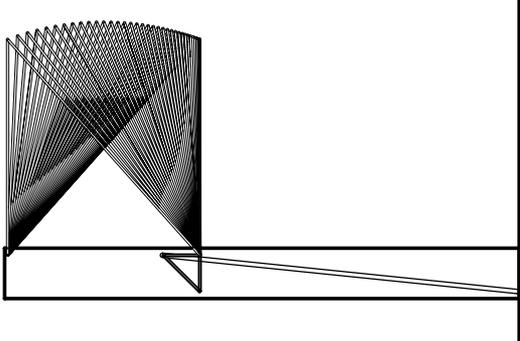
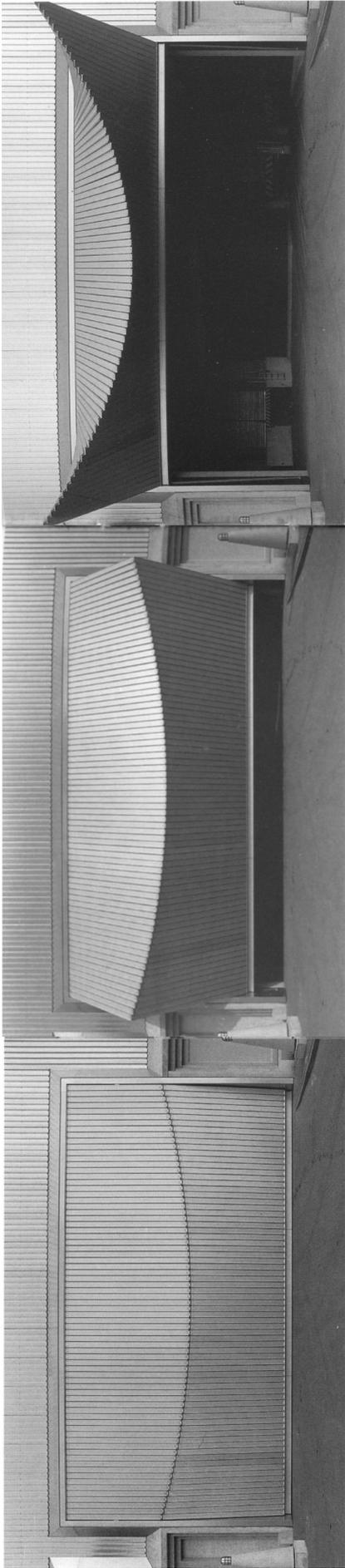
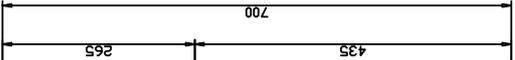
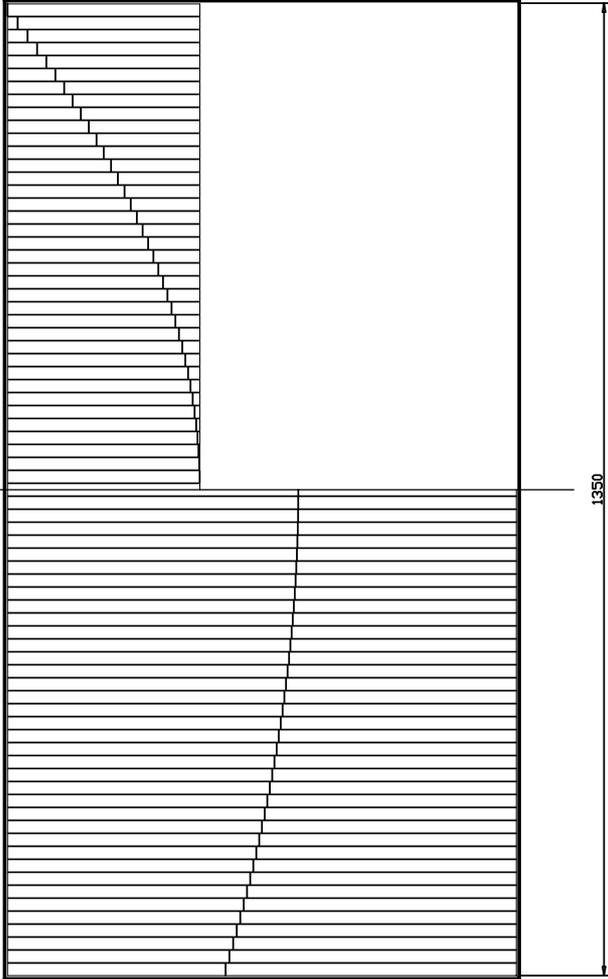


Abbildung 5-64: Torquerschnitt mit einer der Scheren

geöffnet



geschlossen



Fassade des Aurora Place, Sydney, AUS

Entwurf: Renzo Piano Building Workshop

Das Objekt besteht aus einem 44-stöckigen Bürogebäude und einem anschließenden 17-stöckigen Wohngebäude. Die Ostfassade des Wohngebäudes hat eine Glasfassade mit ausklappbaren Lamellen, welche zur Belüftung der dahinter liegenden Wohnungsterrassen dienen.

Das bewegliche Tragwerk

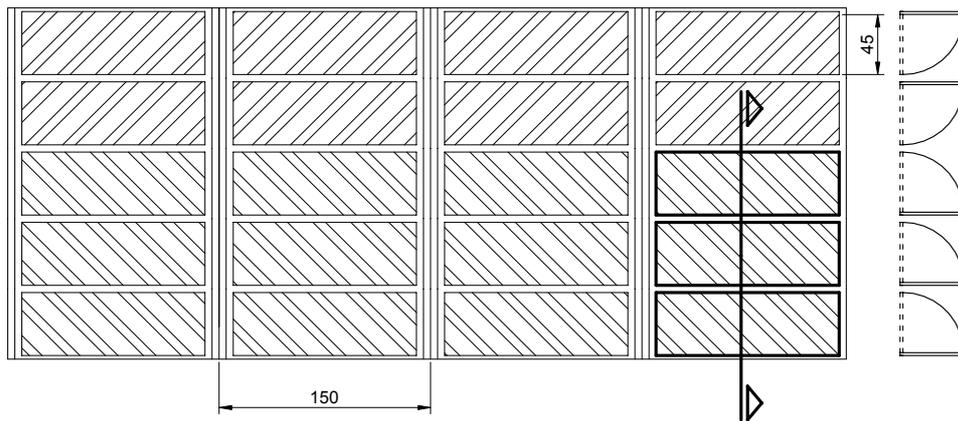
Die Fassadenkonstruktion besteht aus 45 cm breiten, um die horizontale Achse klappbaren Glaslamellen zwischen Glasschwertern im Abstand von 1,5 m.

Der Antrieb der Lamellen erfolgt feldweise, in Gruppen von jeweils zwei oberen und drei unteren Lamellen und vier in Längsrichtung. Ein Elektromotor ist für jede Gruppe auf Höhe der Geschoßdecke hinter der Glasfassade angeordnet. Die Drehbewegung des Motors wird über eine horizontale Welle in Längsrichtung und Parallelkurbeln der Höhe nach übertragen, sodass jeweils alle Lamellen einer Gruppe gleichzeitig bewegt werden. Die Parallelkurbeln sind neben den Glasschwertern angeordnet. Ritzel auf der Antriebswelle bewegen die Antriebskurbel, die als Viertelkreis mit außenliegender Stirnradverzahnung ausgebildet ist und die Bewegung über Pendelstäbe an die Lamellen überträgt.

Vergleichbare Objekte

Paxton sah im Kristallpalast für die Weltausstellung von 1851 in London ähnliche Lüftungslamellen vor.

Standardfeld der Fassadekonstruktion



Schnitt durch die Fassadekonstruktion geschlossen

Schnitt durch die Fassadekonstruktion geöffnet

Bewegungsübertragung durch Parallelkurbel

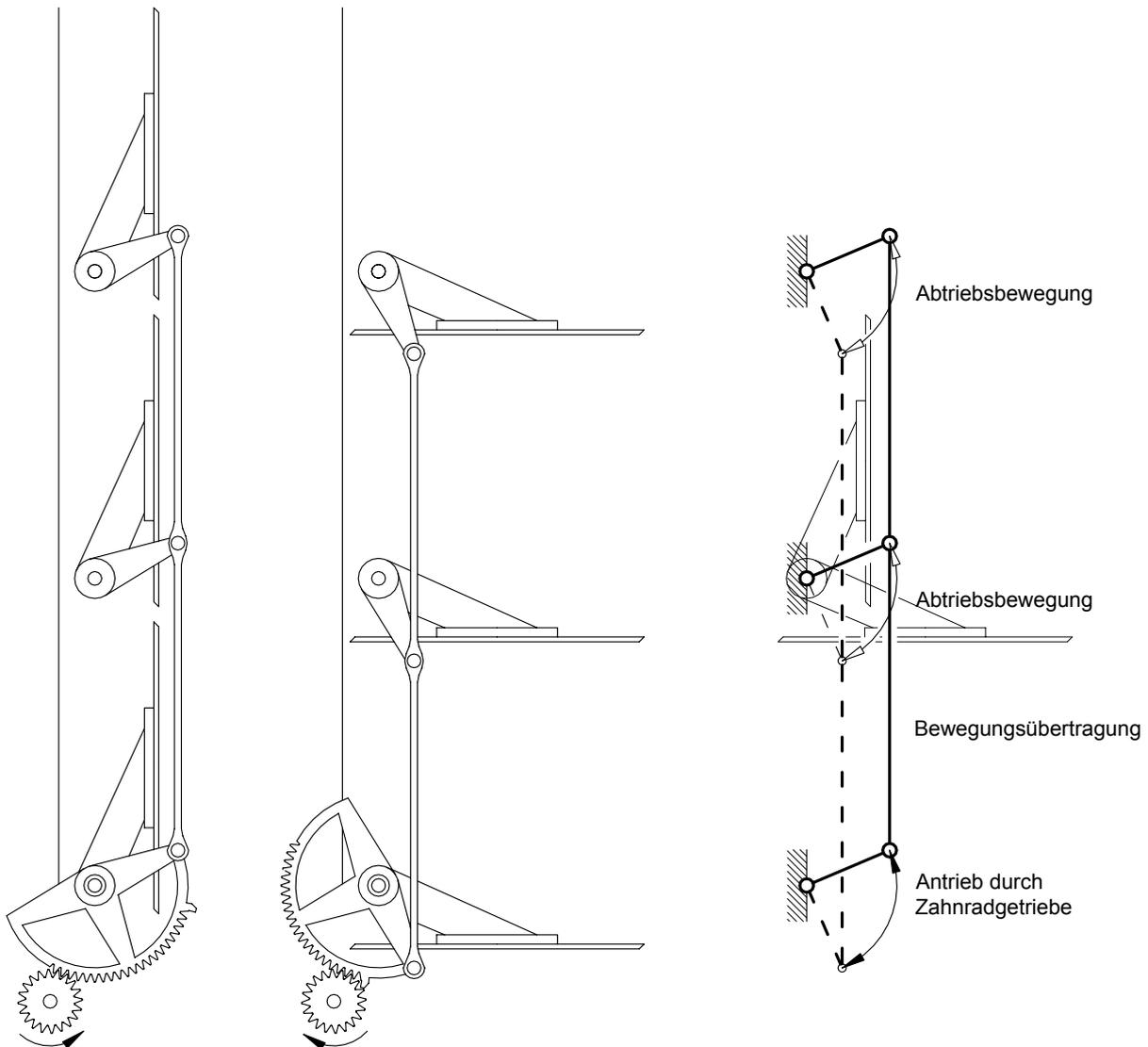


Abbildung 5-65: Querschnitt der unteren drei Glaslamellen im geschlossenen und geöffneten Zustand, Parallelkurbeln zur Bewegungsübertragung



Abbildung 5-66: Ansicht eines Fassadenfeldes

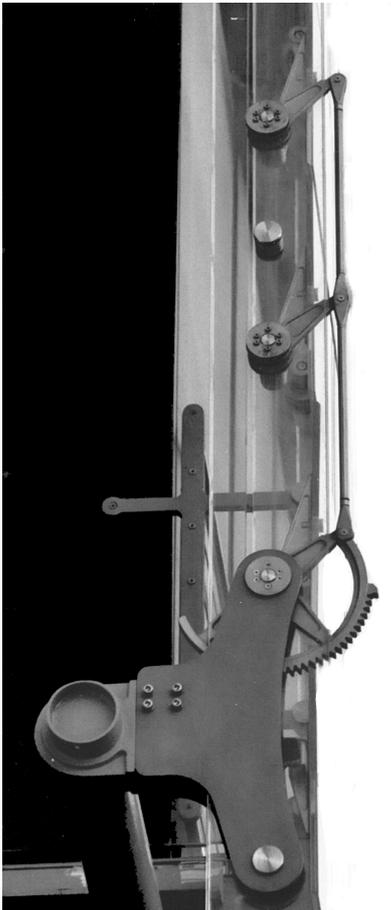


Abbildung 5-67: Ansicht des Antriebes und der Parallelkurbeln

Fassade des Arabischen Institutes, Paris, FRA

Entwurf: Jean Nouvelle

Bei diesem Objekt dienen in der Südfassade 30 000 bewegliche Blenden einer aufwendigen Veränderung der Lichtdurchlässigkeit. Die Muster der Blenden spiegeln Symbole der arabischen Welt wieder.

Jede Blende besteht aus einem Lagerring, drehsymmetrisch gelagerten Lamellen in zwei Ebenen und einer um das Zentrum drehbar gelagerten Kurvenscheibe.

Die Lamellen sind entlang des Umfangs drehbar im Lagerring gelagert und greifen in einem zweiten Punkt mit einem Gleitstein in eine gekrümmte Kulissee der Kurvenscheibe.

Durch Drehung der Kurvenscheibe werden die Lamellen um ihren Lagerpunkt gedreht und übereinander geschoben.

Der Antrieb erfolgt durch ein Gestänge über einen Elektromotor (Das kinematische System ist in Abbildung 5-68 dargestellt).

Der Aufwand hinsichtlich Antrieb und Lagerung und die Kombination mehrerer Kurventriebe widerspricht dem Grundgedanken einfacher Konstruktionen für bewegliche Tragwerke. Die Kleinteiligkeit und die große Zahl der gemeinsam anzutreibenden Einheiten führte zu Einschränkungen in der Funktionstüchtigkeit des Fassadensystems.

Die Konstruktion erinnert an Kamerablenden, bei denen ebenfalls überlappende Lamellen mittels Drehring in das Zentrum gedreht werden.

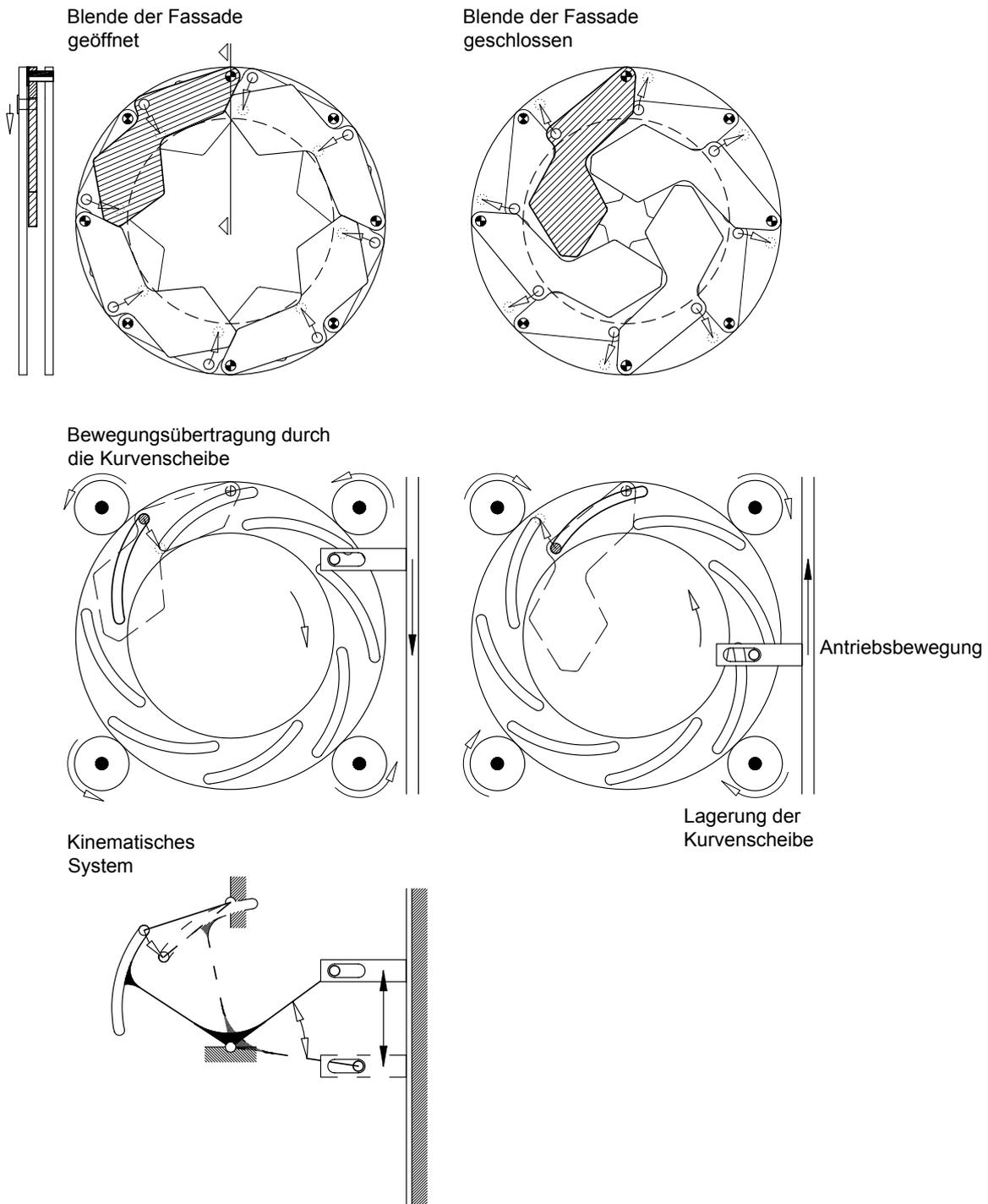


Abbildung 5-68: Blendensystem der beweglichen Fassade

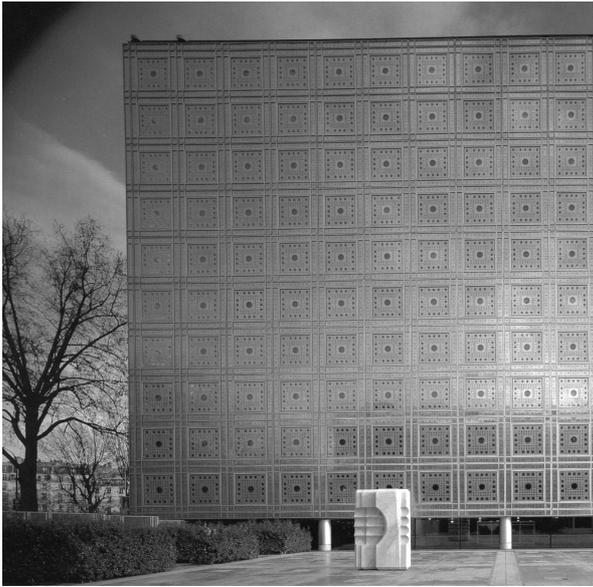


Abbildung 5-69: Ansicht der Südfassade

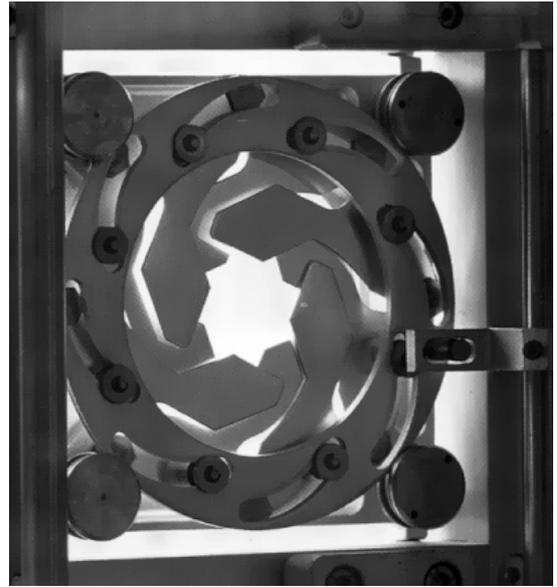


Abbildung 5-70: Blendensystem mit Lamellen und Kurvenscheibe

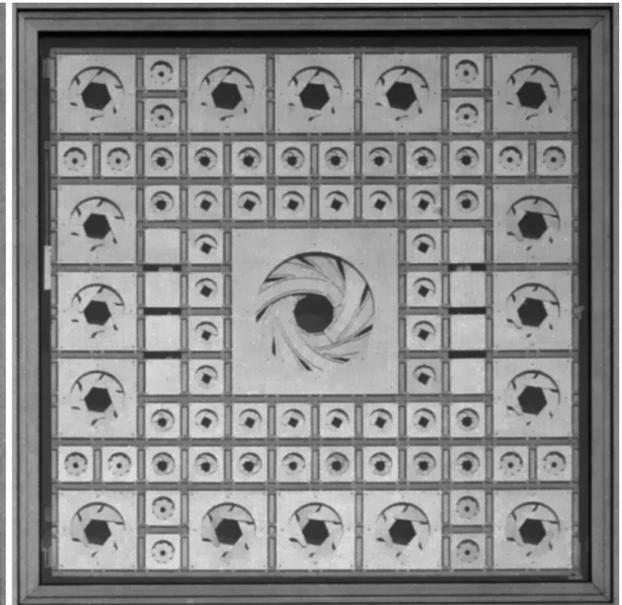
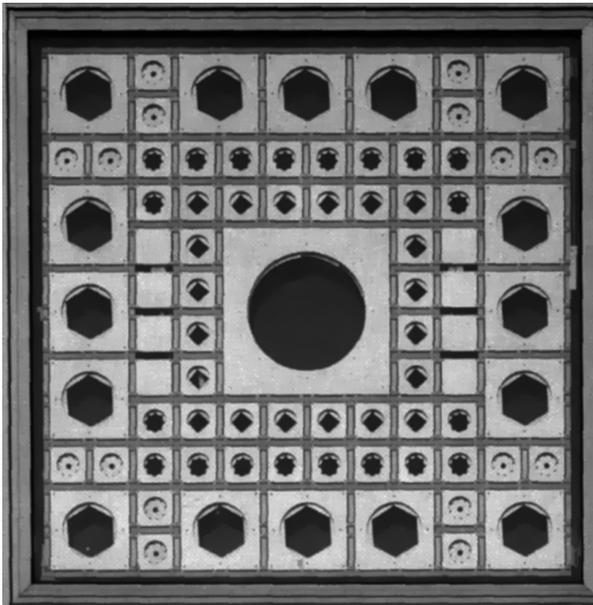


Abbildung 5-71: Fassadenausschnitt in offenem und geschlossenem Zustand.

