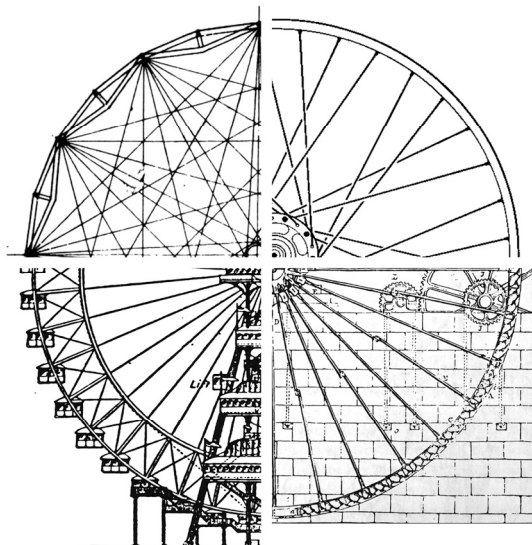


CHRISTOPH PALMEN

**KONSTRUKTIONEN DES LEICHTBAUS
DAS PRINZIP SPEICHENRAD**



Reimer

Diese Publikation beruht auf der Dissertation „Das Prinzip Speichenrad – Ein Beitrag zur Geschichte des Leichtbaus“, die der Verfasser Christoph Palmen am 08. Juni 2016 am Fachbereich Architektur, Stadtplanung, Landschaftsplanung der Universität Kassel zur Erlangung des akademischen Grades des Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) erfolgreich verteidigt hat.

Danksagung:

Herzlicher Dank geht an meine Doktoreltern Prof. Brigitte Häntsch und Prof. Mirko Baum. Ebenfalls danke ich den Mitgliedern der Promotionskommission Prof. Dr. Detlef Kuhl, Prof. Dr. Werner Lorenz und Prof. Helmut C. Schulitz.

Besonderer Dank gilt Jürgen Bleibler vom Zeppelin Museum in Friedrichshafen, Dr. Dirk Bühler und Hans Holzer vom Deutschen Museum in München, Dr. Irene Meissner vom Architekturmuseum der TU München sowie Prof. Dr. Frei Otto († 9. März 2015) und Kenneth Snelson († 22. Dezember 2016) für ihre wertvollen Auskünfte.

Außerdem danke ich Dr. Daniel Buggert, Adria Daraban, Philip Dethlefs, Arne Kesten, Maike Palmen, Prof. Dr. Jan Pieper und Stefan Unnewehr für ihre freundliche Unterstützung bei der Entstehung der Arbeit.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

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

Graphische Gestaltung: Christoph Palmen
Druck: Beltz Bad Langensalza GmbH
Printed in Germany
Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier

© 2017 by Dietrich Reimer Verlag GmbH, Berlin
www.reimer-verlag.de
Alle Rechte vorbehalten

ISBN 978-3-496-01586-4

Einleitung	9
-------------------------	----------

ERSTER TEIL

1 Begriffe	13
1.1 Form, Tragwerk, Konstruktion	13
1.2 Masse, Kraft, Stabilität.....	14
1.3 Leichtbau.....	14
2 Das Speichenradprinzip.....	17
2.1 Definition	19
2.2 Beispiel Fahrradrad	19
2.3 Strukturformen nach dem Speichenradprinzip	26
2.3.1 Segmentierung in Zug- und Druckstäbe	26
2.3.2 Geschlossene Systeme.....	27
2.3.3 Räumliche Stabilität.....	31
2.3.4 Umkehrbarkeit von Exoskelett und Endoskelett ...	34
3 Tensegrity.....	36
3.1 Entstehung	36
3.2 Fuller versus Snelson	39
3.3 3-Stab-Modul.....	44
3.4 Tensegrity-Definitionen.....	48
3.4.1 Buckminster Fuller.....	48
3.4.2 Anthony Pugh.....	50
3.4.3 Gernot Minke.....	51
3.4.4 René Motro.....	52
3.4.5 Skelton/Oliveira	53
4 Zusammenfassung.....	54

ZWEITER TEIL

1 Zur Vorgeschichte zugbeanspruchter Konstruktionen.....	57
2 Wagenräder I.	63
2.1 Bauers Patent.....	63
2.2 Cayleys Räder für Flugmaschinen	66
3 Wasserräder mit Zugspeichen	70
3.1 Thomas C. Hewes.....	71
3.2 William Fairbairn.....	75
3.3 James Smith und Brian Donkin	78
3.4 Henry Burden	80
3.5 Friedrich von Schenk.....	85
4 Wagenräder II.	88
4.1 Henry Strutts Cart Wheels.....	88
4.2 Theodore Jones' Patent	89

5	Verspannte Brücken	96
5.1	Rückverspannte Hängebrücke.....	96
5.2	Lavesträger.....	98
5.3	Unterspannung von Bollman und Fink.....	101
6	Cannings Rettungsinsel und Burdens Dampfschiff	104
7	Wagenräder III.	110
7.1	William Stanley	110
7.2	Edmund Tydeman.....	111
7.3	Fahrräder	111
7.4	Cowper und Price	113
7.5	Phantom Bicycle	115
7.6	Eugène Meyer	119
7.7	James Starley	122
7.8	Charles Palmer	130
7.9	Sharp's Tangent Wheel	133
8	Riesenräder.....	134
8.1	Ferris Wheel	139
8.2	Firth Wheel	148
8.3	Bassetts Riesenräder.....	151
8.4	Kampfräder	157
8.5	Raumstationen.....	159
9	Schwerer als Luft	163
9.1	Flugdrachen.....	164
9.2	Melchior Bauer.....	169
9.3	Jacob Degen.....	172
9.4	William Henson und John Stringfellow.....	175
9.5	Cayleys Aerial Carriage	179
9.6	John Wootton.....	180
9.7	Mikhail Rykachev	182
9.8	Segelflug.....	183
9.9	Kochs Schaufelradflugzeug	185
9.10	Villards Kreiselflieger	187
9.11	Georg Wellners Patent-Ringflieger	188
9.12	Lipkowskis Helikopter	190
9.13	D'Ecquevilly-Mehrdecker	191
9.14	Underwood Flying Machine	193
9.15	Cornus Helikopter	194
9.16	Helicoplan	195
9.17	Sorokin Tragschrauber	196
9.18	Spheroplan	197
9.19	Ellehammer-Helikopter	199
9.20	McCormick-Romme Umbrella Plane.....	201
9.21	Der Schraubenfesselflieger PKZ 2.....	204
10	Leichter als Luft	207
10.1	Halbstarre und starre Luftschiffe.....	208
10.2	Kostović-Luftschiff.....	211

