



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 Rimpf

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

Satz: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpf

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 Naben, 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 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]
Beyss 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, Leipzig, [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-Saludicio, [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 Stolz, 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, Kriftel, [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-Grambusch, [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; Rebour; San Francisco; 2013 [563-1]
Retül Bikefitting, US-Boulder, [437-2]
Riese & Müller GmbH, Weiterstadt, [104-2, 113-1]
Rohloff AG, Fulda, [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]
Velotrauma GmbH + Co.KG, Weil der Stadt, [104-1, 118-1, 228-2, 386-1]
Weiler Werkzeugmaschinen GmbH, Emskirchen/ Maudorf, [42-1]
Wethepeople Bike Company – We Make Things GmbH, Köln, [110-2, 111-1]
Wippermann junior GmbH, Hagen, (Connex), [340-5]
Wulforst GmbH, Gütersloh, [122-2]

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

| | | | |
|--|----|---|-----|
| 1 Technische Grundlagen | 9 | 3 Fahrradbauarten | 101 |
| 1.1 Prüfen und Messen | 9 | 3.1 Alltagsfahräder | 101 |
| 1.1.1 Grundbegriffe und Definitionen | 9 | 3.2 Sportfahräder | 105 |
| 1.1.2 Messen | 10 | 3.3 Sessel- und Liegefahrräder | 112 |
| 1.1.3 Messabweichungen | 10 | 3.4 Lastenfahräder | 116 |
| 1.1.4 Prüfmittel | 11 | 3.5 Kinderfahräder | 117 |
| 1.2 Maschinenelemente | 14 | 3.6 Mehrpersonenfahräder | 118 |
| 1.2.1 Schraubverbindungen und Gewinde | 14 | 3.7 Show-Bikes | 120 |
| 1.2.2 Nietverbindungen | 22 | 3.8 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 |
| 1.3 Fertigungsverfahren | 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 Schienenfahräder | 125 |
| 1.3.5 Gewinde und Gewindeschneiden | 38 | | |
| 1.3.6 Spanende Fertigung mit Werkzeugmaschinen | 41 | 4 Elektrofahrräder | 126 |
| 1.3.7 Scherschneiden | 43 | 4.1 Typen von Elektro-Zweirädern | 126 |
| 1.3.8 Biegen von Blechen | 43 | 4.2 Komponenten von Elektrofahrrädern | 128 |
| 1.3.9 Biegen von Rohren | 44 | 4.3 Antriebsarten und Einbauort von Motoren | 130 |
| 1.4 Werkstofftechnik | 45 | 4.4 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 | 4.5 Antriebssteuerung | 141 |
| 1.4.5 Magnesium | 55 | 4.6 Sensoren | 143 |
| 1.4.6 Faserverstärkte Werkstoffe | 56 | 4.7 Bedienung und Display | 145 |
| 1.5 Tribologie und Verschleiß | 61 | 4.8 Energierückgewinnung | 146 |
| 1.5.1 Tribologisches System | 61 | 4.9 Akkus | 147 |
| 1.5.2 Reibung | 63 | 4.9.1 Elektrochemische Spannungserzeugung | 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 |
| 1.6 Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik | 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 | 5 Fahrwerk | 157 |
| 1.6.5 Bauelemente | 78 | 5.1 Kräfte und Momente am Fahrradrahmen | 157 |
| 1.7 Steuerungs- und Regelungstechnik | 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 | 5.2 Rahmentest | 161 |
| 1.7.5 Signalweg | 92 | 5.3 Rahmenbauarten | 163 |
| 1.7.6 Steuerungsarten | 92 | | |
| 1.7.7 Verknüpfungen | 95 | | |
| 2 Geschichte des Fahrrades | 98 | | |

| | | | | | |
|-------------|--|-----|------------|--|-----|
| 5.4 | Rohrherstellung | 167 | 6.4 | Vorschriften und Prüfverfahren | 267 |
| 5.4.1 | Stahlrohre | 167 | 6.5 | 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 |
| 5.5 | 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 | 6.6 | Felgen | 280 |
| 5.6 | Rahmengeometrie | 195 | 6.6.1 | Reifenaufnahme | 280 |
| 5.6.1 | Rahmenhöhe 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 Brems Scheibe | 285 |
| 5.6.5 | Einfluss auf das Fahrverhalten | 200 | 6.7 | Vorgespannte Speichen | 286 |
| 5.7 | Kontrolle von Rahmen und Gabeln | 201 | 6.7.1 | Material, Herstellung | 286 |
| 5.8 | Rahmen- und Gabel-Anbauteile | 204 | 6.7.2 | Speichenbauarten | 287 |
| 5.9 | 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 |
| 5.10 | 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 |
| 5.11 | Fahrradfederung | 227 | 6.7.11 | Fachgerechter Radbau | 303 |
| 5.11.1 | Aufgaben der Fahrradfederung | 227 | 6.7.12 | Systemlaufräder | 303 |
| 5.11.2 | Das ungefederte Fahrrad | 227 | 6.8 | 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 | Räder | 259 | 6.8.10 | Reifendruck und Karkassenspannung | 319 |
| 6.1 | Scheibenrad | 259 | 6.8.11 | Rolleigenschaften von Reifen | 321 |
| 6.2 | Ungespanntes Speichenrad (Druckspeichenrad) | 260 | 7 | Antrieb | 324 |
| 6.3 | Vorgespanntes Speichenrad (Zugspeichenrad) | 261 | 7.1 | Pedalbewegungen | 324 |
| 6.3.1 | Kräfte am vorgespannten Rad | 261 | 7.2 | Kurbelsatz | 324 |
| 6.3.2 | Radiale Kräfte | 261 | 7.2.1 | Verbindung Kurbelarm-Kurbelwelle | 324 |
| 6.3.3 | Tordierende Kräfte | 262 | 7.2.2 | Kurbellager (Innenlager) | 326 |
| 6.3.4 | Laterale Kräfte | 264 | 7.2.3 | Kurbeln und Kettenräder | 328 |
| 6.3.5 | Zusammenfassung der Kräfte | 265 | 7.2.4 | Kurbellänge | 330 |
| 6.3.6 | Steifigkeit eines Rades | 265 | 7.2.5 | Trittweite | 330 |
| | | | 7.2.6 | Kettenlinie | 331 |

