



EUROPA-FACHBUCHREIHE  
für Kraftfahrzeugtechnik

# Fachkunde Fahrradtechnik

**7. Auflage**

Bearbeitet von Gewerbelehrern, Ingenieuren, Sachverständigen und  
Zweiradmechanikermeistern

**Lektorat: Jens Leiner, Bremen**

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

**Europa-Nr.: 22917**

## Autoren der Fachkunde Fahrradtechnik

Brust, Ernst	Schweinfurt
Gressmann, Michael	Borken (He)
Herkendell, Franz	Bonn
Leiner, Jens	Bremen
Lessing, Hans-Erhard	Koblenz
Muschweck, Oliver	Feucht

## Leitung des Arbeitskreises und Lektorat

Jens Leiner

## Bildbearbeitung

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

Der Verlag und die Autoren bedanken sich bei Herrn Dipl.-Ing. Robert Bastian, Herrn Martin Hillmeier, Herrn Dipl.-Ing. Thomas Mertin und Herrn Dipl.-Ing. Dirk Zedler für hilfreiche Anregungen und Korrekturen.

Folgende Institutionen halfen mit Informationen bei der Erstellung des Buches:

AVK Industrievereinigung verstärkte Kunststoffe e. V., Frankfurt a. M.

Freudenberg Simrit GmbH & Co. KG, Weinheim

Gesellschaft Tribologie e. V., Aachen

Klüber Lubrication KG, München

schaeffler technologies GmbH & Co KG, Herzogenaurach

Toho Tenax Europe GmbH, Neustadt/Weinstraße

7. Auflage 2019, korrigierter Nachdruck 2020

Druck 5 4 3 (keine Änderung seit der 2. Druckquote)

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Korrektur von Druckfehlern identisch sind.

ISBN 978-3-8085-2304-9

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

© 2019 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten  
[www.europa-lehrmittel.de](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: mediaprint solutions GmbH, 33100 Paderborn

Das „Fachkundebuch Fahrradtechnik“, vermittelt die wesentlichen Fachkenntnisse, die für die betriebliche Ausbildung der Zweiradberufe notwendig 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 von motorisierten Zweirädern wird auf die Bücher „Fachwissen E-Bike“ und „Fachkunde Motorradtechnik“ verwiesen.

Das vorliegende Fachbuch begleitet die Auszubildenden während ihrer Ausbildung. Es ist aber auch für den zukünftigen Meister und Servicetechniker ein wichtiger Begleiter in Theorie und Praxis und sollte als Nachschlagewerk in keiner Werkstattbibliothek des Zweiradhandwerks fehlen. Ebenso wird der interessierte Laie in dem Buch eine Menge von Hilfen und Anregungen für sein Hobby finden.

Für die **neue Auflage** erfuhren fünf Kapitel eine vollständige Überarbeitung. Diese Überarbeitung war notwendig, um dem aktuellen Stand des Wissens gerecht zu werden und um überholte Lehrmeinungen innerhalb der Fahrradbranche zu korrigieren: Das **Kapitel 2 „Geschichte des Fahrrades“** behandelt jetzt neben technischen auch kulturhistorische Aspekte, die für die Entwicklung des Fahrrades relevant sind. Im **Kapitel 3 „Fahrradbauarten“** wird die Bandbreite der Entwicklungen und Anwendungszwecke von Fahrrädern anhand von ca. 60 Beispielen illustriert. Das **Kapitel 6 „Räder“** erfuhr eine stärker maschinenbauliche Darstellung der Technik von Nabens, Speichen, Rädern und Reifen. Die aktuellen Erkenntnisse über das Zusammenspiel von Biomechanik und Maschinentechnik zeigt das ebenfalls vollkommen neu gestaltete **Kapitel 11 „Ergonomie“**. Neu hinzugefügt wurde **Kapitel 19 „Terminologie“**. Darin werden einige Begriffe und Bezeichnungen erläutert und richtig gestellt, die fachlich mehrdeutig, irreführend oder falsch sind.

Besondere Beachtung sollte der Leser auch dem **Kapitel 5.5 „Rahmenfügen“** schenken, das umfangreiche Informationen über CFK- (Carbon-) Fahrradbauteile enthält und typische Schadensbilder sowie praktikable Prüfverfahren vorstellt.

Entfallen sind das Kapitel über Antriebssysteme mit Verbrennungsmotoren und das Kapitel über die Wirtschaftskunde.

Wenn im vorliegenden Fachbuch die Rede von 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.

## Bildquellenverzeichnis

- A. Dugast**, NL-Denekamp, [311-2]
- ADP Engineering GmbH**, Dieburg, (Rotwild), [108-1 bis 3, 109-1]
- Advanced Sports GmbH**, Mutlangen, (Fuji), [107-2]
- AeroVelo**, CA-Toronto, [116-1]
- Bevys Leichtfahrzeuge**, Straelen, [115-2]
- Bike Trial Sport**, Königsbach-Stein, (Jitsie), [109-3]
- BMC Switzerland AG**, CH-Grenchen, [105-2, 106-2, 180-2 bis 181-1]
- Britax Römer Kindersicherheit GmbH**, Lepheim, [424-1, 424-2]
- Bullmer GmbH**, Heutal 7, 72537 Mehrstetten, [182-3]
- Busch & Müller KG**, Meinerzhagen, [414-1 bis 416-4]
- c2g-engineering GmbH**, Berlin, (Schindelhauer Bikes), [342-3, 343-1, 343-2]
- Campagnolo Deutschland GmbH**, Leverkusen, [325-4]
- Christiania Cykler**, DK-Kopenhagen, [117-1]
- Ciclofan s.n.c.**, IT-Saludocio, [121-2]
- Conferencebike**, US-San Francisco, [120-1]
- Continental AG**, Korbach, [307-1, 312-2, 313-1a]
- Cosmic Sports GmbH**, Fürth, (Salsa, Surly), [107-1, 110-1]
- Cycling Sports Group Europe B.V.**, NL-Oldenzaal, (GT), [53-1]
- Douglas Philip**, CH-Maschwanden [181-3, 183-1 bis 183-3, 183-5]
- dpa Picture-Alliance GmbH**, Frankfurt, [125-2]
- Edevis GmbH**, Handwerkstr. 55, 70565 Stuttgart, [190-2]
- Electric Bike Solutions GmbH**, Heidelberg, (Yuba), [116-4]
- ElliptiGO Deutschland – 3000watt GmbH**, Bielefeld, [124-3]
- ENVE Composites**, US-Ogden, [290-1]
- Fahrradbau Stoltz**, Hofwiesenstraße 200, CH-8057 Zürich, [170-2, 171-1, 174-1]
- Fallbrook Technologies Inc.**, NL-Zwolle, (Enviolo), [360-1 bis 360-3, 370-2]
- Fateba AG**, CH-Winterthur, [113-2]
- Felt Bicycles**, US-Esperanza, [120-2]
- FOX Factory GmbH**, Rodalben, (Marzocchi), [279-3]
- Garmin Deutschland GmbH**, Garching, [432-2]
- Gazelle**, Mönchengladbach, [101-1, 103-3, 107-3]
- GMA-Werkstoffprüfung GmbH**, Julius-Leber-Weg 24, 21684 Stade, [186-1, 187-1, 189-2]
- Grofa Action Sports GmbH**, Bad Camberg, (Parktool, Profile Design), [13-2, 493-1, 493-3, 494-2 bis 496-1, 496-3 bis 499-1, 499-4, 499-5, 450-2]
- Haberstock Mobility GmbH**, Lauchringen, (Schlumpf), [371-2]
- Hase Bikes**, Waltrop, [114-2, 119-1, 122-3]
- Hercules GmbH**, Köln, [102-2, 102-3]
- Herkendell Franz**, Bonn [14-3, 15-4, 23-1, 23-2 , 46-2, 58-1, 70-1 bis 4, 71-1 bis 4, 72-1 bis 4, 73-1 bis 4, 142-3, 180-1, 181-2, 182-1, 182-2, 183-4, 188-2 bis 189-1, 190-1, 191-3 bis 199-2, 203-1 bis 203-3, 209-1, 212-2, 217-4, 218-1, 221-2, 221-3, 226-3, 229-2, 286-2, 300-1, 329-1, 336-5, 356-1, 381-2, 390-3, 394-2, 401-1, 402-1, 422-2, 427-4, 432-1, 440-1, 447-2, 448-1, 453-1, 475-3 bis 481-1, 483-1 bis 487-1, 488-1, 503-1]
- HP Velotechnik OHG**, Krifte, [115-1]
- Hutchinson SA**, FR-Paris, [309-4b]
- Invacare GmbH**, Isny, (TopEnd), [122-4]
- Joy Industrial Co., Ltd.**, TW-Taichung City, (Novatec), [273-1]
- Kemper**, Erkelenz-Grabmusch, [116-2]
- Kickbike Worldwide Ltd.**, FI-Helsinki, [123-3 und 124-1]
- Kleinebenne GmbH**, Leopoldshöhe, (Patria), [103-2]
- KMC Chain Europe BV**, NL-Heerenveen, [493-2]
- Kris Holm Unicycles Ltd.**, CA-Vancouver, [269-3]
- Leiner Jens**, Bremen [123-1, 294-1, 313-2, 405-1]
- Lessing Hans-Erhard**, Koblenz [98-1 bis 100-2]
- Magura**, Bad Urach, [389-2, 390-1, 397-1]
- Michelin**, FR-Clermont-Ferrand, [314-1]
- Merida & Centurion Germany GmbH**, Magstadt, (Merida), [106-1, 178-4]
- Miche**, IT-San Vendemiano, [269-1b]
- P&K Lie GmbH**, Horst, [493-5]
- Paul Lange & CO. OHG**, Stuttgart, (Shimano), [269-4, 325-2, 325-3, 327-1, 353-2 bis 355-2, 369-1, 369-4, 373-2, 374-1, 388-1, 437-3]
- Pedalpower Schönstedt & Busack GbR**, Berlin, [116-3]
- Pentagon Sports GmbH & CO. KG**, Ellwangen, (Tannus), [309-4a]
- Pinion GmbH**, Denkendorf, [371-1]
- PUKY GmbH & Co. KG**, Wülfrath, [117-4]
- QU-AX GmbH**, Herzebrock-Clarholz, [112-2]
- r2-bike.com**, Dresden, [301-1, 301-2]
- RA-CO GmbH**, Erfurt, (Cyclus Tools, Tufo), [16-3, 36-6, 202-1, 309-1, 327-2, 327-3, 399-2, 493-4, 494-1, 496-2, 499-2, 499-3]
- Ralf Bohle GmbH**, Reichshof, (Schwalbe), [129-1, 304-2, 306-1, 309-2, 313-1b]
- Rebour Daniel**, entnommen aus: F. Berto / R. v.d. Plas; Rebours; San Francisco; 2013 [563-1]
- Retül Bikefitting**, US-Boulder, [437-2]
- Riese & Müller GmbH**, Weiterstadt, [104-2, 113-1]
- Rohloff AG**, Fulldatal, [9-1, 275-3 bis 276-2, 288-1, 357-2, 358-1, 370-1]
- RTI Sports GmbH**, Koblenz, (Ergon, Topeak), [317-1, 446-2]
- Schwinn**, US-Chicago, [121-3]
- Selle Royal**, IT-Pozzoleone, (Brooks), [22-2]
- SitGo VOF**, NL-Zevenaar, [125-1]
- SKS metaplast Scheffer-Klute GmbH**, Sundern, [426-1, 426-3]
- Snike Sport GmbH i.L.**, Stuttgart, (Snaix), [123-2]
- Soma Fabrications**, US-San Francisco, [269-1a]
- Speedone**, TW-Taichung City, [121-3]
- Sports Nut GmbH**, Kirchentellinsfurt, (NS Bikes), [109-2]
- SQLab GmbH**, Taufkirchen, [448-3]
- SRAM Deutschland**, Schweinfurt, [45-1, 57-2, 60-4, 330-1, 369-2, 369-3, 370-3, 374-4, 388-2, 396-1]
- Stahlwille**, Wuppertal, [19-1 bis 4, 21-1, 21-2, 482-1]
- Stevens Vertriebs GmbH**, Hamburg, [105-1, 106-3]
- Streetstepper GmbH**, Schorndorf, [124-2]
- Toxy Liegerad GmbH**, Wrist, [113-3, 114-1]
- TPW Prüfzentrum GmbH**, Xantener Str. 6, 41460 Neuss, [191-2]
- Universal Transmissions GmbH**, Elze, (Gates Carbon Drive), [342-4, 343-3]
- Utopia Velo**, Saarbrücken, (Utopia, Pedersen Manufaktur), [102-1, 165-3, 166-2]
- VanMoof**, Berlin, [103-1]
- velotech.de GmbH**, Schweinfurt, [47-3, 513-1 bis 516-1]
- Velotraum GmbH + Co.KG**, Weil der Stadt, [104-1, 118-1, 228-2, 386-1]
- Weiler Werkzeugmaschinen GmbH**, Emskirchen/Mausdorf, [42-1]
- Wethepeople Bike Company – We Make Things GmbH**, Köln, [110-2, 111-1]
- Wippermann junior GmbH**, Hagen, (Connex), [340-5]
- Wulffhorst GmbH**, Gütersloh, [122-2]

Von den Firmen vertretene Marken, soweit nicht aus dem Firmennamen ersichtlich, werden in () genannt, die Bildnachweise befinden sich in [].