10.3	Zeppelin-Luftschiffe	216
10.3.1	Graf Zeppelin.....	217
10.3.2	Der vorläufige Patententwurf von 1891	219
10.3.3	Theodor Kober	224
10.3.4	Heinrich Müller-Breslau	233
10.3.5	Carl Berg und David Schwarz	240
10.3.6	Das erste Zeppelin-Luftschiff LZ 1	246
10.3.7	Die Weiterentwicklung der Ringkonstruktion	260
10.4	Rößler-Luftschiff	274
10.5	System Wagner-von Radinger	276
10.6	Liversedge-Luftschiff	278
10.7	Flower-Luftschiff	281
10.8	Luftschiffpatente von Hermanson und D'Humy	282
11	Buckminster Fuller.....	285
11.1	Guinea Pig B.	286
11.2	Das Prinzip der Ephemerisierung.....	288
11.3	Vom 4D-Patent zum Hexagonal House.....	291
11.4	Vorbild Zeppelin-Luftschiff	299
11.5	Dymaxion House	302
11.6	Vom Dymaxion House zum Wichita House	309
11.7	Aspension Dome	319
12	Robert Le Ricolais	322
12.1	Le-Ricolais-Kreis	323
12.2	Funicular Polygon of Revolution.....	328
13	Frei Ottos Doppelmembran.....	331
13.1	Zur Vorgeschichte hängender Dächer.....	331
13.2	Frei Otto	333
13.3	Stromeyer... ..	335
13.4	Kassel 1955.....	344
13.5	Rotterdam 1959.....	347
13.6	Der abgespannte Bogen.....	349
14	Große Dächer nach dem Speichenradprinzip.....	352
14.1	Der US-Pavillon.....	353
14.2	Das Utica Auditorium.....	361
15	Überblick.....	367
15.1	Zusammenfassung.....	367
15.2	Chronologie und Morphologie	373
	Schlussbetrachtung.....	379
	Perspektiven der Weiterentwicklung.....	380
	Anhang.....	396
	Abkürzungen.....	396
	Literatur- und Abbildungsverzeichnis.....	397
	Namensregister	410

Naturkräfte lassen sich
nicht beseitigen, aber gegen
einander ausspielen.

G. Zeppelin
Friedrichshafen 9. Mai 1914

„Naturkräfte lassen sich nicht beseitigen, aber gegen einander ausspielen.“
Graf Zeppelin, Friedrichshafen 9. Mai 1914 (Vissering 1922, Widmung)

Die Mittel und Möglichkeiten des Menschen sind grundsätzlich beschränkt. Seit jeher ist die menschliche Existenz davon geprägt, aus den gegebenen Umständen das Beste zu machen. Dies ist auch der Ursprung der Technik. Ob Werkzeuge, Gebäude oder Fortbewegungsmittel, immer versucht der Mensch das Gesuchte leichter und schneller zu erreichen. Dieser Effizienzgedanke zieht sich durch die gesamte Kulturgeschichte, so dass im Laufe der Zeit immer kühnere Aufgaben bewältigt werden konnten.

Der Leichtbau, also die Optimierung des Gewichts eines Objektes bezüglich seiner Tragfähigkeit, ist eine Möglichkeit, um die Leistungsfähigkeit von Konstruktionen zu erhöhen. Leichtbau ermöglicht eine Entmaterialisierung, die sich weit in die Geschichte zurückverfolgen lässt. Beispielsweise erhöhte sich die Tragfähigkeit von Mauerwerkskonstruktionen im Laufe der Geschichte erheblich, aber nicht durch die Verwendung von immer mehr Mauersteinen, sondern durch eine sinnvollere Verteilung des Materials. Durch die Einführung des Gewölbes in der Antike, des Spitzbogens in der Gotik und der Katenoide in der Neuzeit konnte die Ausnutzung des Materials immer weiter gesteigert werden.¹

Im 19. Jahrhundert wurde durch die industrielle Herstellung von Schmiedeeisen ein Baustoff verfügbar, der größere Zugkräfte übertragen konnte als jedes andere bis dahin übliche Baumaterial. Dies führte zu grundsätzlich neuen Konstruktionen, denn je mehr Bauteile auf Zug beansprucht werden, umso weniger Material wird benötigt.

Das Rad, eine der ältesten Erfindungen der Menschheit, unterlag in besonderem Maße einer solchen Optimierung durch den Leichtbau.² Aus dem scheibenförmigen Wagenrad entstand im zweiten Jahrtausend v. Chr. das Speichenrad. Es stellte eine gewichtssparende Konstruktion aus stabförmigen Einzelteilen dar. Dies ermöglichte den Bau deutlich größerer Räder. Buchstäblich neu erfunden wurde das Rad jedoch, als die druckbelasteten Speichen gegen dünne Zugstäbe ersetzt wurden. Damit kehrte sich die Logik der bisher bekannten Lastverhältnisse vollkommen um. Wo zuvor massive Holzspeichen als Druckstützen zum Einsatz kamen, blieb nichts als ein dünner Draht, der sich fast unsichtbar zwischen Nabe und Felge spannte. Wie konnte eine solche vermeintliche Schwächung der Kon-

¹ Die Wölbtechnik der Römer basierte auf dem Kreisbogen. In der Gotik wurde das Konstruktionsgewicht durch Spitzbogengewölbe deutlich gesenkt. Die Stützlinie wird seit dem 17. Jahrhundert eingesetzt.

² Als älteste Räder gelten die Töpferscheiben der Indus-Kultur im fünften Jahrtausend v. Chr. Die ältesten Funde für scheibenartige Wagenräder und Darstellungen von Rädern stammen aus Regionen Mittel- und Osteuropas bzw. Mesopotamiens und gehen auf die Mitte des vierten Jahrtausends v. Chr. zurück. Entscheidend war die kombinierte Verwendung von Rad und Achse zur Erzeugung unendlicher Rotation.

struktion das Gegenteil bewirken und zu einer der effizientesten Konstruktionen³ führen, die der Mensch je geschaffen hat?

Das Speichenrad verkörpert geradezu idealtypisch die Möglichkeiten maximaler Entmaterialisierung. In der vorliegenden Arbeit wird diese Auflösung von massiven, biegesteifen Körpern in leichte, gelenkige Stäbe mit Hilfe einer umfassenden Zugverspannung als ein Prinzip dargestellt, das sich nicht nur beim Speichenrad wiederfindet, sondern auf Konstruktionen aller Art anwenden lässt. Das vorliegende Buch widmet sich diesem Prinzip unter besonderer Berücksichtigung des Speichenrades. Es geht also nicht nur um die Entstehung und Entwicklung des vorgespannten Speichenrades, sondern um Konstruktionen nach dem sogenannten „Speichenradprinzip“, das sich bei Luftfahrzeugen, Dächern mit großen Spannweiten und vielen anderen technischen Gegenständen finden lässt. Die Arbeit fragt sowohl nach den Anwendungsgebieten als auch nach den Konstruktionsweisen des Speichenradprinzips. Im Zentrum der Untersuchung stehen somit unterschiedliche Beispiele aus dem Bereich der Technik. Konstruktionen aus der Natur oder Werke der bildenden Kunst sollen weitgehend ausgeklammert werden.

Bislang existiert keine Untersuchung, welche die Geschichte des Zugspeichenrades umfassend betrachtet oder welche das Speichenrad in einen übergeordneten konstruktionsgeschichtlichen Zusammenhang stellen würde. Existierende Untersuchungen sind immer nur auf einzelne Anwendungen, z. B. das Fahrrad, fokussiert, während die einschlägigen technikhistorischen Kompendien auf die Entwicklung des vorgespannten Speichenrades kaum oder gar nicht eingehen. Auch in umfangreichen Werken wie „Achse, Rad und Wagen“⁴ ist von der Umstellung auf zugbeanspruchte Speichensysteme nicht die Rede. Wann Speichenräder mit Zugspeichen erfunden wurden, scheint bislang nicht erforscht worden zu sein.

Naturgemäß befindet sich eine solche breit angelegte Arbeit im schwierigen Zwiespalt von Umfang und Detailschärfe. Trotz des Versuchs, einen umfangreichen entwicklungshistorischen Überblick zu ermöglichen, kann es hier nicht um eine vollständige Auflistung aller nach dem Speichenradprinzip konzipierten Konstruktionen gehen. Es wird aber angestrebt, das bestehende Wissen an möglichst vielen Stellen zu erweitern, indem vergangene Erfindungen aufgespürt und unbekannte Quellen wiederentdeckt werden. Die Analyse und Gegenüberstellung der gesammelten Konstruktionen soll schließlich eine neue Sichtweise der Thematik ermöglichen.