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

| | | | | | |
|-----------|---|-----|----------------------------|---|-----|
| 13.2.2 | Pulverlackierung | 470 | 17.6 | 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 |
| 13.3 | Eloxieren | 472 | 17.6.3 | Typprüfung Fahrrad | 509 |
| 14 | Schmierung, Reinigung und Pflege | 473 | 17.7 | Sicherheitstechnische Untersuchungen | 509 |
| 14.1 | Schmierung | 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 | 17.8 | Schadensbegutachtung | 515 |
| 14.2 | Pflege und Reinigung von Fahrradbauteilen | 483 | 17.8.1 | Sach- und Körperschäden | 515 |
| 14.3 | Abfallentsorgung | 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 | 17.9 | Risiken | 515 |
| 15 | Instandhaltung, Werkzeuge | 492 | 17.10 | Produktsicherheit Elektrofahrrad | 516 |
| 16 | Arbeitssicherheit | 500 | 18 | Fachrechnen und physikalisch-technologische Grundlagen | 517 |
| 16.1 | Gesetzliche Grundlagen | 500 | 18.1 | Längen | 517 |
| 16.2 | Sicherheitszeichen | 500 | 18.2 | Drehzahl | 517 |
| 16.3 | Gefahrstoffe | 501 | 18.3 | Geschwindigkeit | 517 |
| 16.4 | Persönliche Schutzausrüstung | 502 | 18.4 | Beschleunigung und Verzögerung | 518 |
| 16.5 | Unfallverhütung | 503 | 18.5 | Anhalteweg und Bremsweg | 518 |
| 17 | Produktsicherheit | 504 | 18.6 | Masse und Dichte | 518 |
| 17.1 | Benutzerinformation für Gebrauchsgüter | 504 | 18.7 | Trägheit und Trägheitsmoment | 520 |
| 17.1.1 | Informationspflicht | 504 | 18.8 | Flächenmoment und Widerstandsmoment | 520 |
| 17.1.2 | Informationsinhalte | 504 | 18.9 | Kraft | 520 |
| 17.1.3 | Informationsfehler | 504 | 18.10 | Antriebsschlupf und Bremsschlupf | 525 |
| 17.2 | Gewährleistung | 505 | 18.11 | Mechanische Arbeit | 525 |
| 17.2.1 | Sachmangel | 505 | 18.12 | Energie | 526 |
| 17.2.2 | Beweislastumkehr | 505 | 18.13 | Leistung | 526 |
| 17.3 | Haftung | 505 | 18.14 | Wirkungsgrad | 528 |
| 17.3.1 | Haftungsansprüche | 505 | 18.15 | Drehmoment | 529 |
| 17.3.2 | Zivilrechtliche Produzentenhaftung | 506 | 18.16 | Hebel und Bremsen | 529 |
| 17.4 | Garantie und Kulanz | 506 | 18.17 | Kreiselmoment und Kreiselkraft | 539 |
| 17.5 | Normen | 507 | 18.18 | Getriebe | 539 |
| 17.5.1 | Das DIN | 507 | 18.19 | Kurvenfahrt | 545 |
| 17.5.2 | Normungsarbeit | 507 | 18.20 | Federung | 546 |
| 17.5.3 | Sicherheitsnormen Fahrrad | 507 | 18.21 | Festigkeit | 555 |
| | | | 18.22 | Elektrotechnik | 557 |
| | | | 18.23 | Projekt Elektrofahrrad | 559 |
| | | | 19 | Terminologie | 562 |
| | | | 20 | Sponsoren | 565 |
| | | | Sachwortverzeichnis | | 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 (Kleinkrafträder 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 jedes 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 Kraftfahrzeuges.
- 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 abzustößen, den Gasgriff am Lenker bedient. Ihre Benutzung ist nur auf Privatgrund erlaubt.

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

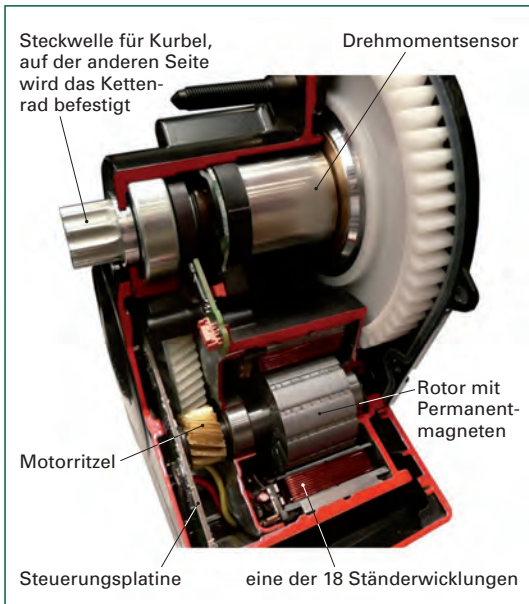


Bild 1: Schnittbild Kurbellagerantrieb mit Direktantrieb der Kurbellagerwelle (Bosch Classic-Antrieb)

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 Fahrerleistung angepasst werden.