<b>1</b>	<b>Technische Grundlagen</b>		<b>9</b>	<b>3</b>	<b>Fahrradbauarten</b>	101
1.1	Prüfen und Messen		9	3.1	Alltagsfahrräder	101
1.1.1	Grundbegriffe und Definitionen		9	3.2	Sportfahrräder	105
1.1.2	Messen	10	3.3	Sessel- und Liegefahrräder	112	
1.1.3	Messabweichungen	10	3.4	Lastenfahrräder	116	
1.1.4	Prüfmittel	11	3.5	Kinderfahrräder	117	
<b>1.2</b>	<b>Maschinenelemente</b>	14	<b>3.6</b>	<b>Mehrpersonenfahrräder</b>	118	
1.2.1	Schraubverbindungen und Gewinde	14	<b>3.7</b>	Show-Bikes	120	
1.2.2	Nietverbindungen	22	<b>3.8</b>	Weitere Bauarten	121	
1.2.3	Bolzen- und Stiftverbindungen	23	3.8.1	Minivelo	121	
1.2.4	Lager	24	3.8.2	Tallbike	121	
1.2.5	Dichtungen	26	3.8.3	Dreirad, Handtrike	122	
<b>1.3</b>	<b>Fertigungsverfahren</b>	28	3.8.4	Knicklenker	123	
1.3.1	Grundlagen des Spanens	28	3.8.5	Roller	123	
1.3.2	Sägen	29	3.8.6	Tretroller, Wipproller	124	
1.3.3	Feilen	30	3.8.7	Laufmaschinen	125	
1.3.4	Bohren, Senken und Reiben	31	3.8.8	Schienenfahrräder	125	
1.3.5	Gewinde und Gewindeschneiden	38				
1.3.6	Spanende Fertigung mit Werkzeugmaschinen	41	<b>4</b>	<b>Elektrofahrräder</b>	126	
1.3.7	Scherschneiden	43	<b>4.1</b>	Typen von Elektro-Zweirädern	126	
1.3.8	Biegen von Blechen	43	<b>4.2</b>	Komponenten von Elektrofahrrädern	128	
1.3.9	Biegen von Rohren	44	<b>4.3</b>	Antriebsarten und Einbauort von Motoren	130	
<b>1.4</b>	<b>Werkstofftechnik</b>	45	<b>4.4</b>	Gleichstrommotoren	134	
1.4.1	Eigenschaften von Werkstoffen	45	4.4.1	Funktion und Aufbau von Kollektormotoren	134	
1.4.2	Stahl	48	4.4.2	Fachbegriffe, Definitionen und Kennlinien	135	
1.4.3	Aluminium	51	4.4.3	Bauarten von Gleichstrommotoren	138	
1.4.4	Titan	54	<b>4.5</b>	Antriebssteuerung	141	
1.4.5	Magnesium	55	<b>4.6</b>	Sensoren	143	
1.4.6	Faserverstärkte Werkstoffe	56	<b>4.7</b>	Bedienung und Display	145	
<b>1.5</b>	<b>Tribologie und Verschleiß</b>	61	<b>4.8</b>	Energierrückgewinnung	146	
1.5.1	Tribologisches System	61	<b>4.9</b>	Akkus	147	
1.5.2	Reibung	63	4.9.1	Elektrochemische Spannungs- erzeugung	147	
1.5.3	Oberflächen metallischer Bauteile	66	4.9.2	Bauarten von Akkus	148	
1.5.4	Verschleiß	66	4.9.3	Ladegeräte, Akkupack und Kennwerte	151	
1.5.5	Tribochemische Reaktionen	69	4.9.4	Bauformen von Lithium-Ionen-Akkus	153	
<b>1.6</b>	<b>Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik</b>	74	4.9.5	Batterie-Management-System	153	
1.6.1	Elektrische Größen	74	4.9.6	Umgang mit Lithium-Ionen-Akkus	155	
1.6.2	Berechnung elektrischer Größen	76	4.9.7	Montageorte von Akkus	156	
1.6.3	Messen elektrischer Größen	77				
1.6.4	Schaltungen	78	<b>5</b>	<b>Fahrwerk</b>	157	
1.6.5	Bauelemente	78	<b>5.1</b>	Kräfte und Momente am Fahrradrahmen	157	
<b>1.7</b>	<b>Steuerungs- und Regelungstechnik</b>	89	5.1.1	Vertikalkräfte	157	
1.7.1	Steuern	89	5.1.2	Horizontalkräfte	158	
1.7.2	Regeln	89	5.1.3	Seitenkräfte	159	
1.7.3	EVA-Prinzip	91	5.1.4	Biegemomente	160	
1.7.4	Signalarten	91	<b>5.2</b>	Rahmentest	161	
1.7.5	Signalweg	92	<b>5.3</b>	Rahmenbauarten	163	
1.7.6	Steuerungsarten	92				
1.7.7	Verknüpfungen	95				
<b>2</b>	<b>Geschichte des Fahrrades</b>	98				

<b>5.4</b>	Rohrherstellung	167	<b>6.4</b>	Vorschriften und Prüfverfahren	267
5.4.1	Stahlrohre	167	<b>6.5</b>	Naben	267
5.4.2	Aluminiumrohre	168	6.5.1	Naben ohne Zusatzeinrichtungen	268
5.4.3	Rohre aus CFK	169	6.5.2	Antriebsnaben	268
5.4.4	Rohrverfeinerungen	169	6.5.2.1	Ritzel	268
5.4.5	Zuschneiden der Rohre	170	6.5.2.2	Freilaufkupplungen	270
<b>5.5</b>	Rahmenfügen	171	6.5.2.3	Antriebsvarianten	273
5.5.1	Löten	171	6.5.3	Nabenflansch	274
5.5.2	Schweißen	176	6.5.4	Nabenlagerung	276
5.5.3	Kleben	179	6.5.5	Nabenabdichtung	278
5.5.4	Herstellen von CFK-Rahmen	180	6.5.6	Nabenklemmung	278
5.5.5	CFK-Schäden und Prüfverfahren	184	<b>6.6</b>	Felgen	280
<b>5.6</b>	Rahmengeometrie	195	6.6.1	Reifenaufnahme	280
5.6.1	Rahmhöhe und -länge	195	6.6.2	Felgenprofile	281
5.6.2	Radstand und Fußfreiheit	196	6.6.3	Werkstoffe und Herstellung von Felgen	284
5.6.3	Kurbellagerhöhe und Bodenfreiheit	197	6.6.4	Felgenbohrungen	284
5.6.4	Nachlauf, Rücksprung und Absenkung	198	6.6.5	Felge als Bremsscheibe	285
5.6.5	Einfluss auf das Fahrverhalten	200	<b>6.7</b>	Vorgespannte Speichen	286
<b>5.7</b>	Kontrolle von Rahmen und Gabeln	201	6.7.1	Material, Herstellung	286
<b>5.8</b>	Rahmen- und Gabel-Anbauteile	204	6.7.2	Speichenbauarten	287
<b>5.9</b>	Lenkung	207	6.7.3	Speichennippel	289
5.9.1	Gabel	207	6.7.4	Speichenbelastung	290
5.9.2	Lenkungslager	210	6.7.5	Einspeicharten	292
5.9.3	Vorbau	214	6.7.6	Speichenlänge	296
5.9.4	Lenker	217	6.7.7	Einspeichverfahren	297
<b>5.10</b>	Sattel und Sattelstütze	223	6.7.8	Spannen und Zentrieren	299
5.10.1	Sattel	223	6.7.9	Korrosion an Speichen und Nippel	301
5.10.2	Sattelstütze	225	6.7.10	Speichen binden und verlöten	302
<b>5.11</b>	Fahrradfederung	227	6.7.11	Fachgerechter Radbau	303
5.11.1	Aufgaben der Fahrradfederung	227	6.7.12	Systemlaufräder	303
5.11.2	Das ungedefierte Fahrrad	227	<b>6.8</b>	Reifen	304
5.11.3	Elemente der Federung und Dämpfung	229	6.8.1	Reifenaufbau	304
5.11.4	Federung	230	6.8.2	Vulkanisieren	306
5.11.5	Dämpfung	234	6.8.3	Bauarten von Reifen	306
5.11.6	Feder-Dämpfertechnologie	239	6.8.4	Kraftübertragung des Reifens	310
5.11.7	Einzelheiten von Federungen	242	6.8.5	Reifenschlauch	313
5.11.8	Ausführungen von Federungen	245	6.8.6	Felgenband	314
5.11.9	Physik der Fahrradfederung	252	6.8.7	Schlauch- und Reifenreparatur	314
			6.8.8	Fahrradventile	315
			6.8.9	Größenbezeichnungen von Reifen	317
			6.8.10	Reifendruck und Karkassenspannung	319
			6.8.11	Rolleigenschaften von Reifen	321
<b>6</b>	<b>Räder</b>	259	<b>7</b>	<b>Antrieb</b>	324
<b>6.1</b>	Scheibenrad	259	<b>7.1</b>	Pedalbewegungen	324
<b>6.2</b>	Ungespanntes Speichenrad (Druckspeichenrad)	260	<b>7.2</b>	Kurbelsatz	324
<b>6.3</b>	Vorgespanntes Speichenrad (Zugspeichenrad)	261	7.2.1	Verbindung Kurbelarm-Kurbelwelle	324
6.3.1	Kräfte am vorgespannten Rad	261	7.2.2	Kurbellager (Innenlager)	326
6.3.2	Radiale Kräfte	261	7.2.3	Kurbeln und Kettenräder	328
6.3.3	Tordierende Kräfte	262	7.2.4	Kurbellänge	330
6.3.4	Laterale Kräfte	264	7.2.5	Trittweite	330
6.3.5	Zusammenfassung der Kräfte	265	7.2.6	Kettenlinie	331
6.3.6	Steifigkeit eines Rades	265			

<b>7.3</b>	Pedale	332	<b>10.4</b>	Fahrradständer	424
7.3.1	Pedalgewinde	332	<b>10.5</b>	Glocke	425
7.3.2	Pedalprüfung	333	<b>10.6</b>	Luftpumpe	426
7.3.3	Pedallagerung	334	<b>10.7</b>	Fahrradschlösser	427
7.3.4	Pedalausführungen	334	<b>10.8</b>	Anhänger	428
<b>7.4</b>	Antriebskette	337	<b>10.9</b>	Fahrradcomputer	429
7.4.1	Aufbau einer Antriebskette	337	<b>10.10</b>	Elektrische Spannungsversorgung für Mobilgeräte	431
7.4.2	Kettenreibung und Kettenverschleiß	338	<b>10.11</b>	GPS-Navigation	432
7.4.3	Kettenfügen	339	<b>10.12</b>	Helm	433
7.4.4	Kettenlänge bei Kettenschaltungen	340	<b>10.13</b>	Sicherheitszelle	434
<b>7.5</b>	Zahnriemen	342			
<b>7.6</b>	Fahrradschaltungen	344			
7.6.1	Nabenschaltungen	344			
7.6.2	Kettenschaltungen	362	<b>11</b>	<b>Ergonomie und Anpassung</b>	435
7.6.3	Schalthebel	367	<b>11.1</b>	Anpassungsbereich	435
7.6.4	Weitere Schaltsysteme	370	<b>11.2</b>	Anpassungsmethoden	436
			<b>11.3</b>	Messmethoden	438
			<b>11.4</b>	Sitzpositionen	439
<b>8</b>	<b>Bremsen</b>	375	11.4.1	Effektive Sitzlänge	439
<b>8.1</b>	Vorschriften	375	11.4.2	Sitzhöhe	440
8.1.1	Gesetzliche Vorschriften	375	11.4.3	Oberkörperhaltungen	442
8.1.2	Sicherheitstechnische Anforderungen und Prüfungen	375	<b>11.5</b>	Kontaktpunkte am Fahrrad	445
8.1.3	Kraftübertragung und Übersetzungsverhältnis	377	11.5.1	Kontaktpunkt Pedal	445
<b>8.2</b>	Bauarten von Bremsen	379	11.5.2	Kontaktpunkt Sattel	447
8.2.1	Felgenbremsen	379	11.5.3	Kontaktpunkt Lenker	448
8.2.2	Nabenbremsen	390	<b>11.6</b>	Auswahl der Rahmenhöhe	450
			<b>11.7</b>	Probefahrt im Fachhandel	451
			<b>11.8</b>	Beinmuskeln als Motor	451
<b>9</b>	<b>Beleuchtung</b>	403			
<b>9.1</b>	Gesetzliche Grundlagen	403	<b>12</b>	<b>Fahrmechanik</b>	454
<b>9.2</b>	Generator	405	<b>12.1</b>	Masse, Trägheit und Gewicht	454
9.2.1	Spannungserzeugung durch Induktion	405	<b>12.2</b>	Kraft und Gegenkraft	456
9.2.2	Generatorbauarten	406	<b>12.3</b>	Reibungskräfte	456
<b>9.3</b>	Lichtquellen	410	12.3.1	Haftreibung	457
9.3.1	Temperaturstrahler	410	12.3.2	Gleitreibung	457
9.3.2	Leuchtdioden	411	12.3.3	Rollreibung	458
<b>9.4</b>	Leuchten	413	<b>12.4</b>	Schlupf	458
9.4.1	Frontleuchte (Schweinwerfer)	413	<b>12.5</b>	Gleichgewicht	459
9.4.2	Schlussleuchte (Heckleuchte)	415	12.5.1	Labiles Gleichgewicht	459
9.4.3	Rückstrahler	416	12.5.2	Dynamisches Gleichgewicht	459
9.4.4	Standlicht	416	<b>12.6</b>	Kurvenfahrt	459
9.4.5	Verkabelung	417	<b>12.7</b>	Kreiselkräfte	461
<b>9.5</b>	Sicherheits- und Komfoseinrichtungen	417	<b>12.8</b>	Lenksystem	463
<b>9.6</b>	Fehlersuche in der Beleuchtungsanlage	419	<b>12.9</b>	Bremsen	466
			12.9.1	Grundlagen Bremsen	466
			12.9.2	Überschlagsgefahr	467
			12.9.3	Bremsen in der Kurve	468
<b>10</b>	<b>Zubehör</b>	420	<b>13</b>	<b>Oberflächenschutz</b>	469
<b>10.1</b>	Schutzblech und Kettenschutz	420	<b>13.1</b>	Lacke	469
<b>10.2</b>	Gepäckträger	422	<b>13.2</b>	Beschichtungsverfahren	469
<b>10.3</b>	Kindersitze	423	13.2.1	Nasslackierung	469