Das Interesse an einer solchen von Einzelbeispielen geprägten Übersichtsarbeit, die sich zudem über die gängigen disziplinären Grenzen von

³ Fahrradspeichenräder können die bis zu 400fache Last ihres eigenen Gewichts tragen. Vgl. Archer 1956, S. 362. „The bicycle wheel is one of the most efficient structural elements in use today.“ Burgoyne und Dilmaghanian 1993, S. 439.

⁴ Vgl. Treue und Decker 1986.

Fahrzeug- und Maschinenbau, Tief- und Hochbau hinwegsetzt, mag der Besonderheit geschuldet sein, dass sie von einem Architekten stammt und nicht von einem Historiker oder einem in Fragen der technischen Mechanik geschulten Ingenieur. Die Arbeit ist damit weder wirtschafts- noch kunstgeschichtlich, noch mathematisch orientiert, sondern richtet sich auf die Intentionen und Möglichkeiten des Konstruierens.⁵ Sie richtet sich somit nicht nur an Bau- und Technikhistoriker, sondern insbesondere an Architekten. Das Studium historischer Konstruktionen ermöglicht immer Rückschlüsse auf die Absichten und das Wissen des Entwerfers. Der Betrachter gewinnt dabei die Chance, von intelligenten Lösungen zu lernen, modische Tendenzen von grundsätzlichen Prinzipien zu unterscheiden und vermeintlich Neues als Althergebrachtes zu entlarven. Ob es sich bei den untersuchten Beispielen um „Architektur“ oder etwas anderes handelt, vermag das Interesse nicht zu schmälern, da die Fragen des materialeffizienten Konstruierens darauf nicht beschränkt sind. Es gilt vielmehr zu bedenken, dass das Verständnis von den Grenzen der Architektur einem ständigen Wandel unterworfen ist. Ingenieur- und Maschinenwesen sind Teilgebiete einer umfassenden Baukunst. Noch im 19. Jahrhundert überschrieb der Begriff Architektur sämtliche Konstruktionen aus allen technischen Gebieten.⁶

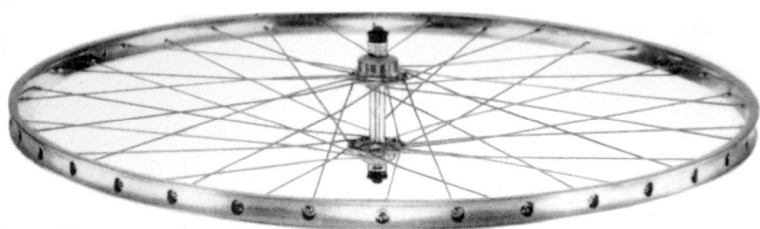
Die Arbeit gliedert sich in zwei Teile: einen typologischen Teil zur Einführung und einen historischen Teil, der den Schwerpunkt der Arbeit bildet. Zunächst werden im typologischen Teil die Eigenschaften von Speichenrädern untersucht und zur Definition eines allgemeinen Prinzips herangezogen. Die nach diesem Prinzip möglichen Strukturformen dienen zur Auswahl der Beispiele im zweiten Teil.

Der zweite Teil der Arbeit befasst sich mit dem Speichenradprinzip anhand historischer Beispiele, sortiert nach Anwendungsart. Die untersuchten Beispiele umfassen einen Zeitraum von etwa 1760 bis 1960. Eine besondere Vertiefung wird den Wagenrädern, den starren Luftschiffen und den Anwendungen in der Architektur zuteil.

Abgeschlossen wird die Arbeit mit einer chronologischen Zusammenfassung in Form einer Zeittafel sowie einem Blick auf die jüngere Entwicklung des Speichenradprinzips in der Architektur.

⁵ Zur Geschichte des Konstruierens als Forschungsgebiet vgl. Graefe 1985, S. 10–16.

⁶ Im 19. Jahrhundert wurden dem Begriff „Architektur“ die zivile Baukunst, die Kriegsbaukunst, die Schiffsbaukunst, die Wasserbaukunst und vieles mehr zugerechnet. Schon zu Zeiten Vitruvs umfasste der Begriff neben Gebäuden auch Brunnen, Brücken, Hafenanlagen und Kraftwerke, ferner Maschinen, Uhren und Waffen. Bauliche Anlagen, Uhrenbau und Maschinenbau stellen bei Vitruv drei gleichrangige Teilgebiete des Faches der Architektur dar. Vgl. Fischer 2008, S. 12, 133ff.



ERSTER TEIL

Typologische Einordnung

Nach einigen Vorbemerkungen zu grundlegenden Begriffen wie Form, Konstruktion und Leichtbau wird sich der erste Teil dieser Arbeit mit den mechanischen Eigenschaften von vorgespannten Speichenrädern befassen. Daraus wird ein übergeordnetes Strukturprinzip abgeleitet, das sogenannte „Speichenradprinzip“. Es werden die möglichen Formen des Speichenradprinzips erläutert und die möglichen Grenzen dieser Bauweise diskutiert. Dies führt schließlich zu der Frage, ob es sich beim Speichenradprinzip um eine Form von Tensegrity handelt.

1 Begriffe

1.1 Form, Tragwerk, Konstruktion

Die Form bezeichnet bei massiven Objekten die äußere Gestalt, bei hohlen Objekten auch die innere Gestalt und bei mehrgliedrigen Objekten ihre Struktur.¹ Erst durch die Form erhalten materielle Objekte bestimmte Eigenschaften. Somit lassen sich für gewisse Aufgaben, wie zum Beispiel das Übertragen von Kräften, besonders passende Formen identifizieren. Sinnvoll geformte Objekte besitzen die gewünschten Fähigkeiten in besonderem Maße. Beispielsweise kann eine Stütze umso mehr Lasten tragen, je dicker sie ist. Hier liegt ein ganz selbstverständlicher Zusammenhang von Form und Funktion. Da die Stütze jedoch nur dort notwendigerweise dicker sein muss, wo sie tatsächlich knickgefährdet ist, lässt sich ihre Form der Beanspruchung exakt anpassen. Dieser analytische Entwurfsgedanke lässt sich zu einer allgemeinen Maxime der Einheit von Form und Funktion erheben.

Die Fähigkeit zur Übertragung von Kräften wird neben der Form durch das Material und die Art der Belastung bestimmt.² Je höher die Festigkeit eines Materials ist, desto größere Kräfte kann es übertragen, ohne zu versagen und desto schlanker und dünner kann es sein.³

Jedes materielle Objekt besitzt die Fähigkeit, Kräfte zu übertragen und ist somit ein Tragwerk.⁴ Konstruktionen sind Gefüge, die aus mehreren

¹ Vgl. Otto und Mast 1992, S. 20.

² Vgl. ebd., S. 13.

³ Die genormten Materialfestigkeiten sind immer formabhängige Festigkeiten, also auf einen bestimmten Prüfkörper bezogen. Vgl. Otto et al. 1997, S. 29.

⁴ „Jedes materielle Objekt ist fähig, Kräfte aufzunehmen und zu übertragen. Es muß inneren oder von außen angreifenden Kräften widerstehen. Die Fähigkeit zur Übertragung von Kräften macht jedes materielle Objekt zu einem Tragwerk, unabhängig davon, ob das Objekt aus sich heraus, aufgrund seiner in ihm innewohnenden Eigenschaften selber entsteht oder ob das Objekt durch äußere Kräfte, z. B. durch den Menschen zusammengefügt wird.“ Otto und Mast 1992, S. 14.

