



EUROPA-FACHBUCHREIHE  
für Kraftfahrzeugtechnik

# Fachkunde Fahrradtechnik

**6. Auflage**

Bearbeitet von Gewerbelehrern, Ingenieuren, Sachverständigen und  
Zweiradmechanikermeistern

**Lektorat: Dipl. Ing. Michael Gressmann, Borken (He)**

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG  
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

**Europa-Nr.: 22917**

## **Autoren der Fachkunde Fahrradtechnik**

---

Artmann, Ulrich	Köln
Bellersheim, Rüdiger	Ibbenbüren
Brust, Ernst	Schweinfurt
Gressmann, Michael	Borken (He)
Hertel, Dietmar	Erfstadt
Herkendell, Franz	Bonn
Leiner, Jens	Bremen

## **Leitung des Arbeitskreises und Lektorat**

---

Michael Gressmann

## **Bildbearbeitung**

---

Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, 73760 Ostfildern  
Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Der Verlag und die Autoren bedanken sich beim Bundesinnungsverband für das Deutsche Zweiradmechaniker-Handwerk für die Hilfe zur Erstellung des Fachbuches.

Weiterer Dank gebührt Herrn Rainer Perske (Münster), Herrn Jürgen Worch (Freiburg) und Herrn Thomas Veidt (Hettenhain) für Text- und Bildbeiträge sowie hilfreiche Korrekturhinweise.

Das vorliegende Buch richtet sich selbstverständlich an Mechanikerinnen und Mechaniker – allerdings haben die Autoren aus Gründen der besseren Lesbarkeit die männliche Form gewählt.

6. Auflage 2016

Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Behebung von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-2298-1

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2016 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten  
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar  
Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald  
Umschlagfotos: Scott Sports AG, 85748 Garching und Pinion GmbH, 73770 Denkendorf  
Druck: B.O.S.S Medien GmbH, 47574 Goch

Das Fachkundebuch „Fahrradtechnik“, das inzwischen in der **6. Auflage** vorliegt, vermittelt die notwendigen Fachkenntnisse, die im Ausbildungsrahmenplan für die betriebliche Ausbildung und im Rahmenlehrplan für die Ausbildung in der Grund- und Fachstufe der Berufsschule aufgeführt sind. Daneben dient das Tabellenbuch „Fahrradtechnik“ aus dem gleichen Verlag als Nachschlagewerk von Daten und Fakten rund um alle Fahrrad-Sachgebiete. Zur Vertiefung von Kenntnissen rund um Elektrozweiräder ist im gleichen Verlag das Buch „Fachwissen E-Bike“ erschienen.

Die Inhalte des Fachkundebuchs entsprechen den für diesen Fachbereich geltenden technischen Regeln und den gesetzlichen Verordnungen sowie fachbezogenen Vorschriften, insbesondere den DIN-Normen. Fragen des Umweltschutzes und der Arbeitssicherheit sind in den jeweiligen Kapiteln angemessen berücksichtigt.

Die bisherige Bezeichnung für den Ausbildungsberuf „Zweiradmechaniker(in)“ ist geändert worden in „Zweiradmechatroniker(in) der Fachrichtung Fahrradtechnik“. Damit wird dem Umstand Rechnung getragen, dass die technische Weiterentwicklung des Fahrrades hohe fachspezifische Anforderungen an die Auszubildenden stellt. Neue Fahrradbauarten, insbesondere die Vielfalt an Elektrofahrrädern, die Verwendung neuer Werkstoffe, neue Leichtbaukonstruktionen, der Einzug der Elektronik in Komponenten der Kraftübertragung (Beispiel: Di2-Schaltung von Shimano) und Bremssysteme, gestiegene Anforderungen an Produktsicherheit, Service und Kundenwünsche prägen das Berufsbild des Zweiradmechatronikers(in) der Fachrichtung Fahrradtechnik.

Das vorliegende Fachbuch begleitet die Auszubildenden im Betrieb, in der überbetrieblichen Ausbildung und in der Berufsschule und leistet wertvolle Hilfe bei der Vorbereitung auf die Zwischen- und Abschlussprüfungen. Es ist auch für den zukünftigen Meister und Servicetechniker ein wichtiger Begleiter in Theorie und Praxis. Es sollte als Nachschlagewerk in keiner Werkstattbibliothek des Zweiradhandwerks fehlen. Aber auch Lehrkräfte an allgemeinbildenden Schulen, an denen das Fahrrad oft Gegenstand von Unterrichtsinhalten ist und als Projekt in vielfältiger Form auftaucht, können von diesem Buch profitieren.

Die weite Verbreitung und Nutzung aller Arten von Pedelecs und E-Bikes machte eine umfangreiche Überarbeitung und Aktualisierung des Kapitels „Elektrofahrräder“ erforderlich. Hier bilden die Fachgebiete „Gleichstrommotoren“ und „Akkumulatoren“ inhaltliche Schwerpunkte.

Eine Überarbeitung und Aktualisierung erfuhren aufgrund neuer Produkte und geänderter gesetzlicher Bestimmungen die Kapitel „Laufräder“ und „Elektrische Ausrüstung“.

Das Kapitel „Fachrechnen“ ist um Musteraufgaben und Projektaufgaben rund um das Elektrofahrrad erweitert worden.

Im Jahr 2015 ist die DIN EN ISO 4210 „Sicherheitstechnische Anforderungen für Fahrräder“ in Kraft getreten. An vielen Stellen im Fachbuch sind daraus wichtige Beschlüsse und Prüfverfahren aufgenommen. Sie machen den Zweiradmechatronikern deutlich, welche Bedeutung Sicherheitsanforderungen im Gebrauch von Fahrrädern haben.

Weitere Schwerpunkte sind Inhalte mit rechtlichen und betriebswirtschaftlichen Anteilen:

- Präsentation und Kundenberatung
- Verkauf und Kalkulation
- Produktsicherheit
- Haftung und Gewährleistung.

Noch ein Hinweis: Wenn im vorliegenden Fachbuch die Rede vom Radfahrer, Benutzer, Techniker und Auszubildender ist, ist auch immer die weibliche Form gemeint.

Autoren und Verlag sind allen Benutzern der Fachkunde Fahrradtechnik für kritische Hinweise und Verbesserungsvorschläge unter [lektorat@europa-lehrmittel.de](mailto:lektorat@europa-lehrmittel.de) dankbar.

Die nachfolgend aufgeführten Firmen haben die Autoren durch fachliche Beratung, durch Informations- und Bildmaterial unterstützt. Es wird ihnen hierfür herzlich gedankt.

<b>Abus AG</b> , Wetter	<b>Grofa GmbH</b> , Bad Camberg	<b>Schwalbe (R. Bohle)</b> , Reichshof
<b>ADFC</b> , Bremen	<b>Hartje GmbH &amp; Co.KG</b> , Hoya	<b>Scott Robertson</b> , Culver City (USA)
<b>Airwings Hillreiner</b> , Hirtlbach	<b>Hebie GmbH</b> , Bielefeld	<b>Selle Royal</b> , Pozzoleone (Italien)
<b>Alex Moulton Bicycles</b> , Bradford o.A., GB	<b>Heinzmann</b> , Schönau	<b>Shimano (Paul Lange)</b> , Stuttgart
<b>Alligator Ventilfabrik GmbH</b> , Giengen	<b>Hercules</b> , Neuhof a.d. Zenn	<b>Sigma-Elektro GmbH</b> , Neustadt/Weinstraße
<b>AT-Zweirad</b> , Altenberge	<b>HP Velotechnik OHG</b> , Kriftel	<b>SQLab GmbH</b> , Taufkirchen
<b>AVK Industrievereinigung</b> , verstärkte Kunststoffe e.V. Frankfurt	<b>Kindersicherheit GmbH</b> , Ulm	<b>SRAM Deutschland GmbH</b> , Schweinfurt
<b>Baringo Barometerfabrik</b> , Villingen- Schwenningen	<b>Klüber Lubrication KG</b> , München	<b>SRAM Europe</b> , Nijkerk (Niederlande)
<b>Basta</b> , Schwerte	<b>KTM Fahrrad GmbH</b> , Mattighofen (Österreich)	<b>Stahlwille</b> , Wuppertal
<b>Bionicon-Inwall AG</b> , Rottach-Weissach	<b>Lienergy GmbH</b> , Olching	<b>Stolz Rahmenbau</b> , Zürich (Schweiz)
<b>Birkhold GmbH</b> , Steinheim/Albuch	<b>Magura (G. Magenwirth GmbH)</b> , Bad Urach	<b>Sturmey-Archer Europa N.V.</b> , Amsterdam
<b>Britax Römer</b>	<b>Michelin</b> , Karlsruhe	<b>Toho Tenax Europe GmbH</b> , Wuppertal
<b>Busch und Müller</b> , Meinerzhagen	<b>Modolo</b> , San Vendemiano (Italien)	<b>TPW ROWO Material Testing GmbH</b> , Neuss
<b>by.schulz GmbH</b> , Saarbrücken	<b>NC-17 Europe GmbH</b> , Frechen	<b>UVEX-Sports GmbH</b> , Fürth
<b>Campagnolo</b> , Leverkusen	<b>P&amp;K Lie GmbH</b> , Hamburg	<b>Veidt Rahmenbau</b> , Marburg
<b>Cannondale B.V.</b> , Allschwil (Schweiz)	<b>Pantherwerke AG</b> , Löhne	<b>Velocity Stahlroß GmbH</b> , Bonn
<b>Continental AG</b> , Korbach	<b>Paul engineering</b> , Coventry (GB)	<b>velotech.de</b> , Schweinfurt
<b>Cycle Union</b> , Oldenburg	<b>Philip Douglas</b> , Maschwanden (Schweiz)	<b>Weber Technik Werkzeugbau GmbH</b> , Breitbrunn
<b>Dipl.-Ing. Robert Bastian</b> , Aachen	<b>Pletscher</b> , Marthalen (Schweiz)	<b>Wulfhorst</b> , Gütersloh
<b>Dipl.-Ing. Thomas Mertin (THM)</b> , Alt Duvenstedt	<b>Polar</b> , Büttelborn	<b>Zedler Institut für Fahrradtechnik und -Sicherheit GmbH</b> , Ludwigsburg
<b>Derby Cycle</b> , Cloppenburg	<b>Prophete</b> , Rheda-Wiedendrück	<b>Zefal</b> , Winnenden
<b>DT Swiss</b> , Schönaich	<b>RA-CO GmbH</b> , Kerspleben	<b>ZEG Zweirad-Einkaufs- Genossenschaft eG</b> , Köln
<b>edevis GmbH</b> , Stuttgart	<b>Riese und Müller</b> , Darmstadt	<b>ZF Sachs AG</b> , Schweinfurt
<b>Freudenberg Simrit GmbH &amp; Co. KG</b> , Weinheim	<b>Rohloff AG</b> , Fuldataal	<b>Zopf Biegemaschinen GmbH</b> , Haldenwang
<b>Gates Carbon Drive</b> , Lübbrechtsen	<b>Sachs Fahrzeuge und Motorentechnik</b> , Nürnberg	<b>Zweirad Röckle</b> , Leonberg
<b>GfT Gesellschaft für Tribologie e.V.</b> , Aachen	<b>SAPIM (Sandmann)</b> , Hagen	
<b>GMA-Werkstoffprüfung GmbH</b> , CFK-Prüfzentrum Stade	<b>schaeffler technologies GmbH &amp; Co KG</b> , Herzogenaurach	
	<b>Schindelhauer</b> , Magdeburg	
	<b>Schmidt Maschinenbau</b> , Tübingen	

Verlag und Autoren bedanken sich für besondere Unterstützung bei der Herstellung des Fachkundenbuchs Fahrradtechnik.