13.2.2 Pulverlackierung	470	<b>17.6</b>	Gesetzliche Vorschriften Fahrrad	508	
13.2.3 Kombinationen von Lackierungen	471	17.6.1	Die StVZO	508	
13.2.4 Elektrotauchlackierung	471	17.6.2	Bauvorschriften Fahrrad	509	
<b>13.3 Eloxieren</b>	472	17.6.3	Typprüfung Fahrrad	509	
<b>14 Schmierung, Reinigung und Pflege</b>	473	<b>17.7</b>	Sicherheitstechnische Untersuchungen	509	
<b>14.1 Schmierung</b>	473	17.7.1	Betriebslasten	509	
14.1.1 Aufgaben und Arten von Schmierstoffen	473	17.7.2	Betriebslastenermittlungen	510	
14.1.2 Schmierstoffe in der Fahrradinstandhaltung	475	17.7.3	Messfahrten und Labormessungen	511	
14.1.3 Prüfverfahren für Schmierstoffe	478	17.7.4	Prüfgrundlagen	511	
14.1.4 Alterung, Neuschmierung und Entfettung	478	17.7.5	Testverfahren, Testeinrichtungen	511	
14.1.5 Tribologische Sonderfälle in der Fahrradtechnik	479	<b>17.8</b>	Schadensbegutachtung	515	
<b>14.2 Pflege und Reinigung von Fahrradbauteilen</b>	483	17.8.1	Sach- und Körperschäden	515	
<b>14.3 Abfallentsorgung</b>	490	17.8.2	Produkt- und Instruktionsfehler	515	
14.3.1 Gesetzliche Grundlagen	490	17.8.3	Gerichts- und Privatgutachten	515	
14.3.2 Beseitigung von Abfällen in Fahrradgeschäften	490	<b>17.9</b>	Risiken	515	
<b>15 Instandhaltung, Werkzeuge</b>	492	<b>17.10</b>	Produktsicherheit Elektrofahrrad	516	
<b>16 Arbeitssicherheit</b>	500	<b>18</b>	<b>Fachrechnen und physikalisch-technologische Grundlagen</b>	517	
<b>16.1</b>	Gesetzliche Grundlagen	500	<b>18.1</b>	Längen	517
<b>16.2</b>	Sicherheitszeichen	500	<b>18.2</b>	Drehzahl	517
<b>16.3</b>	Gefahrstoffe	501	<b>18.3</b>	Geschwindigkeit	517
<b>16.4</b>	Persönliche Schutzausrüstung	502	<b>18.4</b>	Beschleunigung und Verzögerung	518
<b>16.5</b>	Unfallverhütung	503	<b>18.5</b>	Anhalteweg und Bremsweg	518
<b>17 Produktsicherheit</b>	504	<b>18.6</b>	Masse und Dichte	518	
<b>17.1</b>	Benutzerinformation für Gebrauchsgüter	504	<b>18.7</b>	Trägheit und Trägheitsmomente	520
17.1.1 Informationspflicht	504	<b>18.8</b>	Flächenmoment und Widerstandsmoment	520	
17.1.2 Informationsinhalte	504	<b>18.9</b>	Kraft	520	
17.1.3 Informationsfehler	504	<b>18.10</b>	Antriebsschlupf und Bremsschlupf	525	
<b>17.2</b>	Gewährleistung	505	<b>18.11</b>	Mechanische Arbeit	525
17.2.1 Sachmangel	505	<b>18.12</b>	Energie	526	
17.2.2 Beweislastumkehr	505	<b>18.13</b>	Leistung	526	
<b>17.3</b>	Haftung	505	<b>18.14</b>	Wirkungsgrad	528
17.3.1 Haftungsansprüche	505	<b>18.15</b>	Drehmoment	529	
17.3.2 Zivilrechtliche Produzentenhaftung	506	<b>18.16</b>	Hebel und Bremsen	529	
<b>17.4</b>	Garantie und Kulanz	506	<b>18.17</b>	Kreiselmoment und Kreiselkraft	539
<b>17.5</b>	Normen	507	<b>18.18</b>	Getriebe	539
17.5.1 Das DIN	507	<b>18.19</b>	Kurvenfahrt	545	
17.5.2 Normungsarbeit	507	<b>18.20</b>	Federung	546	
17.5.3 Sicherheitsnormen Fahrrad	507	<b>18.21</b>	Festigkeit	555	
		<b>18.22</b>	Elektrotechnik	557	
		<b>18.23</b>	Projekt Elektrofahrrad	559	
		<b>19</b>	<b>Terminologie</b>	562	
		<b>20</b>	<b>Sponsoren</b>	565	
			<b>Sachwortverzeichnis</b>	579	

- Das Fahrzeugleergewicht (mit einem Akku und ohne Gepäck) darf 30 kg nicht überschreiten.
- Eine Dynamopflicht entfällt
- Ein Transport von Kindern (bis 7 Jahren) im Kindersitz oder Anhänger ist gestattet.
- Es gilt die Benutzungspflicht für mit einem blauen Radwegschild gekennzeichneten Radweg.
- Waldwege, Einbahnstraßen, die in Gegenrichtung für Fahrräder freigegeben sind und für Radfahrer freigegebene Fußgängerzonen sind für Pedelecs 25 erlaubt.

**S-Pedelecs** (Schnelle Klasse, Pedelec 45) sind keine Fahrräder, sondern als Kraftfahrzeuge (Klein-Krafträder mit geringer Leistung) der Klasse L1e-B eingestuft (Stand Januar 2013).

- Wer ein S-Pedelec führen will, benötigt mindestens eine Mofa-Prüfbescheinigung, wenn er (sie) **nach** dem 1.4.1965 geboren ist. Mindestalter 15 Jahre.
- Reine Motorfahrt (Vollantrieb) ist per „E-Gasgriff“ bis 20 km/h als „erweiterte Anfahrhilfe“ möglich (in Österreich bis 25 km/h).
- Der Motor darf beim Mittreten bis höchstens 45 km/h unterstützen.
- Die Nenndauerleistung ist auf 500 W begrenzt (in Österreich bis 600 W).
- Keine Zulassungspflicht. Eine Betriebserlaubnis (bzw. Einzelzulassung des Herstellers) und ein Versicherungsnachweis sind erforderlich. Das (grüne) Versicherungskennzeichen muss immer zum 1. März jeden Jahres erneuert werden.
- Helmtragepflicht gemäß § 21a StVO
- Ein Transport von Kindern (bis 7 Jahren) im Kindersitz ist gestattet, aber in einem Anhänger nicht erlaubt.
- Lastenanhänger benötigen eine bauartgeprüfte Fahrrad-Anhängerkupplung.
- Vorschrift: Rückspiegel und selbsteinklappbarer Seitenständer
- Die Reifenprofilstärke muss mindestens 1 mm betragen.
- Alkoholgrenze wie beim Führen eines Kraftfahrzeugs.
- Verbot der Benutzung von Radwegen innerorts (Ausnahme Zusatzschild „Mofa frei“ oder ausgeschalteter Motor).

**E-Bikes** sind Kraftfahrzeuge der Klasse Le1 mit einer begrenzten Höchstgeschwindigkeit und einer maximalen Motorleistung von 500 W. Die Motorsteuerung erfolgt über einen „E-Gasgriff“. Eine Tretunterstützung ist nicht vorgesehen – Pedale sind aber möglich.

Für das Führen eines Leichtmofas oder Mofas reicht eine Mofa-Prüfbescheinigung. Leichtmofas

und Mofas sind zulassungsfrei, benötigen aber eine Betriebserlaubnis und (wie das Pedelec 45) ein Versicherungskennzeichen.

Der Fahrer eines Kleinkraftrades benötigt mindestens einen Klasse-M-Führerschein und es besteht die Pflicht, einen Helm zu tragen.

**E-Roller** gibt es in vielen Varianten. Es sind reine Elektrofahrzeuge ohne Pedale. Man unterscheidet drei Kategorien:

- Kickboards und Stehroller (Segway, Bild 1)
- Kleine Sitzroller
- Große Elektroroller

Ein **Segway** ist ein mechanisch stabilisierter Roller, bei dem der Fahrer aufrecht auf einer Plattform zwischen den beiden angetriebenen Rädern steht. Gyroskope, Sensoren für den Neigungswinkel und leistungsstarke Elektromotoren arbeiten zusammen, um ständig das Gleichgewicht zu stabilisieren.



Bild 1: Segway

**Kickboards** sind Roller, auf denen man steht und, anstatt sich mit einem Bein abzustoßen, den Gasgriff am Lenker bedient. Ihre Benutzung ist nur auf Privatgrund erlaubt.

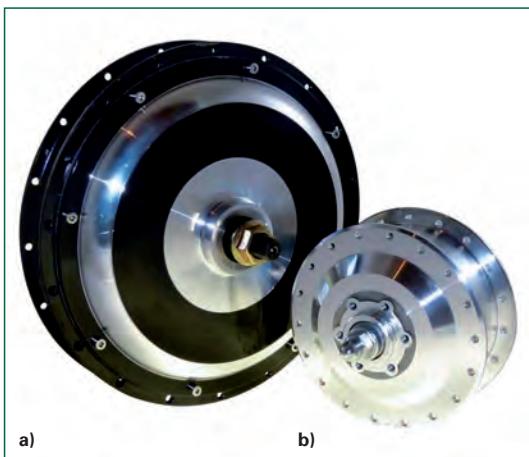
Zwei- oder dreirädrige **Elektroroller** sind Klein-Krafträder, deren bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit auf 45 km/h und die Motorleistung auf 4 kW begrenzt ist. Diese Fahrzeuge benötigen u. a. Kleinkraftradbeleuchtung, typgeprüfte Reifen und Rückspiegel.

Für den Betrieb sind ein geeigneter Helm, ein Versicherungskennzeichen, eine Betriebserlaubnis und mindestens ein Führerschein der Klasse M (AM ab Jan. 2013) vorgeschrieben.

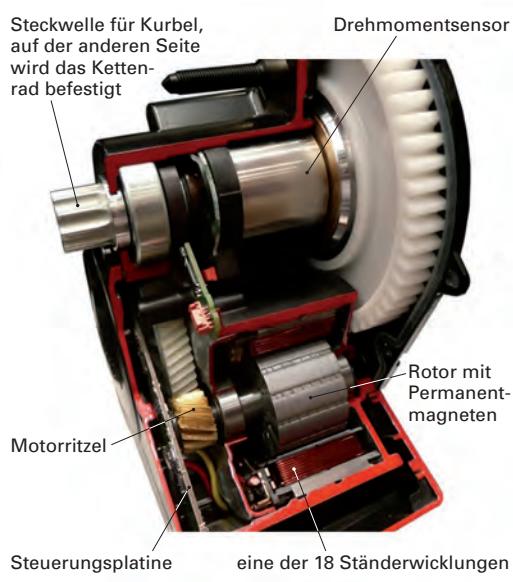
### Merkmale Mittelmotor

- Da der Motor direkt in die Kette eingreift, wird das Motordrehmoment durch die Schaltung übersetzt. Vorteil: Der Motor arbeitet beim Befahren von Steigungen in einem günstigen Wirkungsgradbereich.
- Ein Antrieb im Zentrum wirkt sich günstig auf den Fahrzeugschwerpunkt aus – kann aber bei Elektro-MTBs die Bodenfreiheit einschränken.
- Alle Bauarten von Schaltungen sind möglich.
- Nur Einfach-Kettenräder vorn.
- Die Räder lassen sich leicht ein- und ausbauen.
- Kurze und unauffällige Verkabelung zum Akku.
- Keine Rekuperation möglich.
- Bei Ritzelantrieb: Höherer Ketten-, Ritzel- und Kettenradverschleiß.
- Spezieller Rahmen ist notwendig.

**Nabenmotoren** sind im Vorderrad oder Hinterrad eingebaut. Zur Anwendung kommen Nabenmotoren mit Direktantrieb (Direktläufer) und Getriebemotoren mit und ohne Freilauf (**Bild 2**).



**Bild 2:** Größenvergleich Direktläufer a) ohne Getriebe b) mit Getriebe.

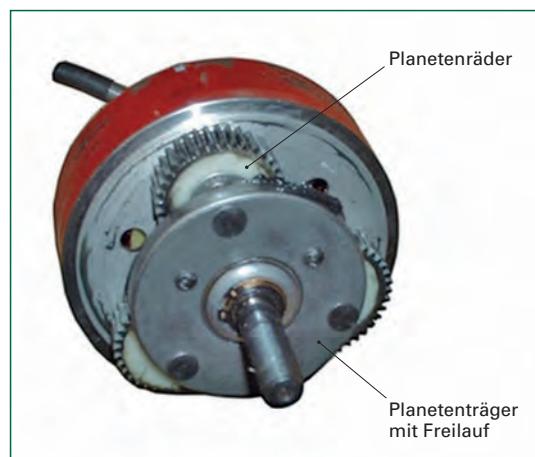


**Bild 1:** Schnittbild Kurbellagerantrieb mit Direktantrieb der Kurbellagerwelle (Bosch Classic-Antrieb)

Ein Antrieb über die Antriebskette hat den Vorteil, dass der Motor mit der für seine Leistung optimalen Drehzahl betrieben werden kann, genauso wie der Fahrer eine bestimmte Trittfrequenz hat, um seine Leistung optimal einzubringen. Mithilfe des Schaltgetriebes können Motordrehzahl und -drehmoment an die Fahrrerleistung angepasst werden.

**Nabenmotoren mit Getriebe** haben gegenüber Direktläufern den Vorteil, dass sie ein größeres Drehmoment liefern und so das Elektrofahrrad aus dem Stand heraus besser beschleunigen.

Ein integrierter Freilauf ermöglicht ein Fahren auch ohne Motorunterstützung, ohne dass das Treten vom Motor behindert wird (**Bild 3**).



**Bild 3:** Nabenmotor mit angeflanschtem Getriebe (Bafang)

Der Hinterradnabenmotor (**Bild 1, Seite 132**) mit dem zweistufigen Planetengetriebe erzielt eine hohe Übersetzung. Der fehlende Freilauf ermöglicht eine Energierückgewinnung (Rekuperation).