< Abb. linke Seite: Fahrradspeichenrad (Wachsmann 1959, S. 38).

materiellen Objekten zusammengesetzt sind, und bilden ein Gesamtsystem.⁵ Da jedes materielle Objekt bis hin zum Atom aus immer kleineren Elementen besteht, können im Grunde alle materiellen Objekte auch als Konstruktionen betrachtet werden.⁶ Der Begriff Strukturform bezeichnet die Form einer Konstruktion.⁷

1.2 Masse, Kraft, Stabilität

Kräfte werden durch Masse ausgelöst. Hinter jeder Kraft, sei sie ruhend oder beweglich, steht immer eine Masse. Masselose Konstruktionen gibt es nicht.⁸ Einwirkende Kräfte können aus der Konstruktion selbst oder von außen stammen. Diese einwirkenden Kräfte werden als Lasten bezeichnet und stellen eine Beanspruchung dar, d. h. sie lösen eine Reaktion aus. Kräfte verlaufen immer auf dem kürzesten Weg.⁹

Stabilität ist ein Gleichgewichtszustand, der z. B. durch äußere Krafteinwirkung gestört werden kann. Objekte sind stabil, wenn sie ihre Form oder Lage im Raum beibehalten oder wenn sie die Fähigkeit besitzen, nach Beendigung einer Belastung wieder in den Urzustand zurückzukehren.¹⁰ Von einer Erhöhung oder Verbesserung der Stabilität wird gesprochen, wenn die Empfindlichkeit gegenüber Störungen verringert wird.

1.3 Leichtbau

Die Frage nach dem Masse- bzw. Energieaufwand, der für eine Konstruktion notwendig ist, um eine bestimmte Funktion zu erfüllen, ist von entscheidender Bedeutung für ihren Erfolg.¹¹ Mit der gleichen Energie einen höheren Nutzen zu erzielen, bedeutet Effizienz. Eine Methode, um Konstruktionen effizienter zu machen, ist der Leichtbau.¹² Leichtbau bedeutet die Op-

⁵ Aus dem Lateinischen von constructio (construere): das Zusammengefügte.

⁶ Vgl. Otto und Mast 1992, S. 14.

⁷ Der Begriff Strukturform findet vorwiegend in der Geologie Verwendung. In der Baukonstruktion wurde der Begriff durch Curt Siegel geprägt. Strukturform ist bei Siegel immer auch die Beziehung von Konstruktion und Form. Mehr als Mathematik sei dies auch eine Art künstlerischer Schöpfung mit dem Ziel einer konstruktionsbedingten Ausdrucksform, die anhand von architektonischer und naturgesetzlicher Ordnung allgemeine Gültigkeit erlange, also immer wiederkehre und Stilepochen überdauere. Vgl. Siegel 1970, S. 8ff.

⁸ Nach dem Newtonschen Gravitationsgesetz erfährt jeder Körper eine Beschleunigung, die proportional zur Größe und Richtung der einwirkenden Kräfte ist. Schwerkraft ist eine einachsige gerade Zugkraft, die auf den Schwerpunkt der anziehenden Masse gerichtet ist. Die Gewichtskraft resultiert direkt aus der Erdanziehung. Erdanziehung oder Magnetismus üben eine materielle Kraftübertragung aus. Genaugenommen gilt dies für alle Stoffe, da sich die Atome nicht berühren.

⁹ Vgl. Otto et al. 1997, S. 30.

¹⁰ Vgl. Elastizitätslehre (Physik) und Gleichgewichtsbegriff (Systemtheorie).

¹¹ Energienutzung und technischer Fortschritt sind deshalb voneinander nicht zu trennen. Technischer Fortschritt erweitert menschliche Handlungsoptionen, z. B. durch Effizienz. Vgl. König 2009, S. 100.

¹² Leichtigkeit ist nicht dasselbe wie Effizienz, sondern nur eine mögliche Methode zur Effizienz. Bei langlebigen Gebäuden bleibt „die investierte Masse konstant und ver-

timierung des Gewichts eines Tragwerks in Bezug auf seine Leistungsfähigkeit.¹³

Leichtbau realisiert sich auf zweierlei Arten: durch ein geringes spezifisches Materialgewicht oder durch eine optimierte Form. Effizient sind Formen, weil sie entweder hohe Belastungen vermeiden, zum Beispiel durch geringen Luftwiderstand, oder weil sie ihre Masse sinnvoll verteilen und besser ausnutzen. Durch Ausmagern oder Verstärken kann ineffektive Masse weggenommen oder Masse an anderer Stelle aktiviert werden.¹⁴ Speichenräder mit Druckspeichen, wie sie im Altertum entstanden, können somit schon als Leichtbau bezeichnet werden, da sie optimierte Formen von massiven Scheiben darstellen. Auch alle Arten von Fachwerkkonstruktionen zählen dazu. Die Entwicklung zur Vorspannung ist dagegen ein Evolutionsschritt, der darüber hinausgeht, da er durch Verstärken und Ausmagern nicht zu erreichen ist.

Leichtbau kann also nicht nur helfen, den Materialverbrauch zu senken, sondern er kann zur Erhöhung der Stabilität eingesetzt werden. Stabilität ist beispielsweise das entscheidende Kriterium zur Realisierung großer Spannweiten, da die Stabilität jedes Objektes durch sein Eigengewicht limitiert ist, so dass es ab einer bestimmten Spannweite keine zusätzlichen Lasten mehr tragen kann und unter seinem Eigengewicht kollabiert.¹⁵ Das Eigengewicht nimmt bei zunehmender Spannweite schneller zu, als die Tragfähigkeit. In welchem Maße dies der Fall ist, hängt allerdings von der Art der Konstruktion ab, da zugbeanspruchte Bauteile das Material viel besser ausnutzen als biegebeanspruchte. Bei einem zugbelasteten Bauteil wird der volle Materialquerschnitt herangezogen, also die Zugkraft auf das ganze Material verteilt, während beim biegebeanspruchten Bauteil Druck- und Zugspannung vor allem in den Rändern vorkommen. Daraus lässt sich ableiten, dass sich die größtmöglichen Spannweiten nur mit den Konstruktionen realisieren lassen, die am wenigsten biegebeansprucht und am meisten zugbeansprucht sind.

Leichtbau ist ein Phänomen im gesamten Aufbau der Natur.¹⁶ Lebende Objekte sind einer permanenten Evolution unterworfen. Sie werden über Generationen durch Selektion optimiert. Selektion sorgt für den Erfolg der angepassten Lösung. Jedes lebende Objekt, das Kräfte aufnehmen und weiterleiten muss, ist durch die Evolution für diese Aufgabe optimiert wor-

braucht sich kaum“, so dass dann auch schwere Konstruktionen effizient sein können. Vgl. Otto et al. 1997, S. 74f.

¹³ „Vergleicht man verschiedenartige Objekte, die in der Lage sind, gleiche Kräfte über gleiche Strecken zu übertragen, so ist dasjenige, das diese Aufgabe mit der geringsten Masse erfüllt, leichter als die anderen.“ Hennicke 1990, S. 46.

¹⁴ Vgl. Otto et al. 1997, S. 22.

¹⁵ Das Verhältnis von Eigengewicht zur Nutzlast ist zur Beurteilung der Leichtigkeit ein wesentliches Kriterium. Vgl. Hennicke und Gaß 1985, S. 42–43.