5.3 Hochbau - Dächer

Schlossbergkasematten, Graz, A

Entwurf : Ingrid Mayr, Jörg Mayr, Graz

Für die Kasemattenbühne am Grazer Schlossberg wurde 1987 ein bewegliches Dach gebaut um die Aufführungen innerhalb des rechteckigen Grundriss von rund 50 m Länge und 20 m Breite witterungsunabhängig zeigen zu können.

Das Dach besteht aus einem fixen und drei verfahrbaren Abschnitten, die als Stahlrahmen mit textiler Bespannung ausgeführt wurden und untereinander geschoben werden können.



Abbildung 5-72: Überdachung der Kasemattenbühne, Blick in Richtung Bühne



Abbildung 5-73: Schließen des Daches

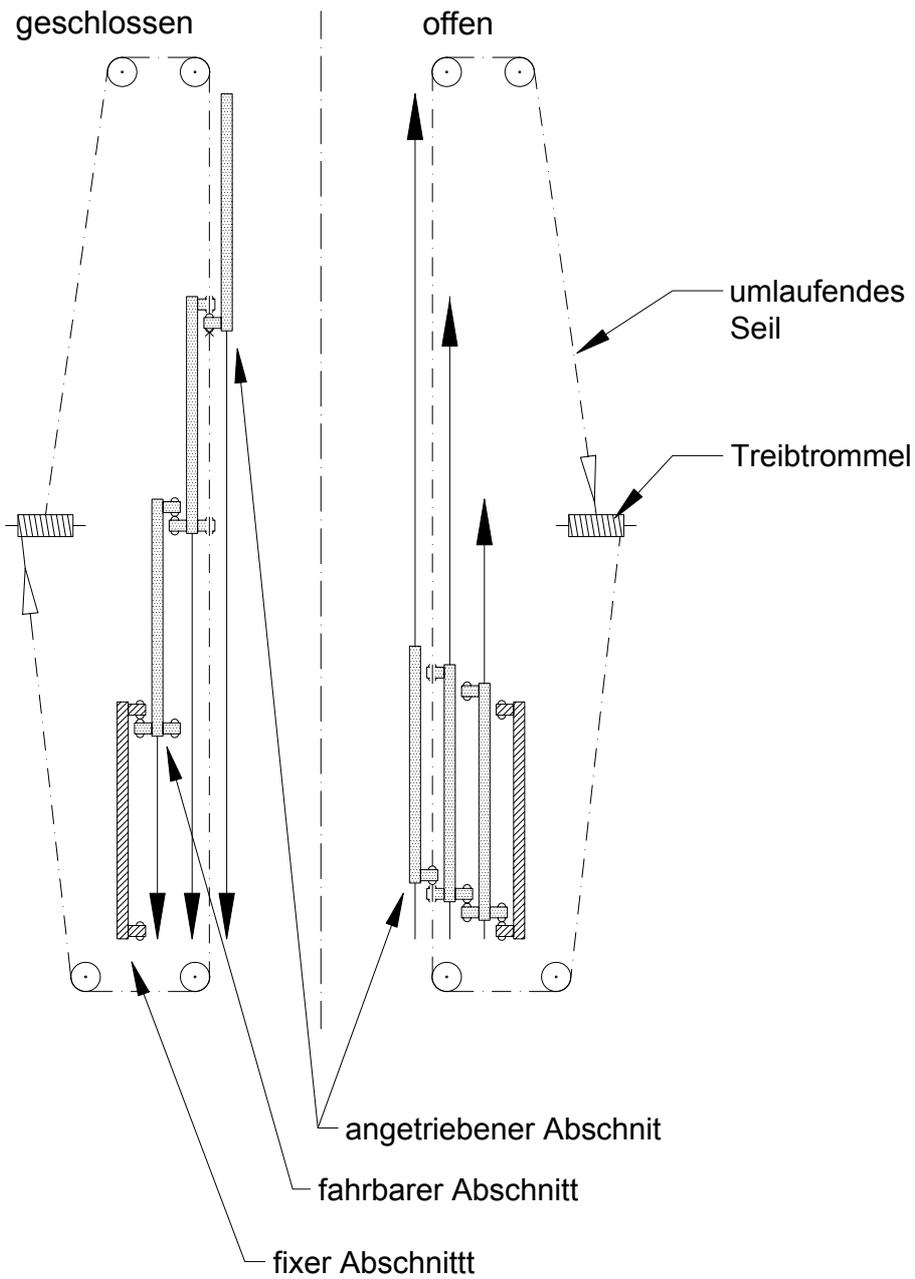


Abbildung 5-74: Horizontalschnitt – Prinzipskizze

Teil der Dachkonstruktion, 2. Dachabschnitt

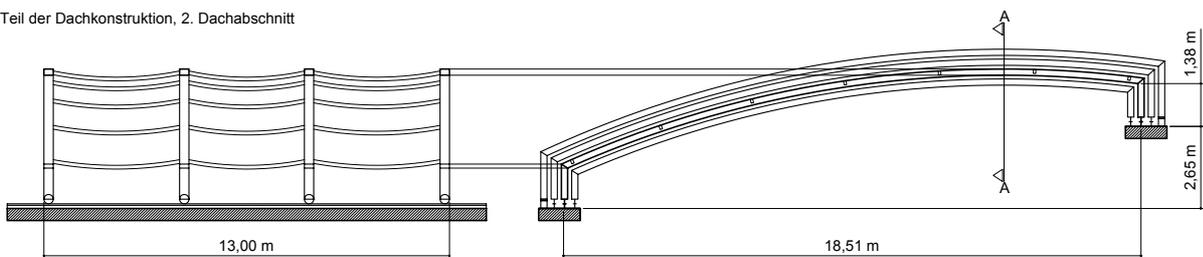


Abbildung 5-75: Dachabschnitte



Abbildung 5-76: Dachabschnitte und Schienen



Abbildung 5-77: Schienenprofil und -befestigung



Abbildung 5-78: Treibtrommel



Abbildung 5-79: Umlenkrollen

Das bewegbare Tragwerk

Die Dachabschnitte bestehen jeweils aus vier gegeneinander ausgesteiften Rahmen. Jeder der 13 m langen Abschnitte überspannt rd. 20 m von Schiene zu Schiene. Der Größenversatz für das Untereinanderfahren beträgt 13 cm bei einer Überlappung der ausgefahrenen Dachabschnitte in Längsrichtung um 70 cm.

Jeder der Dachabschnitte ist mit Lauf- und Führungsrollen in den Rahmenfußpunkten auf eigenen Kranschienen gelagert (Abbildung 5-77).

Das Dach wird von zwei umlaufenden Seiltrieben bewegt. Je eine Seilschleife verbindet über Umlaufrollen den kleinsten Dachabschnitt mit einer Treibtrommel. Die beiden Antriebe werden elektrisch synchronisiert. Beim Schließen des Daches wird zunächst nur der innerste Dachabschnitt bewegt bis er mit Puffern auf Konsolen an den nächsten Abschnitt stößt und diesen mitnimmt. Das Ende der Bewegung ist erreicht, wenn der letzte fahrbare Abschnitt an die Konsole des fixen Abschnittes stößt. Das Schließen erfolgt auf gleiche Weise mit entsprechenden Konsolen.

Das Antriebsseil ist auf beiden Seiten mit Tellerfedern gelagert, um für eine ausreichende Spannung im Seil zu sorgen und Stöße zu dämpfen.

Bad zur Sonne, Graz, A

Architekt : Fritz Lorenz, Salzburg

Das bewegliche Dach über dem auf eine Badeanstalt aus dem 19.Jh. zurückgehenden Bad zur Sonne wurde 2001 erbaut. Der nach oben offene rechteckige Grundriss des Beckens wird umlaufend durch Galerien über drei Stockwerke begrenzt, über welchen das Dach angeordnet ist das als ganzes in Querrichtung über einen bestehenden Gebäudeteil des Bades verschoben werden kann.

Die Dachplatte ist auf einer Unterkonstruktion aus Querträgern fahrbar gelagert und parkt in der geöffneten Endlage auf einer fixen Unterkonstruktion über dem benachbarten Gebäudeteil. Die Unterkonstruktion über dem Becken ist ebenfalls verfahrbar ausgeführt und kann nach dem Öffnen des Daches unter die fixe Unterkonstruktion zurückgezogen werden, sodass die Öffnung über dem Becken zur Gänze frei gemacht werden kann (Abbildung 5-80).

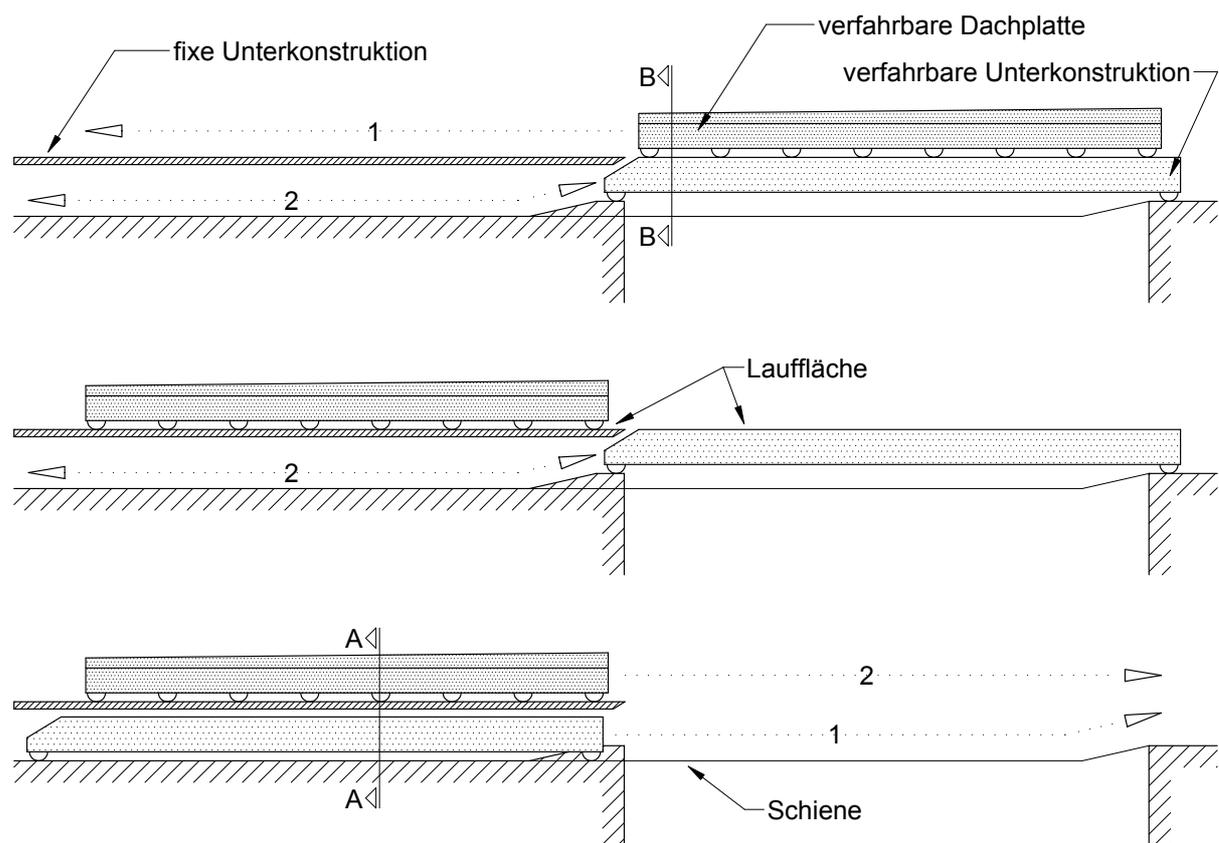


Abbildung 5-80: Bewegungsprinzip des Daches im Aufriss

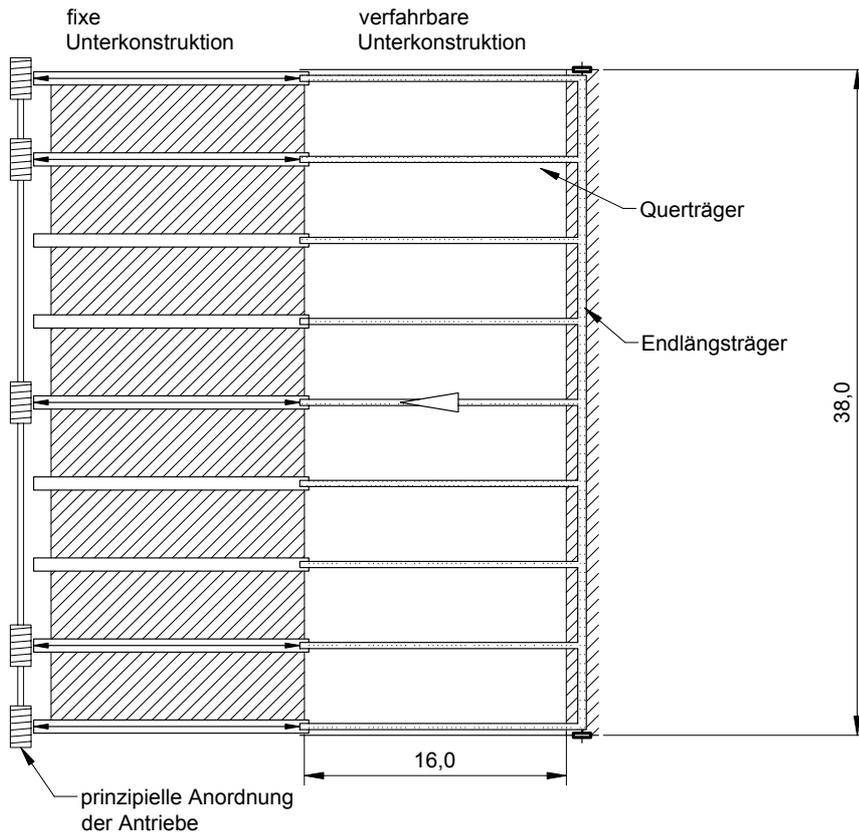
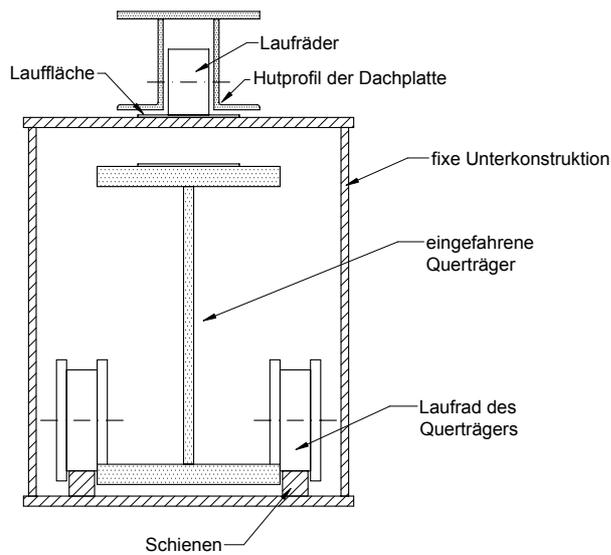


Abbildung 5-81: Grundriss der Unterkonstruktion

Vertikalschnitt A-A
durch einen Querträger
Dach offen



Vertikalschnitt B-B
durch einen Querträger
Dach geschlossen

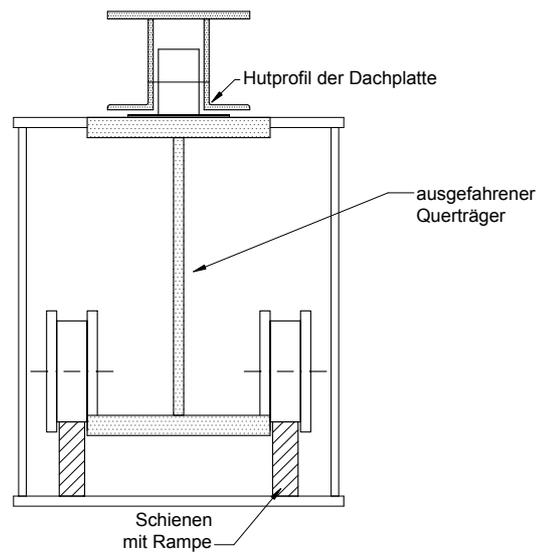


Abbildung 5-82: Schnitt durch die Querträger



Abbildung 5-83: Bewegung der fahrbaren Unterkonstruktion



Abbildung 5-84: Bewegung der Dachplatte

Die Dachplatte mit 16 m Breite und 38 m Länge ist als Rost ausgebildet und mit Isolierglasscheiben gedeckt. Die Querträger der Dachplatte sind als Hutprofile ausgeführt, zwischen deren Stegen jeweils acht Laufräder gelagert werden, mit denen die Platte auf Laufflächen der Unterkonstruktion fährt.

Die fixe Unterkonstruktion über dem benachbarten Gebäudeteil besteht aus neun Querträgern mit rechteckigem Hohlquerschnitt im Achsabstand von 4,80 m. Die fahrbare Unterkonstruktion besteht ebenfalls aus Querträgern mit gleichem Achsabstand, die in diesem Fall aus I-Profilen bestehen und auf einer Seite durch einen Endlängsträger verbunden sind. Diese Unterkonstruktion hat im Grundriss die Form eines Kammes und ist fahrbar gelagert, indem sie auf der Seite des Längsträgers auf zwei Laufrädern und auf der anderen Seite auf einem Laufrad je Querträger aufliegt.

Die fahrbare Unterkonstruktion liegt zunächst über dem Becken und schließt mit der Oberkante der fixen Unterkonstruktion bündig ab, sodass beim Übergang eine möglichst kleine Fuge ohne Stufe entsteht. Nachdem das Dach durch Parken der Dachplatte über der fixen Unterkonstruktion geöffnet ist, wird die bewegliche Unterkonstruktion mit ihren Querträgern in die Hohlprofile der fixen Unterkonstruktion gezogen und das Dach zur Gänze geöffnet. Damit die Querträger in die Hohlprofile passen, werden ihre Schienen mit einer Rampe versehen, um sie abzusenken.

Der Antrieb erfolgt synchron an fünf Stellen durch umlaufende Seiltriebe mit Treibtrommeln. Aus den Planunterlagen wurde auf gleiche Antriebssysteme für beide Bewegungsschritte geschlossen (Abbildung 5-81).

Die seitliche Führung der fahrbaren Unterkonstruktion erfolgt über die profilierten Laufräder und Schienen. Für die seitliche Führung der Dachplatte kommen seitliche Führungsrollen am Dachrand in Frage.

Colonial Stadion, Melbourne, AUS

Entwurf: Daryl Jackson Bligh Lobb Sports Architecture JV mit Connell Mott MacDonald

Das, im Jahre 2000 eröffnete Colonial Stadion in Melbourne bietet als Vielzweckstadion 52 000 Besuchern platz.

Das elliptische Spielfeld in den Abmessungen von 170 m Länge und 140 m Breite wird ringförmig von Tribünen umgeben, die fix überdacht sind. Über dem Spielfeld verbleibt eine rechteckige Öffnung von 100 m Breite und 165 m Länge. Diese Mittelöffnung kann innerhalb von 20 Minuten durch ein bewegliches Dach, aus zwei fahrbaren Hälften, die in Querrichtung auf Schienen zusammen bzw. auseinander gefahren werden, geschlossen bzw. geöffnet werden. In der geöffneten Endlage kommen die beweglichen Dachhälften jeweils über dem fixen Dach zu liegen.

Das fixe Dach lagert entlang des äußeren, annähernd elliptischen Umfangs der Tribünen und auf vier Türmen in den Ecken der rechteckigen Mittelöffnung, deren Rand durch vier Fischbauchträger, als Dreigurtfachwerke zwischen den Türmen, getragen wird. Die quer liegenden Fachwerke tragen den Schienenträger und sind an der Dachoberseite angeordnet, während die Längsträger an der Unterseite angeordnet sind, um Platz für das jeweils darüber bewegte Dach zu belassen.

Die beiden quer laufenden Schienenträger in Form von Viergurt-Fachwerken tragen jeweils eine Kranschiene, auf welcher das bewegliche Dach lagert. Die beiden Dachhälften überspannen rd. 165 m von Schiene zu Schiene und werden aus einer 50 m breiten, durch zwei Dreigurtfachwerke überspannten Platten gebildet. Sie lagern mit jeweils acht Rollenwägen – vier auf jeder Seite – auf der Kranschiene. Jeder Rollenwagen besteht aus zwei Laufrädern und vier seitlichen Führungsrädern. Der Antrieb erfolgt durch einen Teil der Laufräder über Zahnradgetriebe mit Elektromotor.

Die beweglichen Dachabschnitte sind zur Entwässerung leicht in beide Richtungen gekrümmt und geben das Regenwasser in zwei, parallel zu den Schienen laufenden, Rinnen ab.