Die wirksame Spannung  $U_w$  und der ohmsche Widerstand  $R_A$  der Ankerwicklungen bestimmen die Höhe des Ankerstromes  $I_A$ .

$$I_A = \frac{U_w}{R_A}$$

Der Ankerstrom bestimmt die Stärke des Anker-Magnetfeldes und damit die Drehkraft und das Drehmoment des Motors. Bei Nenndrehzahl  $n_N$  ist die Gegenspannung  $U_l$  so groß, dass die wirksame Spannung  $U_w$  nur noch so viel Strom fließen lässt, dass das Nenndrehmoment aufgebracht werden kann.

Die Gegenspannung macht bei Umkehr der Stromrichtung aus dem Motor einen Generator und kann so beim Bremsen zur Energierückspeisung dienen.

### Motorkennlinien

Motorkennlinien veranschaulichen den Zusammenhang zwischen den elektrischen und mechanischen Größen.

#### Beispiel (Bild 1):

Drehzahl/Drehmoment-Kennlinie **a)** mit unterschiedlichen Motorspannungen und **b)** mit der dazugehörigen Stromstärke.

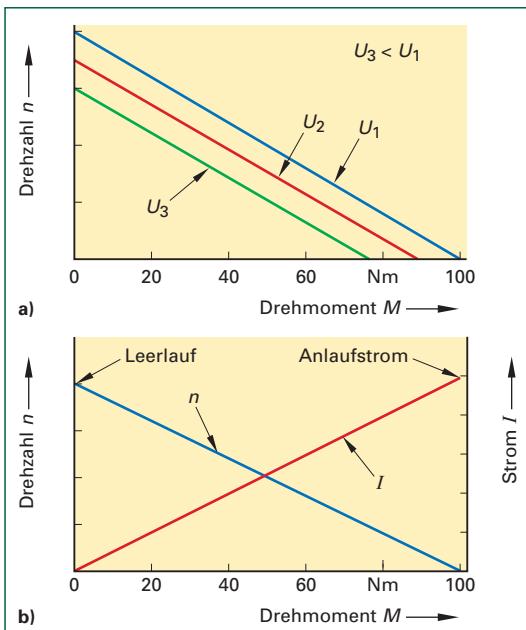


Bild 1: Drehmoment/Drehzahlkennlinie eines Nebenschlussmotors **a)** mit den Kennlinien unterschiedlicher Spannung **b)** mit Kennlinie der Stromstärke

Folgerungen aus den Kennlinien:

- Die Drehzahl des Motors wird von der angelegten Spannung bestimmt.
- Beim Anlauf bestimmen die angelegte Spannung und der Ankerwiderstand den Anlaufstrom. Da der Ankerwiderstand sehr klein ist, wird der Anlaufstrom groß.
- Bei Belastung sinkt die Drehzahl ab. Die induzierte Spannung nimmt ebenfalls ab und der Ankerstrom steigt an.
- Der Motor „holt“ sich den Strom, den er für ein bestimmtes Drehmoment braucht.
- Die Änderung der Drehzahl erfolgt über die Änderung der Motorspannung.

#### Beispiel (Bild 2):

Drehzahl/Drehmoment/Stromstärke-Kennlinie mit Verlauf der mechanisch abgegebenen Leistung  $P_{ab}$  und des Wirkungsgrades  $\eta$  eines Nebenschlussmotors. Die Kennlinien haben immer diesen prinzipiellen Verlauf.

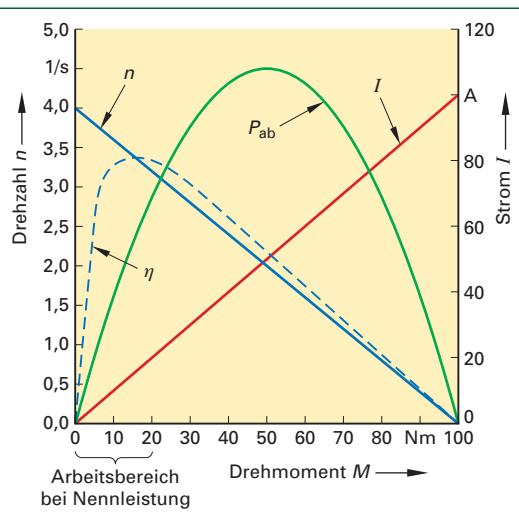


Bild 2: Kennlinien eines Nebenschlussmotors

Folgerungen aus den Kennlinien:

- Die abgegebene (mechanische) Leistung ergibt sich als Fläche unter der  $P_{ab}$ -Kurve. Die Kurvenform ist eine Parabel.
- Beim halben Drehmoment – hier bei 50 Nm – wird die maximale Leistung abgegeben. Es ist aber nicht die Nennleistung und auch der Wirkungsgrad ist hier nicht maximal. Die maximale Leistung hängt quadratisch von der Motorspannung ab.

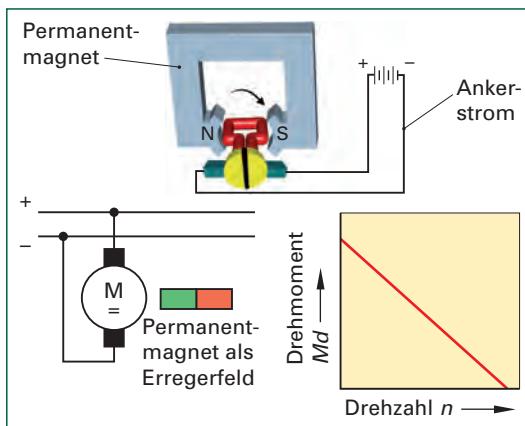
- Im Leerlauf – hier bei  $n_0 = 4/s$  – ist der Wirkungsgrad = 0, da keine Leistung abgegeben wird. Auch beim Anlauf ( $n = 0$ ) ist der Wirkungsgrad 0, weil der Motor hier steht.
- Der maximale Wirkungsgrad wird bei ca.  $1/7$  des maximalen Drehmomentes erreicht

### 4.4.3 Bauarten von Gleichstrommotoren

#### 4 Permanenterregte Gleichstrommotoren

Bei dem Motormodell auf **Bild 2, Seite 134** erzeugt ein Dauermagnet ein gleichbleibendes Erregerfeld.

Mit einer Verbesserung der Magnetwerkstoffe sind diese Gleichstrommotoren immer leistungsfähiger geworden und können mit elektrisch erregten Motoren mithalten. Bei größeren Motoren sind die Kosten für die Magnete oft höher als die einer Erregerwicklung.



**Bild 1:** Aufbau, Schaltbild und Kennlinie eines permanenterregten Gleichstrommotors

Permanenterregte Maschinen haben den Vorteil, dass zur Erzeugung des Magnetfeldes keine Energie benötigt wird. Das verbessert besonders bei kleiner Gesamtleistung den Wirkungsgrad.

#### Elektrisch erregte Gleichstrommotoren

Ersetzt man den Dauermagneten durch einen Elektromagneten, lässt sich dessen Erreger-Feldstärke ändern. Das wirkt sich entscheidend auf das Motordrehmoment aus. Nimmt man für den Rotor und den Elektromagneten eine einzige Spannungsquelle, so sind drei Schaltungsarten möglich:

- Nebenschlussmotor
- Reihenschlussmotor (Hauptschlussmotor)
- Doppelschlussmotor

#### Nebenschlussmotor

Beim Nebenschlussmotor sind der Anker (Rotor) und die Erregerwicklung (Stator) parallel geschaltet, d. h. sie sind jeweils durch einen separaten Stromkreis mit der Spannungsquelle verbunden (**Bild 2**). Wie beim permanenterregten Motor ist das Erregerfeld immer gleich stark.

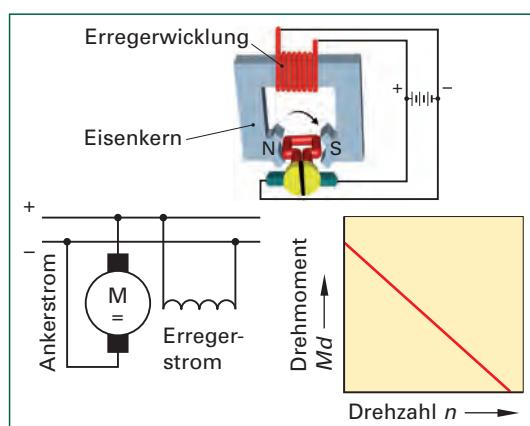
Die Stärke des Stromes, der durch den Anker fließt, ist abhängig von der Belastung des Motors: Mit höherer Belastung steigt das Drehmoment – aber die Drehzahl sinkt und der Motor kann stehen bleiben, weil das Erregerfeld nicht stärker wird.

Nebenschlussmotoren eignen sich für Antriebe, die eine regelbare, aber von der Belastung möglichst unabhängige Drehzahl benötigen. Das maximal erreichbare Drehmoment wird durch den zulässigen Ankerstrom begrenzt, der hauptsächlich von der Kühlung abhängig ist.

Der Zusammenhang zwischen Drehmoment und Ankerstrom lautet:

$$M = f(I)$$

Verdoppelt sich der Motorstrom, verdoppelt sich auch das Drehmoment.



**Bild 2:** Elektrisch erregter Gleichstrom-Nebenschlussmotor

Nebenschlussmotoren fanden als Nachrüstsatz für die ersten Elektrofahrräder Verwendung. In der einfachsten Form wurde das Erregerfeld über Vorwiderstände gesteuert.

Später kamen die besseren Doppelschlussmotoren (**siehe Seite 139**) mit regelbaren Vorwiderständen zum Einsatz. Von Nachteil waren das große Gewicht und der schlechte Wirkungsgrad.

### Reihenschlussmotor

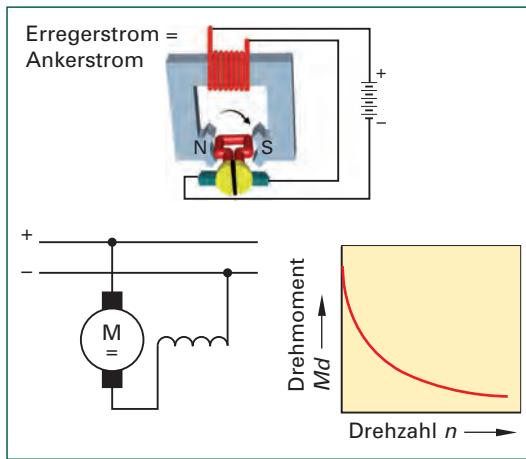
Beim Reihenschlussmotor sind Anker (Rotor) und Stator in einem „Hauptstromkreis“ hintereinander (in Reihe) geschaltet (**Bild 1**). Erregerstrom und Ankerstrom sind immer gleich groß. Mit steigender Belastung fließt ein größerer Strom durch den Anker und die Erregerwicklung. Der Reihenschlussmotor entwickelt beim Anlaufen ein großes Drehmoment.

Von Nachteil ist, dass der Motor ohne Last „durchgehen“ kann: Mit steigender Drehzahl werden Anker- und Erregerstrom immer geringer und damit auch das Erregerfeld und die Gegeninduktionsspannung. Ein Reihenschlussmotor muss immer unter Last laufen.

Der Zusammenhang zwischen Drehmoment und Stromfluss lautet:

$$M = f(I^2)$$

Erhöht sich der Motorstrom um das Doppelte, vervierfacht sich das abgegebene Motordrehmoment.



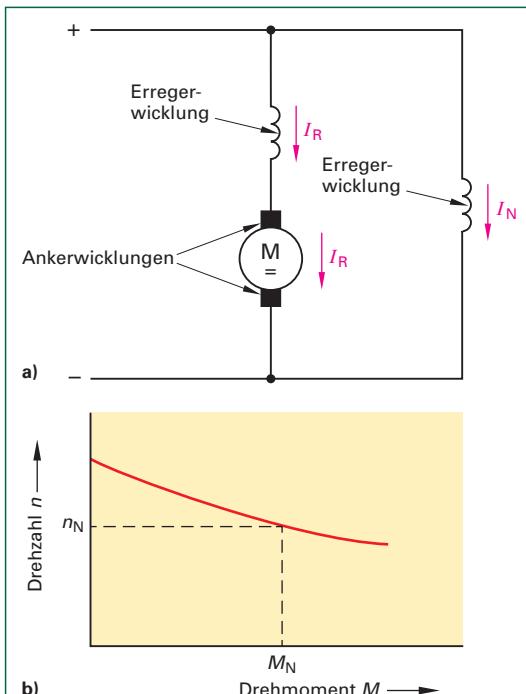
**Bild 1:** Aufbau, Schaltbild und Kennlinie eines Gleichstrom-Reihenschlussmotors

Man verwendet Reihenschlussmotoren dort, wo ein großes Antriebsmoment benötigt wird, z. B. beim Anlasser für Kraftfahrzeuge, bei Aufzügen, Krananlagen und Elektrofahrzeugen wie Elektrokarren, Straßen- und Eisenbahnen.

Auch die ersten Motoren im Fahrrad waren Reihenschlussmotoren, die sich aber trotz ihres idealen Fahrverhaltens nicht durchgesetzt haben: Sie sind zu schwer, zu teuer und es sind wartungsintensive Schleifkontakte erforderlich.

### Doppelschlussmotor

Der Doppelschlussmotor (Compoundmotor) vereinigt die Vorteile des Nebenschluss- und des Reihenschlussmotors. Zwei Erregerwicklungen erzeugen das Erregerfeld: Die eine parallel, die andere in Reihe zum Anker (**Bild 2**).



**Bild 2:** Schaltbild Doppelschlussmotor, Kennlinie

### Bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC)<sup>1</sup>

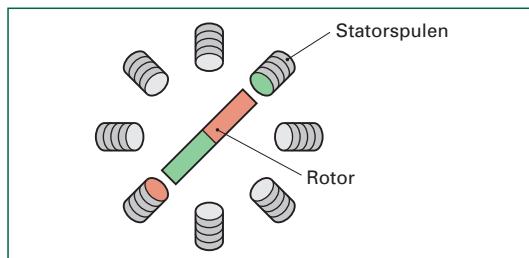
Beim bürstenlosen Gleichstrommotor erfolgt die Umkehr der Stromrichtung in den einzelnen Ankerwicklungen nicht mehr durch einen mechanischen Stromwender (Kommutator), sondern mit einer elektronischen Schaltung. Die verschleißbehaftete Kommutierung entfällt. Bürstenlose Gleichstrommotoren sind praktisch wartungsfrei. Auch kann ein BLDC-Motor bei gleicher Leistung kleiner und leichter ausfallen als ein Motor mit Bürsten.