¹⁶ Es hat sich erwiesen, dass sämtliche Formen in der Natur durch Kräfteverhältnisse bestimmt werden. Wenn bestimmte Kraftverhältnisse hergestellt werden, z. B. durch Gene, dann entsteht die Form durch Selbstbildung in einem physikalischen Vorgang. Vgl. Bien und Wilke 1996, S. 13 und Ebeling 1996, S. 26.

den und daher eine Leichtbaukonstruktion. Im Bereich der Technik¹⁷ werden dagegen nur solche Objekte im Hinblick auf Leichtigkeit optimiert, bei denen ein geringes Gewicht wichtig ist.¹⁸ Werden technische Produkte weiterentwickelt und mit der Zeit verbessert, nähern auch sie sich durch technische Evolution einer nicht mehr verbesserungsfähigen „klassischen Form“¹⁹ an. Speichenräder, wie sie zum Beispiel in Form von Fahrradrädern seit über hundert Jahren unverändert konstruiert werden, können als klassisch gelten.

Im Gegensatz zur langwierigen „Negativauslese“ der Natur kann die technische Entwicklung des Menschen als zielgesteuerte „Positivauslese“ nach bestem Wissen stattfinden.²⁰ Dieser Weg ist der Evolution überlegen. Die Natur kann im Gegensatz zum Menschen nur Baustoffe und Konstruktionen einsetzen, wenn sie durch den Evolutionsprozess auch hervorgebracht worden sind.

¹⁷ Für Nachtigall ist Technik die „Weiterführung der Evolution mit anderen Mitteln“. Nachtigall 2003, S. VI. Das verdeutlicht, dass auch der Mensch und seine Technik ein Teil der Natur sind.

¹⁸ Das ist bei allen Objekten der Fall, die transportieren oder die transportiert werden müssen, also bei Fahrzeugen, Baustoffen oder Lebensmitteln. Die Optimierung im technischen Bereich ist jedoch meist kurzfristig kostenorientiert. Es werden größere Massen in Kauf genommen, wenn die Transportenergie billig ist. Vgl. Otto et al. 1997, S. 153.

¹⁹ Diese Bedeutung des Begriffs wurde von der Baugeschichte am Institut für leichte Flächentragwerke der Universität Stuttgart geprägt. Vgl. Graefe 1985, S. 11

²⁰ Frei Otto bezeichnete den durch Bewusstsein zielgesteuerten Prozess des menschlichen Entwerfens deshalb als „umgekehrten Weg“. Vgl. Otto et al. 1997, S. 194–195.

2 Das Speichenradprinzip

Das Rad hat sich im Laufe der Geschichte von einer Scheibe zu einem gespannten Ring entwickelt (Abb. 2.1). Abstrahiert man ein solches Speichenrad von seiner Anwendung als Wagenrad und betrachtet es als idealisierte Struktur, so handelt es sich um ein Tragwerk, das nur aus Druck- und Zugstäben besteht und in dem ein äußerer, druckbelasteter Rand (Felge) im Kräftegleichgewicht mit einer inneren, zugbelasteten Verspannung (Speichen) steht. Die Felge wird durch die Anzahl der Speichen in kurze Abschnitte unterteilt und kann als polygonaler Ring aufgefasst werden, der aus gelenkig verbundenen Stäben besteht (Stabring). Zwei an sich biege- weiche Bauteile, ein dünnes Zugelement und ein gelenkiges Druckelement, werden somit nur durch die Art der Kombination zu einem widerstandsfähigen Objekt (Abb. 2.2). Dazu kommt eine räumliche Stabilisierung zur Aufnahme seitlicher Kräfte. Im einfachsten Fall werden die Speichen an der Nabe durch einen Druckstab rechtwinklig zur Ebene gespreizt (Speichenstich). Ebene Speichenräder ohne räumliche Stabilisierung müssen als instabil angesehen werden. Es würde eine biegesteife Felge oder andere Maßnahmen erfordern, um seitliche Kräfte aufzunehmen. Ein minimales Speichenrad besteht somit aus einer viergliedrigen Felge und einem zentralen Druckstab (Abb. 2.3). Eine dreigliedrige Felge wäre bereits ohne Speichen stabil.



Abb. 2.1:
6000 Jahre technische Entwicklung: Oben links einteiliges Scheibenrad (jungsteinzeitlich, o. A.), rechts mehrteiliges Scheibenrad (sumerisch, The Alexandria Archive Institute), unten links Speichenrad des Streitwagens Tutanchamuns (ägyptisch, Metropolitan Museum of Art), unten rechts zeitgenössisches Lauftrad aus Karbon (Hersteller Lightweight)

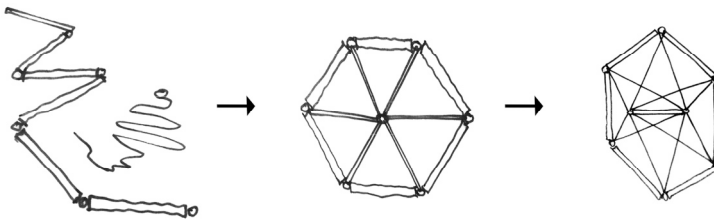


Abb. 2.2:
Aus instabilen Bauteilen wird ein stabiles Speichenrad (d. Verf.)

Die Begriffe Felge, Speiche und Nabe stammen vom Wagenrad, wo die Felge dem Abrollen dient, die Speichen eine Verbindung zur Nabe herstellen und die Nabe zur Befestigung des Rades an der Achse dient. Die Begriffe werden hier der Einfachheit halber auf sämtliche Speichenräder übertragen, so dass z. B. ein Kreuzpunkt mehrerer Speichen auch dann als Nabe bezeichnet wird, selbst wenn gar keine Achse vorhanden ist.

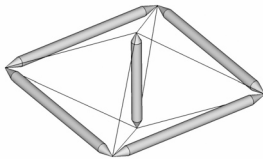


Abb. 2.3:
Minimales Speichenrad mit vier Speichengliedern (d. Verf.)

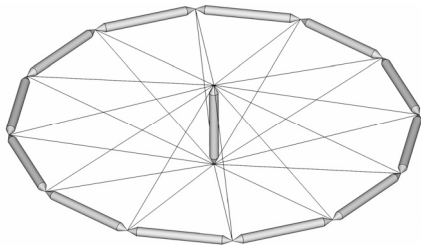


Abb. 2.4:
Zwölfgliedrige Felge und durch einen Nabenstab gespreizte Radialspeichen (d. Verf.)

Die hohe Stabilität der Struktur liegt darin begründet, dass Biegekräfte weitgehend unterbunden werden, indem die knickgefährdete Felge durch die Speichen immer in Form gehalten wird. Wenn die Felge durch äußere Belastung zusammengedrückt wird, baut sich in den Speichen automatisch die notwendige Zugkraft auf, um den gedrückten Stabring am Ausbrechen zu hindern. Die Kräfte werden ringsherum kurzgeschlossen. Immer erfahren die Speichen nur Zug und der Stabring nur Druck. Da die Speichen die Felge in viele kurze Abschnitte mit geringer Knicklänge segmentieren, wird die Felge an den Verbindungspunkten von Biegung befreit und kann gelenkig ausgebildet werden (Abb. 2.4). Je kürzer die Abschnitte, desto höher die Stabilität. Um also bei unterschiedlich großen Rädern die gleiche Stabilität zu erreichen, müssen die Abschnitte entlang der Felge durch die Speichen gleich lang sein. Große Räder erfordern daher eine größere Anzahl

Speichen. Auch wenn in der Praxis nicht alle Biegemomente in der Felge unterbunden werden können, so lassen sie sich doch immer weiter reduzieren, bis sie für die Dimensionierung vernachlässigt werden können.