Spielfeld, Tribünen
und Ecktürme

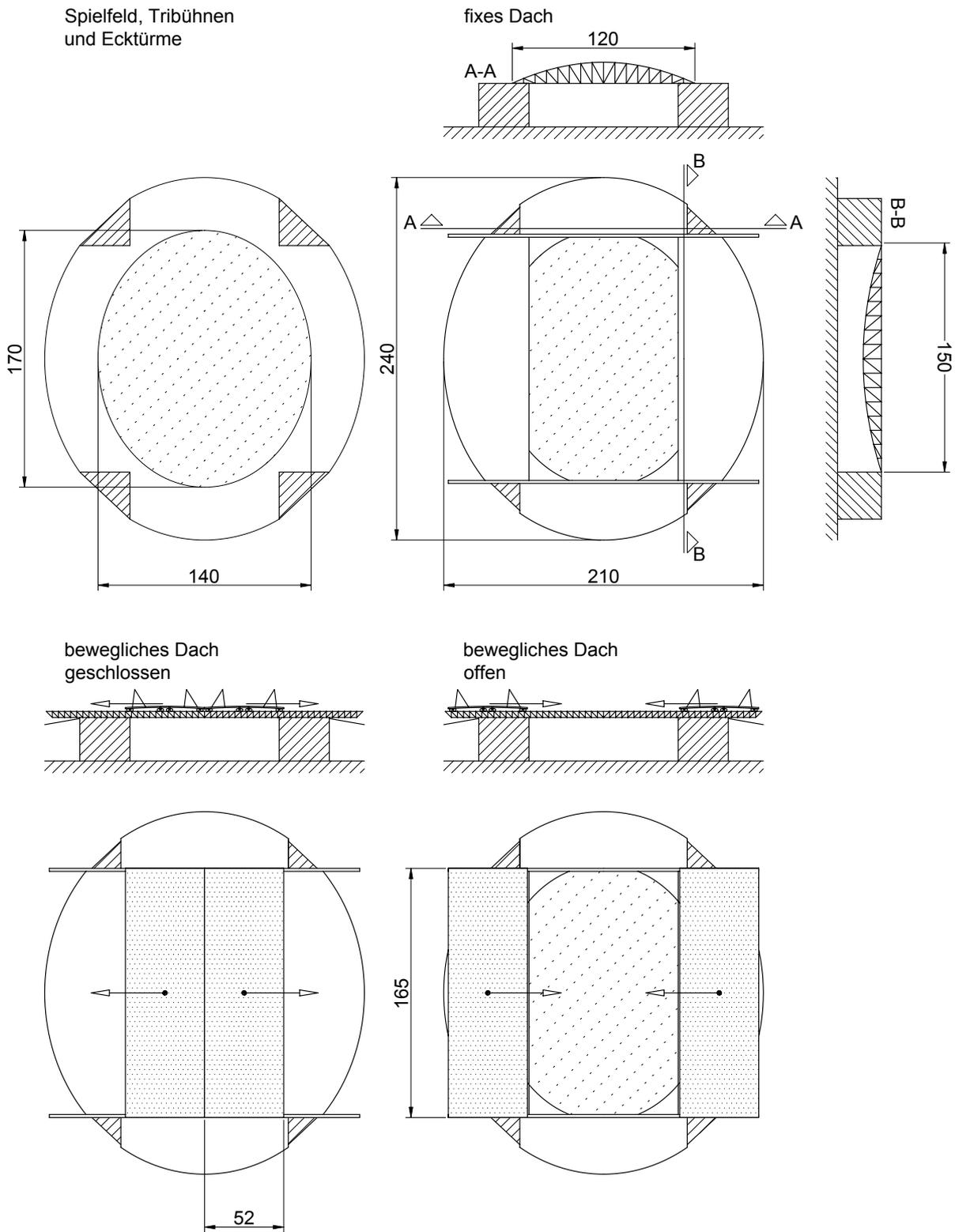


Abbildung 5-85: Grund- und Aufrisse des Stadions

Querschnitt durch
einen beweglichen Dachabschnitt

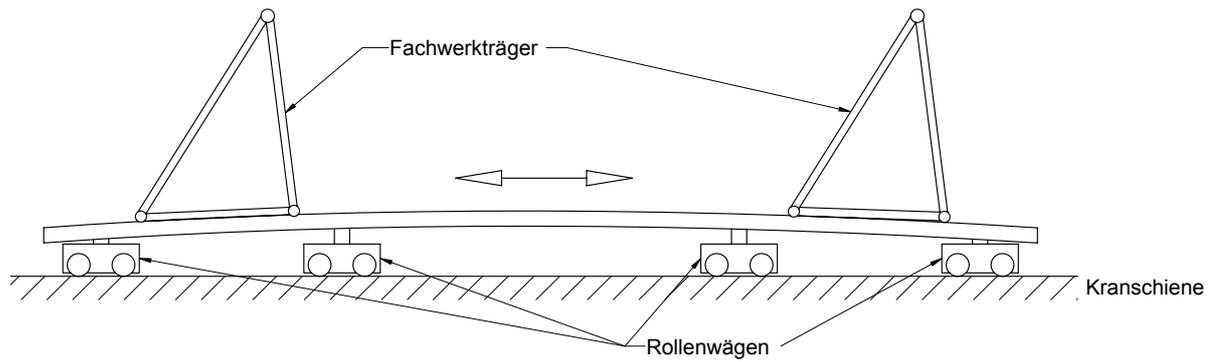


Abbildung 5-86: Querschnitt durch einen befahrbaren Dachabschnitt



Abbildung 5-87: Außenansicht mit einer beweglichen Dachhälfte über dem fixen Dach



Abbildung 5-88: Stadion von oben mit fixem Dach (dunkler) und beweglichem Dach (heller dargestellt)

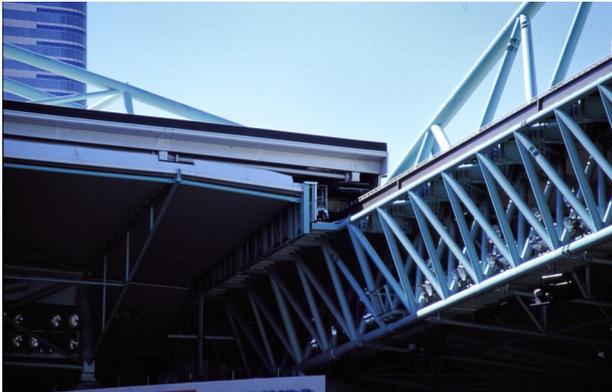


Abbildung 5-89: bewegliches Dach in geöffneter Endlage auf einem Schienenträger



Abbildung 5-90: ein Rollenwagen des beweglichen Daches

Hofüberdachung im Rathaus, Wien, A

Entwurf : Sillja Tillner, Wien (mit Schlaich, Bergermann und Partner, Stuttgart)

Im Innenhof des Wiener Rathauses im neogotischen Stil wurde, Bezug nehmend auf den historischen Bestand, im Jahr 2000 eine mobile, stützenfreien Überdachung geschaffen.

Das bewegliche Dach besteht aus einer textilen Dachhaut, die durch Grat- und Kehlseile gefaltet wird und von der Rückwand des Innenhofes ausgehend, durch fahrbare Fachwerkträger innerhalb von 4 Minuten entlang von längs laufenden Schienen aus- und eingefahren werden kann.

Die Spannweite des Daches beträgt 32,5 m, die Länge im ausgefahrenen Zustand 34,2 m. Die gesamte Konstruktionshöhe des ausgefahrenen Daches beträgt rd. 2,80 m.



Abbildung 5-91: Ansicht des Daches von Unten

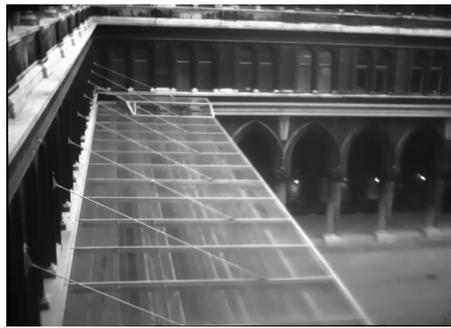


Abbildung 5-92: geparktes Dach unter dem Glasdach



Abbildung 5-93: Endquerträger mit Laufwagen, Laufrad, Antriebsritzel und Zahnstange



Abbildung 5-94: Laufwagen des geöffneten Daches von unten

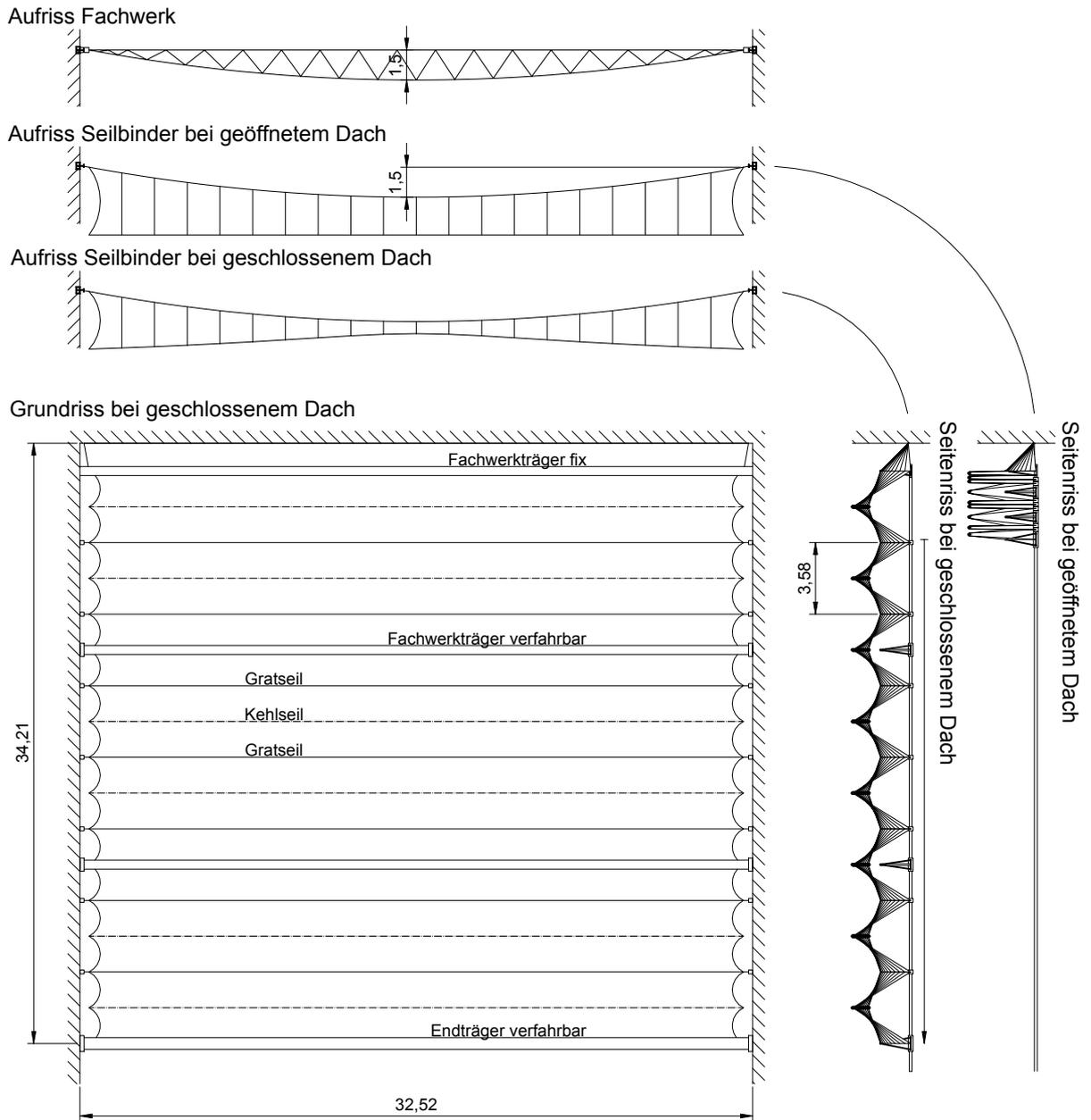
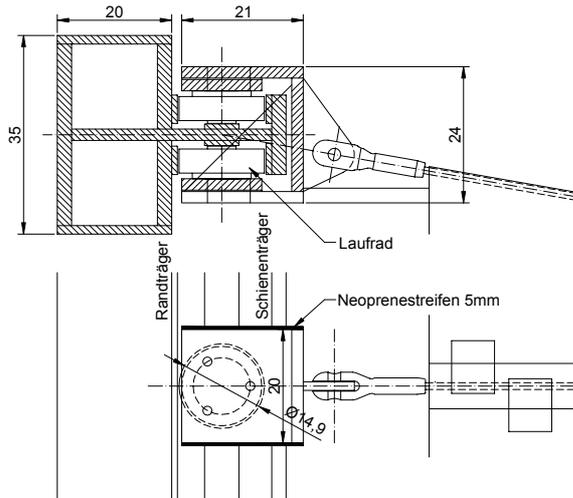


Abbildung 5-95: Grundriss des geschlossenen Daches mit Auf- und Seitenrissen der Fachwerke und der gefalteten Membran

Laufwagen für Gratseile



Laufwagen für Fachwerkträger

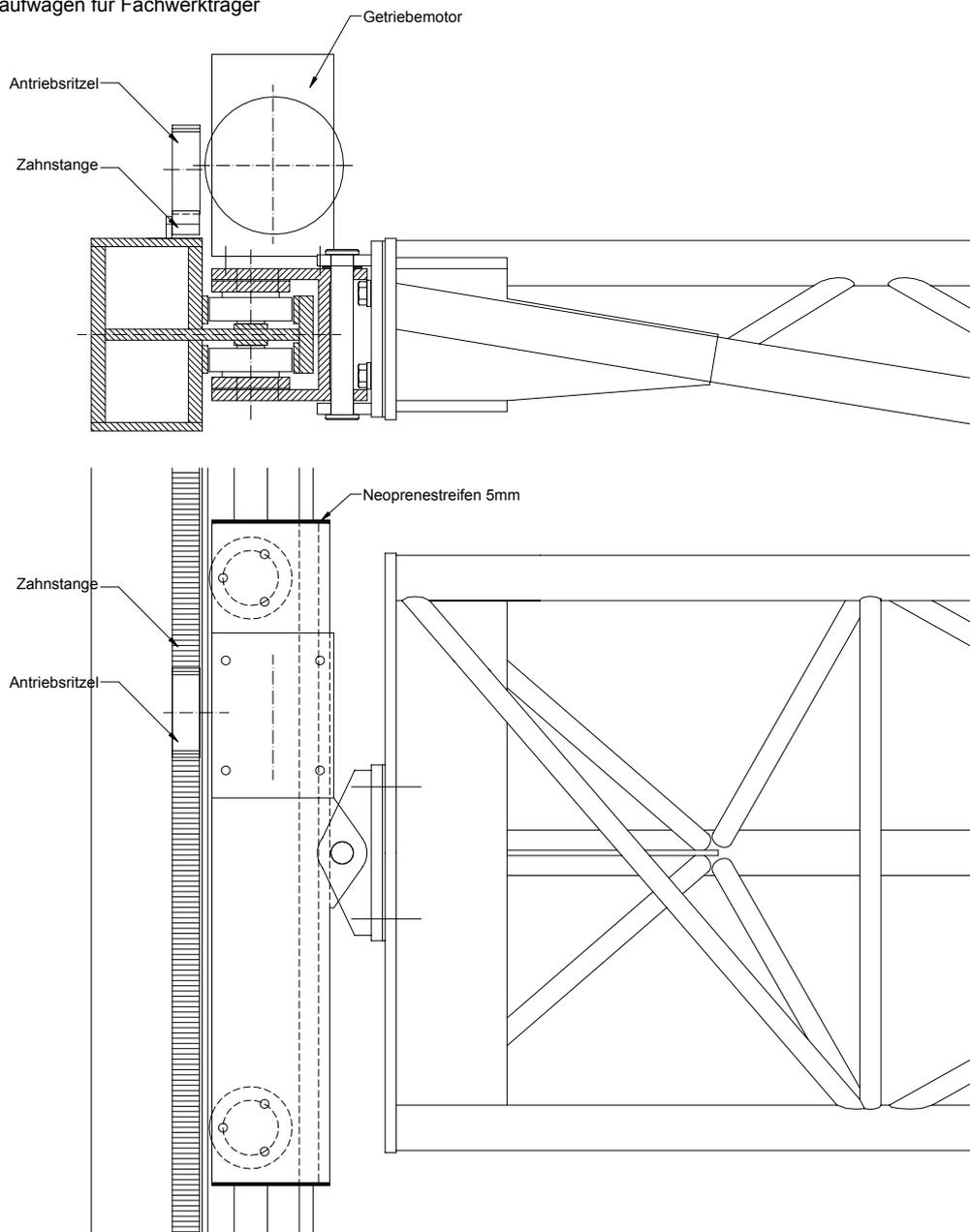


Abbildung 5-96 (vorige Seite) : Randträger und Laufwagen der Gratseile und der Querträger

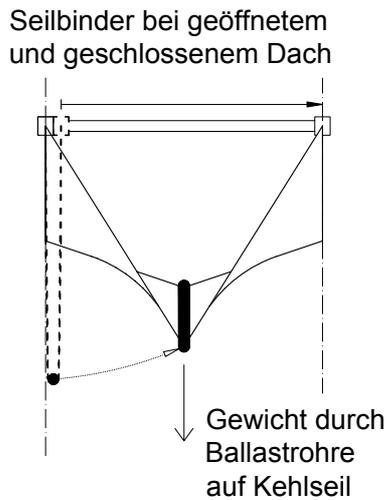


Abbildung 5-97: Seilbinder mit Gratseil und Ballast am Kehlseil

Bewegbares Tragwerk

Gratseile und Kehlseile wechseln einander ab und werden durch die textile Membran jeweils zu Seilbindern verbunden. In Parkposition liegen die Membranfalten zwischen den einzelnen Seilen annähernd parallel, bei ausgefahrenem Dach V-förmig zueinander. Die windgeschützte Lage im Innenhof und die Beschränkung auf das Ausfahren nur unter einer zugelassenen Windgeschwindigkeit erlauben es, die Kehlseile frei hängend auszuführen und den Stoff nur durch Ballastrohre an den Kehlseilen gegen die Gratseile zu spannen (Abbildung 5-97). Die Gratseile sind mittels Laufwagen entlang von längsseitigen Schienen fahrbar gelagert und kommen im ausgefahrenen Zustand im Abstand von 3,6 m zu liegen, bei 34,2 m Spannweite und einem Stich von rd. 1,5 m.

Die Schienen sind als Randträger ausgebildet, um die horizontalen Kräfte der Gratseile über dazwischen liegende, ebenfalls fahrbare Fachwerkträger kurzzuschließen.

Drei Fachwerkträger sind oberhalb der Dachhaut angeordnet und ebenfalls mit Laufwagen in der Schiene gelagert. Neben der Aufnahme der horizontalen Seilkräfte dienen die Dreigurtfachwerke dem Antrieb des Daches. Der Endträger dient zusätzlich dem Abschluss der Dachhaut und ist zur Aufnahme der Membrankräfte breiter ausgeführt.

Die Lagerung der Gratseile und Fachwerkträger erfolgt durch Kunststoffräder in horizontale und vertikale Richtung, die in einem liegenden T-Profil als Schiene laufen, das in den Randträger integriert ist (Abbildung 5-96).

Der Antrieb des Daches erfolgt über die drei fahrbaren Fachwerkträger durch Zahnritzel und Zahnstangen neben den Schienen mittels Elektromotoren. Die Laufwagen der zwischen den Fachwerken liegenden Gratseile werden beim Ausfahren über Schleppseile mitgezogen. Beim

Zusammenfahren schieben die Querträger die Wagen der jeweiligen Gratseile vor sich her. Um Schäden durch Stöße zu vermeiden, sind 5 mm dicke Neoprenestreifen als elastische Puffer an den Stirnseiten der Laufwagen angeordnet.

Beim Ausfahren des Daches wird von der Steuerung zuerst der Endträger in Bewegung gesetzt. Dieser wird soweit gefahren, dass sich die Membran bis zum dahinter folgenden Träger aufgefaltet hat und die Schleppseile gespannt sind. Anschließend wird der zweite Querträger mitgefahren und schließlich der Dritte. In der Endlage halten alle Antriebe an, das Dach ist vollständig geschlossen und die Querträger sind parallel zueinander in gleichmäßigen Abständen entlang der Schiene durch die Zahnräder und Schleppseile arretiert.

Beim Zusammenfahren werden die Träger in umgekehrter Reihenfolge verfahren, beginnend mit dem Anfahren aller angetriebenen Querträger, die dann nacheinander die Parkpositionen erreichen und angehalten werden bis die gesamte Membran eingefaltet ist.

Zum Witterungsschutz wurde am der Rückwand ein Glasdach angebracht, unter dem das zusammengefaltete Dach als vier Meter langes Bündel, in der Parkposition zu liegen kommt.

Markisen

Markisen bestehen aus einer hinteren Randleiste für ihre Montage an einer Wand oder Decke, dem Markisenstoff, der im eingefahrenen Zustand auf einer Welle über der hinteren Randleiste aufgerollt ist, zwei oder mehreren vom Randbalken auskragenden Scheren zum Straffen des Stoffes und einer vorderen Randleiste mit deren Keder der Markisenstoff abschließt.

Durch den Antrieb der Welle wird der Stoff abgerollt, um die Markise auszufahren. Die vordere Randleiste wird dabei durch die Scheren und den Stoff parallel geführt. Das Mittelgelenk der Scheren ist mit einem Seilzug mit Federn versehen, um die vordere Randleiste nach außen zu drücken und den Markisenstoff zu straffen. Die Scherengelenke sind um eine Achse normal zur Markisenebene drehbar.

Der Antrieb erfolgt motorisch oder von Hand über ein Schneckengetriebe, das durch seine Selbsthemmung der Arretierung der Markise dient.

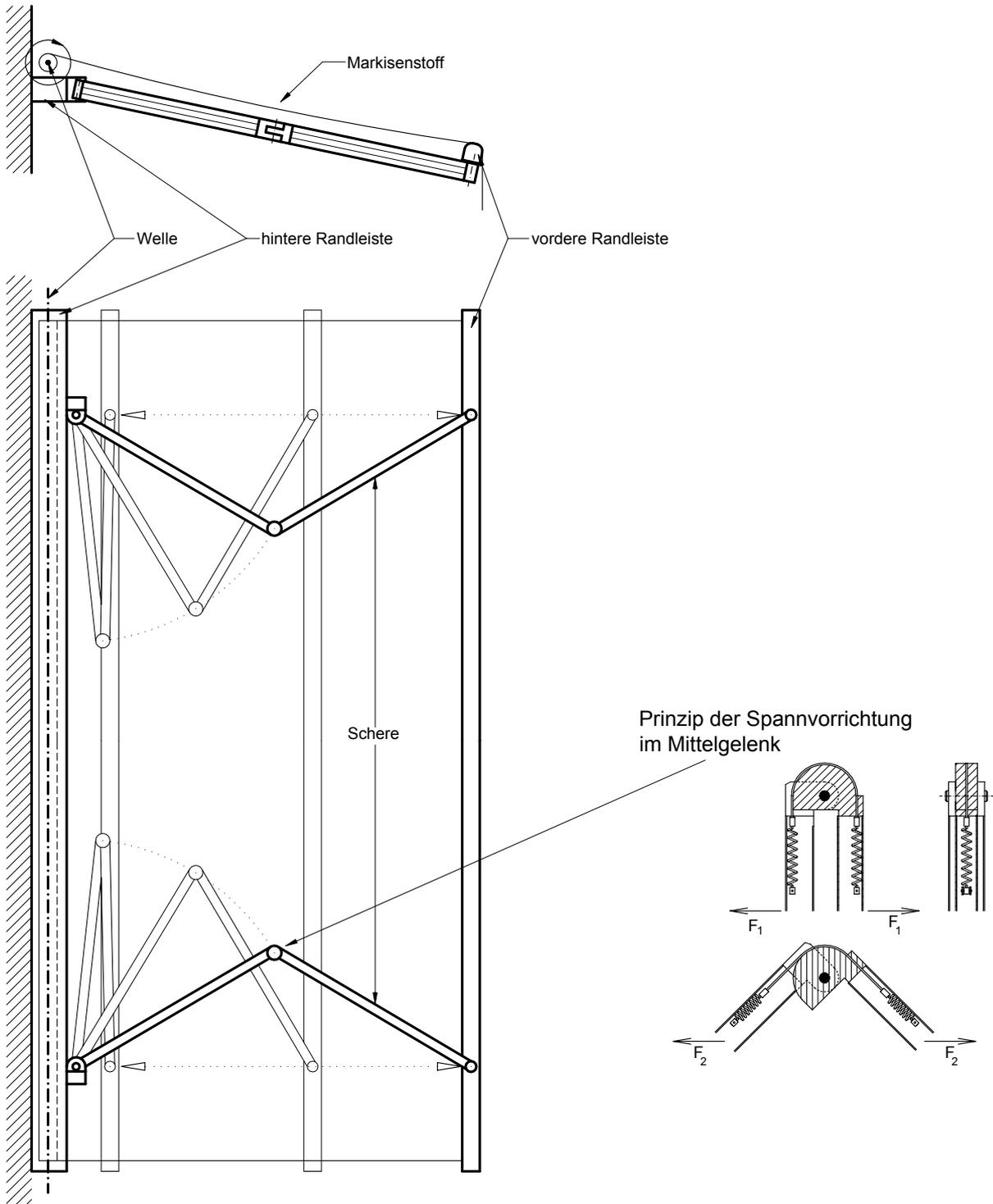


Abbildung 5-98: Markise mit Detail eines Scherengelenks

Freilichttheater, Bad Hersfeld, D

Entwurf : Frei Otto, Stuttgart

Das wandelbare Dach aus dem Jahre 1968 über dem Freilichttheater der historischen Stiftsruine stellt hinsichtlich des Antriebes der raffbaren Dachhaut durch Seiltraktoren ein Novum dar, und zählt zu den frühesten und bisher dauerhaftesten wandelbaren Dächern.