<b>Stahlwille</b> , Wuppertal	<b>Velotech.de</b> , Schweinfurt	<b>Handwerkskammer Rhein-Main</b> , Frankfurt
<b>Focus-bikes (Derby Cycle)</b> , Cloppenburg	<b>SRAM</b> , Schweinfurt	<b>Bundesinnungsverband Zweirad- mechaniker-Handwerk</b> , Bonn
<b>Busch + Müller</b> , Meinerzhagen	<b>Schwalbe (R. Bohle)</b> , Reichshof	<b>Verlag Delius Klasing</b> , Bielefeld
<b>ADFC</b> , Bremen	<b>GROFA (Park Tool)</b> , Bad Camberg	<b>VSF-Akademie</b> , Aurich
<b>Shimano (Paul Lange)</b> , Stuttgart	<b>Rohloff</b> , Fuldataal	

<b>1</b>	<b>Grundstufe Fahrradtechnik</b>	<b>9</b>	<b>3</b>	<b>Fahrradbauarten</b>	<b>101</b>
1.1	Prüfen und Messen	9	3.1	Standardbauarten	101
1.1.1	Grundbegriffe und Definitionen	9	3.2	Sporträder	104
1.1.2	Messen	10	3.3	Kinder- und Jugendfahrräder	106
1.1.3	Messabweichungen	10	3.4	Weitere Bauarten	107
1.1.4	Prüfmittel	11	3.5	Anhänger	111
1.2	Maschinenelemente	14	3.6	Fahrräder mit Hilfsantrieb	112
1.2.1	Schraubverbindungen und Gewinde	14	<b>4</b>	<b>Elektrofahrräder</b>	<b>113</b>
1.2.2	Nietverbindungen	22	4.1	Typen von Elektro-Zweirädern	113
1.2.3	Bolzen und Stifte	23	4.2	Komponenten von Elektrofahrrädern	115
1.2.4	Lager	24	4.3	Antriebsarten und Einbauort von Motoren	117
1.2.5	Dichtungen	26	4.4	Gleichstrommotoren	121
1.3	Fertigungsverfahren	28	4.4.1	Funktion und Aufbau von Kollektormotoren	121
1.3.1	Grundlagen des Spanens	28	4.4.2	Fachbegriffe, Definitionen und Kennlinien	122
1.3.2	Sägen	29	4.4.3	Bauarten von Gleichstrommotoren	125
1.3.3	Feilen	30	4.5	Antriebssteuerung	128
1.3.4	Bohren, Senken und Reiben	31	4.6	Sensoren	130
1.3.5	Gewinde und Gewindeschneiden	38	4.7	Bedienung und Display	132
1.3.6	Spanende Fertigung mit Werkzeugmaschinen	41	4.8	Energierückgewinnung	133
1.3.7	Scherschneiden	43	4.9	Akkus	134
1.3.8	Biegen von Blechen	43	4.9.1	Elektrochemische Spannungserzeugung	134
1.3.9	Biegen von Rohren	44	4.9.2	Bauarten von Akkus	135
1.4	Werkstofftechnik	45	4.9.3	Ladegeräte, Akkupack und Kennwerte	138
1.4.1	Eigenschaften von Werkstoffen	45	4.9.4	Bauformen von Lithium-Ionen-Akkus	140
1.4.2	Stahl	48	4.9.5	Batterie-Management-System	140
1.4.3	Aluminium	51	4.9.6	Umgang mit Lithium-Ionen-Akkus	142
1.4.4	Titan	54	4.9.7	Montageorte von Akkus	143
1.4.5	Magnesium	55	<b>5</b>	<b>Rahmen, Lenkung, Federung</b>	<b>144</b>
1.4.6	Faserverstärkte Werkstoffe	56	5.1	Kräfte und Momente am Fahrradrahmen	144
1.5	Tribologie und Verschleiß	61	5.1.1	Vertikalkräfte	144
1.5.1	Tribologisches System	61	5.1.2	Horizontalkräfte	145
1.5.2	Reibung	63	5.1.3	Seitenkräfte	146
1.5.3	Oberflächen metallischer Bauteile	66	5.1.4	Biegemomente	147
1.5.4	Verschleiß	66	5.2	Rahmentest	148
1.5.5	Tribochemische Reaktionen	69	5.3	Rahmenbauarten	150
1.6	Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik	74	5.4	Rohrherstellung	154
1.6.1	Elektrische Größen	74	5.4.1	Stahlrohre	154
1.6.2	Berechnung elektrischer Größen	76	5.4.2	Aluminiumrohre	155
1.6.3	Messen elektrischer Größen	77	5.4.3	Carbonrohre	156
1.6.4	Schaltungen	78	5.4.4	Rohrverfeinerungen	156
1.6.5	Bauelemente	78	5.4.5	Zuschneiden der Rohre	157
1.7	Steuerungs- und Regelungstechnik	89	5.5	Rahmenfügen	158
1.7.1	Steuern	89	5.5.1	Löten	158
1.7.2	Regeln	89	5.5.2	Schweißen	163
1.7.3	EVA-Prinzip	91	5.5.3	Kleben	166
1.7.4	Signalarten	91	5.5.4	Herstellen von Carbonrahmen	167
1.7.5	Signalweg	92	5.5.5	CFK-Schäden und Prüfverfahren	171
1.7.6	Steuerungsarten	92			
1.7.7	Verknüpfungen	95			
<b>2</b>	<b>Geschichte des Fahrrades</b>	<b>98</b>			

Bei den Elektrofahrrädern kommen sowohl Innen- als auch Außenläufer zum Einsatz. Die Entscheidung darüber hängt vom Einbauort des Antriebs ab. Für Mittelantriebe (Tretlagerantrieb) werden meist Innenläufer eingesetzt (Bild 1), Radnabenantriebe mit und ohne Getriebe sind Außenläufer.

Vereinfachtes Prinzip: Als Rotor dienen Permanentmagnete, während der feststehende Stator aus mehreren Elektromagneten besteht.

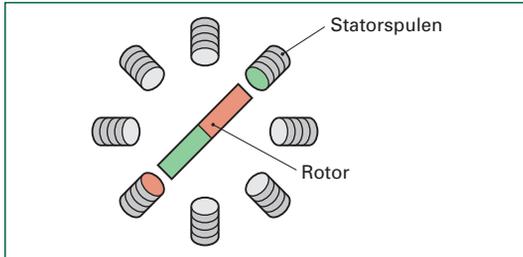


Bild 1: Grundprinzip eines bürstenlosen Gleichstrommotors, Stabmagnet als Innenläufer

Der elektronische Kommutator steuert die Statorspulen zeitlich versetzt an, so dass ein rotierendes äußeres Magnetfeld (Drehfeld) entsteht, dem der Rotor folgt. Dazu muss der Drehwinkel des Rotors exakt erfasst werden, damit die Spulen im richtigen Zeitpunkt einen Stromimpuls erhalten.

Meist sind es *Hallsensoren* (siehe Seite 88), die ständig die Rotorlage erfassen und an das Steuergerät weiterleiten.

Unter Kommutierung versteht man das Umschalten der Ansteuerung des Ankerstromes. Sensoren erfassen die Lage des Rotors und veranlassen die Ansteuerung.

Bei *sensorlosen Motoren* wird die rückwirkende Induktionsspannung (EMK, siehe Seite 123) erfasst und als Lagegeber benutzt.

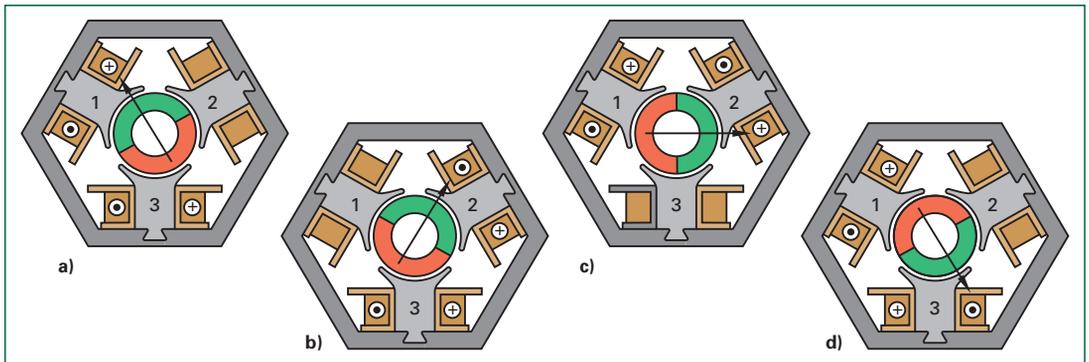


Bild 3: Veränderung der Rotorposition bei Blockeinspeisung (Modellvorstellung, Quelle Ösinghausen)

Im Grunde genommen handelt es sich bei einem BLDC-Motor um einen dreiphasigen **Synchronmotor**, da die Magnetfelder des Stators und des Rotors mit der gleichen Frequenz rotieren. Jeder Strang wird mit sinusförmiger (Bild 2a) oder blockförmiger Spannung (b) angesteuert.

Die *Sinuskommutierung* erfolgt gleichmäßiger als die Blockkommutierung. Je nach Rotorposition werden die Ströme sinusförmig den Wicklungen zugeführt.

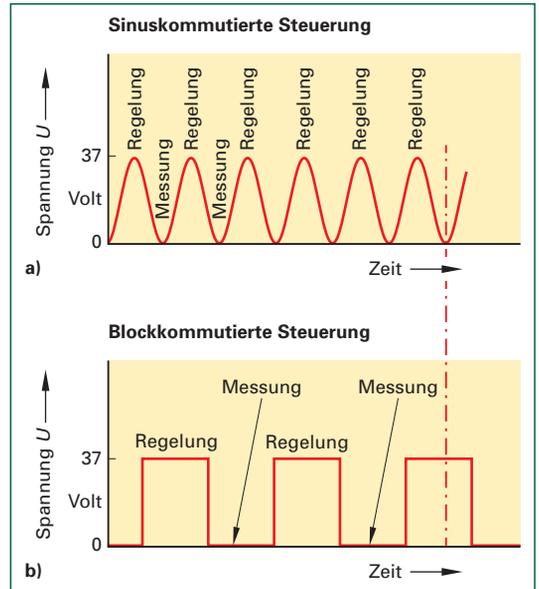
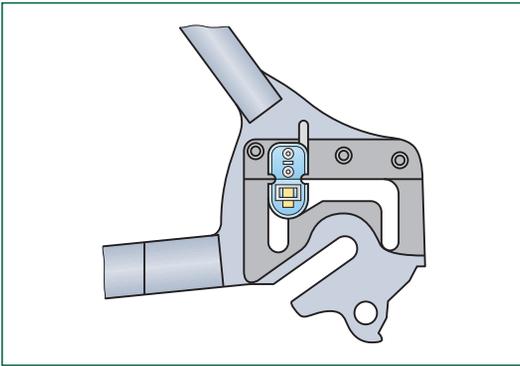


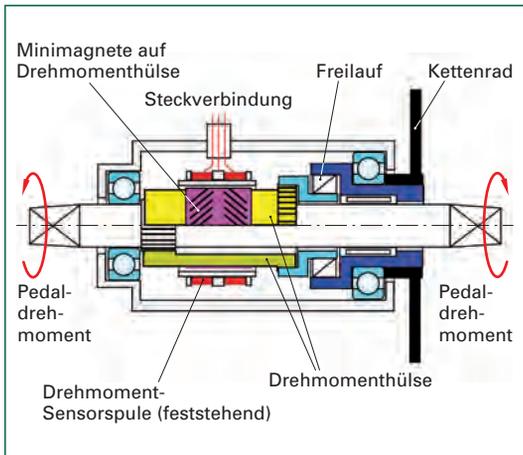
Bild 2: Ansteuerung der Wicklungen a) mit sinusförmiger b) mit blockförmiger Spannung

Bei der *Blockkommutierung* werden den drei Motorwicklungen Ströme aufgezwungen, die nach jeweils 60° umschalten. Beispiel Bild 3: Ein Innenläufer mit einem zweipoligen Dauermagnetrotor und mit drei um 120° gegeneinander versetzten Ankerspulen als Ständer.



**Bild 1:** Ein Sensor für die Trittkraft misst die Verbiegung am Ausfallende

**Funktionsweise:** Bringt der Benutzer beim Pedalieren Kräfte über die Kette auf das Ritzel ein, bewirkt dies eine elastische Durchbiegung der Hinterradachse. Die vom Fahrer eingebrachten Kräfte werden als Signale kontinuierlich von Sensoren in der Hinterradachse gemessen und an das Steuergerät weitergeleitet. Das Steuergerät regelt dann das abgebende Motormoment je nach eingestellter Unterstützungsstufe.



**Bild 2:** Berührungsloser Drehmomentsensor im Tretlagergehäuse

**Funktion des Drehmomentsensors im Tretlagergehäuse:** Wird rechts oder links in die Pedale getreten, überträgt die Drehmomenthülse das eingeleitete Drehmoment auf den Freilauf, der die Tretlagerwelle mit dem Kettenblatt kuppelt.

Auf die Drehmomenthülse ist eine Folie mit Minimagneten geklebt. Darüber befinden sich zwei Spulen, die gegenläufig von Strom durchflossen werden. Die Spulen sind fest mit dem Tretlagergehäuse verbunden, so dass keine Kabelzuführung über Schleifringe erforderlich ist.

Je nach Pedaldruck verdrehen sich die Drehmomenthülse und damit auch die Magnetstreifen. Die dabei entstehende Induktionsspannung wird als Maß dem Steuergerät übermittelt.

Moderne Drehmomentsensoren (**Bild 3**) registrieren bis zu 72 Drehzahlimpulse pro Kurbelumdrehung. Durch die kurzen Reaktionszeiten braucht der Fahrer nur wenige cm zurückzulegen, bis die gewünschte Unterstützung einsetzt.



**Bild 3:** FAG-Drehmomentsensor-Innenlager (Schaeffler)

Wenn der Radfahrer in der Ebene fährt, tritt er nur mit leichter Kraft – der Drehmomentsensor und die Steuerung sorgen dafür, dass der Elektromotor nur wenig unterstützt. Muss der Radfahrer bei Gegenwind oder am Berg kräftiger treten, signalisiert der Drehmomentsensor dem Steuergerät, dass der Motor mehr Leistung abgeben muss. Dadurch schaffen diese Fahrräder den Spagat zwischen guter Unterstützung am Berg und hoher Reichweite.

Dieses Steuerungskonzept bietet gegenüber der reinen Bewegungssteuerung folgende Vorteile:

- Besseres Fahrgefühl, denn der Fahrer merkt direkt, wie die eigene Kraft vom Antrieb verstärkt wird.
- Höhere Reichweite, da die Energie proportional zur Tretkraft des Radfahrers eingesetzt wird.
- Einfachere Bedienung, da der Radfahrer wie gewohnt in die Pedale treten muss – die Anfahrhilfe durch den Motor kommt von alleine.

Bei dem Steuerungskonzept „Kraft- oder Drehmomentsensor“ ist eine Anfahrhilfe nicht erforderlich, da das Steuergerät bei Pedalberührung sofort erfährt, dass der Radfahrer anfahren möchte.