Gegenüber dem bürstenbehafteten Gleichstrommotor wird die Anordnung von Ständer und Rotor vertauscht: Die Permanentmagnete sind auf dem Rotor, die Ankerwicklungen auf dem Ständer angeordnet. Bei einem Außenläufer befinden sich die Magnete außen auf dem Rotor, die Ankerwicklungen bilden innen den Stator. Beim Innenläufer ist es umgekehrt: Rotor innen, Stator außen.

<sup>1</sup> BLDC = brushless direct current

Bei den Elektrofahrrädern kommen sowohl Innen- als auch Außenläufer zum Einsatz. Die Entscheidung darüber hängt vom Einbauort des Antriebs ab. Für Mittelantriebe (Kurbellagerantrieb) 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.

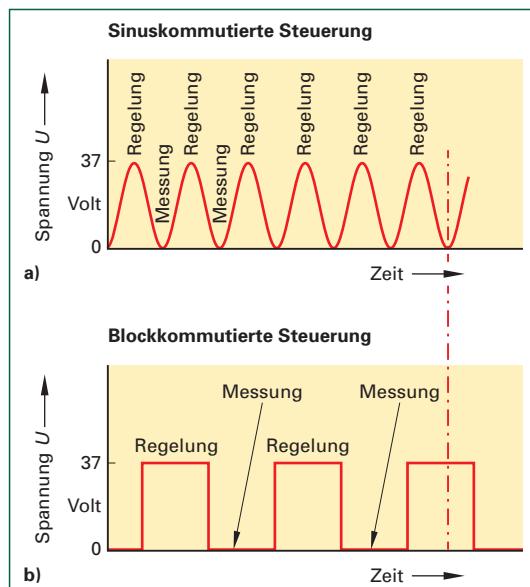
Meist sind es *Hallsensoren* (siehe Seite 88), die ständig die Rotorlage erfassen und an das Steuerausgerät weiterleiten.

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 Gegenspannung (EMK, siehe Seite 136) erfasst und als Lagegeber benutzt.

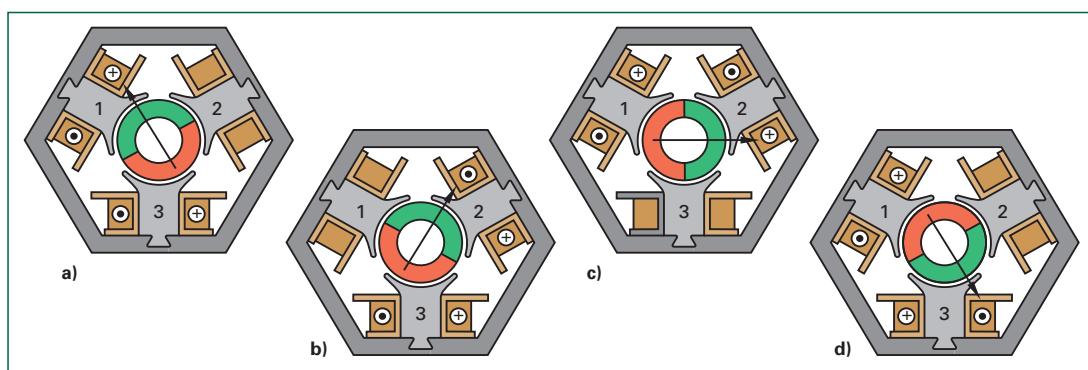
Im Grunde genommen handelt es sich bei einem BLDC-Motor um einen dreiphasigen **Synchronmotor**, da die Magnetfelder des Stators und des Rotors mit der gleichen Frequenz rotieren. Jeder Strang wird mit sinusförmiger (**Bild 2a**) oder blockförmiger Spannung (**b**) angesteuert.

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  $60^\circ$  umschalten. Beispiel **Bild 3:** Ein Innenläufer mit einem zweipoligen Dauermagnetrotor und mit drei um  $120^\circ$  gegeneinander versetzten Ankerspulen als Ständer.

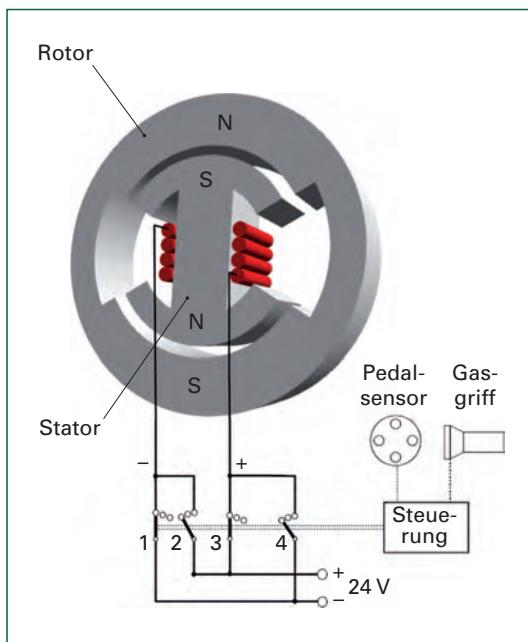


**Bild 3:** Veränderung der Rotorposition bei Blockeinspeisung (Modellvorstellung, Quelle Ösinghausen)

Mit der dreisträngigen Ankerwicklung wird ein Drehfeld aufgebaut, das relativ zum Anker rotiert. Das Drehfeld überlagert sich mit dem Erregerfeld des Dauermagneten und erzeugt ein Drehmoment, das den Rotor in Bewegung versetzt. Die drei Ankerspulen werden in einer bestimmten Reihenfolge an eine Gleichspannung gelegt, so dass in den Spulen ein sinus- oder blockförmiger Strom fließt (**Bild 2, Seite 140**).

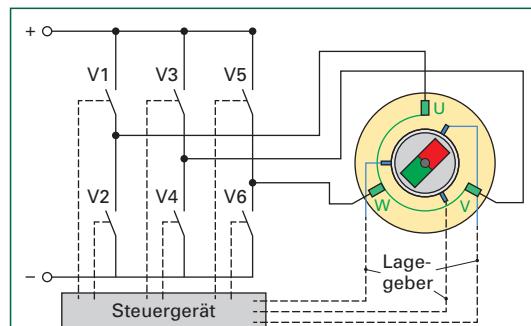
Der Zeiger im Rotor soll die Drehbewegung um  $180^\circ$  in den Schaltzuständen a, b, c und d (**Bild 3, Seite 140**) anzeigen: Eine Spule ist immer stromlos. In der Stellung d sind die gleichen Spulen wie in a von Strom durchflossen – aber die Stromrichtungen haben sich geändert.

Der einfachste bürstenlose Gleichstrommotor ist der Einphasenmotor. Der mit der Ankerwicklung versehene Stator ist fest mit der Achse verbunden. Um den Stator dreht sich der mit Dauermagneten bestückte Rotor (**Bild 1**).



**Bild 1: Einphasenschaltung eines Außenläufers**

Die Leistungstransistoren sind vereinfacht als Schalter dargestellt. Die heute in Elektrofahrrädern eingebauten BLDC-Motoren werden mit drei Phasen betrieben – ähnlich den Drehstrommotoren (**Bild 2**). V1 bis V6 sind hier elektronische Schalter, meist Leistungstransistoren (MOSFETs). Mosfets sind Leistungstransistoren, die ein schnelles, verlustfreies elektronisches Schalten ermöglichen.



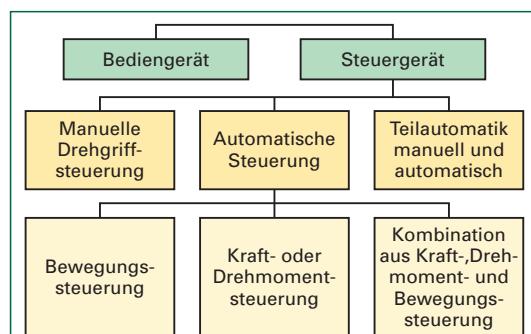
**Bild 2: Prinzip eines Dreiphasen-BLCD-Motors**

## 4.5 Antriebssteuerung

Nach den Vorgaben der DIN EN 15194 („Fahrräder – Elektromotorisch unterstützte Räder“) darf der Elektromotor nur aktive Hilfe leisten, wenn der Radler selbst in die Pedale tritt. Das Steuergerät berechnet aufgrund der Sensordaten

- Trittkraft
- Kurbeldrehzahl (Trittfrequenz, Kadenz)
- Fahrgeschwindigkeit
- Evtl. Temperatur

in Abhängigkeit von der gewählten Motorunterstützung (dem Unterstützungsgrad) die vom Motor zu liefernde Leistung. Für das Einschalten und die Steuerung der Motorunterstützung gibt es verschiedene technische Konzepte (**Bild 3**).



**Bild 3: Steuerungskonzepte**

### Steuergerät

Die Hauptaufgabe des Steuergerätes (Controller) ist es, das für den Motor nötige Drehfeld zu erzeugen und dabei das Drehmoment und die Drehzahl steuern. Ist der Antrieb ein Gleichstrommotor, arbeitet das Steuergerät als Gleichstromsteller, der die Batteriespannung stufenlos verändert und damit die Drehzahl steuert. Beim bürstenlosen

### Geschwindigkeitssensor

Geschwindigkeitssensoren messen die Fahrzeuggeschwindigkeit und sorgen in erster Linie für das Abriegeln des Motors bei 25 km/h (Pedelec 25) oder 45 km/h (Pedelec 45, S-Pedelec). Sie können auch in komplexere Motorsteuerungen eingebunden werden und regeln dann stufenweise ab, bevor die maximale Geschwindigkeit erreicht wird.

### Teilautomatik

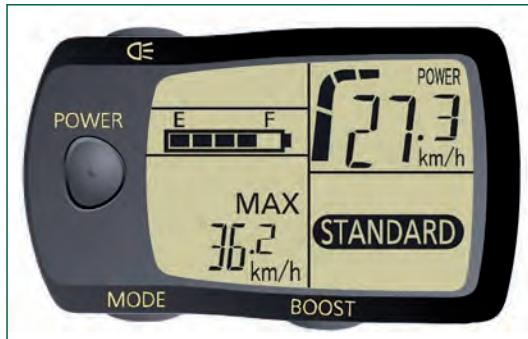
Viele Hersteller bieten die Möglichkeit, mehrere Fahrprogramme zu wählen, die sich optimal auf den Akku abstimmen lassen. Bei Elektrofahrrädern mit festgelegten Fahrprogrammen werden ab Werk die Antriebseigenschaften des Rades festgelegt. Anders als bei der herkömmlichen Steuerung ändert sich die Hilfe nicht, wenn der Fahrer sein Tret- oder Fahrverhalten ändert.

## 4.7 Bedienung und Display

Die Steuerung der Elektrofahrräder erfolgt in einfacher Ausführung ohne Display direkt vom Pedal-Assist-System (PAS) oder dem mit ihm gekoppelten Gasgriff. Notwendiges Zubehör ist ein Akku mit Ladestandanzeige.

Besonders wichtig ist das Vorhandensein einer Anzeige über die Akku-Restkapazität – möglichst als Prozentangabe.

Standard ist eine Anzeigeeinheit LCD (Liquid Crystal Display), die alle wichtigen Daten des Elektrofahrrades übersichtlich und informativ anzeigt (**Bild 1**).



**Bild 1:** Pedelec-Display (Panasonic)

Am Bediengerät kann ausgewählt werden, wie stark der Antrieb unterstützen soll: Bei den meisten Fahrrädern gibt es drei oder mehr Stufen. Meist ist eine Anzeige für den Ladezustand des Akkus enthalten – ähnlich wie die Tankanzeige im Auto.

Einige Hersteller integrieren noch Funktionen wie Pulsmessung oder GPS zur Navigation. Praktisch erweist sich ein Diebstahlschutz: Durch Abnehmen von Display oder über Einstelltasten lässt sich der Motor nicht mehr zuschalten.

Elektronisch weiter aufgerüstet sind die Elektrofahrräder der holländischen Acellgruppe oder die vom Komponentenhersteller BionX (**Bild 2**). Im Display integriert meldet ein Diagnosesystem dem Fahrer eventuelle Fehlfunktionen. Die Information ermöglicht eine schnellere Wartung oder Reparatur durch den Händler. Nach dem Ablesen des Fehlercodes mit präziser Fehleranalyse können die Fachwerkstätten die meisten Fehler selbst beheben.



**Bild 2:** G2-Konsole (BionX)

Beim Bediengerät der Firma Bosch (**Bild 3**) ist neben einem USB-Steckanschluss im Hauptdisplay getrennt eine Anfahrhilfe als Taste vorgesehen.

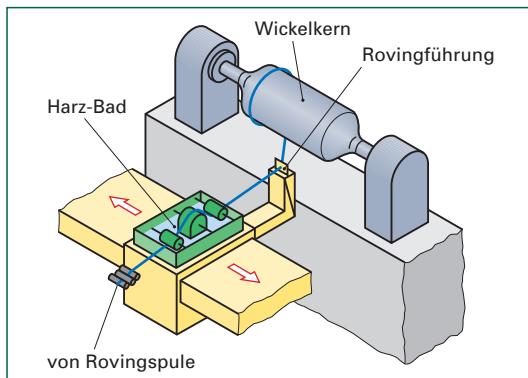


**Bild 3:** Bedieneinheit (Bosch)

### 5.4.3 Rohre aus CFK

Prepregs oder in Harz getränktes Kohlefasersegele oder -gewebe (Seite 60) werden von Hand um einen Kern oder Schlauch herumgewickelt und in einer Form ausgehärtet. Nach dem Aus härten des Harzes wird der Kern abgezogen oder der Schlauch entfernt. Man erhält ein homogenes, leichtes und belastbares Rohr.