Von einem 32 m hohen Mast neben der Stiftsruine laufen strahlenförmig über das Längsschiff des Theaters 14 befahrbare Seile, an denen die Dachhaut über selbstfahrende Seiltraktoren aufgehängt ist. Der Mast ist nach hinten mit zwei Seilen abgespannt sodass die historische Bausubstanz vom wandelbaren Dach nicht angetastet wird.

Die ausgefahrene Dachhaut hat die Form einer Kugelkalotte. Für das Ausfahren bewegen 14 Traktoren Aufhängepunkte, die am Dachrand zu liegen kommen und sieben weitere Aufhängepunkte im inneren der Dachfläche.

Die Dauer für das Ausfahren des, am Mastkopf zentral gerafften Daches, mit einer Grundrissabmessung von 45 m mal 37 m, beträgt 4 Minuten.

Alle Traktoren werden zunächst mittels eines Schaltwerkes nach einem zeitlichen Programm angetrieben. Vor Erreichen der Endlage des ausgefahrenen Daches werden die Randtraktoren, mit Rücksicht auf die richtige Faltenbildung der Dachhaut, einzeln über ein tragbares Steuerpult gesteuert um die Dachhaut zu straffen.

Seiltraktoren

Jeder der Seiltraktoren besteht aus zwei gegenüberliegenden Raupenfahrwerken, die auf dem befahrbaren Seil laufen (Abbildung 5-99). Die Raupenfahrwerke werden durch Gelenksketten mit zwei Umlenkrollen gebildet. Die Glieder sind dem Profil des Fahrseiles angepasst und aus einem Material mit hohem Reibungswert. Die beiden Raupenfahrwerke sind mittels Spannstangen und Tellerfedern gegeneinander verspannt, um das Fahrseil einzuklemmen.

Der Antrieb erfolgt jeweils durch einen Elektromotor am Traktor, welcher über eines der Umlenkräder, das dann als Kettenritzeln ausgebildet ist, die Raupen bewegt. Die Antriebe sind durch Schneckenradgetriebe selbsthemmend, sodass die Traktoren bei Abschalten des jeweiligen Motors blockieren und keine zusätzliche Arretierung notwendig ist. Um die Lage der Traktoren auf dem befahrbaren Seil korrigieren zu können, lässt sich der Antrieb leicht abkoppeln und der Traktor anschließend verschieben.

Die Randtraktoren sind für das Straffen der Dachhaut stärker motorisiert als die Inneren.

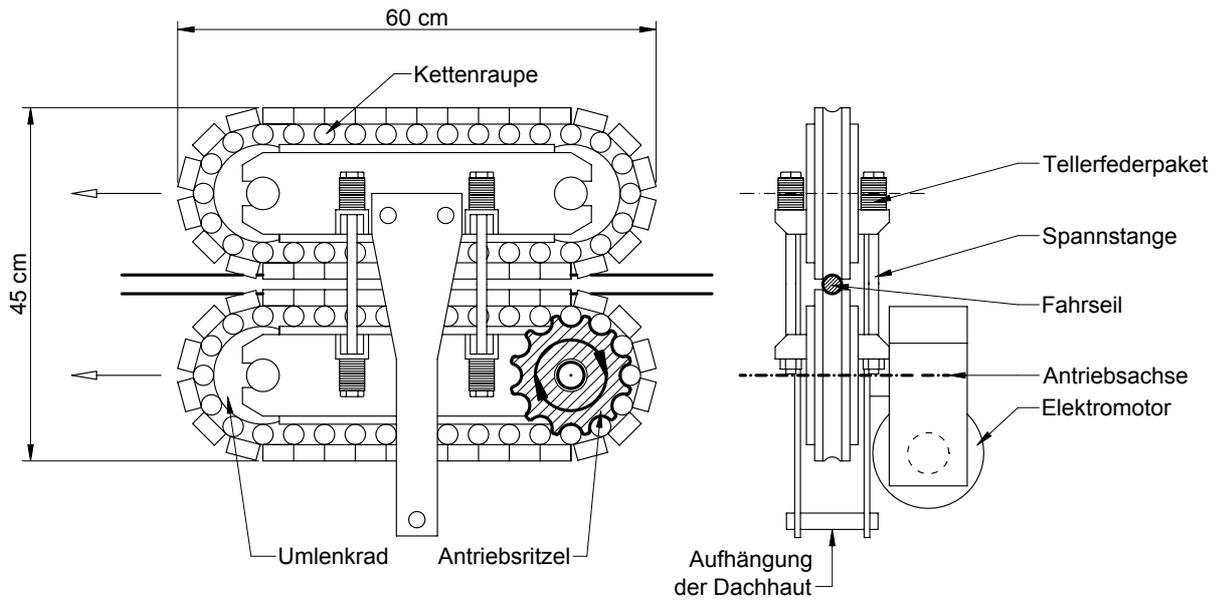


Abbildung 5-99: Seiltraktor

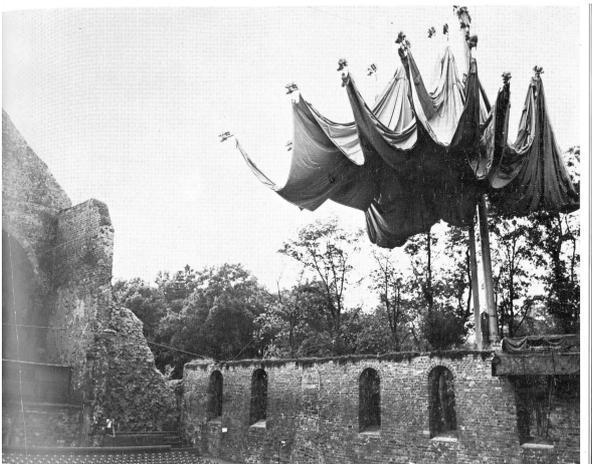


Abbildung 5-100: Dach während des Bewegungsvorganges

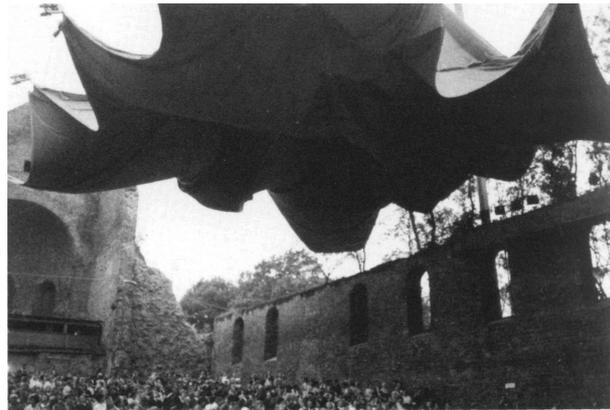


Abbildung 5-101: Dach während des Bewegungsvorganges

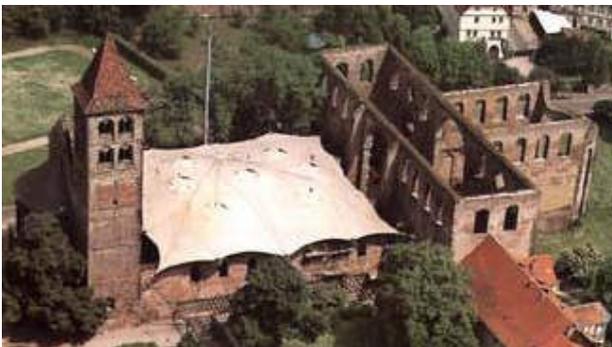


Abbildung 5-102: Luftaufnahme des geschlossenen Daches

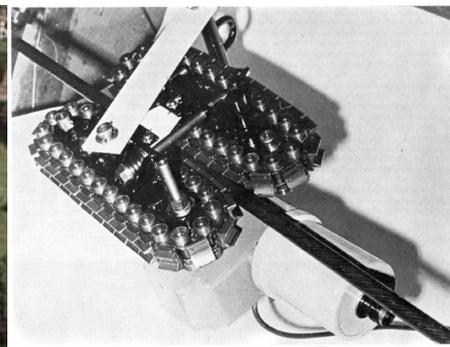


Abbildung 5-103: Seiltraktor

Rothenbaum, Hamburg, D

Entwurf : Werner Sobek

Die Dachkonstruktion wurde vom Konstruktionsprinzip des Speichenrades abgeleitet und besitzt einen äußeren, fix überdachten Ring über den Tribünen und ein bewegliches Innendach mit 63 m Durchmesser (Abbildung 5-104).

Das innere Dach wird in den äußeren Speichenring gehängt und besteht aus 18 Seilbindern, die von einem gemeinsamen Mittelknoten aus nach außen auf jeweils eine Luftstütze laufen. Der Untergurt jedes Seilbinders besteht aus zwei nebeneinander liegenden Seilen, die jeweils durch mehrere Gleitschlitten befahren werden können.

Die bewegliche Dachhaut aus Polyestergewebe wird von diesen Gleitschlitten abgehängt und in der geöffneten Endlage unter einer Abdeckung des Mittelknotens zusammengerafft geparkt. Zum Schließen des Daches werden die äußersten Schlitten nach außen gezogen, wodurch sich die Dachhaut zu entfalten beginnt und die nachfolgenden Gleitschlitten nach außen mitgezogen werden. Der Antrieb erfolgt jeweils mittels Seiltrieb: Eine umlaufende Seilschleife verbindet den angetriebenen Schlitten über Umlenkrollen mit einer Seiltrommel auf der Luftstütze (Abbildung 5-105).

Nach Erreichen des äußeren Randes wird die Dachmembran in einem zweiten Schritt trommelartig gegen die Seilstruktur vorgespannt. Dies geschieht über eigene Spannmechanismen mit Hydraulikzylindern entlang des Umfanges. Jeweils zwei Zylinder sind zusammen mit einem kurzen Balken am Ende der Fahrseile angeordnet. Nach Erreichen der jeweils kritischen Position wird der Schlitten mittels Arretierbolzen gefasst, in einer Schiene am Balken geführt und von den Hydraulikzylindern nach außen gedrückt, um die Dachmembran zu spannen und das Dach in der Endlage zu fixieren (Abbildung 5-112).

Die Abstände der Gleitschlitten am Fahrseil wurden so gewählt, dass sie in Endlage jeweils bei einem Knoten mit einem Hänger des Seilbinders zu stehen kommen.

Der Schließ- und Öffnungsvorgang erfolgt automatisch durch ein Programm, das für die unterschiedlich langen Wege der einzelnen Schlitten zeitlich abgestimmt ist und für das Spannen über Positionssensoren gesteuert wird.

Vergleichbare Bauwerke

Der Vorläufer des beschriebenen Projekts ist die 1988 erbaute Überdachung einer Arena in Saragossa. Der Entwurf stammt von Rudolf Bergermann.

Die zentral raffbare Dachhaut ist von Gleitschlitten abgehängt und wird auf befahrbaren Untergurten einer Speichenradkonstruktion geführt. Der Antrieb des jeweils äußersten Schlitten erfolgt ebenfalls mittels umlaufendem Seiltrieb.

Für Saragossa wurden erstmals zwei getrennte Antriebssysteme für das Verfahren der Gleitschlitten und das anschließende Spannen der Dachhaut eingesetzt. Die Vorspannung wird hier an einer Stelle, durch Verkürzen der zentralen Nabe der Speichenradkonstruktion mittels Schraubengetriebe, erzeugt.

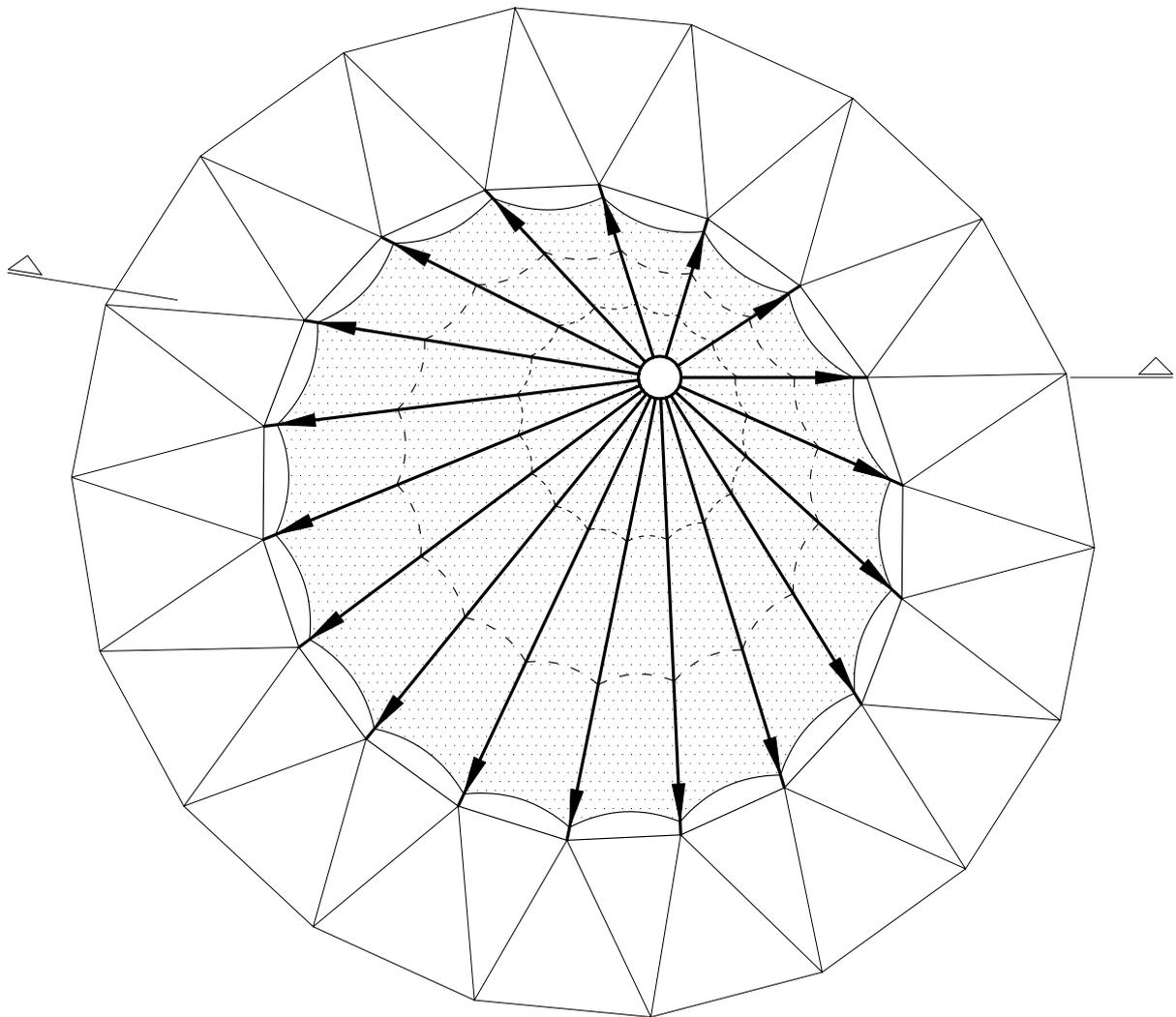
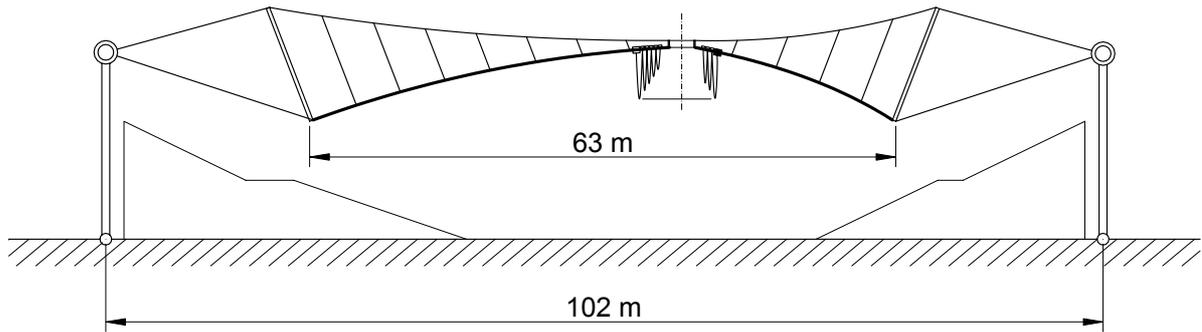
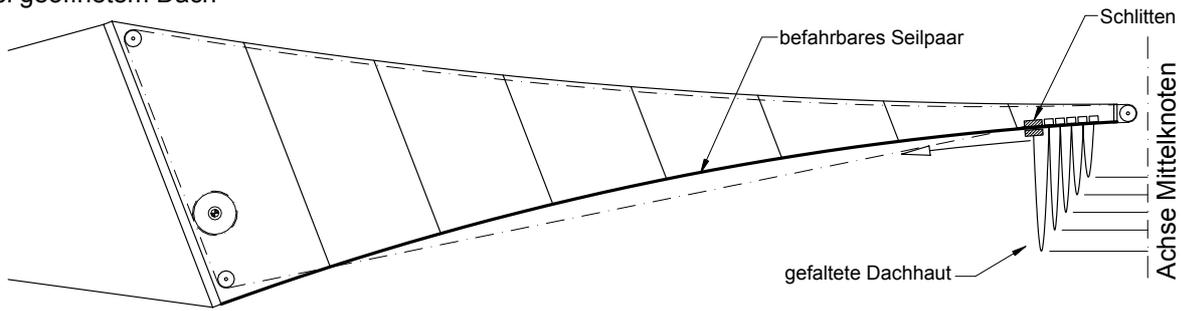


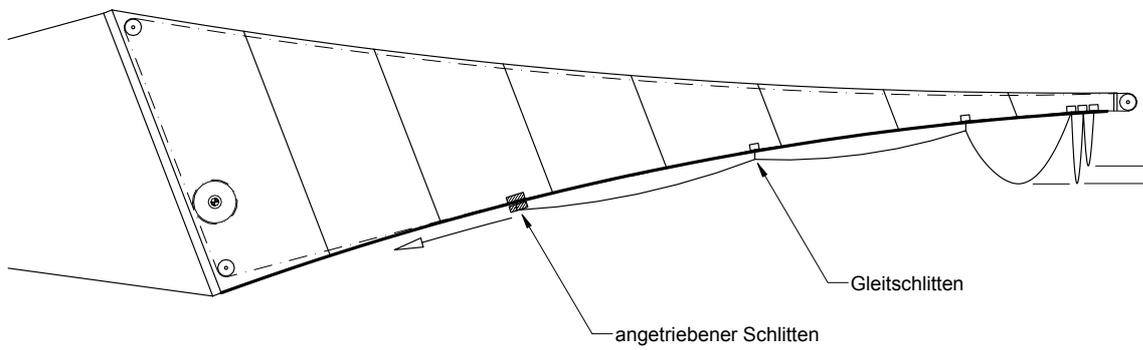
Abbildung 5-104: Grund- und Aufriss der Dachkonstruktion mit der vom Mittelknoten nach außen verschiebbaren Dachhaut.