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

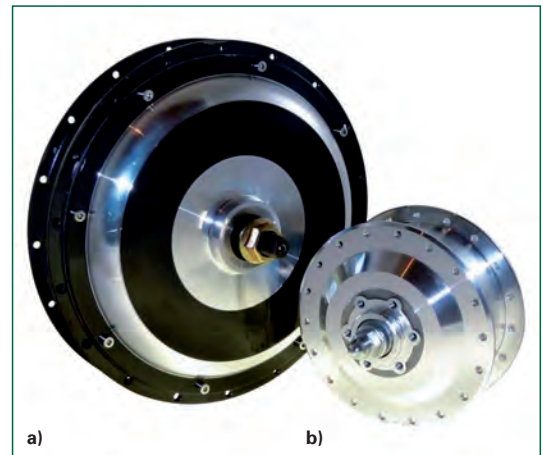


Bild 2: Größenvergleich Direktläufer a) ohne Getriebe b) mit Getriebe.

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**).

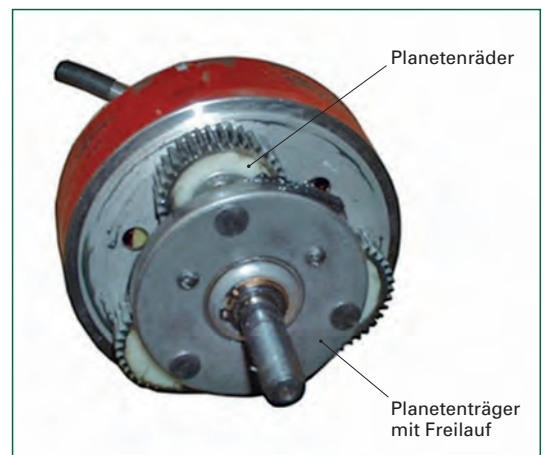


Bild 3: Nabenmotor mit angeflanschem Getriebe (Bafang)

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_i 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.

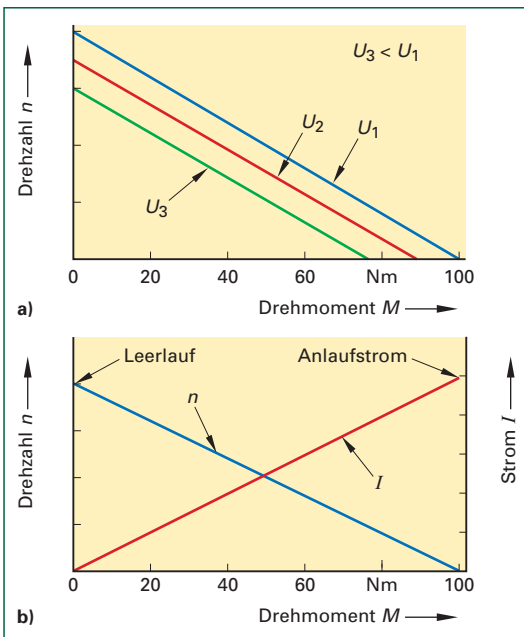


Bild 1: Drehmoment/Drehzahlkennlinie eines Nebenschlussmotors **a)** mit den Kennlinien unterschiedlicher Spannung **b)** mit Kennlinie der Stromstärke

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 η eines Nebenschlussmotors. Die Kennlinien haben immer diesen prinzipiellen Verlauf.

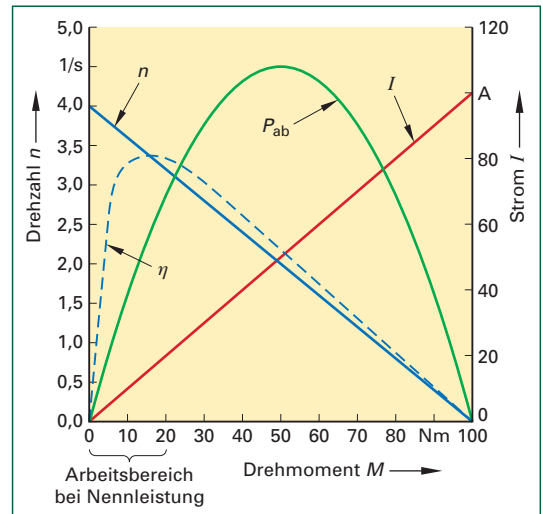


Bild 2: Kennlinien eines Nebenschlussmotors

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

Permanentenerregte 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.

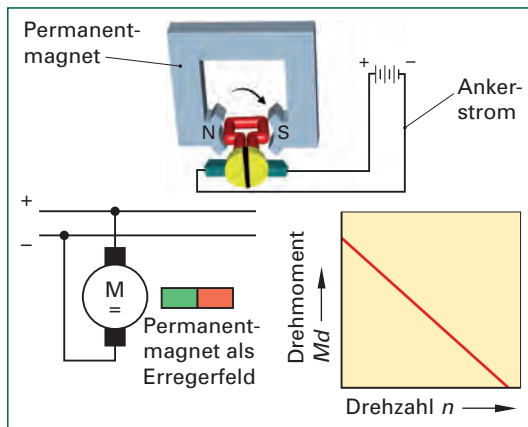


Bild 1: Aufbau, Schaltbild und Kennlinie eines permanentenerregten Gleichstrommotors

Permanentenerregte 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 Erregerfeldstärke 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 permanentenerregten 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.