2.1 Definition

Darin lässt sich ein Prinzip erkennen, das hier wie folgt definiert wird:

Das Prinzip des Speichenrades ist die Auflösung der massiven Scheibe in ein vorgespanntes, biegefreies Skelett, in dem die Anzahl der knickgefährdeten Druckelemente zugunsten von nicht knickgefährdeten Zugelementen reduziert wird und die Knicklängen der verbleibenden Druckelemente mithilfe einer umfassenden Stabilisierung aus Zugelementen in möglichst kurze Abschnitte unterteilt werden, wobei die Druckelemente an den Verbindungspunkten von Biegekräften befreit werden. Durch eine Erhöhung der Vorspannung erhöht sich die Stabilität, ohne eine Änderung der Auflagerreaktion zu bewirken.

Das Speichenradprinzip bezeichnet somit eine allgemeine Leichtbauweise, die sich zwar im Speichenrad idealtypisch ausdrückt, aber beliebig viele Strukturformen annehmen kann. Es ist ein Prinzip der Entmaterialisierung. Das Speichenradprinzip stellt eine Regel dar, die diesen Effekt hervorruft. Es ist als solches unabhängig von irgendeiner Anwendung oder historischen Entwicklung.

Es können natürlich nicht bloß massive Scheiben auf diese Art aufgelöst werden. Dies markiert lediglich den ersten möglichen Schritt der Auflösung. Entscheidend ist, dass immer eine Auflösung zu einem gewissen Grad erreicht wird, auch wenn sie theoretisch unbegrenzt weiter fortschreiten kann.

Druck- und Zugelemente sind als nicht näher bestimmte lineare Tragelemente aufzufassen, die eine Normalkraftbeanspruchung erfahren. Bei den Zugelementen beispielsweise kann es sich um Stäbe, Drähte, Seile, Ketten etc. aus allem möglichen Materialien handeln.

2.2 Beispiel Fahrradrad

Bevor auf die verschiedenen Strukturformen des Speichenradprinzips eingegangen wird, sollen die Eigenschaften des Speichenrades am Beispiel des Fahrradrades näher erläutert werden. Bei Fahrzeugrädern treten hauptsächlich radiale Belastungen durch den Fahrbahnkontakt auf. Die Achse kann als Fixpunkt angenommen werden und die Belastung als punktuelle Kraft durch die Fahrbahn, die gegen die Felge drückt (Abb. 2.5).

Bis in die 1980er Jahre herrschte die Vorstellung, dass die Nabe an den Drahtspeichen hängt und sich die Zugspannung in den oberen Speichen erhöht, wenn man auf das Fahrrad steigt (Abb. 2.6).²¹ Tatsächlich ist dies

²¹ Vgl. Sharp 1896, S. 338.

aber nicht der Fall, da die Speichenräder vorgespannt sind.²² Je stärker die Speichen von vornherein gespannt werden, desto fester wird die gesamte Struktur. Solange die innere Vorspannung die äußere Belastung übersteigt, verformt sich das Speichenrad praktisch überhaupt nicht. Unter Last reduzieren sich die Vorspannkräfte dann lediglich und müssen sich erst vollständig abbauen, bevor Verformungen auftreten. Das Speichenrad scheint sich damit den gewohnten Lastverhältnissen zu widersetzen, denn die dünnen, biegeweichen Speichen können in vorgespanntem Zustand solange Druckkräfte übertragen, bis sich die Zugspannung abgebaut hat. Die Vorspannung erzeugt also einen fiktiven Lastfall, der darauf abzielt, alle äußeren Lasten immer zu überlagern. Dies ist äußerst wirkungsvoll, denn der Konstruktion muss dafür weder Material hinzugefügt werden, noch erzeugt dies irgendwelche Auflagerreaktionen.²³

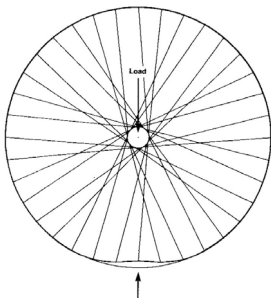


Abb. 2.5:
Radialer Lastfall beim herkömmlichen Fahrradspeichenrad mit 36 Speichen: Die Lasteinleitung erfolgt an der Achse und durch den Straßenkontakt – Verformung fast nur an der Felge (Brandt 1993, S. 19)

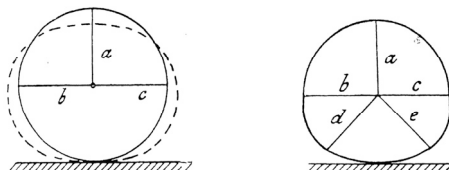


Abb. 2.6:
Verformungsbild des Speichenrades, so wie es bis in die 1980er Jahre angenommen wurde. Die Gesamtheit der Speichen sollte dazu dienen, eine ovale Verformung möglichst zu unterbinden. (Sharp 1896, S. 338)

Wie sich das Speichenrad unter Belastung verhält, wurde in den 1980er Jahren durch Tests und Messungen an Rädern untersucht.²⁴ Durch den Einsatz von Computern konnte die hochgradig redundante Struktur des Speichenrades neu berechnet werden.²⁵ Die bisherige Annahme, das Speichenrad würde sich unter Last oval verformen, wurde widerlegt. Die seit den 1930er Jahren geltende Vorstellung, das vorgespannte Speichenrad

²² Vgl. Brandt 1993, S. 6.

²³ Vgl. Schlaich 1986, S. 532.

²⁴ Vgl. Brandt 1993, S. 6.

²⁵ Vgl. Whitt und Wilson 1982, S. 137.

verhalte sich analog einer Scheibe, bestätigte sich dagegen.²⁶ Es stellte sich heraus, dass im Lastfall nur die Speichen von Spannungsänderungen betroffen sind, die zwischen der Nabe und der Straße liegen, also zwischen Auflager und Widerlager. Die Spannungsänderungen ließen sich durch das Schwingungsverhalten messen wie bei einer Gitarrensaite. Die Messungen ergaben, dass sich die Felge im Lastfall durch den Straßenkontakt lokal abflacht und die dortige Speiche mit entsprechendem Druck belastet, so dass sich Zugkraft in der Speiche abbaut. Nur die Speichen am Ort der Belastung übernehmen die Last. Zwar sind zur Aufrechterhaltung der Vorspannung auch die restlichen Speichen notwendig, sie erhöhen ihre Spannung aber nur minimal, um die zusätzlichen Druckkräfte aus der Abflachung der Felge im belasteten Bereich auszugleichen (Abb. 2.5). Somit trifft das Bild einer hängenden Nabe, bei der ein Teil der Last nach oben abgehängt wird, nicht zu. Tatsächlich besitzt das Zugspeichenrad ganz ähnliche Eigenschaften wie das Druckspeichenrad, obwohl die Kräfte vollkommen gegensätzlich abgeführt werden.²⁷ Durch das Vorhandensein eines pneumatischen Reifens ist die Verformung der Felge gegenüber der Verformung des Reifens sogar vollkommen zu vernachlässigen.²⁸