Bei maschineller Fertigung wird ein Kohlefaserbündel nach dem Durchlaufen eines Harz-Bades um einen sich drehenden Kern gewickelt (**Bild 1**). Die Richtungen, in der der Roving um den Kern gewickelt wird, lassen sich dabei je nach den Belastungen für das spätere Rohr von  $90^\circ$  bis etwa  $2^\circ$  variieren. Auf ähnliche Weise lässt sich die Wandstärke verändern.



**Bild 1:** Wickeln von Carbonrohren

#### Info

Gewickelte Carbonrohre sind seit dem Jahr 2000 nicht mehr üblich.

### 5.4.4 Rohrverfeinerungen

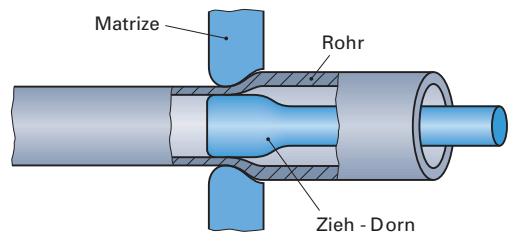
Bei hochwertigen Rahmen folgen weitere Verfeinerungen der Metallrohre.

#### Dickend-Rohre, endverstärkte Rohre

Durch Löten und Schweißen verlieren die Endbereiche der Stahlrohre einen Teil ihrer Festigkeit. Daher werden die Endbereiche besonders leichter Rahmenrohre dicker und das weniger belastete Rohrmittelelement dünner ausgeführt. Diese Veredelung erfolgt als Kaltzug über einen Innen-dorn (**Bild 2**).

#### Konifizierte Rohre

Um einerseits Gewicht zu sparen und andererseits einen optimalen Kraftfluss zu erreichen, werden Unter- und Sattelstreben sowie Gabelbeine mit unterschiedlichem Außendurchmesser versehen (konifiziert, **Bild 3**).



**Bild 2:** Ziehen von Dickend-Rohren



**Einfach endverstärktes Rohr, meist für Sitzrohre verwendet**



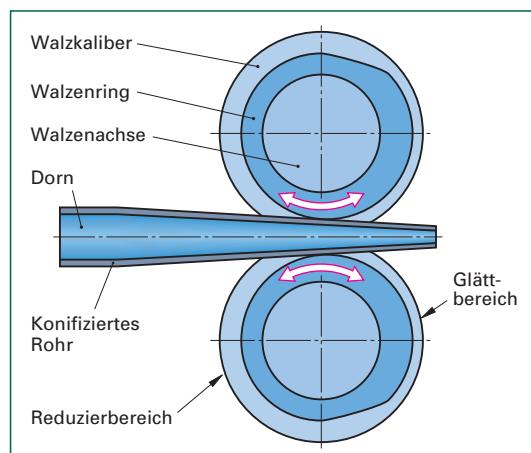
**Bild 3:** Endverstärkte Rohre

Im Bereich der Ausfallenden, wo die Kräfte eingeleitet werden, genügt ein kleinerer Rohrdurchmesser. Die größten Biegemomente wirken im Bereich von Kurbellagergehäuse, Sattelrohrmuffe und Gabelkopf.

Hier muss der Rohrdurchmesser entsprechend größer dimensioniert sein.

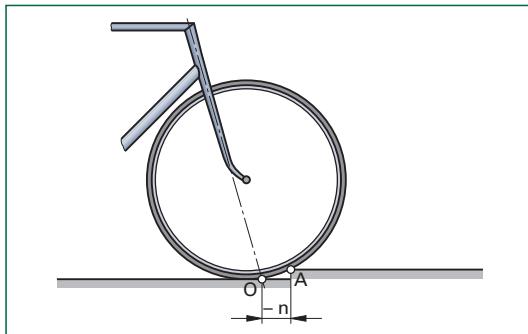
Als Konifizier-Verfahren hat sich für preiswerte Rohre das „Rundhämtern“ über einen Kern durchgesetzt, bei dem die Wandstärke zum dünnen Ende hin zunimmt.

Beim Kaltpilger-Verfahren für hochwertige Rohre (**Bild 4**) bleibt die Wandstärke auch zum dünneren Rohrende hin konstant.



**Bild 4:** Kaltpilgern zur Herstellung konifizierter Rohre

Der Nachlauf kann **negative** Werte annehmen, wenn man z. B. mit dem Vorderrad über eine hohe Bordsteinkante fährt. Dann kann der Aufstandspunkt des Vorderrades **vor** dem Spurpunkt liegen (**Bild 1**).



**Bild 1:** Negativer Nachlauf

Auch beim Rückwärtsschieben des Fahrrades ergibt sich ein negativer Nachlauf. Bei der geringsten Störung schlägt der Lenker um.

Der **Rücksprung**  $v$  ist der senkrechte Abstand (das Lot) zwischen der Lenkachse und der Achsaufnahme (Nabenachse) des Vorderrades (**Bild 1, Seite 198**). Weitere gebräuchliche Fachausdrücke für den Rücksprung sind Gabelversatz, Versatz, Gabelvorbiegung oder Kröpfung.

Der Rücksprung ist positiv, wenn sich die Nabenachse vor der Lenkachse befindet. Oder: Die Gabel ist nach vorn gebogen.

Bei geraden Gabeln und Federgaben wird der Rücksprung durch Kröpfung des Gabelkopfes (**Bild 2**) oder durch seitlich an das Tauchrohr angesetzte Ausfallenden erzeugt. So wird die Lenkachse parallel verschoben. Aus einem Gabelversatz wird hier ein Nabenversatz. Ein anderer Fachausdruck ist Offset.



**Bild 2:** Kröpfung des Gabelkopfes bei gerader Gabel

Der Nachlauf  $n$  lässt sich über den Lenkwinkel  $\beta$  und den Radradius  $r$  berechnen.

*Beispiel für eine Vorderradaufhängung ohne Rücksprung:*

Lenkwinkel  $\beta = 72^\circ$ , Radradius  $r = 347 \text{ mm}$

$$n = \frac{r}{\tan \beta} = \frac{347 \text{ mm}}{\tan 72^\circ} = \frac{347 \text{ mm}}{3,0777} \approx 113 \text{ mm}$$

Bei gegebenem Rücksprung (Gabelversatz) von  $v = 60 \text{ mm}$  ergibt sich ein Nachlauf von

$$n = \frac{r}{\tan \beta} - \frac{v}{\sin \beta} = 113 \text{ mm} - \frac{60 \text{ mm}}{0,9511} \approx 50 \text{ mm}$$

Der Nachlauf stabilisiert die Geradeausfahrt. Wird das Vorderrad zur Seite abgelenkt, zieht die Rückstellkraft das Rad wieder in die Geradeausstellung.

Auch in der Kurve zieht die Rückstellkraft das Vorderrad in die Geradeausstellung. Der Fahrer muss mit dem Lenker dagegenhalten. Weiterhin dämpft der Nachlauf die in Kurvenrichtung einschlagende Wirkung der Kreiselkraft.

Mit zunehmendem Nachlauf schwenkt das Vorderrad beim Lenkeinschlag weiter seitlich aus. Es vergrößert sich der Hebelarm ( $a$  in **Bild 2, Seite 198**) und damit auch das stabilisierende rückstellende Moment. Der Federungskomfort und der Geradeauslauf verbessern sich, die Wendigkeit nimmt ab – besonders bei geringer Fahrgeschwindigkeit.

### Nachlauf-Auslegung

Bei Fahrrädern haben sich Beträge für den Nachlauf zwischen 50 mm und 75 mm als sinnvoll erwiesen. MTBs weisen oft einen Nachlauf von bis zu 85 mm auf. Rennräder haben einen kleineren Nachlauf von etwa 60 mm (bedingt durch einen großen Lenkwinkel). Es sind geringere Lenkkräfte erforderlich, die Wendigkeit ist verbessert, der Fahrkomfort nimmt ab.

Der Nachlauf wird größer

- mit kleinerem Rücksprung (Gabelvorbiegung)
- mit kleinerem (flacherem) Lenkwinkel

Daher lässt sich der gleiche Nachlauf durch einen unterschiedlichen Lenkwinkel erzielen.

*Beispiele:* Ein Nachlauf von 60 mm resultiert aus einem Lenkwinkel von  $74^\circ$  und einem Rücksprung von 40 mm.

Den gleichen Nachlauf erhält man aus einem Lenkwinkel von  $70^\circ$  und einem Rücksprung von 65 mm (**Bild 1, Seite 200**).

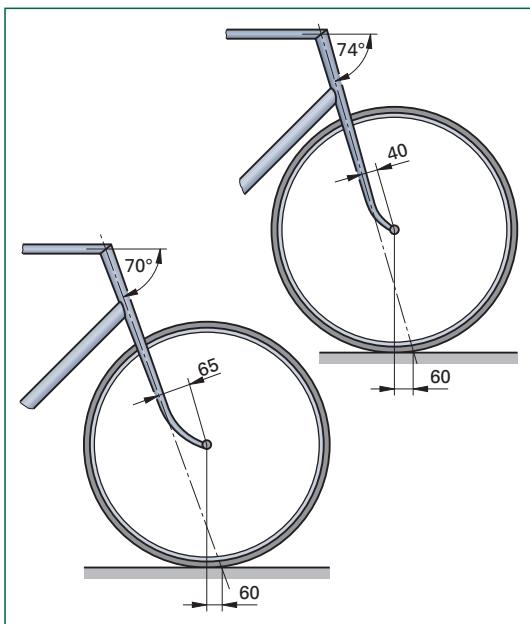


Bild 1: Gleicher Nachlauf bei ungleichem Rücksprung

Bei Fahrrädern mit Vorderradfederung vergrößert sich beim Einfedern der Lenkwinkel, weil sich die Gabel steiler stellt. Als Anhaltswert gilt: Je 20 mm Einfederung vergrößert den Lenkwinkel um 1°. Folge: Der Nachlauf und die Fußfreiheit verringern sich.

### Absenkung

In Geradeaussstellung nimmt der Lenkkopf seine höchste Lage ein und das System aus Fahrer, Rad und Gepäck hat damit die größte potentielle Energie. Beim Einschlagen der Lenkung dreht sich das Vorderrad in die gleiche Richtung und der Gesamtschwerpunkt aus Fahrer und Fahrrad senkt sich geringfügig ab. Grund: Das auf dem Lager lastende Gewicht ist bestrebt, die Gleichgewichtslage (den Zustand niedrigster Energie) wieder einzunehmen. Folge: Die Absenkung unterstützt den Lenkeinschlag.

Der Betrag der Absenkung vergrößert sich mit

- größerem Nachlauf
- geringerem Rücksprung
- größerem Lenkereinschlagwinkel

Es entsteht im Gegensatz zur Richtwirkung ein destabilisierender Effekt:

- Das Einlenken in eine Kurve wird erleichtert
- Man braucht größere Lenkräfte, um aus der Kurve wieder die Geradeausrichtung einzunehmen.

Eine zu große Absenkung führt dazu, dass man freiäugig nicht richtungsstabil fahren kann. Hier liegt ein Rahmenkonstruktionsfehler vor.

### 5.6.5 Einfluss auf das Fahrverhalten

Das Fahrverhalten eines Fahrrades wird bestimmt durch

- Wendigkeit
- Fahrkomfort
- Geradeauslauf
- Steifigkeit

Gute **Wendigkeit** bedeutet schnelle und einfache Richtungsänderung, guter **Geradeauslauf** steht für große Laufruhe. Bei einem Fahrrad mit hohem **Fahrkomfort** werden Stöße in senkrechter Richtung nach der Schwingungseinleitung gut gedämpft. Eine große **Steifigkeit** sorgt für verlustfreie Umsetzung der Antriebskraft und stabiles, flatterfreies Fahren. Steifigkeit ist besonders quer zur Fahrtrichtung gefragt.

Ergonomische und konstruktive Randbedingungen grenzen die Gestaltung der Rahmengeometrie ein.

#### Beispiele:

- Die Länge der Rahmenrohre beeinflusst die Steifigkeit des Rahmens (neben dem Rohrdurchmesser, der Wandstärke und der Form des Rohres). Mit zunehmender Rohrlänge nimmt die Biegesteifigkeit in der dritten Potenz ab.
- Ein tiefer abgesenktes Kurbellager ermöglicht zwar bequemes Fußabstützen beim Stillstand, „erweicht“ aber den Kurbellagerbereich für Seitenkräfte beim Wiegetritt.
- Die Länge des Vorderbaus und der Sitzrohrwinkel gehen vor allem in die Seitensteifigkeit des Rahmens ein – können aber unter Umständen den Verstellbereich von Lenker und Sattel einschränken. Das hat dann wieder Auswirkungen auf die Schwerpunktlage des Systems.
- Der Lenkwinkel beträgt bei den meisten Rädern zwischen 71° und 73°. Er hat großen Einfluss auf die benötigte Lenkkraft. Steilere Winkel führen zu leicht lenkbaren Rädern, aber auch eher zu Flatterneigung, da Schwingungen vom Vorderrad durch die dann ebenfalls steile Gabel weniger gedämpft werden.

Ein flacher Lenkwinkel erhöht den Nachlauf. In Kombination mit einer stark gebogenen Gabel wird das Rad komfortabler. Besonders flache Lenkwinkel haben Hollandräder. Hier macht sich bei langsamer Geschwindigkeit das Gewicht des Fahrers negativ beim Lenken bemerkbar. Reiseräder, bei denen man von hohem Gewicht durch das Gepäck ausgeht, sollten daher steile Lenkwinkel von etwa 73,5° haben.

Der **Time-Trial-Lenker** ist ein Lenkeraufsatz (**Bild 1**), der die Einnahme einer besonders aerodynamischen Fahrposition (american position, eine den Abfahrtskiläufern entliehene Armhaltung) erlaubt.