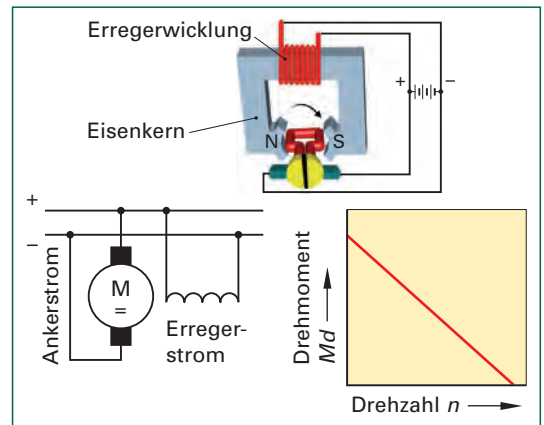


Bild 2: Elektrisch erregter Gleichstrom-Nebenschlussmotor

Nebenschlussmotoren fanden als Nachrüstsatz für die ersten Elektrofahräder 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.

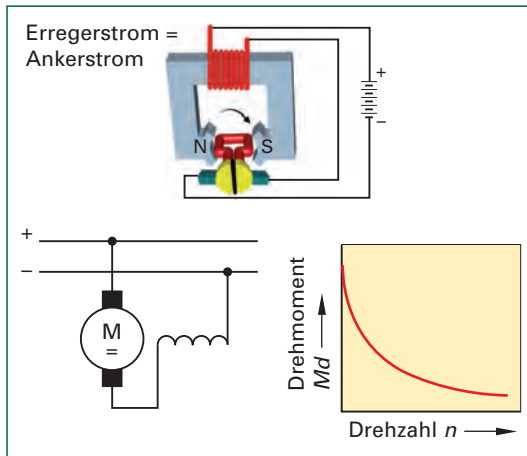


Bild 1: Aufbau, Schaltbild und Kennlinie eines Gleichstrom-Reihenschlussmotors

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

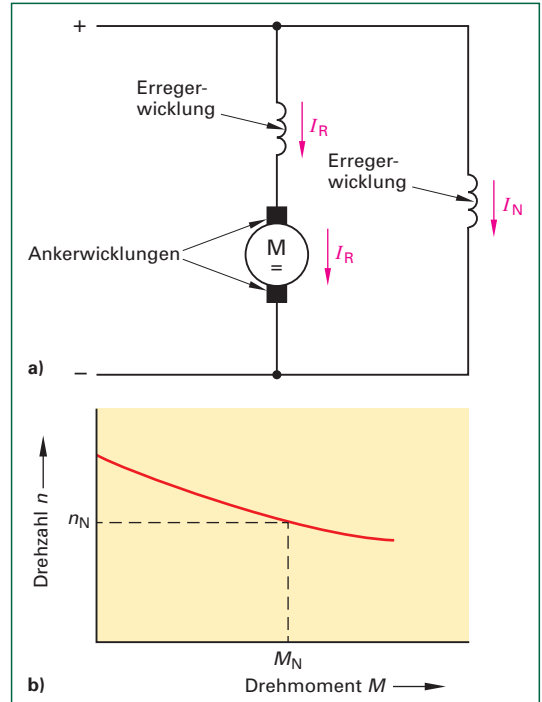


Bild 2: Schaltbild Doppelschlussmotor, Kennlinie

Bürstenloser Gleichstrommotor (BLDC)¹

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.

¹ 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.

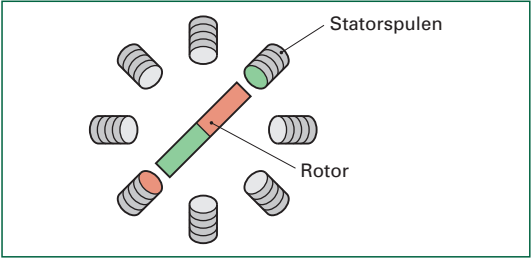


Bild 1: Grundprinzip eines bürstenlosen Gleichstrommotors, Stabmagnet als Innenläufer

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 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 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.

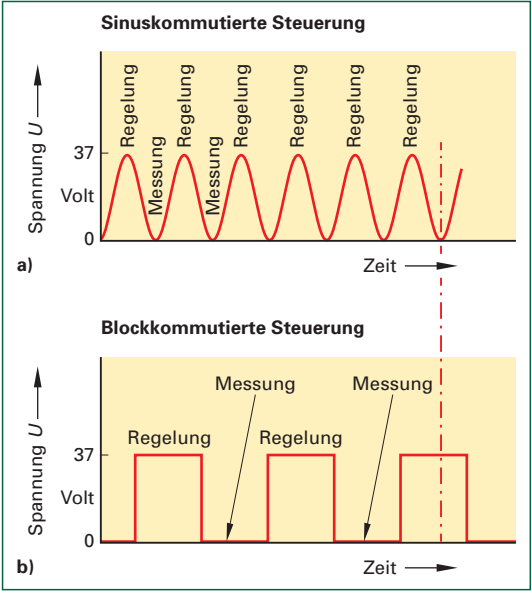


Bild 2: Ansteuerung der Wicklungen a) mit sinusförmiger b) mit blockförmiger Spannung