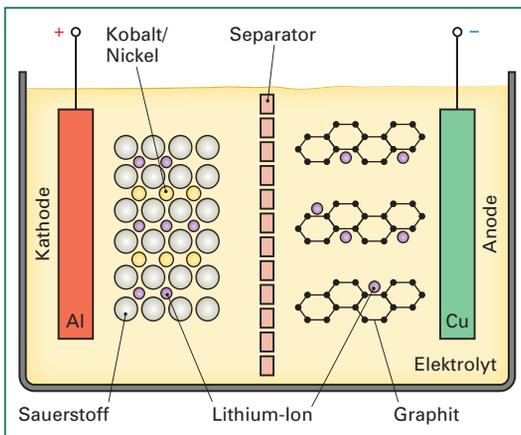
Weitere Möglichkeiten der Antriebssteuerung sind:

- Messung der Deichselkraft bei Betrieb mit einem Schubanhänger
- Messung der elektrischen Werte über einen Pedalgenerator (meist beim Pedelec 45).

## Lithium-Ionen-Akku

Metallisches Lithium ist als Elektrodenmaterial für Anwendungen in Elektrofahrzeugen ungeeignet, da es stark mit Wasser reagiert und brennbar ist. Erst die Lithium-Ionentechnik vermeidet diese Einschränkungen. Aufbau: Man nimmt Elektroden aus Kupfer oder Aluminium und überzieht diese mit Schichten von Metalloxiden und Graphit. In diesen Schichten beider Elektroden wird Lithium in Ionenform ( $\text{Li}^+$ ) eingelagert.

Eine Lithium-Ionen-Zelle besteht aus der negativen Graphitelektrode (Anode), der positiven Lithium-Metalloxid-Elektrode (Kathode), dem Elektrolyten und dem Separator, der die beiden Elektroden trennt (**Bild 1**).



**Bild 1: Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle mit Kobalt-Nickeloxiden**

Die Kathode aus Aluminium kann mit unterschiedlichen Oxiden der Grundmetalle Mangan, Nickel, Kobalt und andere beschichtet sein.

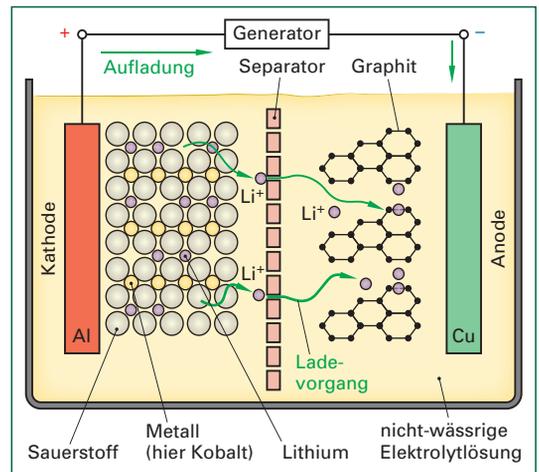
Der Separator aus Polymeren oder aus Keramik ist nur für die Lithiumionen durchlässig.

Der wasserfreie Elektrolyt besteht aus organischen Lösungsmitteln (Achtung: Kontaktgift und brennbar!)<sup>1</sup>. Beim Lithium-Polymer-Akku ist der Elektrolyt nicht flüssig, sondern gelartig und bildet gleichzeitig den Separator.

Die Nennspannung einer Akkuzelle ist abhängig vom Elektrodenmaterial und liegt zwischen 3,6 und 4 Volt.

### Aufladen des Akkus

Zum Aufladen werden mit dem Ladegerät Elektronen von der Plus-Elektrode (Kathode) „abgesaugt“ und zur Minuselektrode (Anode) „gepumpt“ (**Bild 2**).

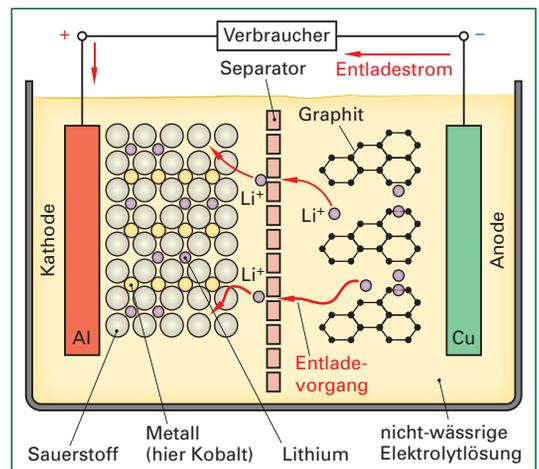


**Bild 2: Aufladen einer Lithium-Ionen-Zelle**

An der Plus-Elektrode lösen sich die eingelagerten Lithiumionen aus den Metalloxidschichten und wandern durch den Elektrolyten und dem Separator zur negativen Graphitelektrode. Dort verbinden sie sich mit den Elektronen, die das Ladegerät liefert. Die nun neutralen Lithiumatome lagern sich in die Graphitschichten ein. Dieser Vorgang wird fortgeführt, bis alle Lithium-Ionen eingelagert sind. Das Ladegerät wird entfernt und der Akku ist aufgeladen.

### Entladen des Akkus

Beim Entladen gibt das atomare (neutrale) Lithium Elektronen an den äußeren Stromkreis ab, die sich in der Kathode ansammeln (**Bild 3**). Zurück bleiben positiv geladene Lithiumionen. Diese wandern im inneren Stromkreis zur Kathode und lagern sich dort in den Metalloxidschichten ab.



**Bild 3: Entladen einer Lithium-Ionen-Zelle**

<sup>1</sup> Elektrolyt aus Lithiumhexafluorphosphat

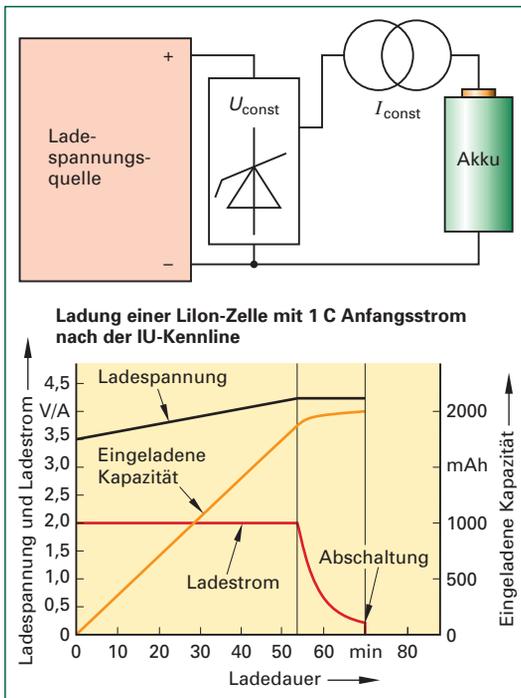
### 4.9.3 Ladegeräte, Akkupack und Kennwerte

#### Ladegeräte

Lithium-Ionen-Akkus benötigen ein „intelligentes“ Ladegerät, da der Ladestrom, die Akkuspannung (über die Zeit), die Akkutemperatur und die Ladezeit überwacht werden müssen. Dabei genügt es oft, eine der Einflussgrößen seitens des Ladegerätes zu steuern.

Bei der *I-Ladung* (Stromkennlinie) wird der Strom auf einen Höchstwert begrenzt, wobei dieser die Ladegeschwindigkeit beeinflusst. Bei der *U-Ladung* (Spannungskennlinie) ist die Ladespannung limitiert. International sind hierfür die Begriffspare *CC-charge* (Constant **C**urrent) und *CV-charge* (Constant **V**oltage) üblich.

Oftmals werden die beiden Ladekennlinien zu einer Strom/Spannungs-Kennlinie kombiniert: IU-Kennlinie oder CCCV-Ladung (**Bild 1**).



**Bild 1:** IU-Ladevorgang und Ladekurve einer Lithium-Ionen-Zelle

Bei der für Lithium-Ionen-Akkus empfohlenen IU-Ladung wird anfangs der Strom durch das Ladegerät begrenzt. Dabei steigt die Ladespannung bis zum eingestellten Höchstwert an. Zu diesem Zeitpunkt tritt die Spannungsbegrenzung in Kraft. Ab hier sinkt dann der Strom bis zu einem Minimalwert, an dem die Ladung beendet wird.

Zunächst liegt die Spannung (= Zellenspannung, Nominalspannung oder auch Nennspannung) einer fast entladenen Akkuzelle bei 3,6 V. Beim Anschließen des Ladegeräts steigt sie langsam auf knapp 4,2 V und bleibt konstant. Beim Erreichen der Maximalspannung (= Ladeschlussspannung) verringert das Ladegerät den Strom umgekehrt proportional zur weiter steigenden Spannung, bis der Ladestrom einen minimalen Wert unterschreitet. Zu diesem Zeitpunkt sind die Zellen vollständig geladen. Ein Timer unterbricht den Ladevorgang im richtigen Moment.

Nach einer definierten Ladezeit muss eine funktionsfähige Zelle geladen sein. Daher wird die Ladung abgebrochen, wenn nach dieser Zeit nicht der Zustand „Zelle voll“ erreicht wird.

#### Info

**Entlade-Schlussspannung:** Um eine Tiefentladung zu vermeiden, dürfen Lithiumakkus nicht unter einen bestimmten Spannungswert entladen werden. Diese Spannung liegt geringfügig unterhalb der Zellenspannung (Nennspannung). Eine typische Entlade-Schlussspannung beträgt 2,5 V.

**Ladeschlussspannung:** Lithiumakkus dürfen nur auf eine bestimmte Spannungshöhe geladen werden, da sie ansonsten zerstört werden. Daher muss das Ladegerät auf den exakten Spannungswert eingestellt werden. Die typische Ladeschlussspannung einer Li-Ionen-Zelle liegt bei 4,2 V.

Bei einer Überladung oder einer Tiefentladung kann es zu irreversiblen Schädigungen und zu Kapazitätsverlusten kommen. Für die Verhinderung dieser sicherheitskritischen Ereignisse ist das Batterie-Management-System (BMS) zuständig.

#### C-Rate, C-Wert

Mit der C-Rate wird der maximale Ladestrom angegeben. Man multipliziert den C-Wert mit der Kapazität und erhält als Ergebnis den maximalen Ladestrom.

#### Beispiel:

Bei einem Akku mit 2 Ah-Zellenkapazität und einer C-Rate von 2 C soll der Ladestrom  $2 \cdot 2 = 4$  A nicht überschreiten.

Zu beachten ist, dass die auf dem Akku angegebene C-Rate häufig (werbewirksam) zu hoch angegeben ist.

## Kapazitätsmessung

Zur Bestimmung der im Akku enthaltenen Kapazität gibt es mehrere Methoden. Wichtig: Man muss die Randbedingungen wie Temperatur und Entladestrom berücksichtigen.

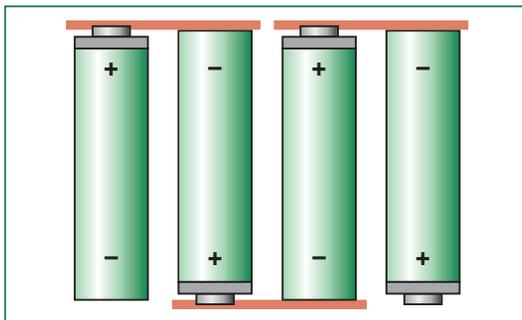
1. Verlauf der Spannung über der Zeit am Akkupack messen.
2. Die eingespeiste Ladung „mitzählen“ und die entnommene Ladung davon subtrahieren (Coulomb Counting“ oder „Gas Gauge“).
3. Das „Impedance Tracking“, das im laufenden Betrieb die Impedanz der Zelle bestimmt. Damit wird eine relativ genaue Kapazitätsbestimmung möglich, die aber Kenntnis der Zellchemie voraussetzt.

## Akkupack

Ein Akkupack (Modul) besteht aus einer Vielzahl einzelner Zellen, die mithilfe von Nickelstreifen durch Punktschweißung in Serien- und Parallelschaltung verbunden sind. Da die einzelne Zelle als kleinste Einheit eines Akkupacks für die meisten Anwendungen eine zu geringe Spannung und/oder Kapazität besitzt, wird sie mit weiteren Zellen verbunden.

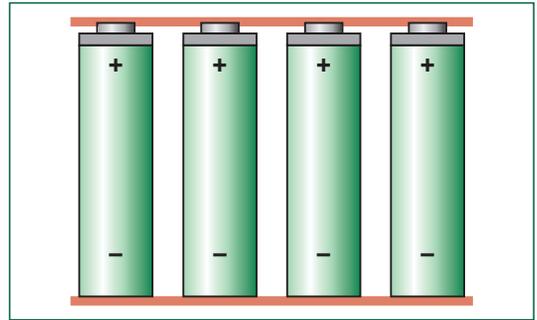
Um die Spannung zu erhöhen, werden Zellen *seriell* (in Reihe) verschaltet (**Bild 1**). Wichtig: Es muss darauf geachtet werden, dass die einzelnen Zellen bei Ladeende dieselbe Spannung aufweisen. Achtung: Bei Ausfall einer Zelle wird der komplette Stromkreislauf unterbrochen.

Die Zellenspannung (Nominalspannung) des Akkupacks ergibt sich aus der Nominalspannung der Einzelzelle multipliziert mit der Anzahl der seriell verschalteten Einzelzellen.



**Bild 1:** Vier Einzelzellen in Serie geschaltet

Eine *parallele* Verschaltung ergibt mehr Kapazität (**Bild 2**). Alle Zellen haben stets die gleiche Spannung, da sie sich durch die Parallelschaltung angleichen.