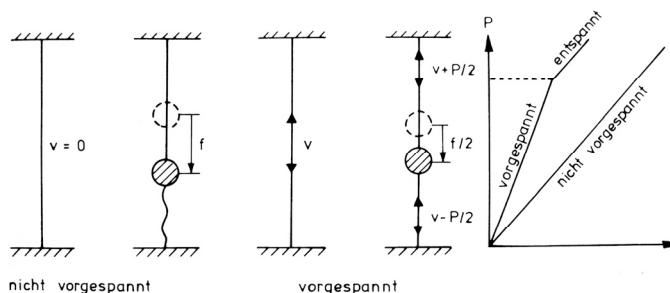


Abb. 2.7:

Wirkungsweise des Vorspannens zwischen zwei unabhängigen Fixpunkten: An einem Seil, das von der Decke abgehängt wird und den Boden nur locker berührt, wird auf halber Länge ein Gewicht befestigt. Die obere Hälfte des Seiles dehnt sich infolge der Last, die untere Hälfte bleibt schlaff. Die Last wird also durch erhöhte Zugkräfte im oberen Seil vollständig von der Decke abgehängt. Befestigt man das Seil nun aber auch am Boden und spannt es vor, dann wird die Last nur noch zur Hälfte von der Decke abgehängt und die Dehnung in der oberen Hälfte des Seiles halbiert sich. Die andere Hälfte der Last wird vom unteren Seil übertragen, indem sich dort die vorhandene Zugspannung lediglich abbaut! Wenn die Vorspannung im Seil geringer ist als das angehängte Gewicht, wird die untere Hälfte des Seiles zwar wieder schlaff, aber erst nachdem sich die vorhandene Vorspannung abgebaut hat. Auch diese Vorspannkraft ist nicht wirkungslos, sondern reduziert die Verformung solange, bis sich die Spannung abgebaut hat. (Schlaich 1990, S. 93)

²⁶ Vgl. Pippard, Francis und White 1931/1932. Seither waren ausreichend genaue Vorhersagen über die Lastverteilung möglich, die Anfang der 1990er Jahre in Versuchen bestätigt wurden. Vgl. Burgoyne und Dilmaghanian 1993, S. 440.

²⁷ Zur Statik des Speichenrades vgl. Brandt 1993 und Burgoyne und Dilmaghanian 1993.

²⁸ Das Rad ist ca. 100-mal steifer als der Reifen. Für die Lastverteilung und Belastbarkeit des Rades spielt die Bereifung eine geringe Rolle, auch wenn Lastspitzen ausgeglichen werden können. Vgl. Brandt 1993, S. 441 u. 451.

Aus der Anzahl der Speichen und der Höhe der Vorspannung resultiert die Druckspannung in der Felge und damit die gesamte Stabilität der Konstruktion. Bei einem heute üblichen 36-fachen Fahrrad-Speichenrad beträgt die Vorspannung pro Speiche 1 kN (100 kg). Dies führt zu einer Felgenkompression von etwa 5 kN (500 kg). Wird die Anzahl der Speichen erhöht, so kann die Vorspannung pro Speiche reduziert werden, ohne dass sich die Kompression der Felge ändert. Je mehr und je fester die Speichen, desto höher die Lastkapazität (Abb. 2.8).²⁹



Abb. 2.8:
Beispiel Flugzeugspeichenrad der Rohrbach Ro VI mit Aluminiumfelge von 1928. Durchmesser 2,20 m mit Bereifung (d. Verf.)

Das richtige Gleichgewicht aus Stabilität und Leichtigkeit zu finden, ist eine schwierige Aufgabe, die von der Nutzung und Belastung des Rades abhängt. Wird der Felgenquerschnitt auf Kosten des Gewichts erhöht, so dass größere Biegekräfte aufgenommen werden können, dann verteilt sich die Belastung der Felge auf mehrere Speichen. Bei einem üblichen 36-fachen Fahrradrad umfasst die belastete Zone etwa vier Speichen. Je biegesteifer die Felge, desto größer zwar die Fläche, durch die die Punktlast auf die Speichen verteilt werden kann, aber desto schwerer auch.³⁰ Die Anzahl der Speichen zu verringern, bringt lediglich aerodynamische Vorteile und trägt zur Gewichtsreduzierung kaum bei.³¹

Bislang wurde der dominierende Lastfall betrachtet, der eine radial gerichtete Punktlast durch die Straße darstellt. Dynamische Lasteinwirkungen durch Fahrbahnunebenheiten, Bremsen, Beschleunigen oder Aufprallen auf Hindernisse können allerdings auch seitlich und verdrehend wirken. Bei Vollbremsungen mit blockierendem Rad verändern sich die Spannungen

²⁹ Vgl. Brandt 1993, S. 35f.

³⁰ Vgl. ebd.

³¹ Die Speichen bewegen sich ca. doppelt so schnell durch die Luft wie das Fahrrad. Scheibenräder konnten sich dennoch nicht durchsetzen. Sie sind schwerer, teurer und windanfälliger, auch wenn sie gezielte Rekordgeschwindigkeiten ermöglichten. Vgl. ebd. S. 4 und S. 66.

sowohl in der Felge als auch in den Speichen (Abb. 2.9): Im vorderen Bereich des Rades verringert sich die Kompression der Felge, so dass sich dort die Zugspannung der Speichen um ca. 5% abbaut. Im gleichen Maße vergrößern sich die Spannungen im hinteren Radteil. Dies ist von Unfällen abgesehen der einzige Lastfall, der die Druckspannung in der Felge merklich erhöhen kann. Im Extremfall können Bremskräfte ein Versagen des Rades verursachen, so dass sich die Felge dauerhaft verzieht (Abb. 2.10).³² Ein Versagen der Konstruktion tritt ein, wenn einzelne Speichen durch eine zu große Last ihre Spannung vollständig verlieren und die überschüssigen Druckkräfte die Felge verformen. Viele kleine Verformungen können Ermüdungsbrüche verursachen. Ein Felgenbruch führt zum sofortigen Kollaps der Konstruktion und Verlust der Vorspannung. Der Ausfall einzelner Speichen führt dagegen nur zu einer Schwächung der Stabilität.³³

Durch den Antrieb über die Achse tritt Torsion auf, da es zu einer relativen Verdrehung der Nabe zur Felge kommt. Die Speichen können keine Biegemomente aufnehmen, so dass sich der entstehende Hebelarm als Spannungsänderung gleichmäßig auf alle Speichen überträgt. Der Hebelarm resultiert aus dem Abstand zwischen dem Speichenloch im Nabenumflansch und der Achse. Die Hebelwirkung ist bei axialen Speichen geringer als bei tangentialen Speichen (Abb. 2.11). Erst durch überkreuzte Speichen, die tangential zum Nabenumfang verlaufen, wird eine Verdrehung unterbunden.³⁴ Bei gekreuzten Speichen wird während des Antriebs die eine Hälfte fester und die andere lockerer, so dass sich die Summe der Kompression in der Felge kaum ändert.³⁵

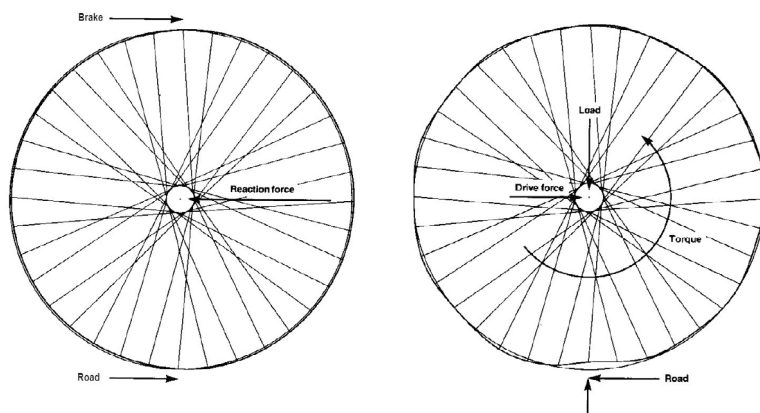


Abb. 2.9:
Verformung durch Bremsen links und Torsion rechts (Brandt 1993, S. 20 u. 27)

³² Vgl. ebd. S. 20.