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

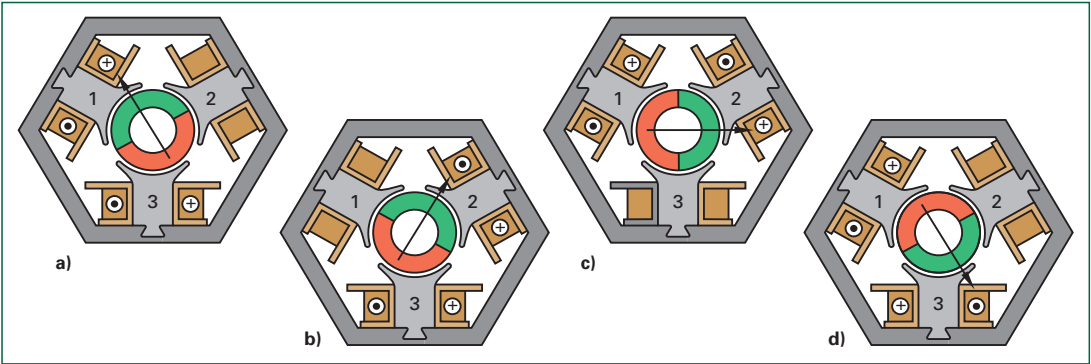


Bild 3: Veränderung der Rotorposition bei Blockeinspeisung (Modellvorstellung, Quelle Ösinghausen)

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, sodass in den Spulen ein sinus- oder blockförmiger Strom fließt (**Bild 2, Seite 140**).

Der Zeiger im Rotor soll die Drehbewegung um 180° 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**).

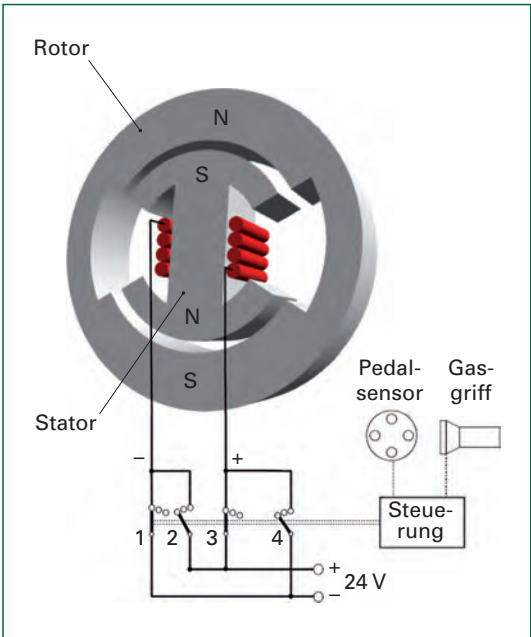


Bild 1: Einphasenschaltung eines Außenläufers

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.

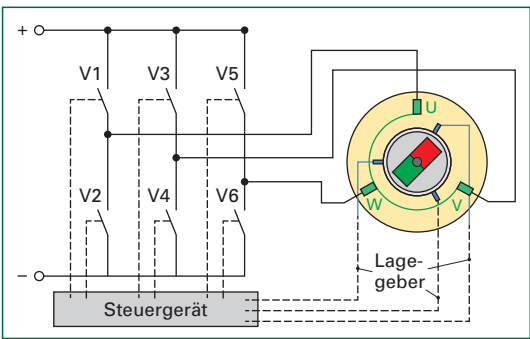


Bild 2: Prinzip eines Dreiphasen-BLDC-Motors

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**).

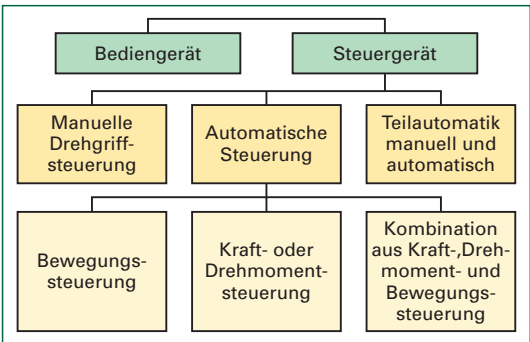


Bild 3: Steuerungskonzepte

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.

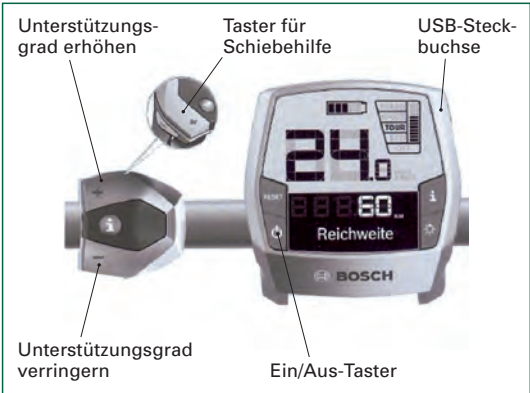


Bild 3: Bedieneinheit (Bosch)

5.4.3 Rohre aus CFK

Prepregs oder in Harz getränkte Kohlefasergelege oder -gewebe (Seite 60) werden von Hand um einen Kern oder Schlauch herumgewickelt und in einer Form ausgehärtet. Nach dem Aushärten 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° bis etwa 2° variieren. Auf ähnliche Weise lässt sich die Wandstärke verändern.

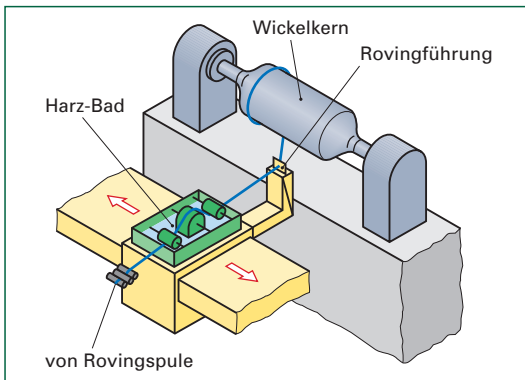


Bild 1: Wickeln von Carbonrohren

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 Lötten und Schweißen verlieren die Endbereiche der Stahlrohre einen Teil ihrer Festigkeit. Daher werden die Endbereiche besonders leichter Rahmenrohre dicker und das weniger belastete Rohrmittelteil dünner ausgeführt. Diese Veredelung erfolgt als Kaltzug über einen Innendorn (**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**).