**Bild 2:** Vier Einzelzellen parallel geschaltet

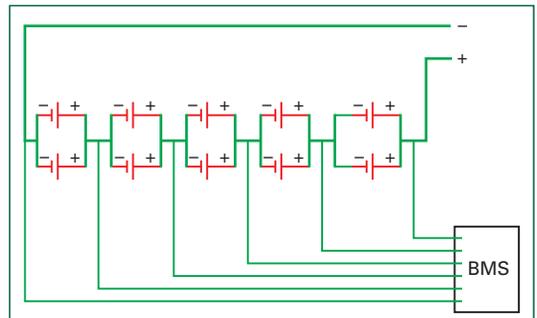
Die Nennkapazität (Nominalkapazität) eines Akkus ergibt sich aus der Kapazität der Einzelzelle multipliziert mit der Anzahl der parallel verschalteten Zellen.

Bilden sowohl seriell als auch parallel verschaltete Zellen einen Akkupack, so ergeben sich veränderte Spannungen und Kapazitäten.

Der Aufbau eines Akkupacks wird in Kürzeln angegeben. Beispiel: 10S4P. 10S steht für 10 in Serie (Reihe) geschaltete Zellen, 4P für 4 parallel geschaltete Zellenreihen.

### Beispiel (Bild 3):

Ein Akku soll eine Spannung von 18 V bei einer Kapazität von 4 Ah aufweisen. Die Einzelzellen haben eine Spannung von 3,6 V und eine Kapazität von jeweils 2 Ah. Man muss 5 Blöcke aus je 2 parallelgeschalteter Zellen in Serie schalten. Die Kurzschreibweise des Akkupacks lautet: 5s2p.



**Bild 3:** Akkupack 5s2p

Ein 10s5p-Akkupack mit  $10 \cdot 5 = 50$  Zellen der Zellenspannung 3,6 V und der Kapazität 2 Ah ergibt eine Gesamtspannung von  $10 \cdot 3,6 = 36$  V und einer Gesamtkapazität von  $5 \cdot 2 = 10$  Ah. Die gespeicherte Energie beträgt  $10 \text{ Ah} \cdot 36 \text{ V} = 360 \text{ Wh}$ .

<sup>1</sup> Impedanz = Wechselstromwiderstand

## Vergleich der Speichermengen

### info

Wichtig: Man darf die Kapazitäten des Akkus nicht einzeln vergleichen, sondern es müssen die Spannungen mit einbezogen werden. So hat ein 36 V-Akku mit einer Kapazität von „nur“ 10 Ah mit 360 Wh deutlich mehr Energie gespeichert als ein 24 V-Akkupack mit dem (lt. Werbung) „höheren“ 12 Ah (= 288 Wh). Dieser Unterschied macht sich in der Reichweite bemerkbar.

4

### 4.9.4 Bauformen von Lithium-Ionen-Akkus

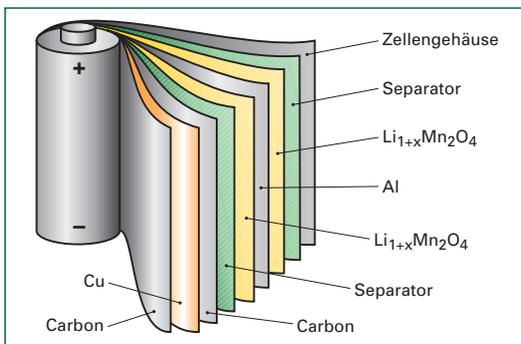
Für Lithium-Ionen-Zellen konzentrieren sich die Hersteller auf drei Bauformen.

Die zylindrische Zelle (**Bild 1**) ist die am weitesten verbreitete Ausführungsform. Das Format ist standardisiert und wird in einer fünfziffrigen Zahl angegeben. Die ersten zwei Ziffern geben den Durchmesser in mm, die dritte, vierte und fünfte Stelle ergeben die Länge in 1/10 mm.

*Beispiel Standardzelle 18650:*

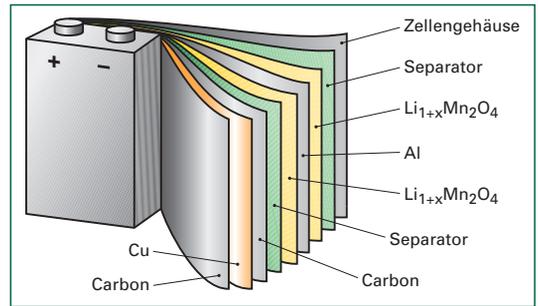
Durchmesser 18 mm, Länge 65 mm

Die zylindrische Zelle ist einfach zu produzieren, mechanisch stabil und erreicht im Vergleich zu anderen Formen die größten Energiedichten. Aufgrund ihrer Form hat sie jedoch eine schlechte Wärmeabfuhr. Die Zellchemie ist bei dieser Batterie in ein stabiles Rundgehäuse integriert. Die Zelle ist innen hohl, damit die Batterie bei Belastung (Erwärmung) nach innen „atmen“ kann und sich nicht nach außen ausdehnt.



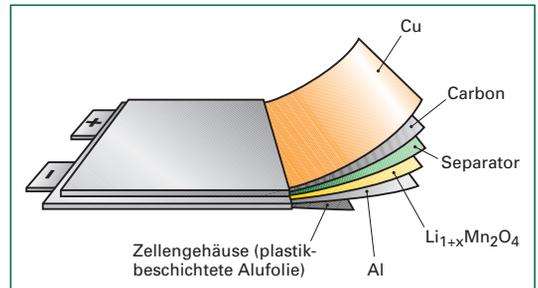
**Bild 1: Zylindrische Li-Ion-Zelle**

Ähnlich wie die zylindrische Zelle ist die prismatische Zelle aufgebaut (**Bild 2**). Die Komponenten werden in der Abfolge Anode – Separator – Kathode – Separator zu einem Flachwickel aufgewickelt und ein prismatisches festes Gehäuse verpackt. Die rechteckige, flache Form ermöglicht im Vergleich zur Zylinderform eine bessere Wärmeabfuhr. Nachteilig ist die aufwändigere Fertigung.



**Bild 2: Prismatische Li-Ion-Zelle**

Bei der Pouch-Zelle wird anstelle des festen Gehäuses ein flexibles verwendet, das aus beidseitig kunststoffbeschichteter Aluminiumfolie besteht (**Bild 3**). Die Komponenten werden in der Abfolge Anode – Separator – Kathode aufgestapelt.



**Bild 3: Pouch-Li-Ion-Zelle (Coffeabag-Zelle)**

Diese Stapel werden entweder aus bereits zugeschnittenen Komponenten gefertigt oder von der Rolle aus laminiert und gestanzt. Vorteile dieser Bauform sind ihre guten Kühleigenschaften, formbedingt ein gutes Raum-Masse-Verhältnis (Packaging), das niedrige Gewicht und eine gute Wärmeableitung. Hohe Energiedichten bei vergleichsweise günstiger Fertigung sind möglich. Nachteilig sind die geringere mechanische Stabilität, die Dichtheit und ein mögliches Aufblähen der Zelle durch einen erhöhten Innendruck bei unkontrollierter Gasentwicklung.

### 4.9.5 Batterie-Management-System

Die wichtigste elektronische Komponente ist das Batterie-Management-System (BMS). Neben der Steuerung und Überwachung des Ladezustandes dient es als Schnittstelle zwischen Elektrofahrzeug und Akkumulator-Kommunikation. Unter Verwendung von Sensorik werden Strom, Spannungen, Temperaturen der Einzelzellen und des Gesamtsystems gemessen und geregelt. Damit trägt das BMS als ein zentraler Bestandteil zur Sicherheit bei. Darüber hinaus ermöglicht es die Fehlerprotokollierung und das Zu- und Abschalten des Systems (**Bild 1, Seite 141**).

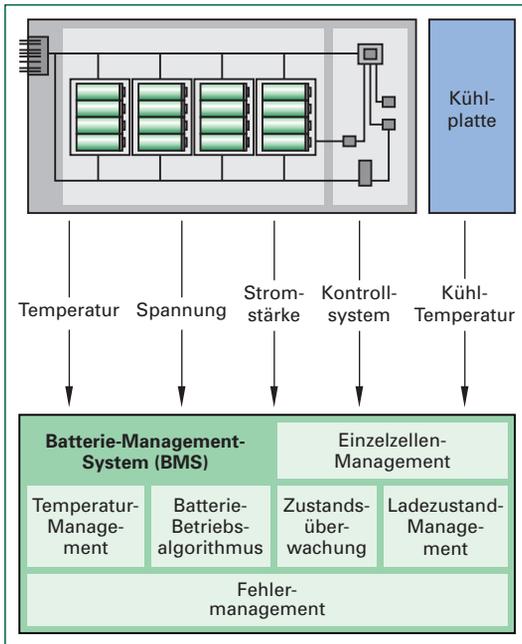


Bild 1: Schema Batterie-Management-System

Ein BMS vereint eine Vielzahl von Funktionen:

- Einzelzellen-Überladeschutz
- Einzelzellen-Tiefentladeschutz
- Balancing-Funktion
- Temperaturkontrolle

### Einzelzellen-Überladeschutz

Das BMS schützt jede einzelne parallele Zellengruppe vor Überladung. Lithiumakkus vertragen keine Überladung, da sie ab einer bestimmten Spannung irreparabel beschädigt werden. Sollte ein falsches Ladegerät an den Akku angeschlossen sein, schützt das BMS vor einer schädlichen Überladung.

### Einzelzellen-Tiefentladeschutz

Eine Tiefentladung eines Lithiumakkus muss unter allen Umständen vermieden werden. Sie schädigt die Zellen und verkürzt die Lebensdauer. Das BMS überwacht jede einzelne parallele Zellengruppe und schaltet bei Unterschreitung einer kritischen Spannung ab.

### Balancing

Lithiumakkus reagieren empfindlich auf Überladung und Tiefentladung. Die meisten Lithiumakkus sollten nicht über 4,2 V pro Zelle geladen und nicht unter 2,5 V entladen werden, da sonst Aufblähung und Zerstörung drohen. Da die einzelnen Zellenspannungen eines Akkupacks mit der Zeit auseinanderdriften, droht ohne Balancer eine Überladung.

### Beispiel:

Ein Akku, bestehend aus zwei Zellen mit je 3,7 V Zellenspannung, ist seriell verschaltet. Die Nominalspannung beträgt 7,4 V, die Ladeschlussspannung 8,4 V (4,2 V pro Zelle). Wird beim Vollladen auf 4,2 V pro Zelle eine Zelle etwas voller als eine andere geladen, z. B. 4,4 V die eine und 4,0 V die andere, ergeben sich auch 8,4 V.

Das Ladegerät wird „annehmen“, der Akku sei voll, da er die 8,4 V-Ladeschlussspannung erreicht hat. In Wirklichkeit ist er irreparabel beschädigt, da die eine Zelle mit 4,4 V überladen wurde. Um diesem Effekt vorzubeugen, reicht es nicht aus, ein Ladegerät mit einer angepassten Ladeschlussspannung zu verwenden. Man benötigt ein Gerät, das die einzelnen Zellen überwacht. Dieses elektronische Bauteil ist ein Balancer<sup>1</sup>.

Beim **passiven Ladungsausgleich** werden beim Ladevorgang die stärksten Zellen gezielt über ohmsche Widerstände leicht entladen, um die schwächeren Zellen vollständig aufladen zu können (Bild 2). Von Nachteil ist, dass ein Teil der Energie in Verlustwärme umgewandelt wird und für den Fahrbetrieb nicht zur Verfügung steht.

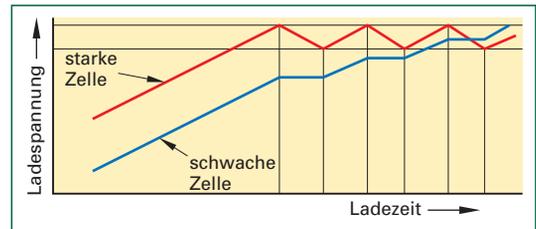


Bild 2: Prinzip passiver Ladungsausgleich

Die schwächeren Zellen mit der niedrigen Kapazität erreichen beim Laden schneller die obere zulässige Spannungsschwelle. Der Ladevorgang wird abgebrochen, obwohl die stärkeren Zellen mit der höheren Kapazität noch nicht vollständig geladen sind. Dem Benutzer steht nach dem Ladevorgang nicht die volle Energiemenge zur Verfügung.

Beim **aktiven Ladungsausgleich** wird elektrische Ladung von einer Zelle zu einer anderen Zelle transportiert. Man unterscheidet das kapazitive und induktive Verfahren.

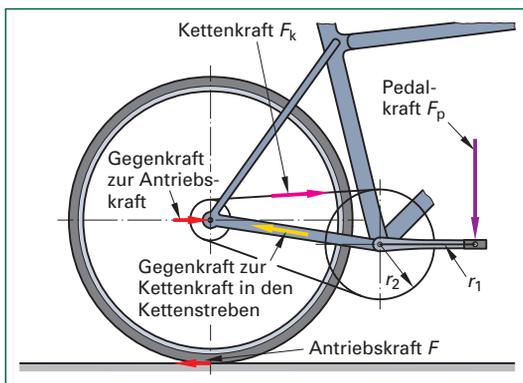
Beim **kapazitiven Verfahren** wird ein Kondensator parallel zur Zelle mit der höheren Spannung geschaltet. Nachdem dieser aufgeladen ist, wird er parallel zur Zelle mit der niedrigen Spannung geschaltet und kann diese aufladen. Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis an beiden Zellen die gleiche Spannung anliegt (Bild 1, Seite 142).