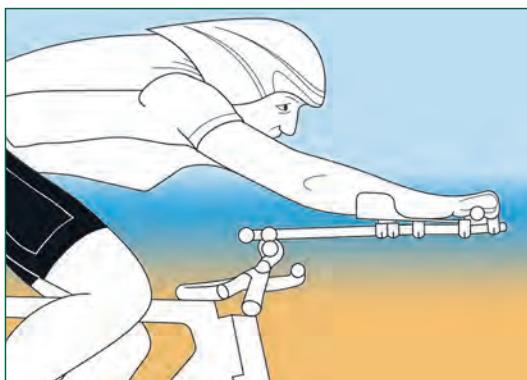


**Bild 1:** TT-Lenker mit Unterlenker

Von dem Welt-Radsportverband UCI (Union Cyclist Internationale) nicht mehr zugelassen sind Lenkeraufsätze, die die *Obree-Haltung* (**Bild 2**), bzw. die *Superman-Position* ermöglichen (**Bild 3**).



**Bild 2:** Kurzlenker für die Obree-Position



**Bild 3:** Lenker für die Superman-Position

## Fertigung

Lenker aus Aluminium, Stahl und Titan werden aus Präzisionsrohren hergestellt. Vom dicken Mittelteil aus wird das Rohr durch Ziehen oder Walzen zum Lenkerende hin dünner ausgezogen. Die Biegungen werden auf einer Biegescheibe vorgenommen, in der der halbe Rohrdurchmesser eingearbeitet ist, damit das Rohr beim Biegen keine Falten bekommt (**Bild 4**).



**Bild 4:** Rohr-Biegemaschine (Zopf)

Größere Biegewinkel (Rennlenker) werden über einen kugelförmigen Innendorn gebogen, der sich mit fortschreitendem Biegeradius zurückzieht.

Lenker aus Carbon fertigt man meist in Flechtechnik und härtet diese im Schlauchblasverfahren aus. Aus patentrechtlichen Gründen sind die meisten Carbonrennlenker aus mehreren Einzelsegmenten aufgebaut.

## Zur Sicherheit

Lenkerenden können bei einem Fahrradunfall schwere Verletzungen hervorrufen und sollten deswegen stets mit einem möglichst voluminösen Stopfen bzw. Lenkergriff verschlossen sein. Nach Stürzen sollten verbogene Lenker ausgetauscht werden, da die Dauerhaltbarkeit deutlich beeinträchtigt ist.

Das vom Hersteller angegebene maximale Anzahmmoment des Vorbaus und der Bar Ends mit Außenklemmung darf nicht überschritten werden. Diese Bar Ends sollten an dünnwandigen Alulenken mit speziellen Innenstopfen (Plugs) montiert werden. Diese schützen den Lenker vor Verformung durch die Klemmkräfte der Befestigungsschelle.

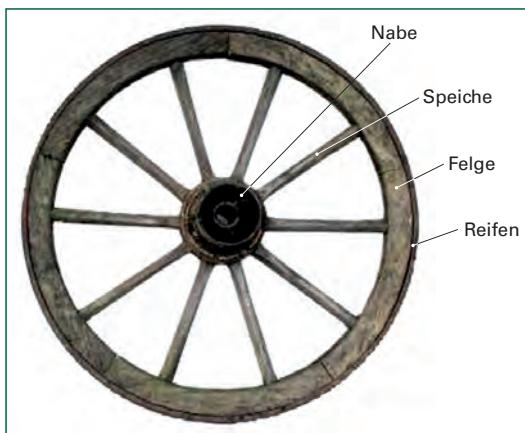
Beim Transport mit dem Auto dürfen Räder nicht kopfüberstehend am Lenkbügel befestigt werden, da die auftretenden dynamischen Kräfte zu Materialermüdung führen können.

## 6 Räder

Das Rad trägt die Last von Fahrrad, Fahrer und Gepäck (Systemmasse). Es ist das gestalt- und namensgebende Bauelement des Fahrrades.

Die vier Funktionseinheiten des Rades sind (**Bild 1**):

- Die **Nabe** bildet das Zentrum des Rades und erlaubt seine reibungsarme Rotation.
- Die **Speichen** bzw. die **Radscheibe** verbinden die Nabe mit der Felge.
- Die **Felge** trägt den Reifen, gibt dem Rad seine Form und dient ggf. als Bremsfläche.
- Der **Reifen** stellt den Kontakt des Rades mit der Fahrbahn her, um Antriebs-, Brems- und Seitenführungskräfte zu übertragen. Er gleicht in begrenztem Umfang Fahrbahnunebenheiten aus und ist damit ein Teil der Federung.



**Bild 1:** Funktionseinheiten des Rades

Es werden drei Arten des Rades unterschieden:

- Scheibenrad
- Ungespanntes Speichenrad (Druckspeichenrad)
- Vorgespanntes Speichenrad (Zugspeichenrad)

### 6.1 Scheibenrad

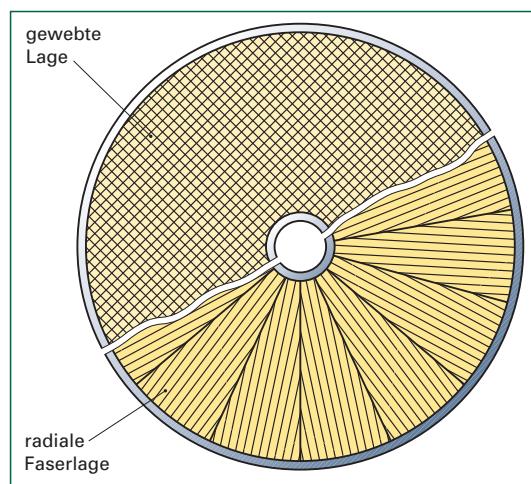
Die Urform des Rades ist das Scheibenrad. Es kann einfach hergestellt werden und hat eine hohe Tragfähigkeit. Es besitzt aber eine hohe Masse, weshalb man es lange Zeit nicht im Fahrradbau einsetzte, bis schließlich der Vorteil des geringeren Luftwiderstands (bei kontrollierten Windverhältnissen) erkannt wurde.

Der Anströmwinkel der Luft ist ein entscheidender Faktor bei der Betrachtung der Aerodynamik. Bei einem Seitenwind, der unter einem Winkel ca. 20° seitlich von vorne kommt, können Scheibenräder zusätzlichen Vortrieb erzeugen.

Bei Seitenwind drückt eine Flächenlast auf das Vorderrad und erschwert durch Rücksprung (Gabelversatz) und Nachlauf die Lenkung. Es ist daher in einem solchen Fall nicht sinnvoll, ein Scheibenrad als gelenktes Rad einzusetzen.

Verkleidete Speichenräder, bei denen die Speichen mit Textilien oder Kunststoffscheiben abgedeckt sind, gelten nicht als Scheibenräder. Sie sind bei offiziellen Wettkämpfen nicht zugelassen.

Erst mit der Verwendung leichter Verbundfasermaterialien ist der Einsatz von Scheibenräder am Fahrrad sinnvoll geworden. Die Scheiben bestehen oft aus einem Schaum- oder Wabenkern, der auf beiden Seiten mit CFK-Scheiben abgedeckt ist. Die CFK-Beschichtung kann aus einzelnen Gewebelagen oder aus Kreissegmenten bestehen. Letztere vergrößern den radialen Faseranteil (**Bild 2**).



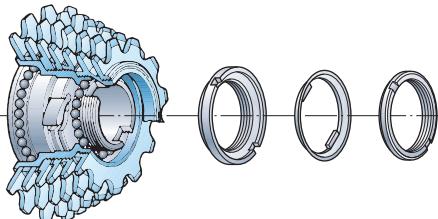
**Bild 2:** Faserlage im Scheibenrad

Nachteilig ist ihre mangelnde vertikale Elastizität, die zu einem unkomfortablen Lauf und Energieverlusten auf unebener Fahrbahn führt.

Bei Scheibenrädern bilden Nabe, Radscheibe und Felge eine Einheit. Die Fügestellen sind verklebt und Reparaturen dementsprechend aufwendig.

### Freilaufritzelsatz (Schraubzahnkranz)

Anstelle eines einzelnen Ritzels kann ein Freilauf auch eine Kombination von Ritzeln tragen. Die Ritzel sind mit verschiedenen Innendurchmessern stufenweise auf den Ritzelträger geschraubt oder gesteckt (**Bild 1**).



**Bild 1:** Freilaufritzelsatz

Der Freilaufkörper besitzt das gleiche Gewindemaß wie einzelne Schraub- oder Freilaufritzel. Zur Befestigung von Schraubritzeln, Freilaufritzeln oder Freilaufritzelsatz an der Nabe gibt es fünf Gewindegroßen (**Tabelle 1**).

**Tabelle 1: Gewindemaße zur Ritzelbefestigung**

Maß	Bezeichnung	Verwendung
1,370" x 24 TPI 34,80 x 1,058 mm	Englisches Maß BSA	Schraubritzeln, Freilaufritzeln, Freilaufritzelsatz
35 mm x 24 TPI 1,378" x 1,058 mm	Italienisches Maß	Schraubritzeln, Freilaufritzeln, Freilaufritzelsatz
34,7 x 1,0 mm 1,366" x 25,4 TPI	Französisches Maß	Schraubritzeln, Freilaufritzeln, Freilaufritzelsatz
1,375" x 24 TPI 34,92 x 1,058 mm	US Maß	Schraubritzeln, Freilaufritzeln, Freilaufritzelsatz
M 30 x 1	BMX	Freilaufritzeln

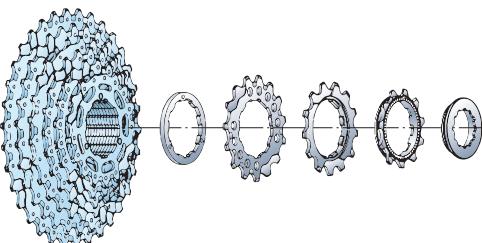
#### Hinweis:

Die verschiedenen Gewinde (außer BMX) unterscheiden sich in ihren Abmessungen nur minimal. Es ist bei der Montage auf jeden Fall mit Vorsicht zu testen, ob Nabe und Freilaufträger zusammenpassen.

Ein Gewinde nach französischer Bauart hat eine kleinere Steigung als die nach englischer, italienischer oder US Bauart und sollte nicht mit solchen kombiniert werden.

### Steckritzelsatz (Kassette)

Bei einem Steckritzelsatz werden die Ritzel als vormontiertes Paket oder einzeln mit Zwischenringen auf den Ritzelträger aufgesteckt (**Bild 2**).



**Bild 2:** Steckritzelsatz

Die Drehmomentübertragung geschieht über ein Keilwellenprofil vom Ritzel auf den Ritzelträger. Ein Gewindering mit Rechtsgewinde wird als Abschluss in den Ritzelträger geschraubt. Als Werkzeug ist dafür ein passender Schlüsseleinsatz (fälschlich oft als Abzieher bezeichnet) notwendig.

Zum Lösen wird der Ring gegen den Uhrzeigersinn geschraubt. Da die Nabe in dieser Richtung frei dreht, ist dabei die Kassette mit einer Kettenpeitsche festzuhalten.

### 6.5.2.2 Freilaufkupplungen

Die Freilaufkupplung stellt eine drehrichtungsabhängige Verbindung zwischen Ritzel und Nabe her. Wird der Antrieb langsamer, unterbrochen oder umgekehrt (reversiert), kann das Rad ohne Einschränkung seiner Bewegung in Fahrtrichtung weiterrollen.

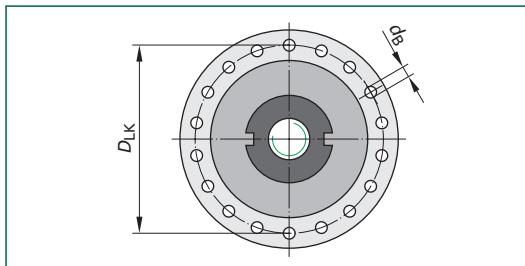
Die Erfindung des Freilaufs war einer der wichtigsten Beiträge, um das Fahrrad im 19. Jahrhundert massentauglich zu machen. Die bis dahin sich ständig mitdrehenden Pedale erschwerten die Handhabung, weil bei schneller Bergabfahrt die Füße oft den Halt auf den Pedalen verloren haben und es deswegen zu Stürzen mit schwerwiegenden Verletzungen kam. Ein weiterer Sicherheitsgewinn ergibt sich bei Kurvenfahrt in großer Schräglage, da das kurveninnere Pedal hoch gehalten werden kann. Darüber hinaus ermöglicht der Freilauf das Rollenlassen des Fahrrades zur Erholung der Muskeln und beim Schalten von Getrieben ab entlastet er den Antriebsstrang vom Drehmoment.

Je nach Prinzip der Kraftübertragung unterscheidet man beim Freilauf zwischen:

- Formschluss durch Sperrklinken oder Zahnscheiben und
- Kraftschluss durch Klemmrollen oder Klemmkörper.

### Speichenbohrungsdurchmesser

Der Durchmesser der Speichenbohrung  $d_B$  liegt zwischen 2,3 und 3,0 mm (**Bild 1**). Er sollte 0,2 bis 0,3 mm größer als der Durchmesser im Bogen der Speiche sein, damit diese problemlos eingefädelt werden kann, dabei aber unnötiges Spiel vermieden wird. Größere Differenzen zwischen Speichenbohrung und -durchmesser vereinfachen die industrielle Fertigung von Rädern, verringern aber ihre Haltbarkeit.



**Bild 1:** Maße am Nabenflansch

### Hi-Lo-Nabe

Bei der Übertragung von Drehmomenten, die durch Antriebs- oder Bremskräfte entstehen, verdreht sich bei einseitiger Krafteinleitung immer auch das Nabenzentrum. Das bedeutet, dass der Nabenflansch, der näher zum Ort der Krafteinleitung liegt, einen höheren Anteil des Drehmoments übertragen muss. Um die an diesem Flansch befestigten Speichen zu entlasten, werden gelegentlich Hi-Lo-Naben angeboten, deren höher belasteter Flansch einen größeren Durchmesser aufweist (**Bild 2**).



**Bild 2:** Hi-Lo Nabe

Die Entlastung der Speichen durch die Vergrößerung des Lochkreisdurchmessers ist aber geringfügig, sodass diese Konstruktion nur in den Grenzbereichen der Gewichtsoptimierung sinnvoll einzusetzen ist.