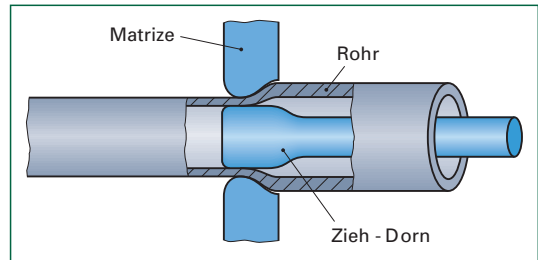


Bild 2: Ziehen von Dickend-Rohren

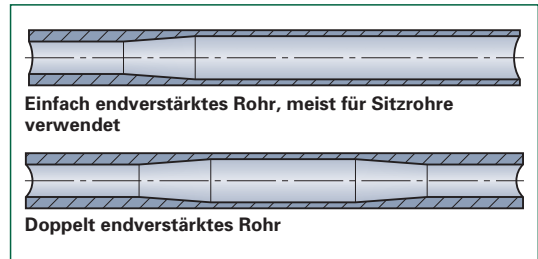


Bild 3: Endverstärkte Rohre

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 „Rundhämmern“ 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.

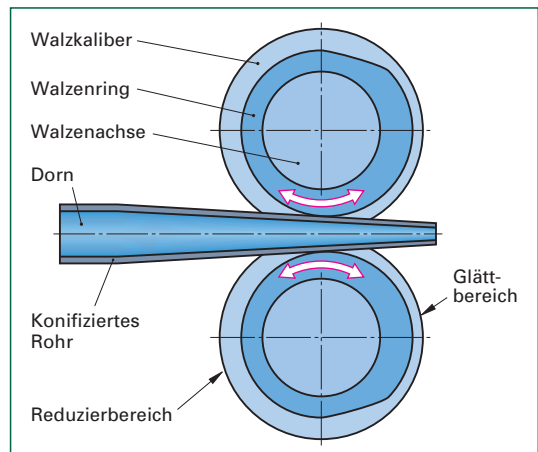


Bild 4: Kaltpilgern zur Herstellung konifizierter Rohre

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**).

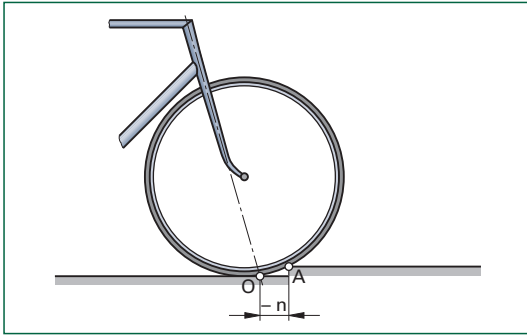


Bild 1: Negativer Nachlauf

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 Federgabeln 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 β 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° und einem Rücksprung von 40 mm.

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

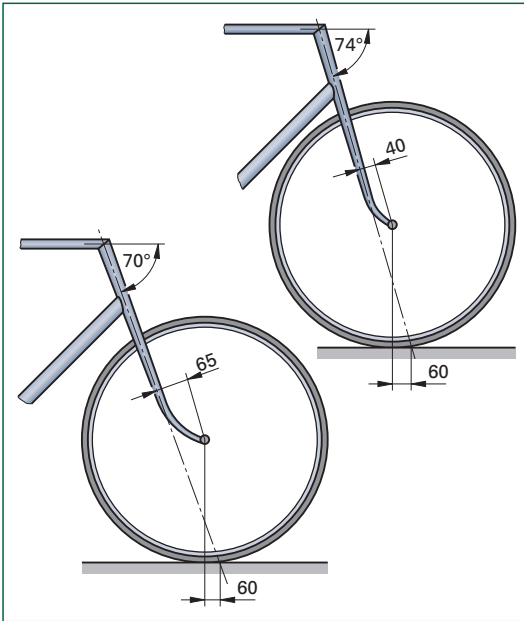


Bild 1: Gleicher Nachlauf bei ungleichem Rücksprung

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 Geradeausstellung 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 Lenkkräfte, um aus der Kurve wieder die Geradeausrichtung einzunehmen.

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

5.6.5 Einfluss auf das Fahrverhalten

Das Fahrverhalten eines Fahrrades wird bestimmt durch

- Wendigkeit
- Geradeauslauf
- Fahrkomfort
- 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 Rahmengestaltung 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 entlehnte 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**).

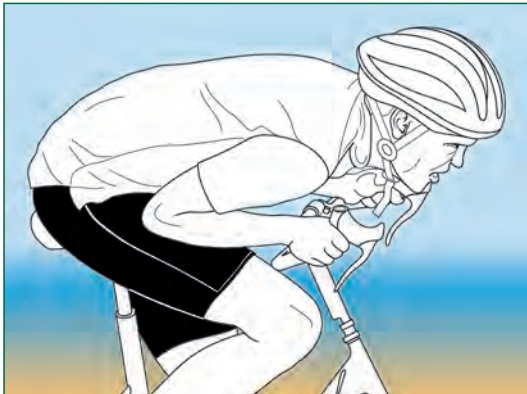


Bild 2: Kurzlenker für die Obree-Position

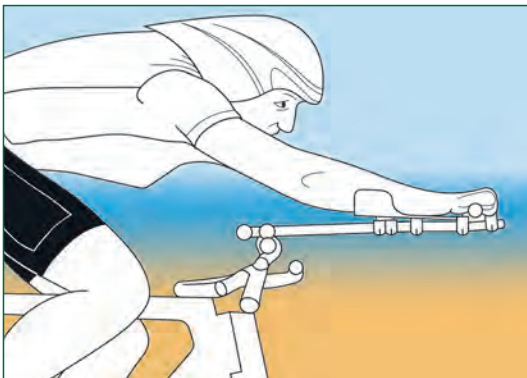


Bild 3: Lenker für die Superman-Position

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**).