³³ Vgl. ebd. S. 28.

³⁴ Auf die Erfindung der Tangentialspeichen wird im 2. Teil, Kap. 7.7 eingegangen.

³⁵ Beim Fahrrad beträgt die Änderung ca. +/- 5%. Vgl. ebd. S. 41.

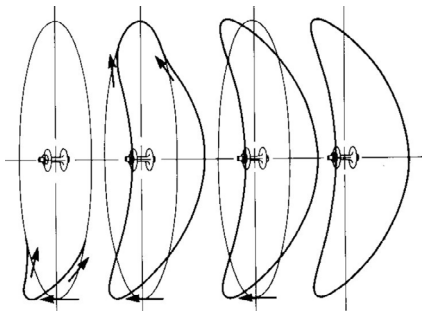


Abb. 2.10:
Verlust der Vorspannung, Ausbrechen der Felge und Versagen der Stabilität
(Brandt 1993, S. 29)

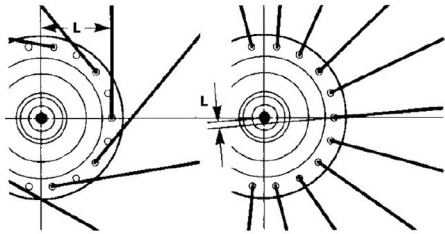


Abb. 2.11:
Biegemomente aus einer Verdrehung von Nabe zu Felge führen zu Torsion
(Brandt 1993, S. 43)

Die seitliche Stabilität hängt insbesondere von der Spreizung der Speichen ab.³⁶ Es bilden sich somit zwei gegenläufige Lagen von Speichen, die nicht parallel zur Ebene des Rades verlaufen. Erst diese Komponente sorgt für räumliche Stabilität (Abb. 2.12). Seitlich auftretende Lasten quer zur Felge sind beim vertikalen Wagenrad vergleichsweise gering. Beim Fahrrad oder Motorrad balanciert der Fahrer das Rad immer relativ zur Fahrt aus. Die seitliche Widerstandsfähigkeit beträgt beim Fahrrad daher nur ein Zehntel der radialen Widerstandsfähigkeit.³⁷

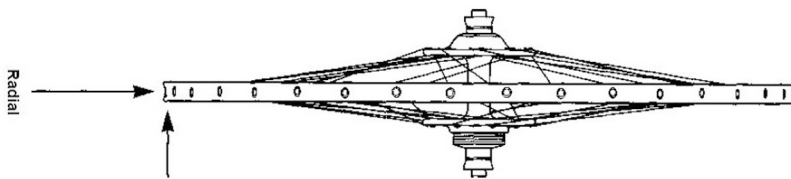


Abb. 2.12:
Speichenstich: räumliche Stabilität durch Spreizen ((Brandt 1993, S. 23)

Es existieren viele Möglichkeiten Tragwerke zu klassifizieren, z. B. nach Nutzung, Material oder Form. Auf der Form basierende Einordnungen erfolgen nach der maßgeblichen Beanspruchung der Konstruktion, also

³⁶ In geringerem Maße erhöht auch die Anzahl der Speichen oder die Festigkeit der Felge die seith. Stabilität. Vgl. Brandt 1993, S. 38.

³⁷ Das ist nur dann nicht ausreichend, wenn es zum Unfall kommt. Vgl. Brandt 1993, S. 22.

Druck-, Zug- oder Biegebeanspruchung.³⁸ Das vorgespannte Speichenrad entzieht sich aber einer solchen Klassifizierung, da Druck und Zug im gegenseitigen Gleichgewicht stehen. Es ist keine dominierende Druck- oder Zugbeanspruchung auszumachen.³⁹ Man könnte argumentieren, das Speichenrad sei vornehmlich auf Zug beansprucht, da die druckbelastete Felge bei einem Fahrradspeichenrad kaum am Lastabtrag beteiligt ist. Spannungsänderungen treten nur an den belasteten Speichen auf. Man könnte das Speichenrad aber auch als druckfeste Scheibe einstufen, da primär Druckkräfte übertragen werden. Immer entsteht ein geschlossenes System, das im Ausgleich seiner Kräfte steht. Die Vorspannung dient dazu, ein Kraftgefüge herzustellen, das äußeren Einwirkungen gegenüber möglichst unempfindlich ist. Das bedeutet, dass die Stabilität des Speichenrades prinzipiell auch von seiner räumlichen Lage unabhängig ist.

Bei so unterschiedlichen Konstruktionen wie Fahrradrädern, Riesenrädern oder Dächern ist das Verhältnis der Eigengewichtskräfte zu den Vorspannkräften allerdings sehr unterschiedlich. Es hängt davon ab, ob die Vorspannung nur zur Reduktion oder zur vollständigen Unterbindung von Verformungen eingesetzt wird. Horizontale Speichenräder wie Seilnetzdächer sind daher meist als zugbeanspruchte Seiltragwerke einzustufen, während beispielsweise Riesenräder zu den Bogentragwerken gezählt werden. Konstruktionen nach dem Speichenradprinzip lassen sich also unterschiedlich interpretieren. Man kann sie als Bogentragwerke, als Fachwerke oder als Seiltragwerke ansehen, denn wie in einem Bogentragwerk überträgt die Felge große Druckkräfte,⁴⁰ wie bei einem Fachwerk ist die Struktur in ein gelenkiges Stabwerk mit Zug- und Druckgliedern zerlegt⁴¹ und wie in einem Seiltragwerk übernehmen zugbeanspruchte, biegeeweiche Glieder den Großteil der Kraftübertragung.⁴²

Angesichts der großen Bandbreite verschiedener Speichenräder bezüglich Größe, Lage und Vorspannung soll jedoch in dieser Arbeit das Augenmerk auf die strukturellen Gemeinsamkeiten gelenkt werden, so dass ein gemeinsames Prinzip erkennbar wird.

³⁸ Dies entspricht den heutzutage in der Baukonstruktion allgemein etablierten Klassifikationen, wie sie durch Curt Siegel, Heino Engel, José Luis Moro und andere aufgestellt wurden.

³⁹ Curt Siegel bezeichnete die Speichenräder 1960 als „kombinierte Seil-Stab-Konstruktionen“. Er hielt es für möglich, dass sich das Speichenrad zu „einer eigenen Gruppe von Strukturformen“ entwickeln könne. Vgl. Siegel 1970, S. 279.

⁴⁰ Die Felge überträgt zumindest die über die Vorspannung hinausgehenden Lasten.

⁴¹ „Unter Fachwerk verstehen wir jenes System von Stäben, deren Endpunkte durch Gelenke miteinander verbunden sind.“ Otto Königer, 1890, zit. nach Schulitz et al. 2001, S. 44.

⁴² Um ein Beispiel der Doppeldeutigkeit zu nennen: In der Klassifikation der Primärtragwerke von Moro wird das horizontale Speichenraddach sowohl als zugbelastete Rippenplatte (Scheibe) als auch verspanntes Seiltragwerk (Netz) eingestuft. Vgl. Moro et al. 2009, S. 298 u. 336.