Abbildung 5-105 (nächste Seite): Seilbinder mit Dachhaut, Antrieb und Spanmechanismus

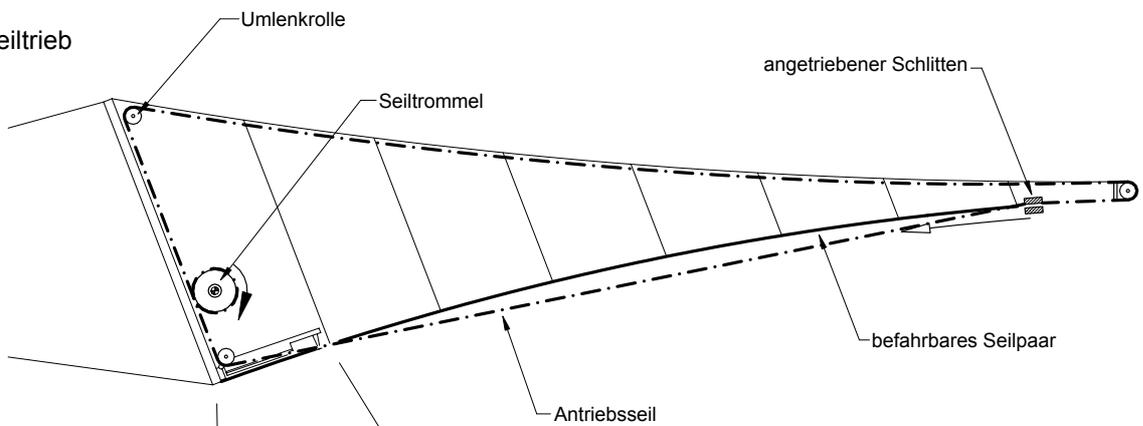
Seilbinder mit zentral gefalteter Dachhaut bei geöffnetem Dach



Seilbinder mit Dachhaut während des Schließens



Seiltrieb



Spannmechanismus (Ausschnitt)

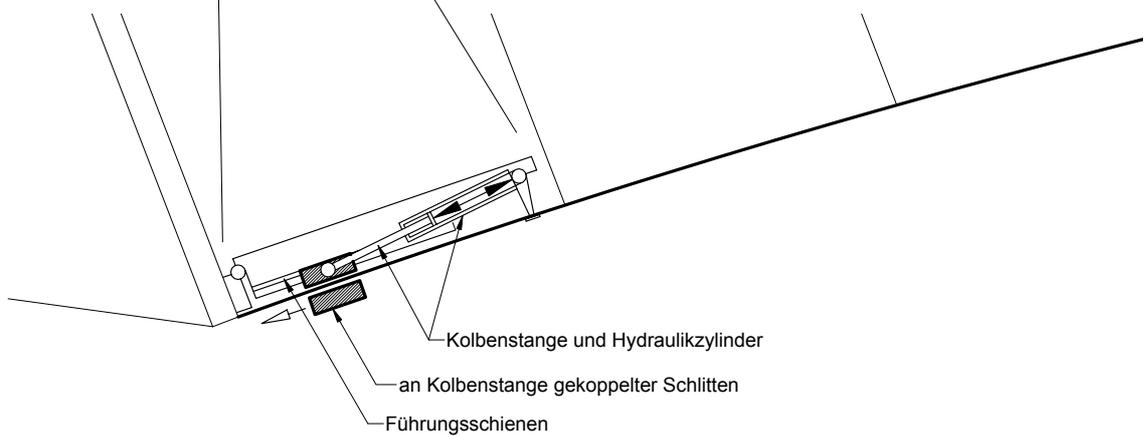




Abbildung 5-106: Dach während dem Schließen



Abbildung 5-107: Montage der Dachhaut



Abbildung 5-108: Seilbinder mit geschlossener Dachhaut. Seiltrommel und Spannmechanismus jeweils am Fuß der Luftstützen



Abbildung 5-109: Aufhängung der Dachhaut mit Gleitschlitten am Untergurt des Seilbinders

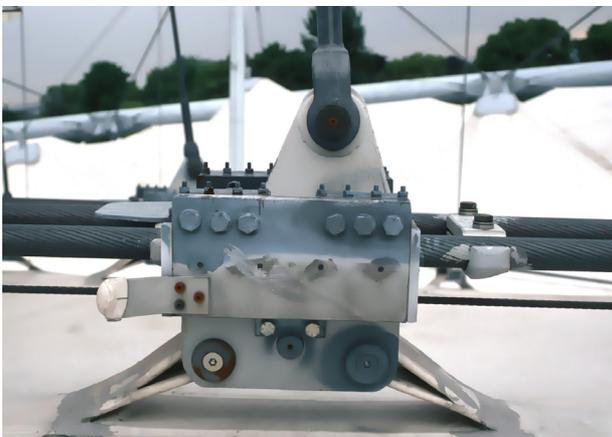


Abbildung 5-110: Fahrseile mit Gleitschlitten Seitenansicht



Abbildung 5-111: Spannmechanismus

Angetriebener Gleitschlitten

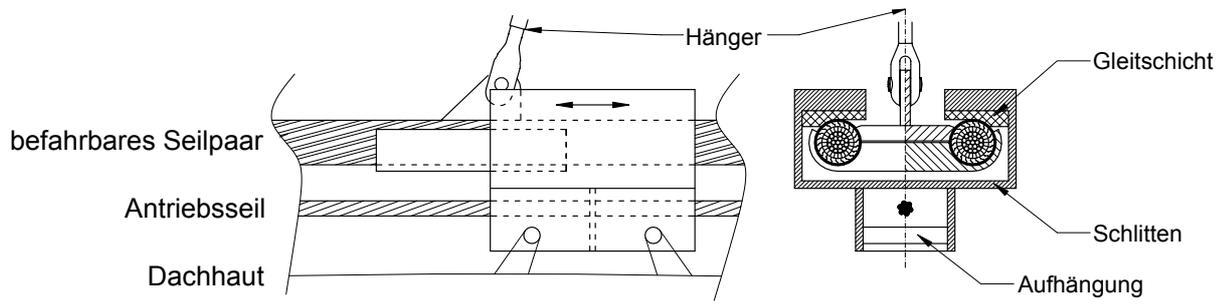


Abbildung 5-112: Prinzipielle Darstellung der Gleitschlitten

Werfthalle Cargo Lifter, Brand, D

Entwurf : SIAT Architektur + Technik, München

Die 2002 erbaute Werfthalle wurde für die Produktion und Wartung von Luftschiffen konzipiert. Das Tragwerk besteht im Mittelteil aus einer zylindrischen Tonne mit 144 m Länge und halbkreisförmigen Querschnitt im Durchmesser von 210 m. An die mittlere Tonne sind an beiden Enden der Halle Viertelkugeln gleichen Durchmessers als große Tore angeschlossen.

Die Kugelabschnitte sind jeweils aus zwei feststehenden und sechs beweglichen Segmenten aufgebaut und werden durch Ineinanderschieben unter die beiden, an die Tonne anschließenden fixen Randsegmente geöffnet. Das Öffnen und Schließen erfolgt während der Sommermonate nur wenige Male im Jahr zum Ausschiffen der Luftschiffe und dauert jeweils rd. 15 Minuten.

Die Segmente werden auf Schienen entlang von annähernd konzentrischen Kreisen geführt und lagern am Fuß auf jeweils zwei Rollwägen und am Scheitelpunkt in einem Drehzapfen. Der Antrieb erfolgt durch einen Elektromotor über jeweils eines der Laufräder.

Die Lagerung der Segmente erfolgt um die vertikale Achse drehbar am gemeinsamen Drehzapfen am First und mittels jeweils zwei Rollwägen durch Laufräder und horizontale Führungsrollen auf Kranschienen. Durch die Lagerung im Drehzapfen sind die Bahnen der Segmente kinematisch vorgegeben, und zwar als konzentrische Kreisbahnen mit ihrem gemeinsamen Mittelpunkt im Drehzapfen. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel wurden die Schienengeometrie davon abweichend gewählt, um die einzelnen Segmente in der geöffneten Endlage enger aneinander zu bringen. Die einzelnen Bahnkurven haben von der Drehachse abweichende Mittelpunkte, wodurch sich die Fußpunkte im Zuge der Bewegung vom Drehzapfen entfernen. In den Projektdokumentationen wurden keine eigenen konstruktiven Elemente erwähnt, welche diese Bewegung ermöglichen, woraus zu schließen ist, dass dies durch (geringfügiges) Verformen der Segmente geschieht (Abbildung 5-113).

Die jeweils drei Elemente einer Torhälfte fahren auf fünf Schienen, jeweils zwei für die mittleren und eine für das äußere fahrbare Segment.

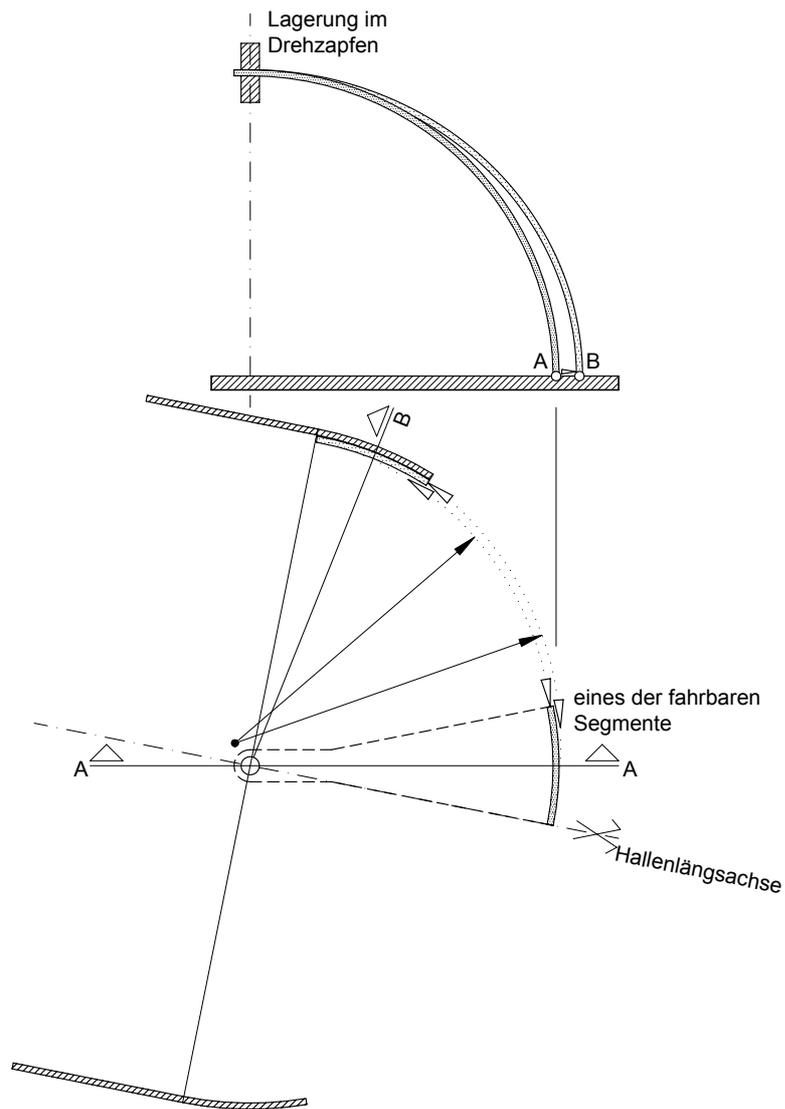


Abbildung 5-113: Unmaßstäbliche Darstellung eines fahrbaren Segments in Grund und Aufriss mit den Kreisbahnen der Rollenwägen, deren Mittelpunkt nicht mit der Drehachse zusammenfällt.



Abbildung 5-114: Ansicht der Halle von Aussen



Abbildung 5-115: Modellfoto bei geöffnetem Tor

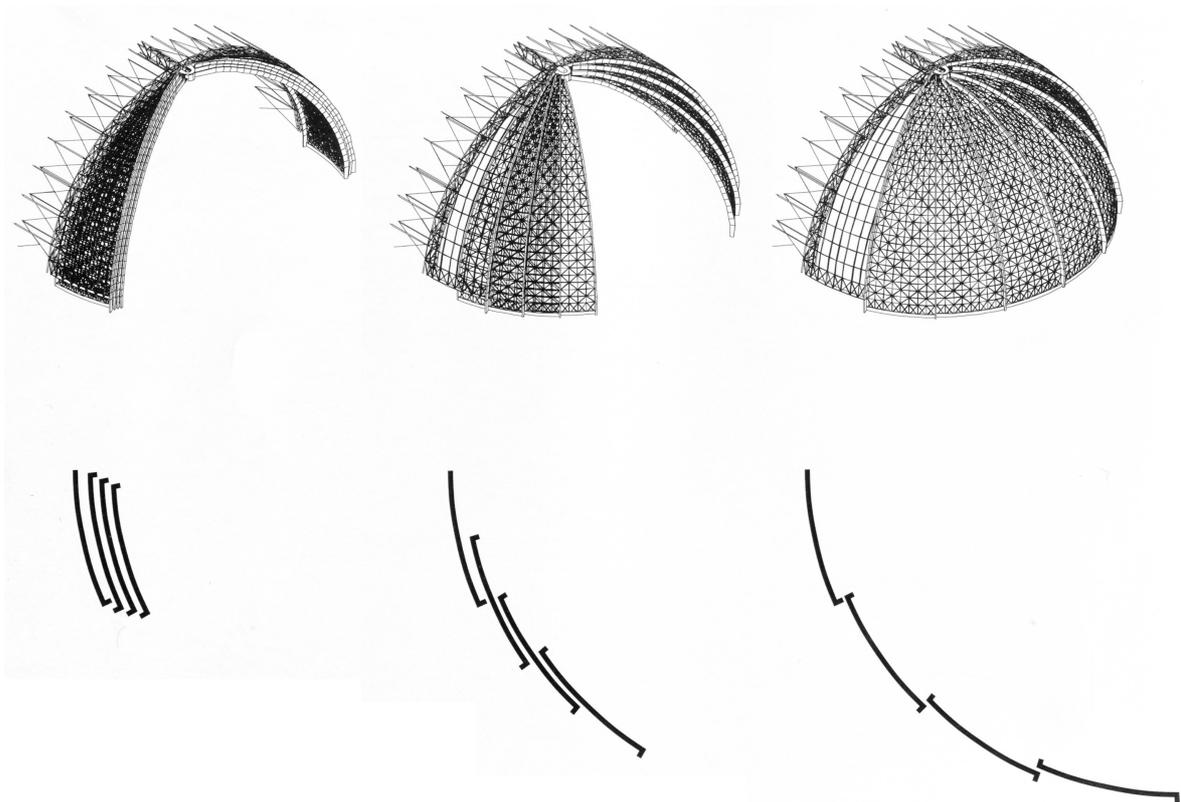


Abbildung 5-116: Wandsegmente in geöffneter Endlage, während des Bewegungsvorganges und in geschlossener Endlage.



Abbildung 5-117: Drehzapfen am First mit zwei montierten Segmenten



Abbildung 5-118: Lagerung der Segmentfußpunkte auf Schienen

5.4 Bewegliche Sonderbauwerke

5.4.1 einmalig bewegt

Pantadome System der Convention Hall, Nara, JAP

Konzept : Kawaguchi

Systemprinzip

Der japanische Ingenieur Mamoru Kawaguchi entwickelte ein System zur wirtschaftlichen Errichtung räumlicher Tragwerke, das bisher für sechs Großbauten in Japan und Europa angewandt wurde. Der Name des Pantadome-Systems wurde vom englischen Pantograph (deutsch Storchenschnabel) abgeleitet, einem zwangsläufigen Viergelenkmechanismus zur Übertragung von Grafiken in einen anderen Maßstab.

Die Grundidee des Pantadome-Systems basiert darauf, eine Kuppel oder eine kuppelartige Konstruktion für den Montagezustand faltbar, also kinematisch verschieblich zu machen. Dies geschieht durch vorübergehendes Entfernen konstruktiver Teile, wie Stäbe entlang eines Umfangringes der Kuppel. Bei entsprechender Gelenksausbildung lässt sich der innere Teil der Kuppel entlang dieses fehlenden Rings falten und ist während dieses Stülpvorganges auf einer vertikalen Bahn geführt (Abbildung 5-119, Abbildung 5-120).

Alle für den Faltvorgang notwendigen Gelenke können einfach, um eine Achse drehbar, ausgeführt werden. Als Antrieb der zwangsläufigen Hubbewegung kommen hydraulische Pressen oder innerer Überdruck unter der Kuppel in Frage. Durch die zwangsläufige Führung sind keine horizontalen Stützungen notwendig. Die Arretierung der Kuppel erfolgt nach dem Hubvorgang durch Einbau der weggelassenen Stäbe bzw. Sperren der Gelenke.

Die Vorteile dieser Bauweise liegt in der wirtschaftlichen Montage aller Teile einschließlich ihrer Verkleidungen, Elektroinstallationen und anderer Einbauten in Bodennähe. Das Zusammenfügen kann genauer, sicherer und schneller erfolgen.

Die erste Anwendung des ‚Pantadome System‘ war 1984 für die World Memorial Hall in Kobe¹. Das National Indoor Stadion in Singapur (1989), der Sant Jordi Sportpalast in Barcelona (1990), der Sun-Dome in Fukui (1995), der Namihaya Dome in Osaka (1996) und schließlich die im Weiteren näher betrachtete Convention Hall in Nara (1998) folgten.

¹ In diesem Zug wurde das System zum Patent angemeldet

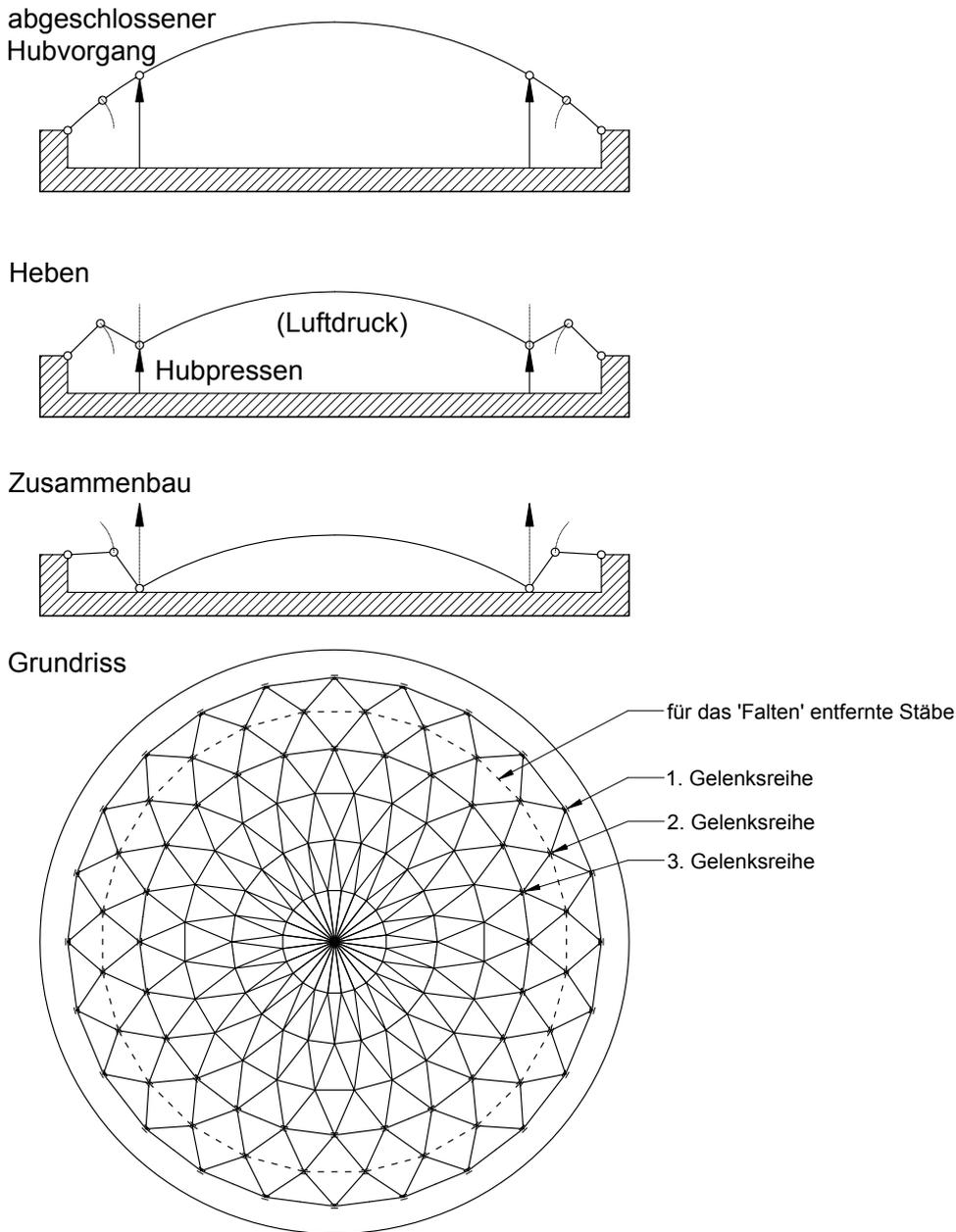


Abbildung 5-119: Prinzip des Pantadome-Systems anhand einer Stabkuppel

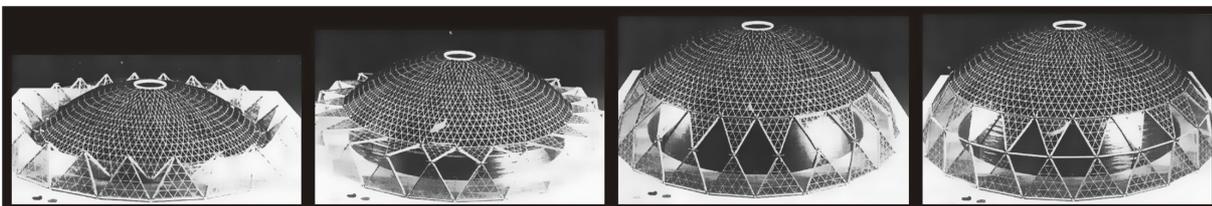
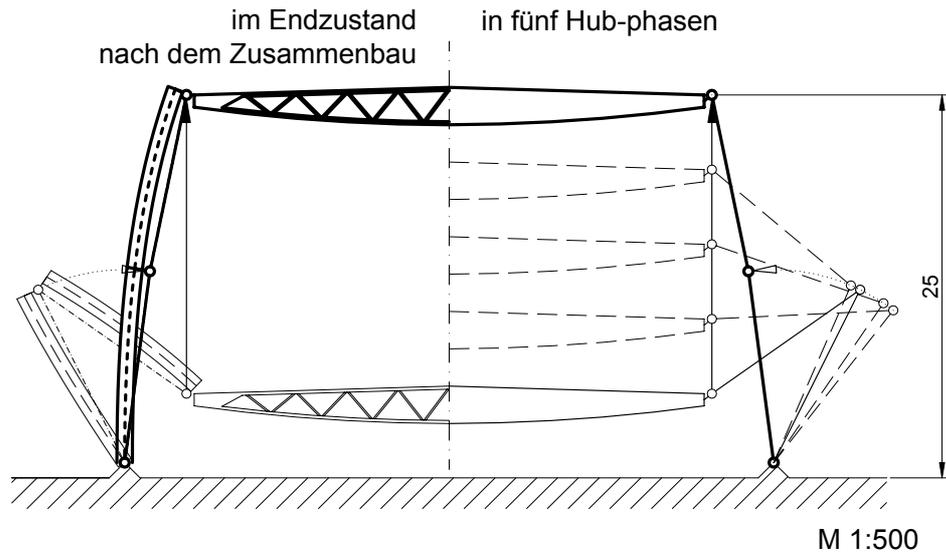


Abbildung 5-120: Modellbilder zum Prinzip des Pantadome-Systems

Vertikalschnitt



Grundriss

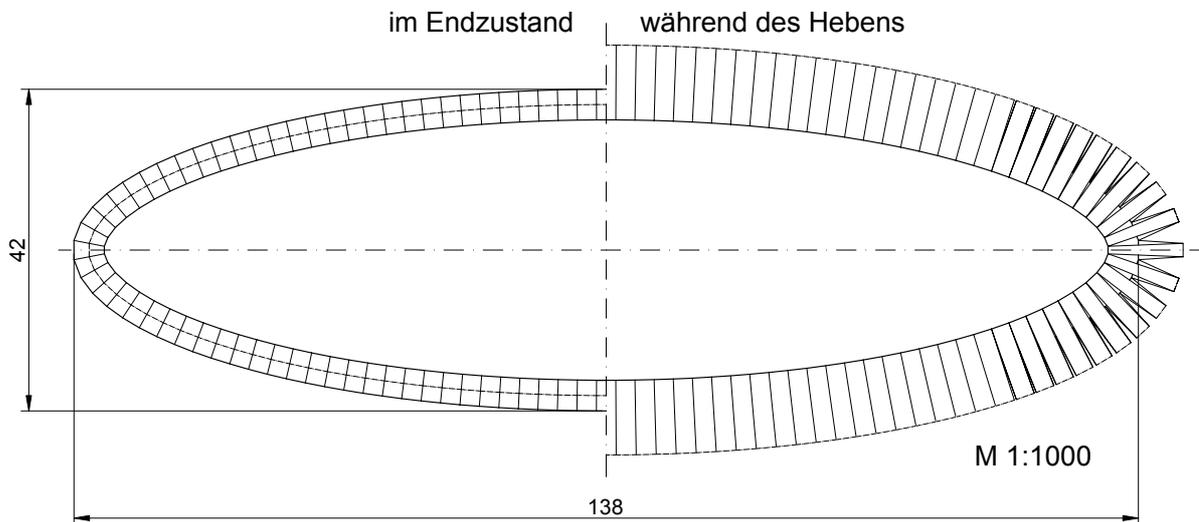


Abbildung 5-121: Convention Hall in Nara, Japan

Convention Hall in Nara

Die, von Arata Isozaki entworfene Konzerthalle beherbergt zwei Konzertsäle und hat einen elliptischen Grundriss mit den Hauptachsenlängen von 42 m und 138 m und eine Höhe von 25 m im fertigen Zustand.