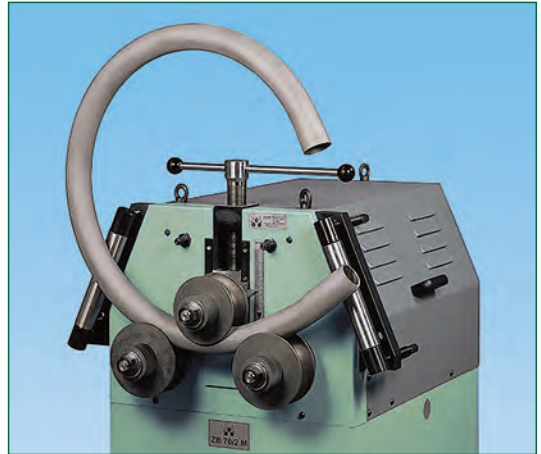


Bild 4: Rohr-Biegemaschine (Zopf)

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

Lenker aus Carbon fertigt man meist in Flechttechnik 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 Anziehmoment des Vorbaus und der Bar Ends mit Außenklemmung darf nicht überschritten werden. Diese Bar Ends sollten an dünnwandigen Alulenkern mit speziellen Innenstopfen (Plugs) montiert werden. Diese schützen den Lenker vor Verformung durch die Klemmkraft 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 Fahrbahnebenheiten aus und ist damit ein Teil der Federung.

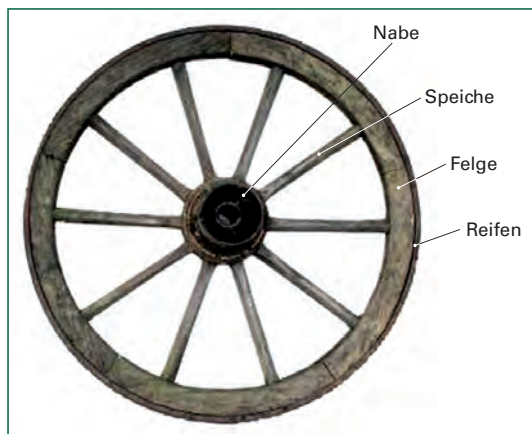


Bild 1: Funktionseinheiten des Rades

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 Scheibenrädern 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**).

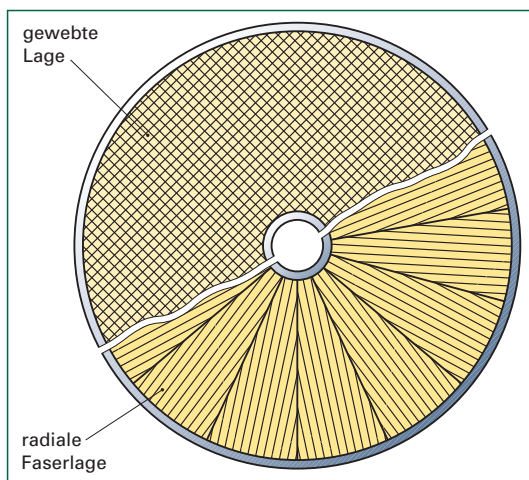


Bild 2: Faserlage im Scheibenrad

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.

6

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**).

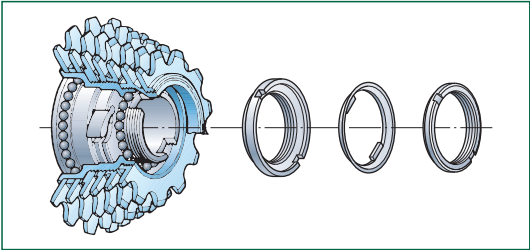


Bild 1: Freilaufritzelsatz

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

Tabelle 1: Gewindemaße zur Ritzelbefestigung

| Maß | Bezeichnung | Verwendung |
|-------------------------------------|-----------------------|---|
| 1,370" × 24 TPI 34,80 × 1,058 mm | Englisches Maß BSA | Schraubritzel, Freilaufritzel, Freilaufritzelsatz |
| 35 mm × 24 TPI 1,378" × 1,058 mm | Italienisches Maß | Schraubritzel, Freilaufritzel, Freilaufritzelsatz |
| 34,7 × 1,0 mm 1,366" × 25,4 TPI | Französisches Maß | Schraubritzel, Freilaufritzel, Freilaufritzelsatz |
| 1,375" × 24 TPI 34,92 × 1,058 mm | US Maß | Schraubritzel, Freilaufritzel, Freilaufritzelsatz |
| M 30 × 1 | BMX | Freilaufritzel |

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**).