<sup>1</sup> Quelle: www.linergy.de

Dabei können beim Rennrad Vertikalkräfte bis 7500 N und beim ungefederten Mountainbike bis 9000 N über das Hinterrad in den Rahmenhinterbau eingeleitet werden. Auf die weniger belastete Gabel entfallen dabei beim Rennrad bis 3000 N und beim Mountainbike bis 3500 N.

**info**

**Kraft:** Kräfte können einen Körper beschleunigen, verzögern oder die Form des Körpers verändern. Die Einheit der Kraft ist Newton [N]. 1 N beschleunigt einen Körper der Masse 1 kg mit  $1 \text{ m/s}^2$ .



**Bild 1: Von der Pedalkraft zur Antriebskraft**

Die angeführten Werte sind Maximalwerte. Sie resultieren aus Messwerten, die man an statisch nachgestellten Belastungen und Versuchen mit Radsportlern ermittelt hat und die zu Achsverbiegungen oder Rahmenschäden geführt haben.

Hohe Belastungen treten beim Radfahren auf, wenn man in ein tiefes Schlagloch fährt oder ein höheres Hindernis überrollt. Die Häufigkeit hoher Stoßbelastungen ist gering und erreicht in einem Fahrradleben selbst bei einem Mountainbiker selten mehr als 1000 Wiederholungen.

**info**

**Stoß:** Ein Körper erfährt einen Stoß (Wucht, Kraftstoß, Impuls), wenn auf ihn eine Kraft über eine ganz bestimmte Zeit einwirkt. Die Einheit des Impulses ist Newtonsekunde [Ns].

*Beispiel:*

Die bis zu 2500 N großen Pedalkräfte beim Wiegetritt führen zu doppelter Kettenkraft, wenn die Kette auf einem 42er-Kettenblatt aufliegt, da dessen Radius etwa die halbe Kurbellänge aufweist<sup>1</sup>. In diesem Fall tritt ein Kettenzug von 5000 N auf. Schaltet man auf ein Ritzel mit mehr als 24 Zähnen, rutscht das Hinterrad bei dieser Antriebskraft durch.

Liegt die Kette auf einem Kettenblatt mit 24 Zähnen, steigt die Kettenkraft auf über 8500 N an; das Hinterrad würde aber bereits beim Aufliegen eines 14er-Ritzels durchrutschen.

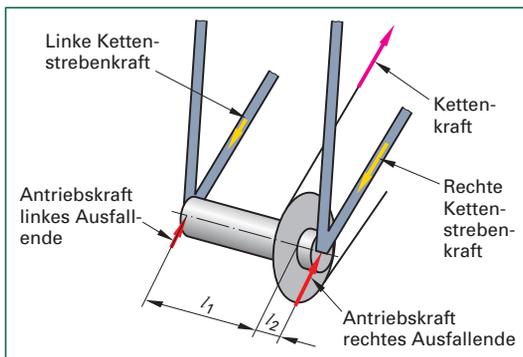
Neben der Kettenkraft wirkt noch die Antriebskraft auf den Rahmen. Während die Antriebskraft die Kettenstreben zu gleichen Teilen auf Druck belastet<sup>2</sup>, wirkt die Kettenkraft als Zugkraft insbesondere auf die rechte Kettenstrebe (**Bild 2**). Je kleiner der Abstand  $l_2$  des Ritzels vom rechten Ausfallende ist, desto größer ist der Zugkraftanteil in der rechten Kettenstrebe.

**5.1.2 Horizontalkräfte**

Auch die horizontalen Kräfte werden von den Ausfallenden ausgehend in den Rahmen übertragen. Diese entstehen durch Fahrbahnstöße, Antriebs- und Bremskräfte sowie bei Auffahrunfällen, die in der Regel zu plastischen Verformungen von Lauf- rad, Gabel und Rahmen führen.

**Antriebskräfte**

Die Pedalkräfte erzeugen während der Tretbewegung am Kettenblatt ein ständig schwankendes Drehmoment, das über die Kette das Hinterrad antreibt. Über die Haftung des Reifens auf der Fahrbahn entsteht die Antriebskraft, die gegen die Fahrtrichtung gerichtet ist. Deren Gegenkraft – in **Bild 1** in die Hinterradachse verlegt – wird in den Rahmen eingeleitet und sorgt für die Vorwärtsfahrt.



**Bild 2: Gegenkräfte zur Kettenkraft: Kettenstrebenkräfte rechts und links**

<sup>1</sup> Teilkreisdurchmesser  $d_0 = 170 \text{ mm}$   
<sup>2</sup> Gilt nur für symmetrisch aufgebaute Hinterräder

Bei der Monocoque-Bauweise wird der Rahmen aus zwei oder mehr Bausegmenten hergestellt. Jedes Segment wird in einer eigenen Metallform gefertigt und die Segmente anschließend sichtbar oder unsichtbar miteinander verklebt.

Monocoque bietet eine große Vielfalt an Rahmenformen, sodass die Wünsche von Konstrukteuren und Produktdesignern umgesetzt werden können (**Bild 1**).



**Bild 1: Monoqoque-Rohrverbindung**

Jede Rahmenhöhe benötigt eine eigene teure Form. Auch zusätzliche Formen für die Herstellung von Formkernen können notwendig sein.

Als *Open-Mold* bezeichnet man eine Form, die der CFK-Produzent dem Auftraggeber zur Verfügung stellt. Solche Rahmen unterscheiden sich durch die Lackierung und unterschiedliche Gewichte und Steifigkeitswerte.

Eine *Closed-Mold* dagegen befindet sich im Besitz des Auftraggebers. Das hergestellte Rahmen-design ist einmalig, manchmal auch patentrechtlich geschützt.

Monocoque Rahmen, Gabeln und einige Lenker werden aus tiefgefrorenen Kohlefaser-Prepregs hergestellt.

Nach dem Grobzuschnitt der aufgetauten Endlos-Prepregs werden bis zu 550 Faserzuschnitte je Rahmen angefertigt (**Bild 2**). Der Zuschnitt dieser sogenannten *B-Stage Prepregs* erfolgt von Hand oder mit computergesteuerten Cuttern und Nesting-Software (**Bild 3**).

Die Bereitstellung der großen Zuschnittmengen je Rahmen und Rahmenhöhe und das Einhalten der vorgegebenen Fasermaterialien und Faserorientierung stellt eine große logistische Herausforderung dar.



**Bild 2: Prepregs-Einzelzuschnitte**



**Bild 3: CNC Ultraschall-Cutter für Prepregs (Topcut-Bullmer)**

Nach dem Zuschneiden werden Preformen von Bausegmenten eines Rahmens hergestellt. Dabei werden die Zuschnitte über Positivformwerkzeugen aus Holz, Silikon oder Hartschaum drapiert und geschichtet. Für Rohranbindungen benutzt man Winkelschablonen.

Das Aufschichten der Einzellagen des Laminats (engl. Ply lay-up) erfolgt nach dem Faserlegeplan, dem Ply-Book. In ihm ist die Ausrichtung und Reihenfolge des durchnummerierten Fasermaterials genau vorgegeben.

Mit Wärme können die leicht klebrigen Prepreg Zuschnitte beim Faserlegen fixiert werden (**Bild 1, Seite 170**) Dabei muss die Faserorientierung und Materialart genau eingehalten werden, denn schon wenige Grad Abweichung können die Rahmensteifigkeit deutlich senken.

Auch Faserknickungen durch Fehler beim Drapieren und jede Form der Verschmutzung des Laminats müssen vermieden werden (siehe auch Kapitel 5.5.5 CFK-Schäden).

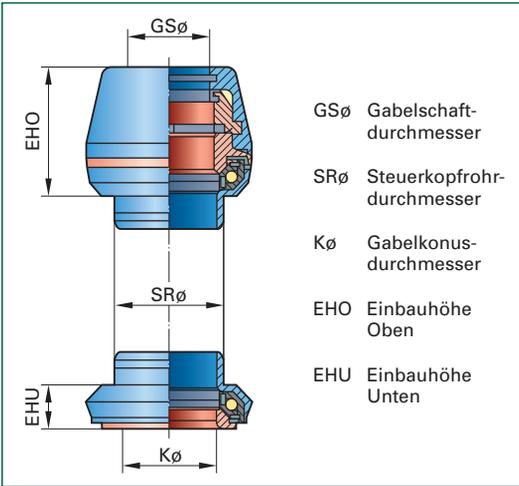


Bild 1: Maße Ahead-Steuersatz (Standard)

Außerdem gibt es noch diverse Herstellerunterschiede, z. B. nach Cane Creek oder Campagnolo-Standard. Diese sind untereinander nicht kompatibel. Mit einer Steuersatzlehre für integrierte Steuersätze (Bild 2) können die Durchmesser und Winkelgrade der Lagersitze ermittelt werden<sup>1</sup>.

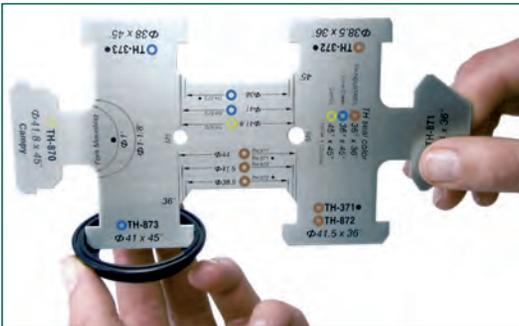


Bild 2: Steuersatzlehre (FSA)

Die gewindelosen Ahead-Steuersätze besitzen meist einen geschlitzten Zentrierkegel, der die obere Lagerschale (Mutterschale) auf dem Gabelschaft zentriert. Die Schale muss auf dem Schaftrohr axial leicht verschiebbar sein, damit das Lagerspiel eingestellt werden kann.

Eine Federkralle oder ein Spreizkegel (Bild 3) dient als Aufnahme der Steuersatz-Einstellschraube. Auf den Lenkervorbau wird eine Kappe aufgesteckt, die diese Schraube stützt. Durch Drehen der Schraube verschieben sich Vorbau und Lagerschale. Die axiale Fixierung des Steuersatzes erfolgt über die Klemmung des Lenkervorbaus.



Bild 3: a) Federkralle b) Spreizkegel (Expander)<sup>2</sup>

Beim Standard-Steuersatz und semiintegrierten Steuersatz werden beide Lagerschalen mit Montagepaste in das Steuerkopfrohr eingepresst (Bild 4).

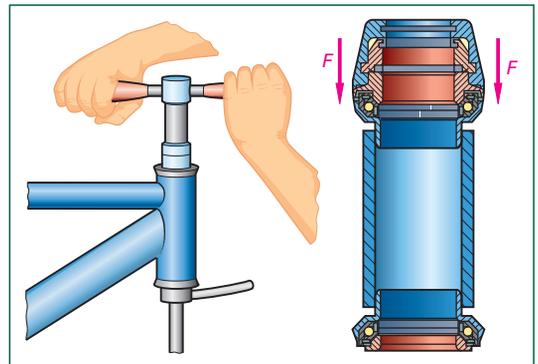


Bild 4: Einpressen der oberen und unteren Lagerschalen.

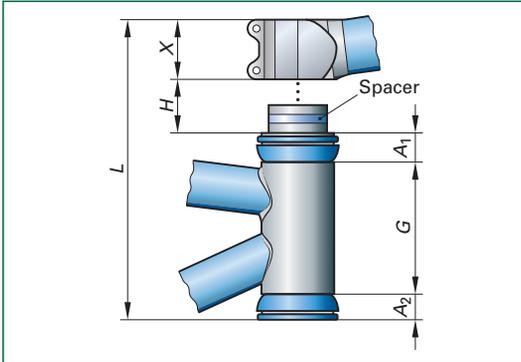
Montage eines Ahead-Steuersatzes

- Lagerschalen einpressen. Der Außendurchmesser der Lagerschale ist meist 0,1 mm bis 0,25 mm größer als der Innendurchmesser des Steuerkopfrohrs. Durch die Presspassung halten die Lagerschalen sicher im Rahmen. Die Auflagefläche des Einpresswerkzeuges darf nur auf dem äußeren Ring des Lagers oder auf dem Innenbund aufliegen.
- Kugellager entfernen.
- Gabelkonus (Steuersatzboden) auf den Gabelschaft aufpressen. Den Gabelkonus mit der Lagerauflagefläche in Richtung Vorbau aufsetzen. Geeignetes Aufschlagrohr verwenden.
- Gabelschaft bei Bedarf kürzen. Der Schaft der neuen Gabel ist oft länger als nötig und daher entsprechend zu kürzen.

<sup>1</sup> Das neue System S.H.I.S. (Standardized Headset Identification System) hilft bei der Zuordnung von Steuersatz-Bauformen. Internet: <http://bicycleheadsets.com>  
<sup>2</sup> Dieser ist bei Carbon-Gabelschaften zwingend vorgeschrieben

Die Gabelschaftlänge ist individuell zu entscheiden und hängt von der Körpergröße und den persönlichen Vorlieben bzw. der Konstitution des Fahrers ab. Mit Spacern (= Distanzringe) kann die gewünschte Vorbauhöhe angepasst werden. Die Formel zur Berechnung lautet (**Bild 1**):

$$L = (A_1 + A_2 + G + H + X) - 2 \text{ mm}$$



**Bild 1: Länge Gabelschaft**

### Info

Gabelschäfte aus Metall nur mit Metallsägeblättern kürzen. Keine Rohrabschneider verwenden. Für saubere rechtwinklige Schnitte eine Sägeführung verwenden. Mit einer Feile und Dreikantschaber entgraten. Carbongabelschäfte mit Klebeband umwickeln und mit einem sehr scharfen Metallsägeblatt kürzen<sup>1</sup>.