### Flanschbrüche

Durch fehlerhafte Montage oder durch eine falsche Kombination von Bauteilen kann es zu ei-

ner Rissbildung am Flansch kommen, die normalerweise zu einem Bruch führt.

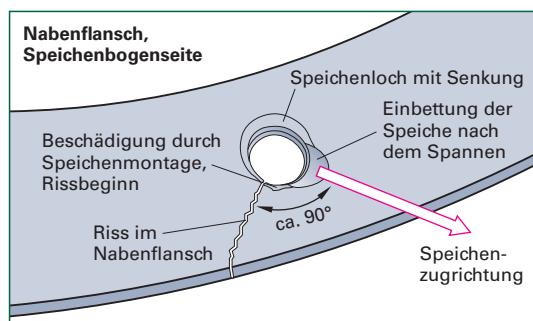
Mögliche Ursachen für Flanschbrüche an Fahrerradnaben sind:

**1 Radiale Einspeichung in einer vom Nabenherrsteller nicht dafür vorgesehenen Nabe.**

Dabei wirkt eine zu hohe Gesamtzugkraft der Speichen auf einen schwach ausgelegten Flansch. Gleichzeitig wird die zyklische Ent- und Belastung der Speichen nicht durch Unterkreuzungen abgedämpft (**vgl. Kap. 6.7.5**).

**2 Falsche Speichengeometrie (Speichenbogenlänge zu kurz und/oder Drahtdurchmesser im Speichenbogen zu groß).**

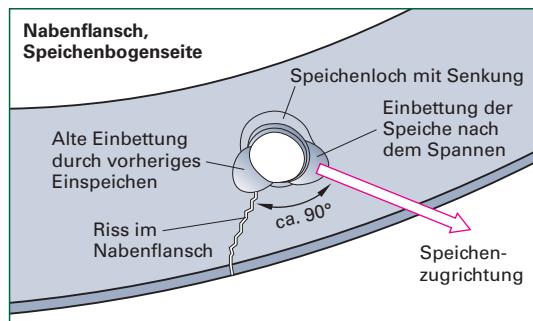
Die Speiche beschädigt beim Einfädeln, Ausrichten oder Spannen den Rand der Speichenbohrung durch Quetschung. Wenn die Beschädigung im Winkel von ca. 90° zur Speichenzugrichtung liegt, kann der Nabenflansch einreißen (**Bild 3**).



**Bild 3:** Rissbildung durch falsche Speichengeometrie

**3 Umspeichen mit geänderter Speichenausrichtung (zweites Einspeichen der Nabe).**

Die alte Einbettung wirkt wie eine Beschädigung oder Kerbe an der Speichenbohrung. Da die alte Einbettung ca. im 90° Winkel zur neuen Zugrichtung steht, kann sie der Ausgangspunkt für einen Riss im Flansch sein (**Bild 4**).



**Bild 4:** Rissbildung durch falsche Speicheneinbettung

Je nachgiebiger und unebener die Fahrbahn ist, desto präziser ist der korrekte Reifendruck auszuwählen. Bei festem und glattem Untergrund „durf es auch mal ein bisschen mehr sein“, ohne dass der Rollwiderstand zu stark beeinflusst wird (**Bild 1**). Oft ist der Reifendruck zu hoch eingestellt, weil die starken Vibratoren dem Fahrer eine hohe Geschwindigkeit suggerieren.

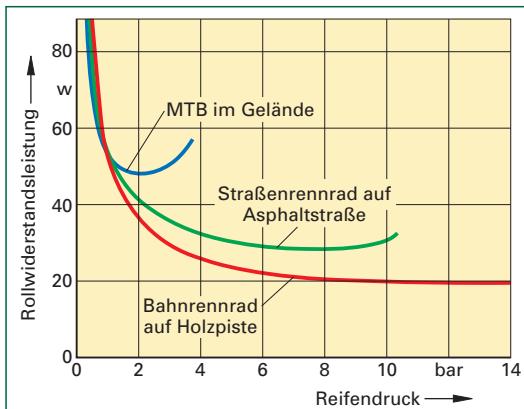


Bild 1: Abhängigkeit des Rollwiderstands vom Reifendruck bei unterschiedlichen Fahrbahnen

### Einfluss des Materials

Das verwendete Material hat einen erheblichen Einfluss auf den Rollwiderstand eines Reifens:

- Weniger Material für Karkasse, Lauffläche und Schlauch vermindern die für die Verformung aufzuwendenden Kräfte.
- Elastischeres Material für Karkassenfäden, umgebende Gummimatrix und Schläuche erhöhen die Rate der Rückgewinnung der eingebrachten Energie.
- Flexibleres Material verbessert die Anpassung des Reifens an die Fahrbahnoberfläche und reduziert beim Überfahren von Gegenständen und Hindernissen die Länge des Reifenlatsches (**s. Seite 228, Bild 1**).
- Schläuche, die möglichst genau dem Innen-durchmesser des Reifens entsprechen, sind weniger durch den Luftdruck vorgespannt und haben einen geringeren Verformungswiderstand als zu kleine Schläuche.

### Breite vs. schmale Reifen

Die Größe der Aufstandsfläche ist vom Innen-durchmesser abhängig, ihre Form aber von der Reifenbreite. Während der breite Reifen einen kurzen Latsch ausbildet, ist der des schmalen länger. Ein schmälerer Reifen hat dementsprechend auch ein höheres Bremsmoment (**Bild 2**).

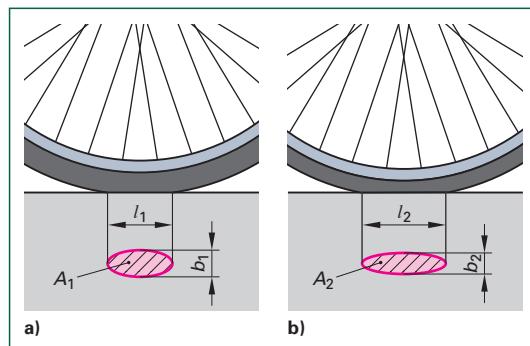


Bild 2: Vergleich von Aufstandsflächen  
a) breiter Reifen, b) schmaler Reifen

Breite Reifen senken sich auch nicht so stark in Vertiefungen der Fahrbahn ab. Unebenheiten werden nicht so stark als unerwünschte Schwingungen des Rahmens weitergegeben. Die Verlustleistung von breiten Reifen ist insgesamt geringer als die von schmalen (**Bild 3**).

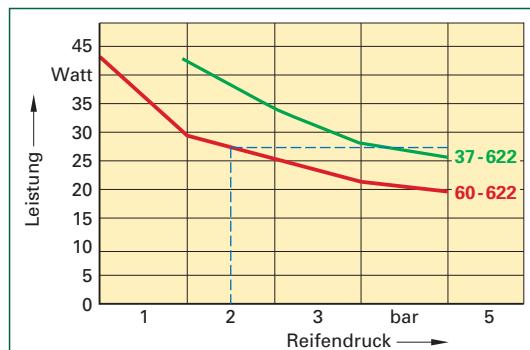
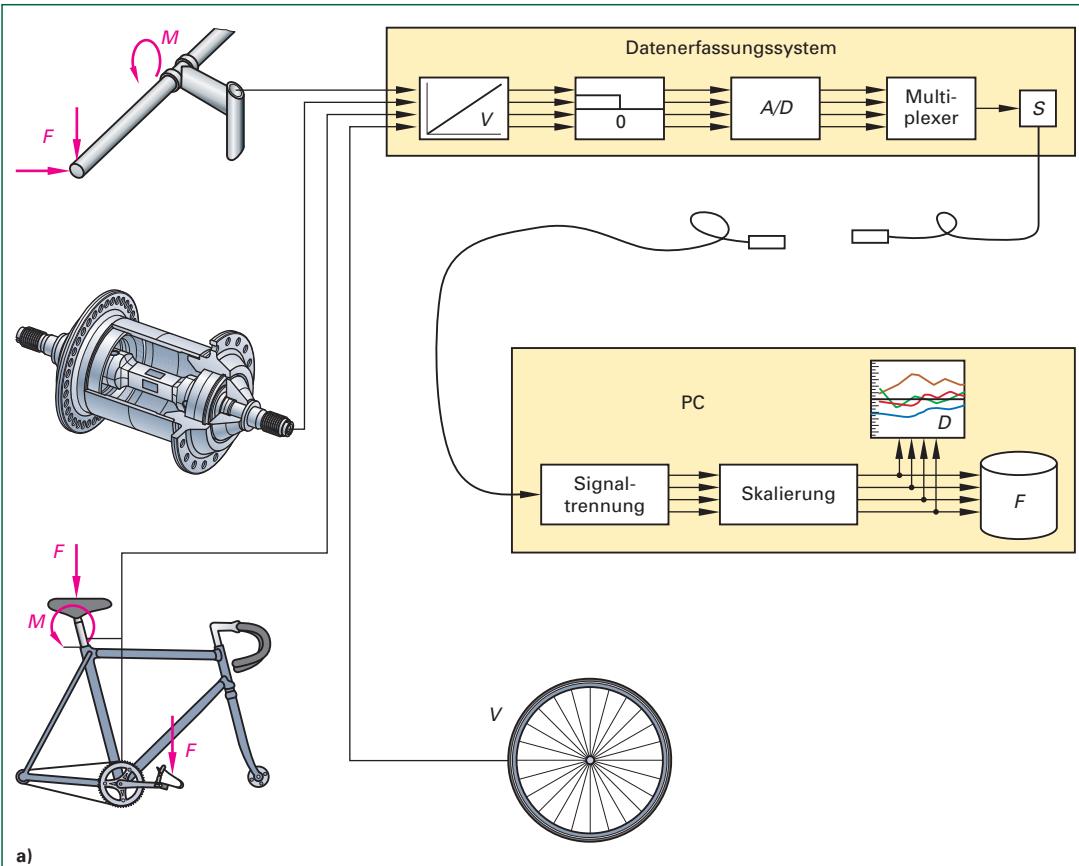


Bild 3: Verlustleistung unterschiedlicher Reifenbreiten

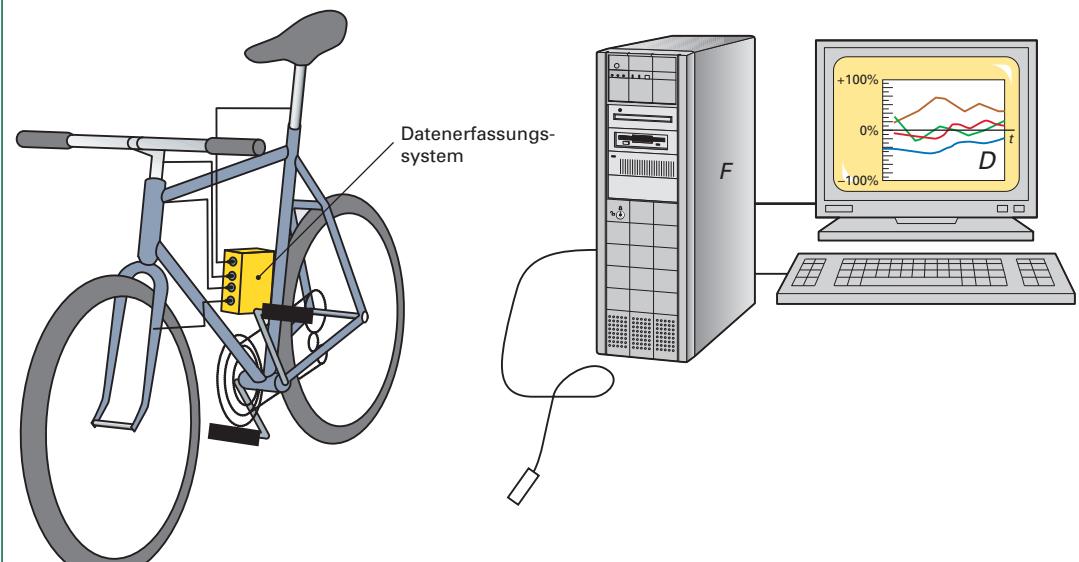
### Großer vs. kleiner Raddurchmesser

Kleine Raddurchmesser sind gegenüber großen bezüglich des Rollwiderstandes in mehrfacher Hinsicht benachteiligt:

- Der Reifen senkt sich tiefer ab, um dieselbe Aufstandsfläche zur erhalten. Das bedeutet eine höhere Walkarbeit.
- Das Hebelverhältnis  $s/r$  wird größer und damit das Bremsmoment  $M_b$  bzw. der Rollwiderstandsbeiwert  $k_R$ .
- Beim Überfahren eines Hindernisses entsteht ebenfalls ein für das kleine Rad ungünstiges Hebelverhältnis.
- Beim Durchfahren eines Schlaglochs ist die Einsinktiefe des kleinen Rades größer und somit steigt in diesem Fall noch zusätzlich die Höhe des Hindernisses.

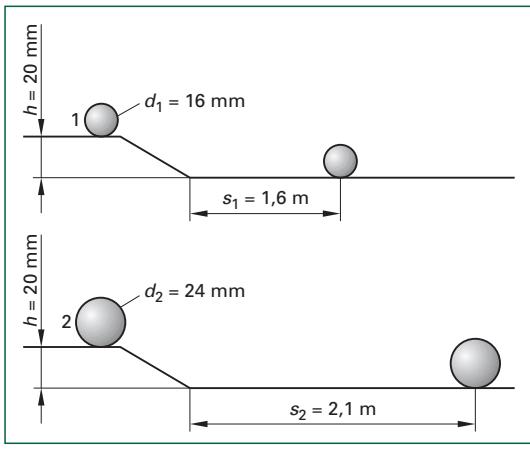


a)



17

Bild 1: Datenerfassungsanlage a) Schematische Darstellung der Messkette b) Messaufbau

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 523**).

Bestimmen Sie

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

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

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

### 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  $\varrho$ , 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:

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

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

Bestimmen Sie den Luftwiderstand bei Windstille.

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

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

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

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

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

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

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

### Steigungswiderstand

Beim Befahren einer Steigung muss der Radfahrer mit seiner Antriebskraft  $F_A$  den Steigungswiderstand  $F_{St}$  überwinden (**Bild 1, Seite 525**). 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:

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