Die Außenwand hat ist leicht gekrümmt und nach innen geneigt und wird entlang des Umfangs der Halle in 120 Segmente geteilt. Nach dem Pantadome-Prinzip wird die Wand durch Einführen von Scharnieren etwa auf halber Höhe faltbar gemacht und die Dachplatte zwangsläufig geführt. Die horizontale Aussteifung der Dachplatte erfolgt wegen des schmalen elliptischen Grundrisses in Längsrichtung durch die als Scheiben wirkenden 2,5 m breite Außenwandsegmente und in Breitenrichtung durch zusätzliche faltbare Innenwände.

Beim Zusammenbau wurde zuerst das Dach auf Behelfsstützen montiert und ausgebaut. Währenddessen wurden die Seitenwände mit den Mittelgelenken als Fertigteile angeschlossen und soweit als möglich verkleidet. Nach Abschluss der Montage wurde die gesamte Kuppelkonstruktion durch 32 Hubeinheiten mit jeweils zwei Hydraulikpressen gehoben. Die Drücke in den 64 Pressen wurden zentral ausgeglichen. Nach Abschluss des Hubvorganges wurden Scharniere der Wandtafeln durch Verschrauben und Verschweißen gesperrt.

Beschreibung eines Vergleichbaren Objekts

Die ingenieurmäßigen Umsetzung des Pentadome-Prinzips findet eine Entsprechung in einer älteren Erfindung eines faltbaren Drahtkorbes als Haushaltsgegenstands.

Er besteht im Wesentlichen aus zwei Drahringen unterschiedlichen Durchmessers, die durch Drahtschlaufen in gleicher Art wie die Hallenaußenwände gelenkig verbunden sind. Der innere Ring ist mit Draht ausgefüllt und gegenüber dem äußeren Ring durch die Drahtschleifen zwangsläufig entlang einer Geraden verschiebbar, die sich bei der Bewegung entsprechend mitfalten.

Durch Umstülpen in verschiedene Lagen lässt sich der Gegenstand als Tragetasche oder Obstkorb nützen oder flach machen, um ihn zu verstauen (Abbildung 5-122, Abbildung 5-123).

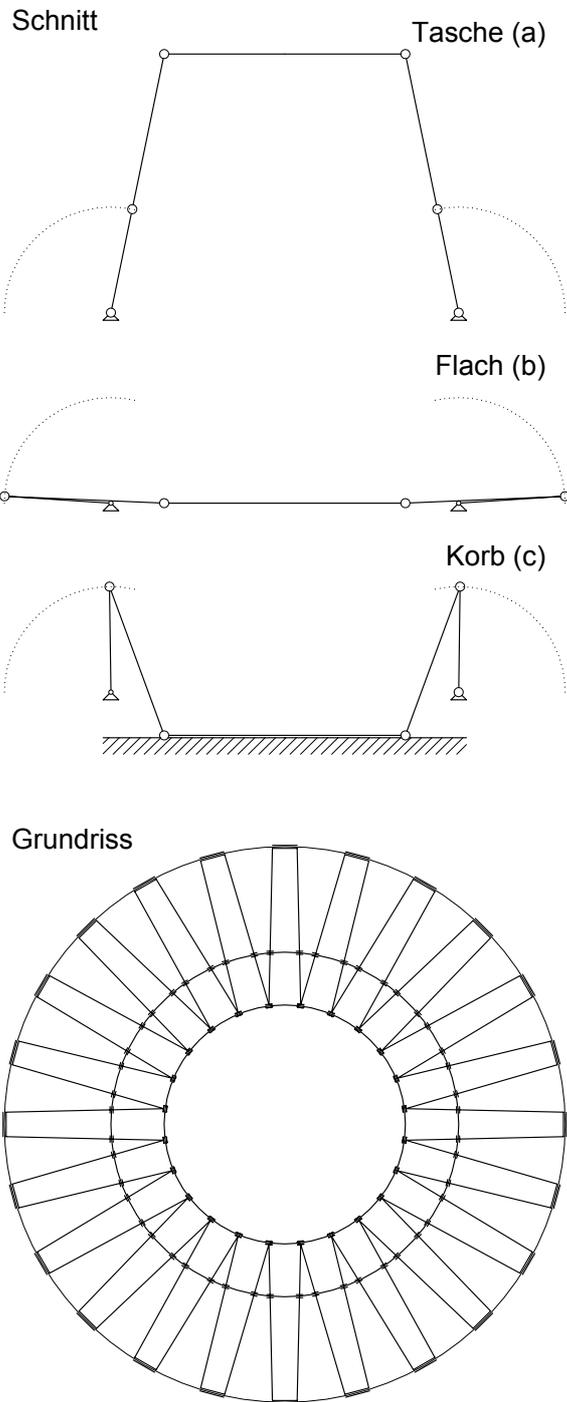


Abbildung 5-122: Prinzip eines faltbaren Haushaltsgegenstands

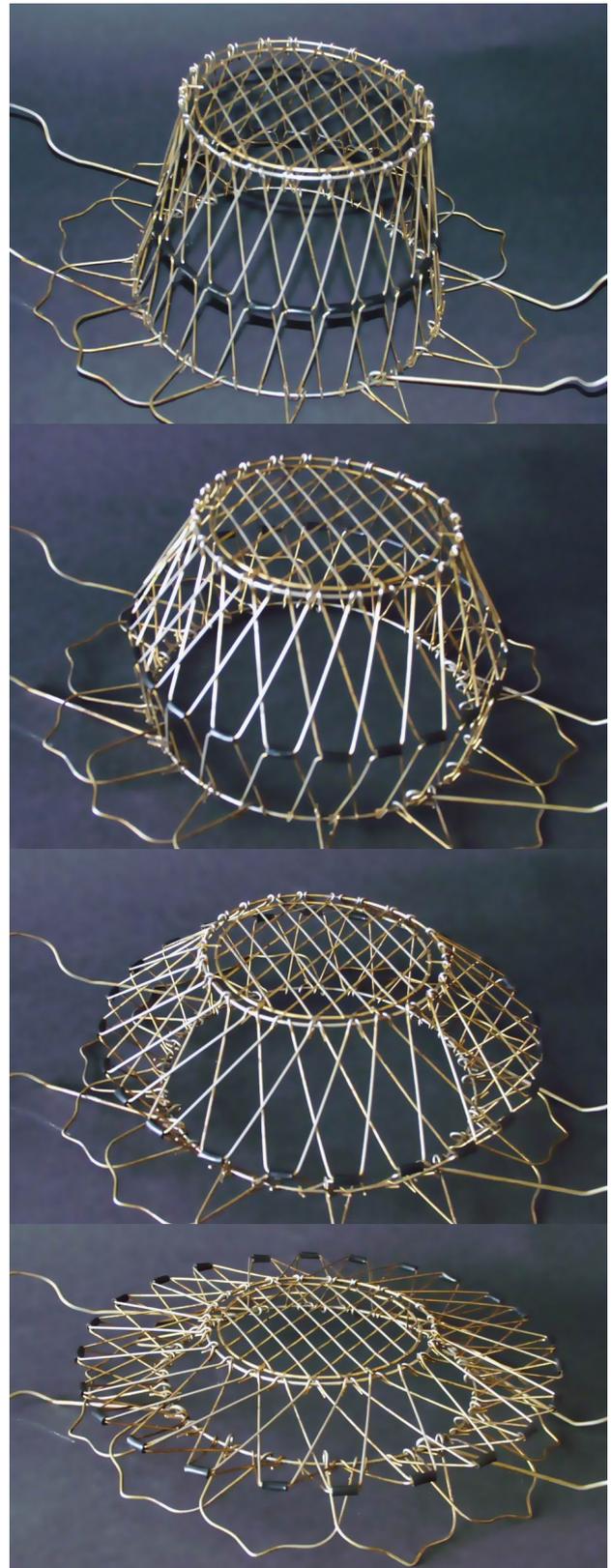


Abbildung 5-123: Photos vom Faltvorgang

Systeme mit Scherengittern

Scheren aus zwei, in der Mitte gelenkig gekoppelten Stäben, bilden das Grundelement der Scherengitter. Durch Aneinanderreihen mehrerer Scheren an ihren Endpunkten entstehen zwangsläufige Ketten, die durch einen Antrieb bewegt werden können. Die Elemente von Scherenketten werden auf Biegung beansprucht, solange die Ketten nicht durch zusätzliche Elemente zu einem Fachwerk gemacht werden. Wird der Gelenkspunkt der Scheren von der Mitte nach außen gerückt, so faltet sich die daraus gebildete Kette entlang eines Kreisbogens, dessen Krümmung von der Exzentrizität der Gelenkspunktes abhängt (Abbildung 5-124). Werden mehrere Ketten zu einem Rost verbunden, so entsteht ein flächiges Scherengitter. Dabei ist für ebene Gitter eine Anordnung mit Scharen in zwei oder drei Richtungen möglich (Abbildung 5-125), Kugelflächen können durch orthogonale Anordnung von Ketten aus exzentrischen Scheren gebildet werden.

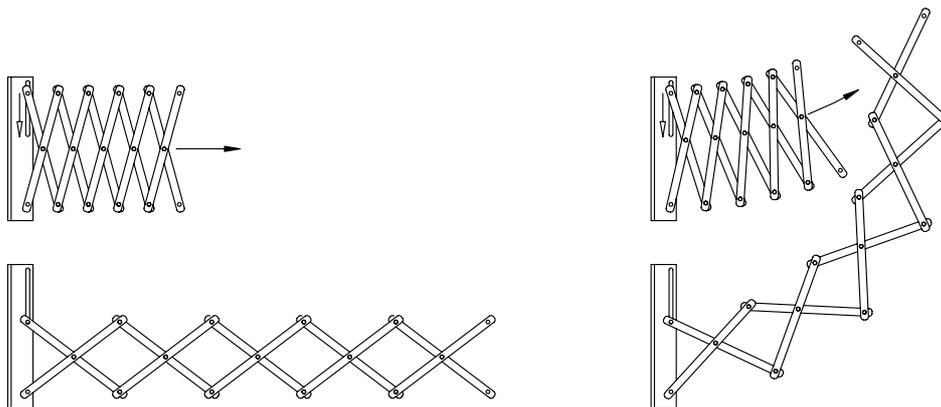


Abbildung 5-124: ebene Scherenketten aus zentrisch und exzentrisch ausgebildeten Scheren

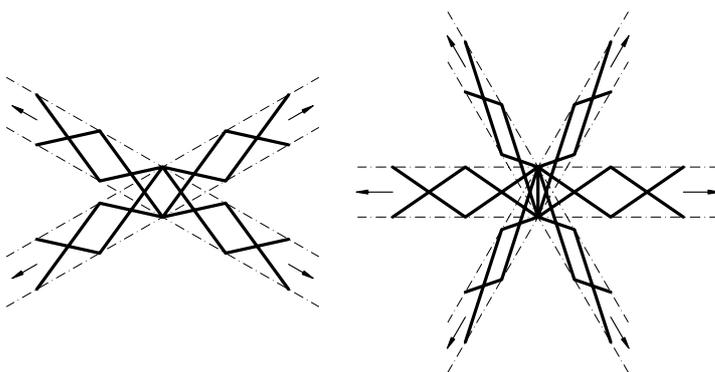


Abbildung 5-125: Kombination zu ebenen Scherengittern

Die temporäre Schwimmbad-Überdachung für das San Pablo Sportzentrum in Sevilla von 1996 stellt die erste ausgeführte Überdachung aus einem Scherengittersystem seit 30 Jahren dar. Das von Escrig entworfene, temporäre Dach besteht aus zwei Scherengittern, die im ausgefalteten Endzustand zwei, im Grundriss quadratisch begrenzte Kugelsegmente von je 30 x 30 m ergeben. Für die Montage werden die zu Bündeln zusammengefalteten Scherengitter zentral aufgestellt und durch einen Kran angehoben, wodurch sie sich zufolge ihres Eigengewichts entfalten. Die beiden Kugelsegmente werden nach dem Aufstellen miteinander verbunden, durch zusätzliche Diagonalstäbe ausgesteift und entlang des Randes durch Masten unterstützt.

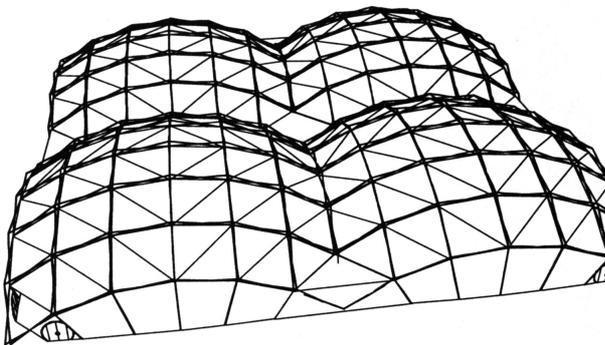


Abbildung 5-126: Axonometrie des fertigen Daches



Abbildung 5-127: Ansicht des fertigen Daches bei Nacht

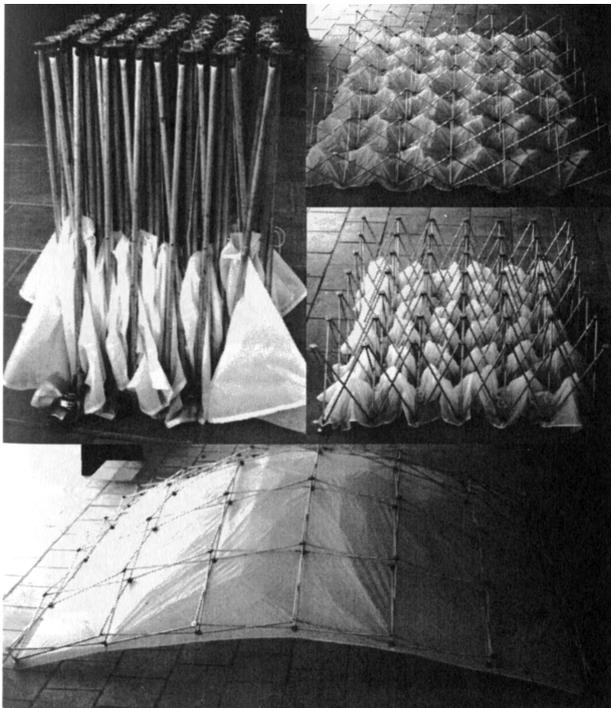


Abbildung 5-130: Fotos eines Prototyps

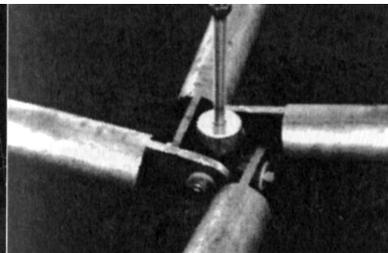


Abbildung 5-128: Knotenausbildung



Abbildung 5-129: Stabbündel bei der Montage

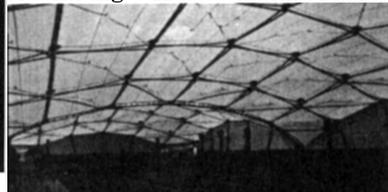


Abbildung 5-131: Entfaltetes Dach

5.4.2 wiederholt bewegt

Riesenräder: Wien, A; London Eye, GB

Riesenrad im Prater, Wien

Ingenieur : Walter Basset

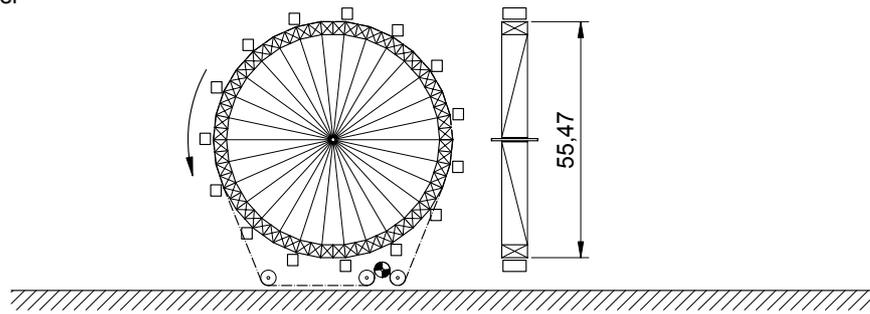
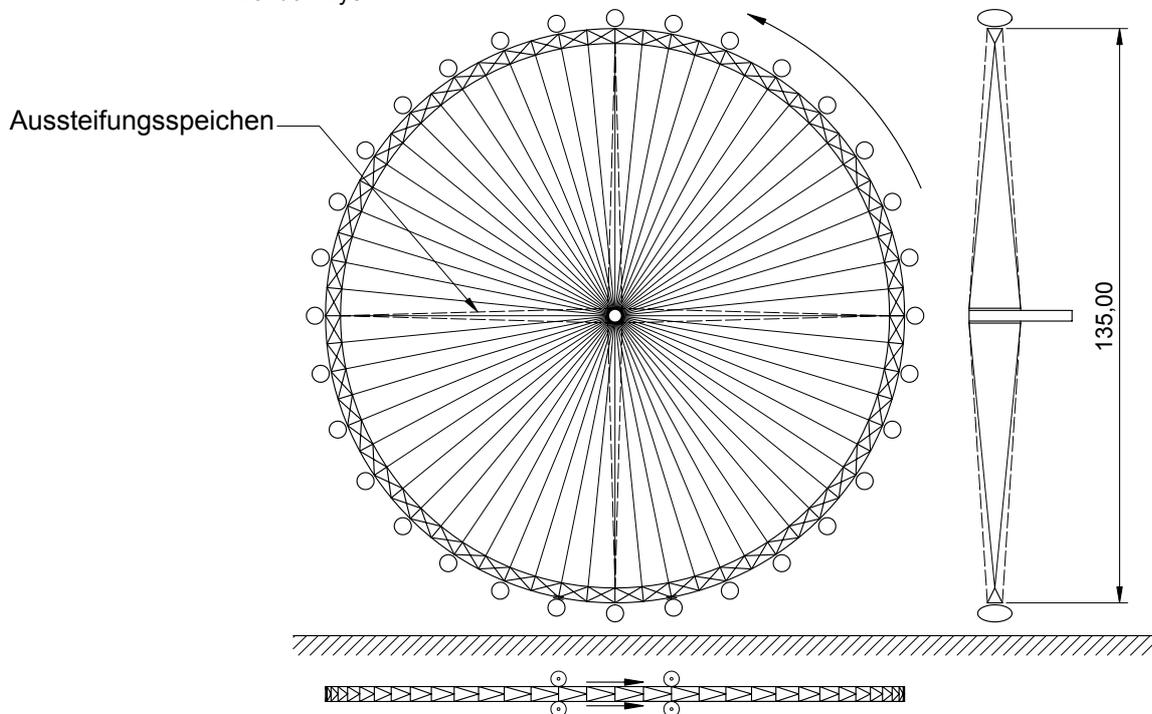
Bauwerksbeschreibung

Riesenräder werden in der Regel als schlaffe Speichenräder mit nicht vorgespannten Speichen ausgeführt oder neuerdings als vorgespannte Speichenräder mit Speichen, die gegen den äußeren Radkranz vorgespannt sind.

Schlaffe Speichenräder werden entweder aus einem biegesteifen Kranzträger mit zugbeanspruchten Speichen oder einem wahlweise biegesteifen oder gelenkig ausgebildeten Kranzträger mit zug- und druckbeanspruchten Speichen ausgeführt und in der zentralen Nabe gelagert.

Das 1896/97 gebaute Riesenrad im Wiener Prater ist in gleicher Weise, wie das erste, anlässlich der Weltausstellung in Chicago 1893 gebaute, Riesenrad von George W. Ferris (Brückenbauer aus Pittsburgh), mit ausschließlich zugfesten Speichen konzipiert. Die Montage des Rades kann von der auf Pylonen gelagerten Nabe ohne Gerüst erfolgen, indem das Rad abschnittsweise symmetrisch vorgebaut und auf die Speichen gehängt wird.