### Federkralle installieren

Niemals eine Federkralle aus Stahl in einen Gabelschaft aus Carbon schlagen, sondern ausschließlich geeignete Einsätze verwenden. Die Federkralle darf beim Einschlagen nicht kippen (**Bild 2**). Die Hersteller geben die maximale Einschlagtiefe an, z. B. 25 mm.

Beim Einschlagen ist darauf zu achten, dass die Ausfallenden nicht beschädigt werden. Am besten ist es, ein bereiftes Vorderrad zu montieren. Einfetten erleichtert die Montage. Ist die Federkralle fehlerhaft montiert, kann das Steuersatzlager nicht eingestellt werden.



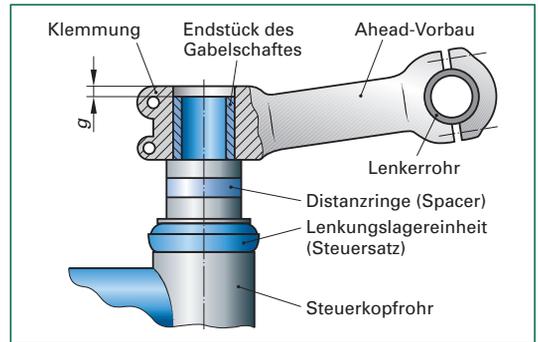
**Bild 2: Werkzeuge zum Einschlagen der Federkralle**

### Gabel montieren

Herstellerabhängig: Oberes Lager mit Klemmring (Zentrierkonus), Spannring und Steuersatz-Deckel auf den Gabelschaft schieben.

- Spacer aufschieben
- Lenkervorbau auf Gabelschaft stecken
- Kappe (Spanndeckel) auf Lenkervorbau aufsetzen, Spannschraube einführen

Der Abstand  $g$  zwischen Vorbau-Oberkante und Oberkante Gabelschaft darf nicht größer als 5 mm sein (**Bild 3**). Ist der Abstand geringer als 1 mm, lässt sich der Steuersatz nicht korrekt einstellen.

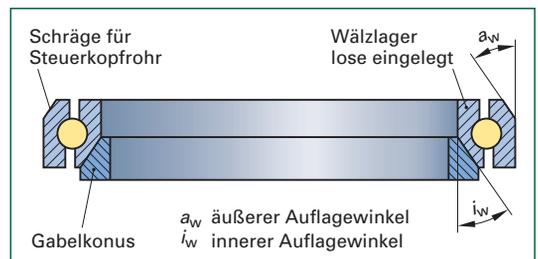


**Bild 3: Abstand  $g$  Vorbau/Gabelschaft**

- Spannschraube anziehen, bis der Steuersatz kein Spiel aufweist. Die Gabel lässt sich ohne Widerstand leicht drehen.
- Lenkervorbau gerade ausrichten und Klemmschrauben anziehen.

Im Gegensatz zu den **semiintegrierten** Steuersätzen werden bei **vollintegrierten** Steuersätzen keine separaten Lagerschalen in das Steuerkopfrohr eingepresst. Hier sind im Inneren des Steuerkopfrohrs konische Lagersitze eingearbeitet, in denen spezielle Schulterkugellager sitzen.

Unten sorgt ein aufgepresster Gabelkonus, oben ein Zentrierkonus für die Führung (**Bild 4**).



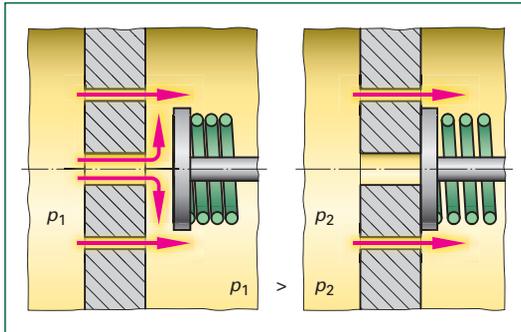
**Bild 4: Prinzip vollintegrierter Steuersatz**

<sup>1</sup> Parktool vertreibt spezielle Sägeblätter für Carbon: [www.parktool.com/product/carbon-saw-blade-csb-1](http://www.parktool.com/product/carbon-saw-blade-csb-1)

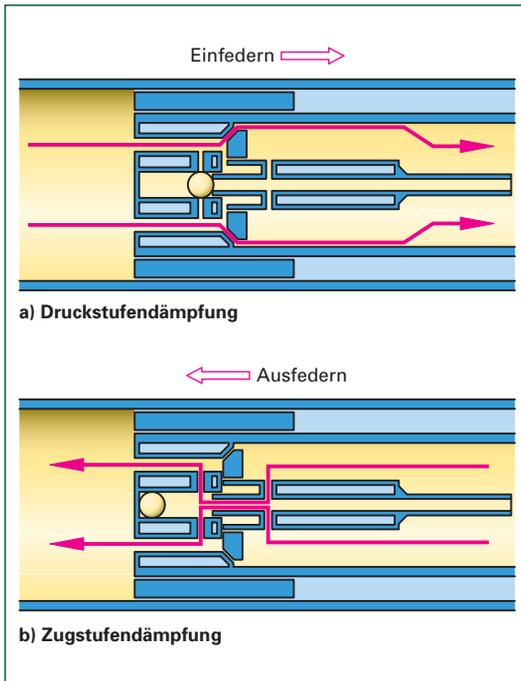
Da die Bohrungen immer geöffnet sind, strömt das Öl, sobald sich der Kolben bewegt. Ein Dämpfer, der allein mit „freien“ Bohrungen arbeitet, kann Dämpferaufgaben nicht optimal erfüllen.

Eine Verbesserung der Dämpferfunktion bringen unterschiedlich große freie Bohrungen, in der Größe einstellbare Kanäle oder Plattenventile (**Bild 1**).

Die Plattenventile öffnen sich, wenn der Druck von unten den Federdruck übersteigt. Dämpfer mit Plattenventilen in Kombination mit freien Bohrungen haben nahezu linear verlaufende Kennlinien.



**Bild 1:** Grundprinzip: Dämpfung durch Plattenventile

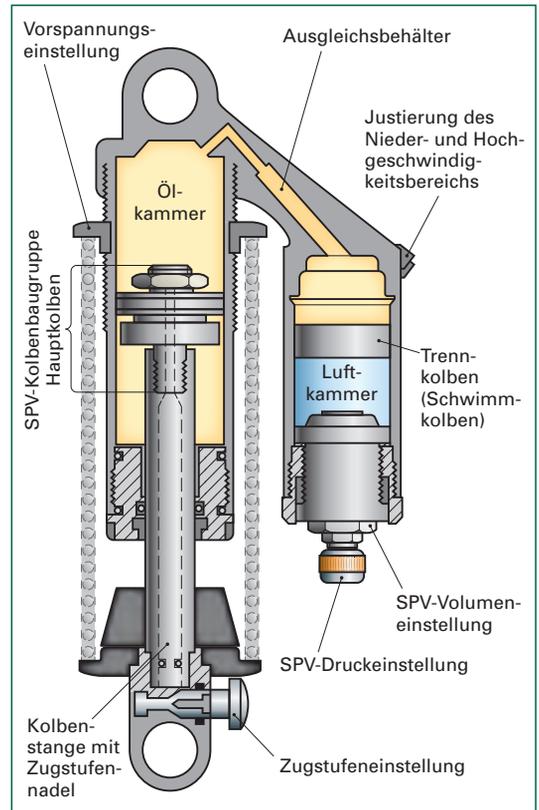


**Bild 2:** Öldämpfung bei Druck- und Zugstufendämpfung

**Prinzip:** Die Größe dieser Bohrungen ist verstellbar: Je größer sie sind, desto mehr Öl kann fließen und die Dämpfung wird schwächer.

- Beim Einfedern gelangt das Öl durch eine große Öffnung in den oberen Gabelteil. Die Dämpfung fällt geringer aus (**Bild 2a**).
- Beim Ausfedern muss das Öl durch eine kleine Öffnung in den unteren Gabelteil zurückfließen. Die Ausfedergeschwindigkeit verringert sich und bewirkt damit eine höhere Dämpfung (**b**).

**Bild 3** zeigt ein Federdämpferelement mit Einstellmöglichkeiten der Zug- und Druckstufe.



**Bild 3:** Schnittbild „Manitou Swinger“ SPV<sup>1</sup>

Federt die Kolbenstange im Federbein ein, wird Öl aus dem Zylinder in den Ausgleichsbehälter gedrückt.

Hier befindet sich ein Trennkolben (Schwimmkolben, *IFP* = *Internal Floating Piston*), der von einer Luft- oder Stickstofffüllung unter einen Druck von bis zu 12,5 bar gesetzt wird. Der Druck verhindert, dass sich bei schneller Kolbenbewegung Gasblasen im Öl bilden.

Im Hauptkolben befindet sich die Zugstufennadel, die eine Bohrung öffnet oder schließt und so den Ölfluss reguliert.

<sup>1</sup> SPV = Stable Platform Value

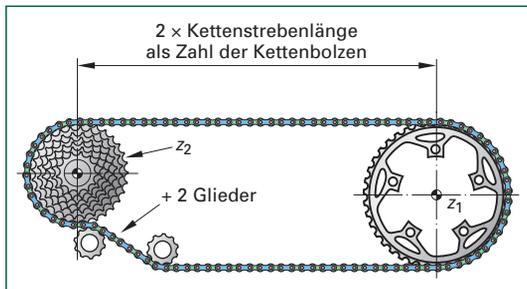
Ist die Kette zu kurz, kann die Übersetzung „größtes Kettenblatt/größtes Ritzel“ nicht mehr geschaltet werden. Sollte der Schalthebel versehentlich trotzdem in diese Position geraten, versucht die Kette auf das größte Ritzel zu schalten. Es besteht die Gefahr, dass sich dabei das Schaltwerk und das Schaltauge verbiegen.

Es gibt zwei Wege zur Bestimmung der richtigen Kettenlänge bei Kettenschaltungen:

a) Zur praktischen Bestimmung wird die zu montierende Kette als Maßband benutzt. Als Anfang dient das Außenglied mit dem herausstehenden Bolzen.

Beim Abzählen gilt: ein Bolzen = ein Kettengelenk.

Man addiert die Zahnzahl des größten Kettenblattes und des größten Ritzels und teilt das Ergebnis durch zwei. Dazu addiert man zwei Kettenglieder (**Bild 1**).



**Bild 1:** Kette als Maßband

*Beispiel:*

Größtes Kettenblatt 44 Zähne, größtes Ritzel 28 Zähne

$$44 + 28 = 72 : 2 = 36$$

$$36 + 2 = 38$$

Die letzte Zahl merken: 38 Gelenke = 38 Bolzen

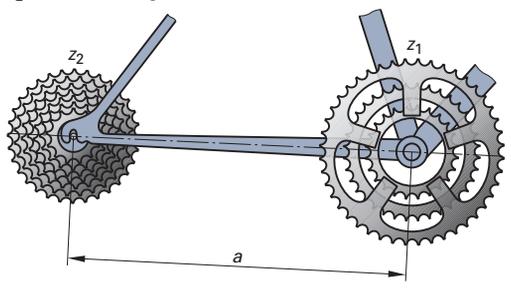
Nun wird mit der Kette die Länge der Kettenstrebe (= Länge Unterrohr) abgemessen. Den Anfangsbolzen der Kette hält man an die Mitte der Hinterradachse und misst bis zur Mitte der Tretlagerachse.

Die so ermittelte Länge wird verdoppelt und die vorher gemerkte Zahl der Bolzen addiert. Ergibt sich jetzt an dieser Stelle beim Öffnen ein Innenglied, so wird die Kette hier geöffnet.

Ergibt sich ein Außenglied, so muss zum Öffnen ein Gelenk weitergezählt werden. Die Kette ist jetzt in der richtigen Länge gekürzt und hat zum Verschließen zwei ungleiche Enden.

b) Mit einer Formel kann die richtige Kettenlänge berechnet werden (**Bild 2**).

- $L_K$  = Kettenlänge in Zahl der Gelenke (= Bolzenzahl)
- $a$  = Kettenstrebenlänge in mm (Mitte Tretlager bis Mitte Hinterachse)
- $z_1$  = Zahnzahl größtes Kettenblatt
- $z_2$  = Zahnzahl größtes Ritzel



**Bild 2:** Berechnung der Kettenlänge

a) für Schaltwerke mit 10-Zahn-Kettenrädchen:

$$L_K = 0,157 a + \frac{1}{2} z_1 + \frac{1}{2} z_2 + 2$$

b) für Schaltwerke mit 11-Zahn-Kettenrädchen:

$$L_K = 0,157 a + \frac{1}{2} z_1 + \frac{1}{2} z_2 + 4$$

*Beispiel:*

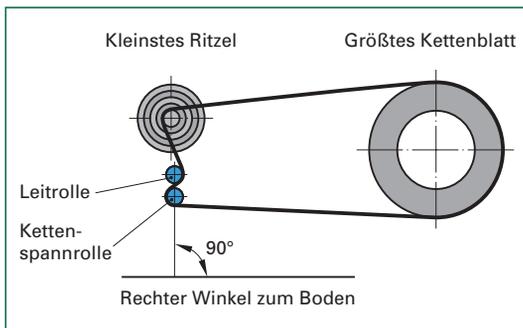
für ein Schaltwerk mit 10-Zahn-Kettenrädchen:

$a = 420$  mm,  $z_1 = 44$  Zähne,  $z_2 = 28$  Zähne

$$L_K = 0,157 \cdot 420 + \frac{44}{2} + \frac{28}{2} + 2 = 103,94$$

Die Kette sollte 104 Gelenke haben. Damit sich die Kettenenden verschließen lassen, ist das Ergebnis auf eine gerade Zahl aufzurunden.

Zur Kontrolle, ob beim Rennrad die Kettenlänge korrekt ist, legt man die Kette auf das große Kettenblatt und hinten auf das kleinste Ritzel (**Bild 3**). Jetzt sollen die Spannrolle, Leitrolle und Hinterachsmittelpunkt auf einer Linie liegen und einen rechten Winkel zum Boden einnehmen.



**Bild 3:** Prüfen der Kettenlänge beim Rennrad<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Quelle: Shimano Händlerkatalog 2011

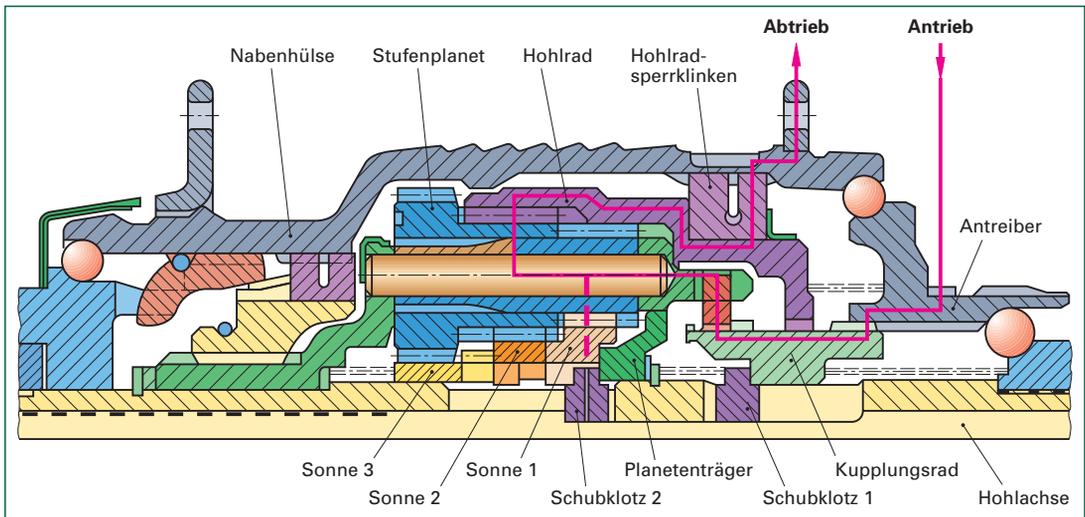
Nach dem gleichen Schema der Fünfgangnaben ist die **Siebengang-Nabe** von SRAM (**Bild 1**) aufgebaut. Jedoch sind hier drei Sonnenräder mit den dazugehörigen Planetenrädern im Einsatz. Das Getriebe liefert neben einem Normalgang drei Übersetzungen ins Langsame und drei Übersetzungen ins Schnelle.

Bei der **Siebengang-Nabenschaltung** von Shimano sind zwei Planetengetriebe mit je zwei Sonnenrädern hintereinander geschaltet. Hier entfällt der Normalgang, da dieser fast dem vierten Gang entspricht.

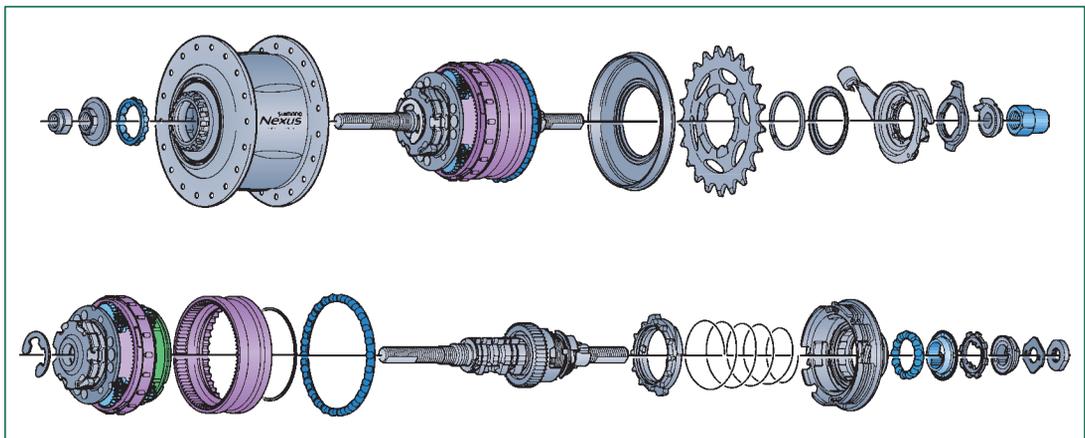
Die **Achtgang-Nabenschaltung** (**Bild 2 und Bilder Seite 271, 272 und 273**) von Shimano besteht aus einem Viergang-Planetengetriebe, das mit einem weiteren vorgeschalteten Planetengetriebe wahlweise untersetzt oder durchgeschaltet werden kann. Ein Schaltservo benützt die Pedalkraft, um das Zurückschalten auch unter Last zu unterstützen.

Die Gesamtübersetzung von 307 % ergibt sich aus den Einzelübersetzungen:

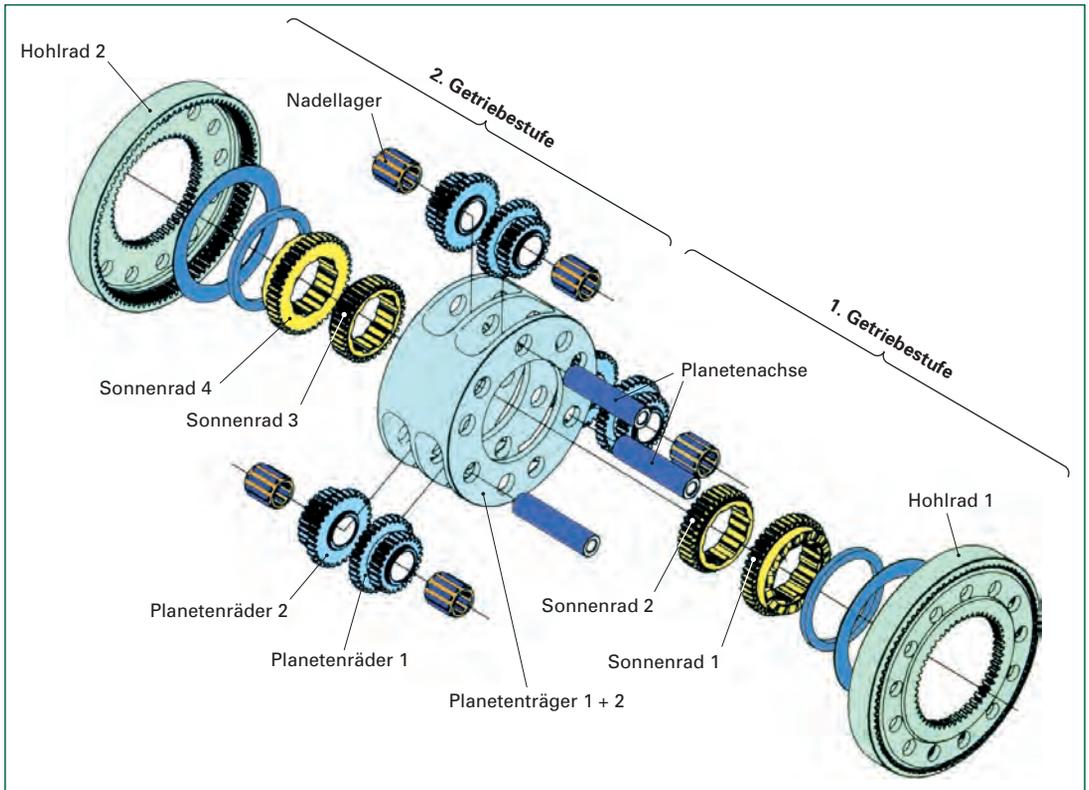
Gang	1	2	3	4	5	6	7	8
1:	1,9	1,55	1,34	1,18	1	0,82	0,71	0,62
$i$	0,527	0,644	0,748	0,851	1	1,223	1,419	1,615



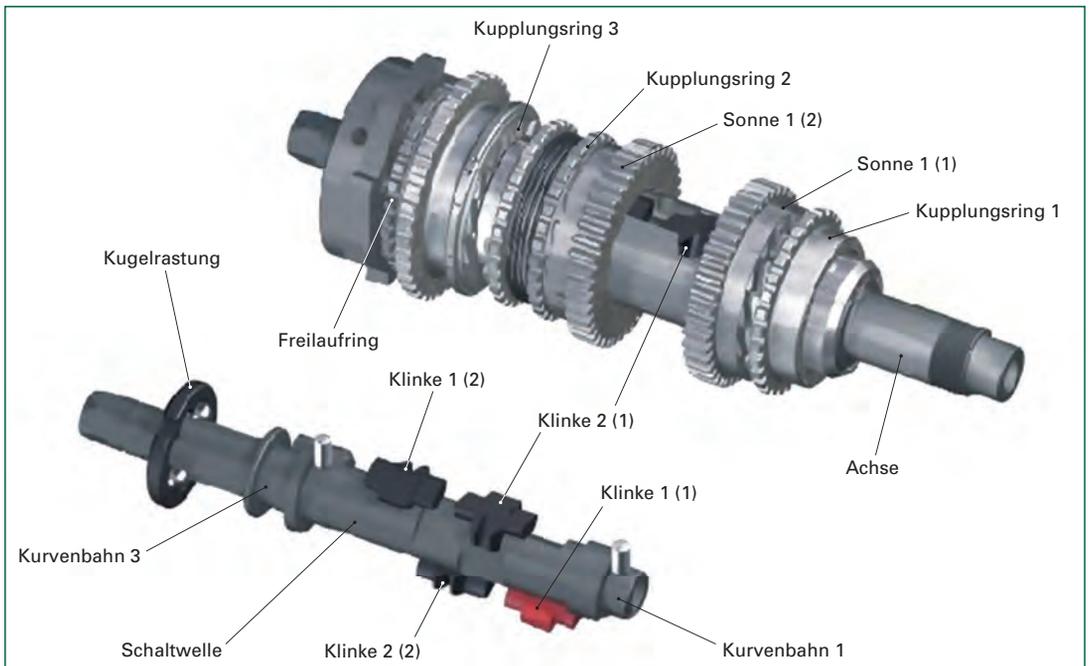
**Bild 1:** Kraftverlauf im kleinen Schnellgang der Siebengang-Nabenschaltung von SRAM



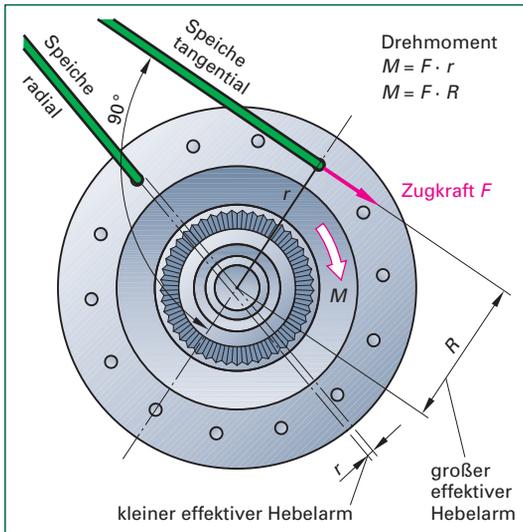
**Bild 2:** Achtgang-Nabenschaltung von Shimano Nexus Inter 8



**Bild 1: 14-Gang-Nabenschaltung. 7 Gänge mit zwei Planetengetrieben in einem Planetenträger**



**Bild 2: Schaltfunktion mit Achse, Schaltwelle, Kupplungselementen und Sonnenrädern. Ziffern in der Klammer bedeuten Getriebestufe 1 oder 2. Die mittleren Sonnenräder sind nicht dargestellt.**



**Bild 1: Zugspeiche im Antriebsrad**

Für Speichenlaufräder mit Nabenbremsen (das sind Rücktrittsbremsen, Trommelbremsen, Rollenbremsen oder Scheibenbremsen) gilt prinzipiell das gleiche wie für Antriebsräder. Hier wirken die Bremskräfte tangential – nur in umgekehrter Richtung wie beim Antriebsrad und zwar sowohl für das Vorderrad als auch für das Hinterrad.

Bei einer radialen Einspeichung tendieren die Speichen bei jeder tangentialen Belastung sich 90° zum Nabenflansch auszurichten. Durch stetig wechselnde Belastungen können sich die Speichennippel lösen oder die Speiche brechen.

Deshalb sollte man von einer radialen Einspeichung an scheibengebremsten Laufrädern und an der Antriebsseite des Hinterrades absehen.