Für vorgespannte Riesenräder ist zum Kurzschließen der Vorspannkräfte aus den Speichen ein umlaufender druck- und torsionssteifer Kranzträger notwendig. Das 1999 fertig gestellte Riesenrad ‚London Eye‘ ist das erste Riesenrad dieser Bauart. Das liegend montierte und vorgespannte Rad wurde als Ganzes aufgekippt und in der Nabe gelagert.

a) Riesenrad Wien,
Praterb) Riesenrad
London Eye**Abbildung 5-132: Riesenräder :**

- a) Wiener Prater mit nicht vorgespannten Speichen und Seilantrieb
- b) London Eye mit vorgespannten Speichen und Reibradantrieb



Abbildung 5-133: Ansicht Wiener Riesenrad

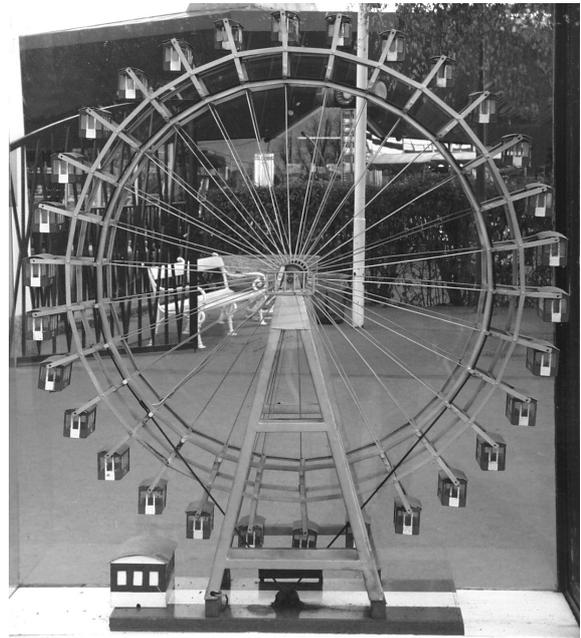


Abbildung 5-134: Modell Wiener Riesenrad



Abbildung 5-135: Antriebsseil mit Umlenkrollen



Abbildung 5-136: Antrieb mit Spanneinrichtung



Abbildung 5-137: Aufhängung eines Waggons



Abbildung 5-138: Riesenrad London Eye

Wiener Riesenrad

Das Wiener Riesenrad besitzt 120 Speichen aus schlaffen, nicht vorgespannten Stahlseilen. Der außen liegende Kranzträger ist als biegesteifer Fachwerkring ausgebildet und hat einen äußeren Durchmesser von rd. 55 m und eine Konstruktionshöhe von rd. 3 m bei einer Breite von 6 m. Das Rad wird mit seiner Nabe drehbar in Lagerschalen mit einer Bronzgleitschicht auf den beidseits angeordneten Pylonen gelagert.

Von der Radnabe aus verlaufen 30 radial angeordnete Speichen in zwei Ebenen zum Kranzträger. Zur Aufnahme von Windkräften in Achsrichtung sind weitere 30 Speichen diagonal angeordnet (Abbildung 5-132 a).

15 Passagier-Waggons sind mittels Auslegern an der Außenseite des Kranzträgers als Pendel von der oberen Drehachse abgehängt, sodass ihr Boden durch das Eigengewicht immer horizontal bleibt (Abbildung 5-137).

Der Antrieb erfolgt über zwei Seiltriebe mit umlaufenden Seilschleifen die an der Außenseite des Kranzträgers über Umlenksättel mit Reibungsbacken gelenkt werden und durch eine Treibscheibe am Fuß des Rades elektrisch angetrieben werden. Jedes Seil ist für ausreichende Kraftübertragung $1\frac{1}{2}$ mal um den Radumfang geschlagen und durch ein Spannsystem gespannt. Dazu wird die Treibscheibe vertikal verschiebbar gelagert und mit einem Gegengewicht gegen das Antriebsseil gespannt (Abbildung 5-135,Abbildung 5-136).

Die konstante Relativgeschwindigkeit zwischen Waggon und Einstiegsplattform wird für ein sicheres und komfortables Ein- und Aussteigen mit 0,75 m/sec begrenzt.

London Eye

Das 1999 fertig gestellte Riesenrad ‚London Eye‘ am Ufer der Themse ist das zur Zeit größte Riesenrad² mit einem Durchmesser von 134 m und das erste Riesenrad mit vorgespannten Speichen.

Der Kranzträger des London Eye besteht aus einem Dreigurtfachwerk aus Rohren. Die zentrale Nabe mit 2 m Durchmesser und 24 m Länge wird in einem Walzlager drehbar gelagert und vom rückverankerten Pylon auf einer Seite des Rades getragen. Die vertikalen Lasten werden von der Nabe aufgenommen, während Führungsrollen am Fuß des Rades der Aufnahme von horizontalen Lasten dienen.

Jeweils 32 radiale Speichen laufen von den beiden Enden der zentralen Nabe auf den inneren Gurt des Kranzträgers zusammen und ermöglichen die Aufnahme von Windkräften quer zur Radebene. Gegen das Verdrehen des Radkranzes gegenüber der Nabe sind zusätzlich zwei mal acht Aussteifungsspeichen sternförmig angeordnet.

Der Antrieb erfolgt am Fuß des Rades über ein Reibradgetriebe, dessen liegende Antriebsräder gegen den Kranzträger gespannt sind. Für eine Umdrehung benötigt das Rad rd. 30 Minuten, was eine Relativgeschwindigkeit einer Gondel gegenüber der Einstiegsplattform von 0,32 m/sec ergibt³.

An der Außenseite des Radkranzes sind 32 Waggon auf Auslegern drehbar gelagert. Um den Boden der Waggon horizontal zu halten, werden sie einzeln durch jeweils eigenen Antrieb mit zugehörigen Sensoren mit dem Rad mitgedreht (Abbildung 5-132 a, Abbildung 5-138).

² In Shanghai soll ein Riesenrad gleicher Bauart mit 200 m Durchmesser bis 2005 fertig gestellt werden.

³ Für gehbehinderte Passagiere wird das Rad angehalten.

6 Conclusio

In der Konzeption am Beginn und der Ausformung am Ende des Planungsprozesses liegt der Hauptinhalt der Tragwerkslehre, die mit der vorliegenden Arbeit um einen Beitrag zu beweglichen Tragwerken erweitert wurde. Die dafür erforderlichen Inhalte zur Bewegungsgeometrie wurden im Kapitel Kinematik behandelt, die verschiedenen Getriebe für die Ausformung beweglicher Baukonstruktionen wurden im gleichnamigen Kapitel beschrieben.

Die jeweiligen Entwicklungen im Brückenbau und Hochbau und die behandelten Anwendungsbeispiele zeigen, dass sich im Allgemeinen nur jene einfachen Bautypen durchsetzen konnten die auf ebener Kinematik und einfachen Mechanismen basieren.

Die Anwendungsbeispiele dienen der Verdeutlichung der vorgehenden Inhalte und als Anregungen für eigene Entwürfe.

Im folgenden Ausblick finden sich Anregungen für weiterführende Arbeiten, welche über die bewusst abgegrenzten Inhalte der vorliegenden Arbeit hinaus gehen.

Berechnung

Im Zuge der Bearbeitung der Katzbuckelbrücke, Duisburg (Entwurf: Schlaich) wurden deren Kinematik und Dynamik mit dem Softwarepaket RM2000¹ untersucht. Das System wurde räumlich modelliert und unter Berücksichtigung großer Verformungen und Verschiebungen berechnet. Als Ergebnis wurden unter anderem die räumliche Bewegungsgeometrie und die Veränderung der Eigenfrequenzen in Abhängigkeit des Öffnungsgrades bestimmt. In einer weiterführenden Arbeit sollte die Modellierung beweglicher Tragwerke für die EDV-gestützte Berechnung beschrieben und ihre Tauglichkeit anhand von Referenzprojekten untersucht werden.

Bewertung

Einige Diskussionen führten zur Frage der Bewertbarkeit beweglicher Tragwerke. Die Bewertung beweglicher Tragwerke, beispielsweise die Wirtschaftlichkeit oder Dauerhaftigkeit betreffend, ist wegen der Vielzahl an Einflüssen komplex. In der Robotertechnik sind die Nutzungsbedingungen klar definiert und eine Bewertung aus der Zahl und Art der Gelenke und der für den Bewegungsvorgang notwendigen Energie möglich². Bewegliche Tragwerke können aus Sicht des Autors nur im gegenseitigen Vergleich einiger weniger Aspekte und nur innerhalb einer Bauaufgabe bewertet werden. Die Erstellung und Erprobung eines Bewertungssystems für eine spezifische Bauaufgabe ist für eine weiterführende Arbeit interessant.

¹ Tdv, RM2000, 2002

² McCloy: Robotertechnik, 1989

Bewegliche adaptive Systeme

Ein Teil der adaptiven Systeme, jene in 2.1.1 beschriebenen Systemen, die sich mit Hilfe selbstgesteuerter oder selbstorganisierter Vorgänge aktiv verändern können, kann als bewegliche Tragwerke aufgefasst werden. Sobek et.al.¹ schlagen beispielsweise eine Anwendung mit längenverstellbarer Elementen vor, welche zur Veränderung der Schnittkraftverteilung in statisch unbestimmten Systemen genutzt werden sollen. Die dafür vorgeschlagenen Mechanismen lassen sich in das Ordnungsprinzip der vorliegenden Arbeit einordnen, weichen jedoch von den beschriebenen Antrieben hinsichtlich der an sie gestellten Anforderungen ab und stammen aus dem Bereich der ‚smart materials‘, Materialien mit besonderen technologischen Eigenschaften. Eine weiterführende Behandlung dieser noch im Konzeptstadium befindlichen Systeme aus der Sicht der Tragwerkslehre wäre – über die zitierte Arbeit hinaus – sinnvoll.

Alternativen zum mechanischen ‚Versteifung‘

Bewegliche Tragwerke mit in sich faltbaren Elementen, wie textile Materialien oder Scherengittern, sind Inhalt der vorliegende Arbeit. Sie werden nach dem Bewegungsvorgang mechanisch, also durch Spannen oder Arretieren fixiert und tragfähig gemacht. Neben dieser mechanischen ‚Versteifung‘ durch Getriebe sind – ganz allgemein betrachtet – auch andere physikalische oder chemische Prozesse denkbar, wie sie in Anhang C kurz beschrieben sind. Für eine weiterführende Arbeit zu diesem Thema sollte eine systematische Behandlung dieser alternativen Methoden erfolgen und ihre Umsetzbarkeit untersucht werden.

¹ Sobek, Haase, Teuffel: Adaptive Systeme, 2000

A. LITERATURVERZEICHNIS

FÜR DIE KAPITELN 1 BIS 4 UND 6 IN ALPHABETISCHER REIHENFOLGE

- Anonym: Aufblasbares Dach, 1994 (Kap.4)
Anonym: Aufblasbares Railmobildach für die Freilichtbühne Tecklenburg in
Stahlbau 63, H. 8, S. 232, 1994
- Anonym: Bascule, 1984 (Kap.2)
Anonym: Bascule in Civil Engineering ASCE volume 54, No. 7, S.57, 1984
(englisch)
- Anonym: Hubbrücke, 1992 (Kap.2)
Anonym : Hubbrücke über die Gouwe bei Gouda in Beton- und Stahlbetonbau, Nr.
87, Heft 7, S. 170, 1992
- Anonym: Seilbahnen, 1994 (Kap.4)
Anonym : Reglement über Bau und Betrieb der nicht eidgenössisch
konzessionierten Seilbahnen und Skilifte, Urner Rechtsbuch - 50. 3213, Kantonale
Verwaltung Uri, Schweiz, 1994
- Bartens, Maahs, Schiffner, Vogt: Kettentechnik, 1989 (Kap.4)
Bartens, R.; Maahs, G.; Schiffner, H.; Vogt, E.: Handbuch der Kettentechnik,
Einbeck: Verlag der Arnold&Stolzenberg GmbH., 1989
- Blaser: Sobek, 1999 (Anhang)
Blaser, Werner: Werner Sobek – Ingenieur-Kunst. Basel, Boston, Berlin:
Birkhäuser, 1999
- Bonatz, Leonhardt: Brücken, 1952 (Kap.2)
Bonatz, Paul;Leonhardt, Fritz: Brücken, Königsstein: Karl Robert Lange Wiesche
Verlag, 1952
- Brisighella et.Al.: Moveable Bridges, 2003
Briseghella; Siviero; Zordan; Pircher; Wallner: The innovation in movable bridges:
sophisticated design and analysis with an eye on tradition, Proceedings of the New
York, Bridge Engineering Conference, New York, 2003
- Bubner: IL 12 - Pneus, 1975 (Kap.4)
Bubner, Ewald : Wandelbare Pneus = Convertible pneus, Stuttgart: Krämer ,
1975. (Mitteilungen des Instituts für Leichte Flächentragwerke (IL), Universität
Stuttgart ; Nr. 12)

- Buderer: Kinetische Kunst, 1992 (Kap.2)
Buderer, Hans-Jürgen : Kinetische Kunst: Konzeptionen von Bewegung und Raum; Worms: Wernersche Verlagsgesellschaft, 1992
- Buterworth, Carr, Kassabian: Gateshead, 2003 (Kap.2)
Butterworth, K.;Carr, D.; Kassabian, P. : Gateshead Millennium Bridge, UK: fabrication, assembly and erection. in Bridge Engineering, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Bristol: Thomas Telford Publishing, Vol. 1, 2003
- Calatrava: Faltbarkeit, 1981 (Kap.2)
Calatrava Valls, Santiago: Zur Faltbarkeit von Fachwerken, Dissertationsschrift (ETH-Zürich, ETM 6870), Zürich, 1981
- Dietz: Bewegliche Brücken, 1907 (Kap.2, Kap.4)
Dietz, W.: Bewegliche Brücken in Landsberg, T.; Schäffer, T.; Sonne E. :Der Brückenbau, Handbuch der Ingenieurwissenschaften, Leipzig: Wilhelm Engelmann, 1907
- Escring: Faltbarkeit in der Architektur, 1996 (Kap.2)
Escring, F.: General Survey of deployability in architecture. in Escring, Brebbia [Ed.]: Mobile and Rapidly Assembled Structures II. Southampton: Computational Mechanics Publications, 1996. S. 3-22
- Feldham: Leonardo, 1913 (Kap.2)
Feldham, Fanz: Leonardo der Techniker und Erfinder, Jena:Diederichs, 1913
- Föppl: Fachwerk im Raume, 1892 (Kap.3)
Föppl, August: Das Fachwerk im Raume, Leipzig: B.G. Teubner, 1892
- Föppl: Fachwerk, 1880 (Kap.3)
Föppl, August: Theorie des Fachwerks, Leipzig: Verlag Arthur Felix, 1880
- Freudenberg: Waagbalken-Klappbrücken, 1989 (Kap.2)
Freudenberg, Gerhard : Zwei neue Waagbalken-Klappbrücken in Mannheim in Stahlbau, Berlin: Willhelm Ernst&Sohn, Jg. 58, H. 2, S.35-43, 1989
- Galluzzi: Renaissance, 1996 (Kap.2)
Galluzzi, Paolo : Renaissance Engineers, From Brunelleschi to Leonardo da Vinci; Florence:Istituto e Museo di Storia della Scienza, 1996; Katalog zur gleichnamigen Ausstellung, Florenz, 1996
- Gengnagel, Barthel: Bewegliche Dächer, 2001 (Kap.2)
Gengnagel, Christoph; Barthel, Rainer : Bewegliche Dächer in Detail Nr. 5/2001, S. 841-846, 2001

- Gengnagel: Forschungsprojekt, 1999 (Kap.2)
Gengnagel, Christoph: Design and Optimization of a Lightweight Deployable Roof Enclosure Systems. Forschungsprojekt am Lehrstuhl für Tragwerksplanung (Prof.Dr.-Ing. Rainer Barthel), Technische Universität München, Fakultät für Architektur, Institut für Entwerfen und Bautechnik. www.lt.arch.tu-muenchen.de
- Gerner: Historische Fenster, 1996 (Kap.2)
Gerner, Manfred : Historische Fenster : Entwicklung, Technik, Denkmalpflege, Stuttgart : Deutsche Verlags-Anstalt, 1996
- Graefe: Vela, 1979 (Kap.2)
Graefe, Rainer: Vela Erunt, Dissertationsschrift in zwei Bänden, 1979
- Hardesty, Fischer, Christie: Moveable Bridge History, 1975 (Kap.2)
Hardesty, Egbert; Fischer, Henry; Christie, Richard : Fifty-Year History of Moveable Bridge Construction (Part I III); in Journal of the Construction Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Vol. 101, No. CO3, September 1975. pp. 511-557
- Hawranek: Bewegliche Brücken, 1936 (Kap.2)
Hawranek, Alfred: Bewegliche Brücken, Berechnung und Konstruktion, Berlin: Julius Springer, 1936
- Hoberman: expandable structure, 1990 (Kap.2)
Hoberman, Charles: Reversibly expandable doubly-curved truss structure, US-Patent No.: 4,942,700, US Patent & Trademark Office, 1990
- Hoberman: retraction truss structures, 1991 (Kap.2)
Hoberman, Charles: Radial expansion/retraction truss structures, US-Patent No.: 5,024,031, US Patent & Trademark Office, 1991
- Ideberger: bewegliche Hallen, 1973 (Kap.2)
Ideberger, Klaus: Zur Sonne zu öffnen, gegen Regen und Schnee überdacht : Bäder mit beweglichen Hallen in Acier ·stahl ·steel, 11/1973, S. 464-469
- IL: 5 Wandelbare Dächer, 1972 (Kap.2)
Institut für Leichte Flächentragwerke: Mitteilungen des Institutes für leichte Flächentragwerke, Band IL 5, Wandelbare Dächer; Stuttgart: Krämer Verlag, 1972
- Ishii: Retractable Roofs, 2000 (Kap.2)
Structural design of retractable roof structures / IASS. Kazuo Ishii ed. . - Southampton : WIT Press , 2000 . - 187 S. . - ISBN: 1-85312-619-5. - (International series on advances in architecture ; 5)

- Kassabian etAl.: Retractable roofs, 1999 (Kap.2)
Kassabian, P. E., You, Z. and Pellegrino, S.: Retractable roof structures. Proc. Instn Civ. Engrs Structs & Bldgs, 134, 45-56, 1999
- Kassabian etAl.: Retractable structures, 1997 (Kap.2)
Kassabian, P. E., You, Z. and Pellegrino, S. : Retractable structures based on multi-angulated elements. In Proc. International Colloquium on Structural Morphology, Nottingham, U.K. (Edited by J. C. Chilton), 1997
- Kiefer: Textiles Bauen, 1995 (Kap.4)
Kiefer, M. : Beispiele für Textiles Bauen - Ausgeführte und projektierte Bauten in Bauingenieur, H. 70, S. 263-269, 1995
- Kurokawa: Oita Stadium, 2002 (Kap.2)
Kurokawa, Kisho: Oita Stadium, Oita, Japan / text Dennis Sharp - Stuttgart [u.a.] : Ed. Axel Menges , 2002
- Kurrer: Geschichte, 2002 (Kap.2)
Kurrer, Karl-Eugen : Geschichte der Baustatik, Berlin : Ernst, 2002
- Marti, Morphologie, 2002
Marti, Peter (ETH Zürich): persönliches Gespräch am 19.9.2002, München, 2002
- McCloy: Robotertechnik, 1989
McCloy, Don : Robotertechnik: Einführung; D.McCloy, M.J. Harris; hrsg. (dt): Hans-Dieter Junge; Übers.: Franz Klefenz und Monika Recker. Weinheim, Basel, Cambridge, New York: VCH, 1989
- Merten: Bewegliche Hallen, 1991 (Kap.2)
Merten, Michael: Bewegliche Dachtragwerke und Hüllsegmente für Hallen – unter Berücksichtigung der Aspekte der Architekturbionik, Dissertationsschrift, Fakultät für Architektur, Hochschule für Architektur und Bauwesen, Weimar, 1991
- Meyer-Bohe: Fenster, 1978 (Kap.2)
Meyer-Bohe, Walter : Fenster, Stuttgart : Koch, 1978
- Niemann, Winter: Zahnradgetriebe, 1983 (Kap.4)
Niemann, G.; Winter, H. : Maschinenelemente - Band II, Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe, 2. Auflage. Berlin: Springer, 1983
- Pellegrino: Kinematically Indeterminate Structures, 1986 (Kap.3)
Pellegrino, Sergio: Mechanics of Kinematically Indeterminate Structures, Dissertation University of Cambridge, 1986

- Pircher: Aufsatz, 2001 (Kap.2)
Pircher, Wolfgang: Technik als symbolische Form. Ein taugliches Konzept?,
Aufsatz in www.phaidon.philo.at, 2001
- Reuleaux : Kinematik, 1875 (Kap.2)
Reuleaux, Franz : Lehrbuch der Kinematik, Erster Band; Braunschweig:
Friedrich Vieweg und Sohn, 1875.
- Reuleaux : Kinematik, 1900 (Kap.2, Kap.3)
Reuleaux, Franz : Lehrbuch der Kinematik, Zweiter Band, Die praktischen
Beziehungen der Kinematik zu Geometrie und Mechanik; Braunschweig:
Friedrich Vieweg und Sohn, 1900.
- Robin: Engineering, 1996 (Kap.2)
Robin, Tony: Engineering a new architecture, New Haven and London: Yale
University Press, 1996
- Rombock: Fensterkonstruktionen, 1993 (Kap.2)
Rombock, Ulrich : Informationszentrum Raum und Bau Stuttgart : Historische
Fensterkonstruktionen, Stuttgart : IRB-Verlag, 1993
- Rückert: Wandelbare hybride Konstruktion, 2001 (Kap.2)
Rückert, Gerhard : Wandelbare hybride Konstruktionen: von der
morphologischen Studie zum Prototyp; Basel [u.a.]: Birkhäuser , 2001
- Sanchez, Escring, Valcárel: Schwimmbadüberdachung, 1996 (Kap.2)
Sanchez, J.; Escring, F.; Valcárel, J.P. : The adventure of covering a swimming-
pool with an X-frame structure. in Escring, Brebbia [Ed.]: Mobile and Rapidly
Assembled Structures II. Southampton: Computational Mechanics Publications,
1996. S. 115-122
- Scheffler: Fördertechnik, 1994 (Kap.4)
Scheffler, Martin : Grundlagen der Fördertechnik - Elemente und Triebwerke;
Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1994
- Schmid: Schwachstellenanalyse, 1987 (Kap.1)
Schmid, Gerd : Wandelbare Hallen: Struktur und Schwachstellenanalyse (Hrsg.
Lehrstuhl 1 für Baukonstr. Und Entwerfen, Uni Stuttgart); Schriftenreihe
Baukonstruktion, 21.; Hochschulschrift, Stuttgart, 1987
- Schlaich, Knippers: Dreifeld-Klappbrücke, 1999 (Kap.2)
Schlaich, J.; Knippers, J. : Dreifeld-Klappbrücke in Kiel-Hörn. in
Bauingenieur, Bd.74, Nr.5. Mai, 1999, S. 213-217.