**3. Beispiel:**

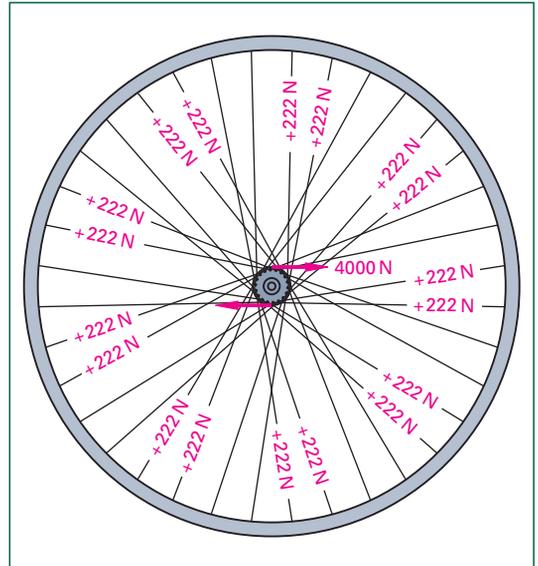
Beim kräftigen Bergantritt mit einer angenehmen Pedalkraft von 1000 N wirkt der 170 mm lange Kurbelarm als Hebel und verdoppelt die Kraft auf die Kette, wenn diese auf einem 42er Kettenblatt (Teilkreisradius 85 mm) aufliegt.

Die Kette leitet die Kraft auf ein 22er Ritzel. Da dessen Teilkreisradius mit 44,5 mm doppelt so groß ist wie der Teilkreisradius der Speichenlöcher einer Niederflansch-Hinterradnabe, wird die Kraft bei tangentialer Speichenausrichtung noch einmal verdoppelt:

$$2 \cdot 2 \cdot 1000 \text{ N} = 4000 \text{ N}$$

Am Speichenlochkreis liegen 4000 N an. Diese Kraft wird von den 18 nach links abgewinkelten Speichen aufgenommen (**Bild 2**).

- Jede der 18 Speichen trägt dabei eine Zusatzlast von 4000 N : 18 = 222 N.
- Mit 1000 N Ausgangsvorspannung und 222 N Zusatzlast ergibt sich für die 18 Zugspeichen eine Zugkraft von 1222 N. Dieser Betrag liegt noch um den Faktor 2 unter der Bruchlast von Speichen.
- Die restlichen 18 Speichen werden um jeweils 222 N entlastet. Ihre Ausgangsvorspannung geht auf 778 N zurück.



**Bild 2: Antriebsbelastung durch Verdrehkräfte**

**8.2.3 Seitenbelastung**

Im Wiegetritt (**Bild 1, Seite 324**) wird das Fahrrad schräg gehalten und im Stehen getreten. Dabei wirken Seitenkräfte bis zu 300 N auf das Hinterrad. Das Hinterrad widersteht diesen Kräften durch die Schrägstellung seiner Speichen, wobei die Horizontalkomponente der Speichenzugkraft zum Tragen kommt.

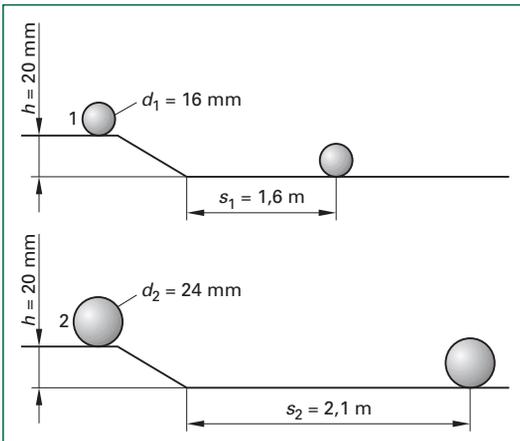
Bei Standardnaben und 28-Zoll-Felgen beträgt der Speichenwinkel etwa 4° auf der Zahnkranzseite des Hinterrades und 7° auf der Gegenseite. Die Horizontalkomponente errechnet sich nach:

$$F_h = F_{Sp} \cdot \sin \alpha$$

$F_h$  → Horizontaler Anteil der Speichenzugkraft in N

$F_{Sp}$  → Ausgangsvorspannung in N

$\alpha$  → Speichenschrägwinkel



**Bild 1:** Bestimmung der Abrollwiderstandszahl  $c_R$

Der Quotient  $e/r$  bezeichnet die Abrollwiderstandszahl  $c_R$ .

$$c_{R1} = \frac{0,2 \text{ mm}}{8 \text{ mm}} = 0,025$$

$$c_{R2} = \frac{0,23 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} \approx 0,019$$

Diese Rechnung kann man auch auf rollende Räder übertragen. Daraus folgt, dass mit steigender Radgröße der Abrollwiderstand kleiner wird.

Bei einem Versuch zur Bestimmung des Abrollwiderstandes wurden gemessen: Radradius  $r = 335 \text{ mm}$ , Vorderradlast  $F_V = F_N = 300 \text{ N}$ , Hebelarm  $e = 5 \text{ mm}$  (**Bild 2, Seite 511**).

Bestimmen Sie

- den Abrollwiderstand  $F_r$  und
- die Abrollwiderstandszahl  $c_R$ .

$$a) F_r = F_N \cdot \frac{e}{r} = 300 \text{ N} \cdot \frac{5 \text{ mm}}{335 \text{ mm}} = 4,5 \text{ N}$$

$$b) c_R = \frac{e}{r} = \frac{5 \text{ mm}}{335 \text{ mm}} = 0,015$$

### Luftwiderstand

Der Luftwiderstand wird hervorgerufen durch den Druckunterschied zwischen der Stirnfläche und der Rückseite des Radfahrers (**Bild 2**).

Der Luftwiderstand ist abhängig von der Luftdichte  $\rho$ , der wirksamen Stirnfläche  $A$ , der Fahrgeschwindigkeit  $v$  und der Körperform, der durch den Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  berücksichtigt wird. Der  $c_w$ -Wert wird durch Versuche im Windkanal ermittelt. Für einen aufrecht fahrenden Radfahrer auf einem Straßenrad nimmt man einen  $c_w$ -Wert von 1,1 an. Bei Gegenwind ist zu der Fahrgeschwindigkeit die Windgeschwindigkeit zu addieren, bei Rückenwind ist sie zu subtrahieren.



**Bild 2:** Luftwiderstand beim Radfahren

Die Formel zur Berechnung des Luftwiderstandes lautet:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot v^2$$

Die Luftdichte  $\rho$  wird mit dem mittleren Wert von  $1,3 \text{ kg/m}^3$  eingesetzt, die Geschwindigkeiten in  $\text{m/s}$  umgerechnet.

Ein Rennradfahrer mit einer Stirnfläche von  $0,38 \text{ m}^2$  und einem  $c_w$ -Wert von 0,88 fährt mit einer Geschwindigkeit von  $36 \text{ km/h}$ .

Bestimmen Sie den Luftwiderstand bei Windstille.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot v^2$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot 1,3 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,38 \text{ m}^2 \cdot 0,88 \cdot (10 \text{ m/s})^2$$

$$F_L = 21,7 \text{ N}$$

Bestimmen Sie den Luftwiderstand eines aufrecht fahrenden Tourenradfahrers ( $A = 0,6 \text{ m}^2$ ,  $c_w = 1,1$ ), der bei einer Geschwindigkeit von  $20 \text{ km/h}$  einen Gegenwind von  $15 \text{ km/h}$  überwindet.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_w \cdot v^2$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot 1,3 \text{ kg/m}^3 \cdot 0,6 \text{ m}^2 \cdot 1,1 \cdot (5,6 \text{ m/s} + 4,2 \text{ m/s})^2$$

$$F_L = 41,2 \text{ N}$$

### Steigungswiderstand

Beim Befahren einer Steigung muss der Radfahrer mit seiner Antriebskraft  $F_A$  den Steigungswiderstand  $F_{St}$  überwinden (**Bild 1, Seite 513**). Der Steigungswiderstand  $F_{St}$  hängt von dem Gewicht des Systems  $F_G$  (Rad + Fahrer) und dem Steigungswinkel  $\alpha$  ab. Statt des Steigungswinkels kann man auch die Steigung  $p$  in % angeben:

$$F_{St} = m \cdot g \cdot \sin \alpha = F_G \cdot \sin \alpha \approx F_G \cdot \frac{p}{100 \%}$$

## Projektaufgabe Rücktrittbremse

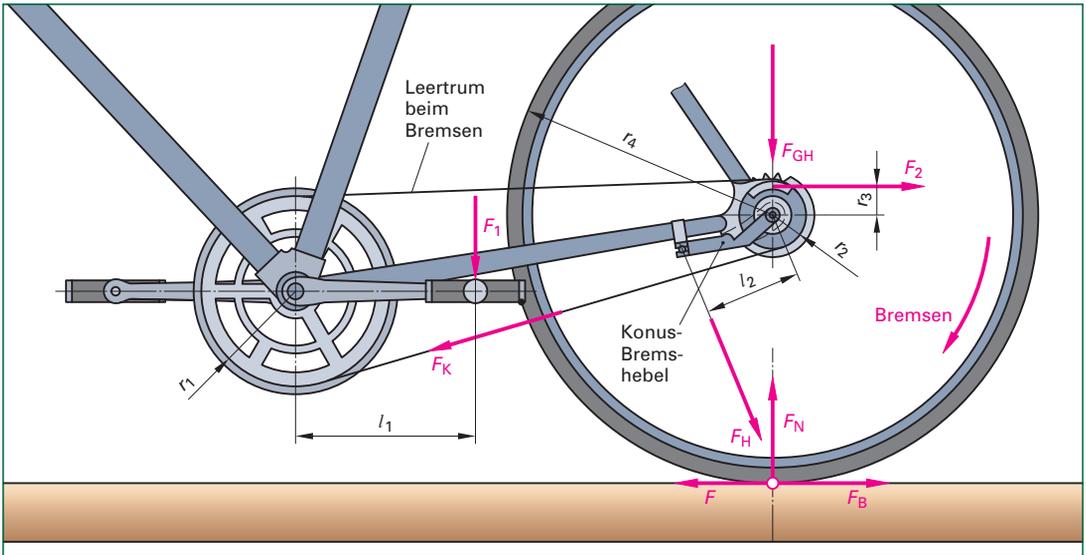


Bild 1: Projekt Rücktrittbremse

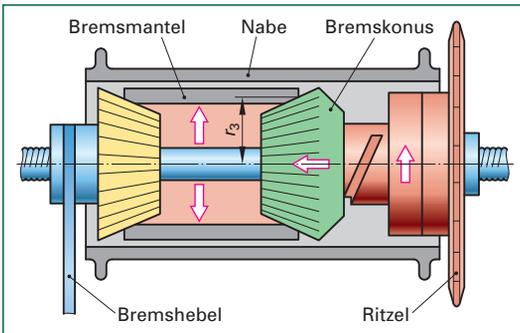


Bild 2: Schema Rücktrittbremse

1. Ein Radfahrer betätigt die Rücktrittbremse mit einer Pedalkraft von  $F_1 = 350 \text{ N}$  (Bild 1). Die Länge der Tretkurbel beträgt  $l_1 = 170 \text{ mm}$ . Wie groß ist das Drehmoment  $M_1$  in der Tretlagerwelle?

$$M_1 = F_1 \cdot l_1 = 350 \text{ N} \cdot 0,17 \text{ m} \approx 60 \text{ Nm}$$

2. Das Kettenblatt mit  $z_1 = 46$  Zähnen hat einen Teilkreisradius von  $r_1 = 93 \text{ mm}$ . Bestimmen Sie die Zugkraft  $F_K$  in der Kette.

$$F_K = \frac{M_1}{r_1} = \frac{60 \text{ Nm}}{0,093 \text{ m}} = 645 \text{ N}$$

3. Die Zahnzahl des Ritzels auf der Hinterradnabe beträgt  $z_2 = 19$  mit einem Teilkreisradius von  $r_2 = 39 \text{ mm}$ .

Wie groß ist das Drehmoment  $M_2$  in der Rücktrittnabe?

$$M_2 = F_K \cdot r_2 = 645 \text{ N} \cdot 0,039 \text{ m} = 25 \text{ Nm}$$

Über die Zähnezahlen kann das Moment in der Rücktrittnabe auch so ausgerechnet werden:

$$M_2 = M_1 \cdot \frac{z_2}{z_1} = 60 \text{ Nm} \cdot \frac{19}{46} \approx 25 \text{ Nm}$$

Das Fahrradgetriebe ist ein Drehmomentwandler.

4. Der wirksame Radius des Bremskonus beträgt  $r_3 = 30 \text{ mm}$ .

Wie groß ist die Reibkraft  $F_2$  innerhalb der Bremse?

Die Reibungszahl zwischen dem Bremskonus und dem Bremsmantel soll 1 betragen (100 % Kraftübertragung, siehe Bild 2). Bei kleineren Reibungszahlen wird auch die Reibkraft kleiner.

$$F_2 = \frac{M_2}{r_3} = \frac{25 \text{ Nm}}{0,03 \text{ m}} = 833 \text{ N}$$

Das Bremsmoment muss sich am Rahmen abstützen, damit es auf die Straße übertragen werden kann.

5. Wie groß ist die Abstützkraft  $F_H$  an der Hinterradgabel, wenn der Festkonus-Bremshebel eine wirksame Länge von  $l = 80 \text{ mm}$  aufweist?

$$F_H = \frac{M_2}{l_2} = \frac{25 \text{ Nm}}{0,08 \text{ m}} \approx 313 \text{ N}$$