- Schwedler: Drehbrücken ohne Rollenkranz, 1871 (Kap.2)
 Schwedler, W. : Mitteilung über einige Drehbrücken ohne Rollenkranz. (über die Peene bei Anclam). in Zeitschrift für Bauwesen, Nr. 21, S.197-198, 1871
- Sobek, Haase, Teuffel: Adaptive Systeme, 2000 (Kap.2)
 Sobek, Werner; Haase, Walter; Teuffel, Patrik : Adaptive Systeme; in Stahlbau 69 (2000), Heft 7, S.544-555
- Stürzebecher: Sporthallen, 2001 (Kap.2)
 Stürzebecher, Peter; Ulrich, Sigrid: Architekten für Sport: neue Konzepte, internationale Projekte für Sport und Freizeit, Berlin: Verl. Bauwesen, 2001
- Szabo: Technische Mechanik, 1963 (Kap.2)
 Szabo, Istvan: Einführung in die Technische Mechanik; Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer, 1963
- Tdv, RM2000, 2002 (Kap.6)
 TDV GmbH., Graz: RM2000 – Technische Beschreibung, Graz, 2002
- Thayer: Vitruvius, 2003 (Kap.2)
 Thayer, Bill [Hrsg.]: Vitruvius, Polli: De architectura, Buch X. Internetlink: www.ukans.edu/history/index/europe/ancient_rome/E/Roman/Texts/Vitruvius/10.html (englische Fassung), 2003.
- Tzonis: Calatrava, 1999 (Kap.2)
 Tzonis, Alexander: Santiago Calatrava, The Poetics of Movement, London: Thames&Hudson, 1999
- Valcárel, Escring, Martín, Freire: Expandable Space Structures , 1991 (Kap.2)
 Valcárel, J.P.; Escring, F.; Martín, E.; Freire, M. : Expandable Space Structures with self-folding Textile Cover.in Bulson [Ed.]: Rapidly Assembled Structures, Southampton: Computational Mechanics Publications, 1991, S.283-295
- van Naeste: Stahlbrücken, 1970 (Kap.2)
 van Naeste, A.J. : Zehn Jahre Stahlbrücken in Rotterdam, zweiter Teil in acier-stahl-steel, Jg.1970, Vol. 9, S. 392-400, 1970
- Vierling: Maschinenkunde, 1943 (Kap.4)
 Vierling, H. : Maschinenkunde des Bauingenieurs in Schleicher, Ferdinand [Hrsg.] : Taschenbuch für Bauingenieure, Berlin: Springer, 1943
- Volmer: Getriebetechnik, 1987 (Kap.3, 4)
 Volmer, Johannes [Hrsg.] : Getriebetechnik, 5. durchges. Auflage, Berlin : VEB Verlag Technik, 1987

Wallner: Kinematics, 2002

Wallner, Markus: Geometry and Kinematics - Planning and Design of Moveable Structures, 4th PhD - Symposium, München, 2002

Wallner, Pircher: Structures, 2002

Wallner, Markus; Pricher, Martin: Structures Reacting to Environmental Boundary Conditions, Proceedings to the IABSE Symposium 'Towards a Better Built Environment - Innovation, Sustainability, Information Technology', Melbourne, 2002

Wittenbauer: Grafische Dynamik, 1923

(Kap.3)

Wittenbauer, Ferdinand : Grafische Dynamik; Berlin : Springer, 1923

Zirpke: Zahnräder, 1964

(Kap.4)

Zirpke, K. : Maschinenteile, Bd. IV, Zahnräder. Leipzig : VEB Fachbuchverlag, 1964

LITERATURVERZEICHNIS

ZU DEN ANWENDUNGSBEISPIELEN VON KAPITEL 5
IN DER DORT ANGEFÜHRTEN REIHENFOLGE

Galata-Brücke, Istanbul, T

Anonym: Bascule, 1984

Anonym: Bascule in Civil Engineering ASCE volume 54, No. 7, S.57, 1984
(englisch)

Kästel: Galata-Brücke, 1992

Kästel, Dirk : Die neue Galata-Brücke in Istanbul, Beton 7/92, S. 371, 1992

Anonym: Galata-Brücke, 1995

Anonym : Galata-Brücke als fest verankerte Klappbrücke, Stahlbau, Nr. 64, Heft 7, S. 201, 1995

Saul, Zellner, Eilzer, Braun, Veerer: Galata-Brücke I, 1992

Saul, R.; Zellner, W.; Eilzer, W.; Braun, M.; Veerer, K. : Die neue Galata-Brücke in Istanbul – Entwurf, in Bauingenieur, Nr. 67, S. 433-444, Springer-Verlag, 1992

Saul, Zellner, Eilzer, Braun, Veerer: Galata-Brücke II, 1993

Saul, R.; Zellner, W.; Eilzer, W.; Braun, M.; Veerer, K. : Die neue Galata-Brücke in Istanbul – Besonderheiten der Berechnung und Bauausführung, in Bauingenieur, Nr. 68, S. 43-51, Springer-Verlag, 1993

Deffenè-Brücke, Mannheim, D

Freudenberg: Waagbalken-Klappbrücken, 1989

Freudenberg, Gerhard : Zwei neue Waagbalken-Klappbrücken in Mannheim in Stahlbau, Berlin: Willhelm Ernst&Sohn, Jg. 58, H. 2, S.35-43, 1989

Kindmann, Sass: Reiherstieghklappbrücke , 1985

Kindmann, R.; Sass, H.H. : Neubau der Reiherstieghklappbrücke im Hamburger Hafen in Bauingenieur, Berlin: Springer, Jg. 60, S. 469-476, 1985

Sheboygan-Brücke, Wisconsin, USA

Cassity, Patel, Nair: Bascule, 1996

Cassity, Patrick; Patel, Vinod; Nair, Shankar : Rebound of the Bascule Bridge, in Civil Engineering, 8/1996, S. 48-50

Drehbrücke Ludwigshafen, D

Freudenberg: Drehbrücke Ludwigshafen, 1984

Freudenberg, Gerhard: Erneuerung der Drehbrücke Ludwigshafen. in Stahlbau
5/1984, S. 150-156, 1984

Volker: Drehbrücke Sluiskil, 1969

Volker, A. : Die Drehbrücke in Sluiskil (Niederlande). in Acier Nr. 3, S. 121-126.
1969

El Ferdan-Brücke, Ägypten

Schlecht, Krüger, Heß: Drehbrücke, 1999

Schlecht, R.; Krüger, H.; Heß J. : Drehbrücke über den Suez-Kanal bei El Ferdan,
in Stahlbau Nr. 68, H. 5, S.329-346, 1999

Schlecht, Krüger, Heß: Drehbrücke Suez-Kanal, 2000

Schlecht, R.; Krüger, H.; Heß J. : Die Maschinenteknik der größten Drehbrücke
der Welt über den Suez-Kanal in Bauingenieur, Bd. 75, Nr. 10, S.646-655, 2000

Saltinabrücke, CH

Meyer, Pfammatter, Eyer Elmar; Werlen, Werlen: Saltina-Hubbrücke, 1997

Meyer, Oliver; Pfammatter, Cäsar; Eyer Elmar; Werlen, Matthias : Saltina-
Hubbrücke in Brig-Glis in Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 50, 12/1997, S.
1022-1026

Katzbuckelbrücke, Duisburg, D

Schlaich: Convertible Bridge, 1999

SBP: Convertible Bridge over the inner Harbour, Projektbeschreibung des
Ingenieurbüros

Schlaich: Fußvolk, 2001

Schlaich, Mike: Lastfall Fußvolk in db - Deutsche Bauzeitung 6/2001, S 106-112

Anonym: Fußgängerbrücke, 1999

Anonym ; Fußgängerbrücke im Innerhafen Duisburg, in Detail 8/1999,
S. 1455-1458, 1999

ILEK: Vorlesung Brückenbau, 2001 Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Uni-
Stuttgart : Lehrmittel zur Vorlesung ‚Entwerfen und Konstruieren von
Ingenieurbauten‘, 2001

Schwimmbücke Lundrim, Genf, CH

Nikmengjaj: LUNDRIM, 2003

Nikmengjaj, Nik : LUNDRIM, To cross a river / shores to link; Diplomarbeit, TU-Graz, 2003

Senkwand, Cafe Schlossberg, Graz, A

Frank, Rieper: Cafe Schlossberg, 2002

Frank, Siegfried; Rieper, Michael : Café Schlossberg, Wettbewerbsmappe, Eigentum der Verfasser, 2002

Stiller: Haus Tugendhat, 1999

Stiller, Adolph [Red.]: Das Haus Tugendhat : Ludwig Mies von der Rohe, Brunn 1930 ; [anlässlich der gleichnamigen Ausstellung im Ausstellungszentrum der Wiener Städtischen Allgemeinen Versicherung in Wien. Salzburg: Pustet , 1999

Earnstings Warenhaus, Coesfeld, D

Blaser: Calatrava, 1989

Blaser, Werner [Hrsg.] : Santiago Calatrava – Ingenieur-Architekt. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser, 1989

Fassade des Aurora Place, Sydney, AUS

Renzo Piano: Technische Beschreibung, 2003

Renzo Piano Building Workshop S.r.l. : Technische Beschreibung des Projekts. Internetseiten - www.rpwf.org , 2003

Wachsmann: Bauen, 1959

Wachsmann, Konrad : Wendepunkt im Bauen, Wiesbaden: Krausskopf-Verlag, 1959

Fassade des Arabischen Institutes, Paris, FRA

Nouvel: El Croquis, 1987

Nouvel, Jean: El Croquis: publicacion de arquitectura, construction y diseno. Madrid: Artes Graficos GRUPO, 1998

Bad zur Sonne, Graz, A

Rekonstruktion auf Grund von Plänen des Instituts für Hoch- und Industriebau, Prof. Gamerith, Technische Universität Graz

Colonial Stadium, Melbourne, AUS

Sheldon, Dean : Colonial Stadium, 2002

Sheldon, Mark; Dean, Brian: Colonial Stadium, Melbourne, in Structural Engineering International, Journal of the International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), 1/2002, S. 4-7, 2002

Cole, Idelberger : Stadion in Melbourne, 2000

Cole, Peter; Idelberger, Klaus : Stadion in Melbourne mit Schiebedach. in Stahlbau, Nr. 69, Heft 8, Berlin: Ernst & Sohn. S.662-665, 8/2000

Hofüberdachung im Rathaus, Wien, A

Anonym: Faltwerk, 2001

Anonym : Faltwerk in den Arkaden; Rondo, Der Standard, 21.12.2001, Wien, 2001

Hötzl: Rathausdach, 2003

Hötzl, Manuela : Der fünf Minuten Himmel, DBZ Deutsche Bauzeitschrift, H.4, 51. Jg, Gütersloh: BertelsmannSpringer Bau-Verlag, S. 48-53, 2003

Tillner: Technischer Bericht, 1999

Tillner, Silja : Rathaus-Überdachung / Technischer Bericht Rathaus Wien, Arkadenhofüberdachung; Schriftliche Unterlagen der Verfasserin, Wien 12/1999

Freilichttheater, Bad Hersfeld, D

Blümel: Wandelbare Dächer,1972

Blümel, Dieter, et.Al; [Red.] Pankoke, Uta: Wandelbare Dächer = Convertible roofs. Stuttgart: Krämer, 1972. (Mitteilungen des Instituts für Leichte Flächentragwerke (IL), Universität Stuttgart ; 5)

Ishii: retractable roof structures, 2000

Ishii, Kazuo [Ed.]: Structural design of retractable roof structures / IASS. Southampton: WIT Press , 2000 (International series on advances in architecture; 5)

Rothenbaum, Hamburg, D

Blaser: Sobek, 1999

Blaser, Werner: Werner Sobek – Ingenieur-Kunst. Basel, Boston, Berlin:
Birkhäuser, 1999

Stürzebecher: Architektur für Sport, 2001

Stürzebecher, Ulrich: Architektur für Sport – neue Konzepte, internationale
Projekte für Sport und Freizeit. Berlin: Verlag Bauwesen, 2001

Werfthalle Cargo Lifter, Brand, D

Anonym: CargoLifter, 2000

Anonym : CargoLifter Werftanlage in Brand bei Berlin, Glas 3/2000

Grimm: Tragwerke, 2003

Grimm, Friedrich : Weitgespannte Tragwerke aus Stahl, Berlin: Ernst&Sohn,
2003

SIAT: CargoLifter, 2001

SIAT Architektur + Technik [Hrsg.]: CL21 – Die CargoLifter-Werft, München
2001

Pantadome System der Convention Hall, Nara, JAP

Herler, Korb, 2002

Herler, Frida : Persönliche Korrespondenz, Frohnleiten, 2002

Kawaguchi: Pantadome-System, 1998

Kawaguchi, Mamoru : Neuartige Tragwerke und ihre Formen – Beispiele des
Pantadome-Systems. in Bautechnik 75, Heft 11, S.948-954, 1998

Kawaguchi: Convention-Hall, 1998

Kawaguchi, Mamoru: Ein Pantadome für die Convention Hall – Bewegliches
Tragwerk der neuen Konzerthalle in Nara, Japan. in Bauwelt, JG.89, Nr.4, S.160-
163, 1998

Robbin: Engineering, 1996

Robbin, Tony : Engineering an New architecture, New Haven and London: Yale
University Press, ISBN 0-300-06116-1, S.46-49, 1996

Systeme mit Scherengittern

Sanchez, Escring, Valcárel: Schwimmbadüberdachung, 1996

Sanchez, J.; Escring, F.; Valcárel, J.P. : The adventure of covering a swimming-pool with an X-frame structure. in Escring, Brebbia [Ed.]: Mobile and Rapidly Assembled Structures II. Southampton: Computational Mechanics Publications, 1996. S. 115-122

Riesenrader in Wien, A; London Eye, GB

Anonym: Wiener Riesenrad, 2003

Anonym: Wiener Riesenrad: Technische Details, Unterlagen der
Betreibergesellschaft Wiener Riesenrad, Wien, 2003

Berenbak: London Eye, 2002

Berenbak, Jacques : The ‚British Airways London Eye‘ the greatest observation wheel in the world in Stahlbau, Nr. 71, H. 4, S. 278-284, 2002

Berenbak, Lanser: London Eye, 2002

Berenbak, Jacques; Lanser, Arie : The structural design of the ‚British Airways London Eye‘ in Stahlbau, Nr. 71, H. 4, S. 285-288, 2002

B. ABBILDUNGSNACHWEIS

- Abbildung 2-1, Abbildung 2-2:
Galluzzi: Renaissance, 1996
- Abbildung 2-3, Abbildung 2-4, Abbildung 2-5:
Reuleaux : Kinematik, 1875
- Abbildung 2-7: Bonatz, Leonhardt: Brücken, 1952, S.20
- Abbildung 2-8: Dietz: Bewegliche Brücken, 1907, S. 38
- Abbildung 2-10: Freudenberg: Waagbalken-Klappbrücken, 1989
- Abbildung 2-11: Dietz: Bewegliche Brücken, 1907, S.77
- Abbildung 2-12: Dietz: Bewegliche Brücken, 1907, S.67
- Abbildung 2-13: Dietz: Bewegliche Brücken, 1907, S.138
- Abbildung 2-14: Hawranek: Bewegliche Brücken, 1936
- Abbildung 2-15: van Naeste: Stahlbrücken, 1970
- Abbildung 2-16: Anonym: Hubbrücke, 1992
- Abbildung 2-17, Abbildung 2-18:
Schlaich, Bergermann und Partner (www.sbp.de)
- Abbildung 2-19: Wilkinson Eyre Architects Limited, Foto : Graeme Peacock
- Abbildung 2-20: Graefe: Vela, 1979
- Abbildung 2-21, Abbildung 2-22:
Ideberger: bewegliche Hallen, 1973
- Abbildung 2-23, Abbildung 2-24:
Ishii: Retractable Roofs, 2000
- Abbildung 2-25: Kurokawa: Oita Stadium, 2002
- Abbildung 2-26: Robin: Engineering, 1996
- Abbildung 2-27: Stürzebecher: Sporthallen, 2001
- Abbildung 2-28: Robin: Engineering, 1996
- Abbildung 2-29: Tzonis: Calatrava, 1999
- Abbildung 2-30: Robin: Engineering, 1996
-

- Abbildung 5 2, Abbildung 5 3:
Saul, Zellner, Eilzer, Braun, Veesser: Galata-Brücke I, 1992
- Abbildung 5 6, Abbildung 5 8, Abbildung 5 9,
Abbildung 5 10, Abbildung 5 11:
Freudenberg: Waagbalken-Klappbrücken, 1989
- Abbildung 5 13, Abbildung 5 14:
Cassity, Patel, Nair: Bascule, 1996
- Abbildung 5 17, Abbildung 5 18:
Freudenberg: Drehbrücke Ludwigshafen, 1984
- Abbildung 5 19: www.me.tu-dresden.de
- Abbildung 5 23: www.brig.ch
-

- Abbildung 5 28, Abbildung 5 29 :
Büro Schlaich, Bergemann und Partner, Stuttgart
- Abbildung 5 30 : ILEK: Vorlesung Brückenbau, 2001
- Abbildung 5 33 : Nikmengjaj: LUNDRIM, 2003
- Abbildung 5 34: TUG-Info, Monatszeitschrift der TU-Graz, Ausgabe 7/2002
- Abbildung 5 39: Frank, Rieper: Cafe Schlossberg, 2002
- Abbildung 5 45, Abbildung 5 46, Abbildung 5 47 :
Rainer Plösch, Hochbauamt, Graz Stadt
- Abbildung 5 51, Abbildung 5 52, Abbildung 5 53,
Abbildung 5 54, Abbildung 5 55, Abbildung 5 58,
Abbildung 5 60: Rainer Plösch, Hochbauamt, Graz Stadt
- Abbildung 5 69, Abbildung 5 70, Abbildung 5 71:
Nouvel: El Croquis, 1987
- Abbildung 5 72, Abbildung 5 73:
Ingrid Mayr, Jörg Mayr
- Abbildung 5 83: Architekturdatenbank db.nextroom.at
- Abbildung 5 84: Firma Sto, www.sto.at
- Abbildung 5 87: Sheldon, Dean : Colonial Stadium, 2002
- Abbildung 5 90: Firma SEMF, Australien, www.semf.com.au
- Abbildung 5 91: Anonym: Faltwerk, 2001 (Foto : Monika Nikolic)
- Abbildung 5 100: Blümel: Wandelbare Dächer,1972,
Abbildung 5 101: Ishii: Retractable Roofs, 2000
Abbildung 5 103: Blümel: Wandelbare Dächer,1972
- Abbildung 5 104: Information von Bad-Hersfeld, www.bad-hersfeld.de
- Abbildung 5 104, Abbildung 5 105, Abbildung 5 112:
Rekonstruktion des Autors aus Beschreibungen und Lokalaugenschein
- Abbildung 5 106, Abbildung 5 107:
Stürzebecher: Architektur für Sport, 2001
- Abbildung 5 114: SIAT:CargoLifter, 2001
- Abbildung 5 115: Anonym: CargoLifter, 2000
- Abbildung 5 116, Abbildung 5 116, Abbildung 5 117:
SIAT: CargoLifter, 2001
- Abbildung 5 120: Robbin: Engineering, 1996
- Abbildung 5 123: Herler, Korb, 2002
- Abbildung 5 126: Sanchez, Escring, Valcárel: Schwimmbadüberdachung, 1996
- Abbildung 5 127: www.imageweaver.net/las2005/
Abbildung 5 128, Abbildung 5 129,
Abbildung 5 130, Abbildung 5 131:
Sanchez, Escring, Valcárel: Schwimmbadüberdachung, 1996
- Abbildung 5 138: www.london-eye.com

C. Anhang

In sich faltbare Elemente, wie textile Materialien oder Scherengittersysteme werden zunächst als bewegliche Elemente verwendet und durch einen, als ‚Versteifung‘ bezeichneten¹ Vorgang tragfähig gemacht. Neben der mechanischen Versteifung, wie sie in der vorliegenden Arbeit behandelt wurde, können andere physikalische oder chemische Prozesse genutzt werden.

Die Versteifung kann ganz allgemein betrachtet² durch Wirkung eines äußeren Energiefeldes, chemisch oder mechanisch erfolgen, wie in Tabelle C-1 (Seite C-2) angeführt.

Gravitationsenergie als äußeres Energiefeld wirkt bei schweren Hängedächern mit der Stabilisierung hängender Elemente durch Ballast, wie bei der Überdachung der Hofreitschule³ (einem beweglichen Dach, das auf parallelen Tragseilen fahrbar gefaltet wird).

Die Anwendung von Wärmeenergie zur Verfestigung von Materialien ist wegen des Phasenwechsels denkbar, wie beispielsweise mit Wasser getränkter Stoff, der sich durch Einfrieren verfestigt. *Kinetische Energie* wird bei andauernd bewegten Systemen für eine gewisse Tragfähigkeit genutzt. Sobek⁴ entwarf Schirme, die nur aus einem drehbaren Mast und einem Tuch für die Schirmfläche bestehen. Bei konstanter Drehung des Masten wird das Tuch durch Fliehkräfte, die auf einem äußeren Wulst wirken, gespannt. Eine ähnliche Anwendung ist aus der Raumfahrt für das Aufspannen von Parabolspiegel bekannt⁵. Eine weitere Anwendung kinetischer Energie findet sich bei einem Entwurf von ‚atelier one‘, London. Wasser wird von einer Linie aus in einem Bogen hoch gespritzt und auf der anderen Seite gesammelt, wodurch ein Gang entsteht, der (zumindest bei geringer Windeinwirkung) Regendicht ist, da die Regentropfen mit der bewegten Wasserfläche mitgenommen werden.

Durch chemische Verfahren ist in der Regel nur eine irreversible Versteifung möglich, wie durch das Verfestigen von Beton.

Die mechanische Versteifung ist durch Vorspannen, den Einbau zusätzlicher Elemente oder Arretierungseinrichtungen möglich. Allgemein sind reversible und irreversible Verfahren zu unterscheiden.

¹ Rückert: Wandelbare hybride Konstruktion, 2001

² Marti, Morphologie, 2002

³ IL: 5 Wandelbare Dächer, 1972

⁴ Blaser: Sobek, 1999

⁵ Pellegrino, dsl, University of Cambridge

,Versteifung' ¹		
äußeres Energiefeld	chemisch	mechanisch
Gravitationsenergie (schweres Hängedach)	chemische Verfestigung (Beton)	Vorspannung gegen ein fixes Tragwerk (z.B. Rothenbaum Sobek)
Wärmeenergie (physikalische Verfestigung durch Phasenwechsel)		Innere Vorspannung durch Verformung (hybride Systeme)
Kinetische Energie (konstante Bewegung)		Einbau von Elementen (z.B. Montageverfahren Kawagutchi)
Magnetische Energie (elektrisch geladene Elemente in einem Magnetfeld)		Arretierungseinrichtungen (z.B. Bolzen)

Tabelle C-1: Mittel um eine Tragfähigkeit von in sich beweglichen Elementen zu erreichen

¹ Rückert: Wandelbare hybride Konstruktion, 2001