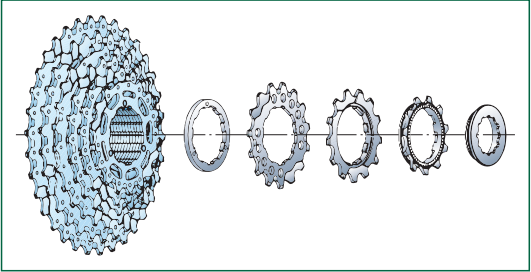


Bild 2: Steckritzelsatz

Die Drehmomentübertragung geschieht über ein Keilwellenprofil vom Ritzel auf den Ritzelträger. Ein Gewinding 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 Getriebeabstufen 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.

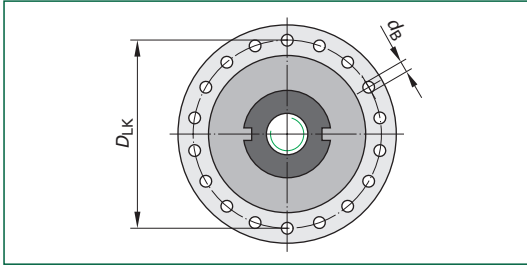


Bild 1: Maße am Nabenflansch

Hi-Lo-Nabe

Bei der Übertragung von Drehmomenten, die durch Antriebs- oder Bremskräfte entstehen, verdreht sich bei einseitiger Krafteinleitung immer auch das Nabenmittelteil. 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 Fahrradnaben sind:

1 Radiale Einspeichung in einer vom Nabenhersteller 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 abgedeckt (**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**).

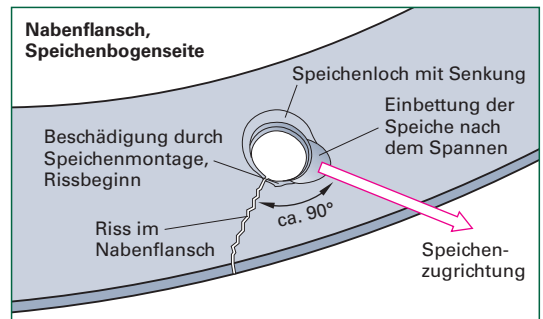


Bild 3: Rissbildung durch falsche Speichengeometrie

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**).

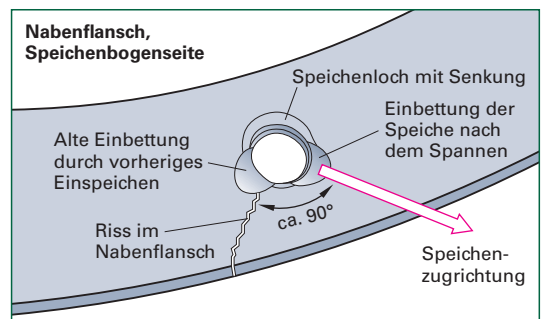


Bild 4: Rissbildung durch falsche Speichenbettung

Je nachgiebiger und unebener die Fahrbahn ist, desto präziser ist der korrekte Reifendruck auszuwählen. Bei festem und glattem Untergrund „darf 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 Vibrationen dem Fahrer eine hohe Geschwindigkeit suggerieren.

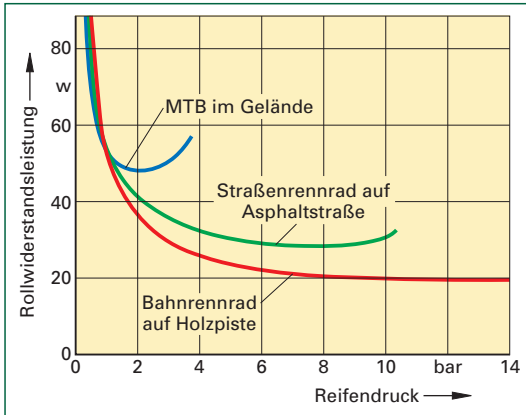


Bild 1: Abhängigkeit des Rollwiderstands vom Reifendruck bei unterschiedlichen Fahrbahnen

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 Innendurchmesser 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 Innendruck abhängig, ihre Form aber von der Reifenbreite. Während der breite Reifen einen kurzen Latsch ausbildet, ist der des schmalen länger. Ein schmalere Reifen hat dementsprechend auch ein höheres Bremsmoment (**Bild 2**).

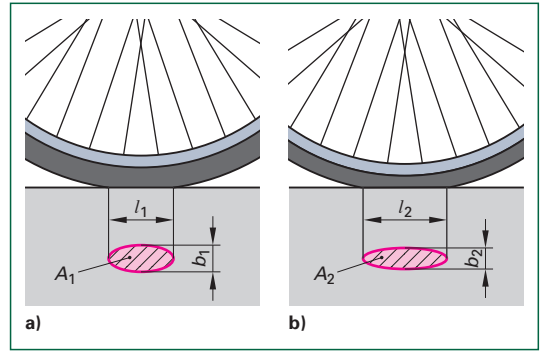


Bild 2: Vergleich von Aufstandsflächen
a) breiter Reifen, b) schmaler Reifen

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**).

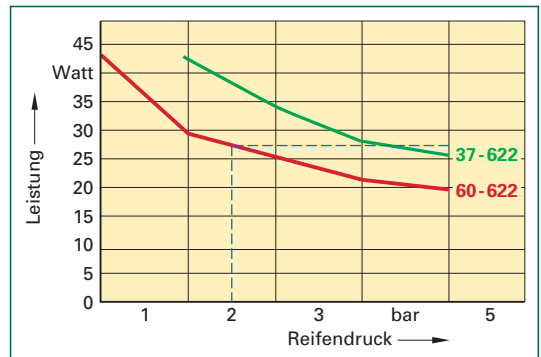


Bild 3: Verlustleistung unterschiedlicher Reifenbreiten

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 zu 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.

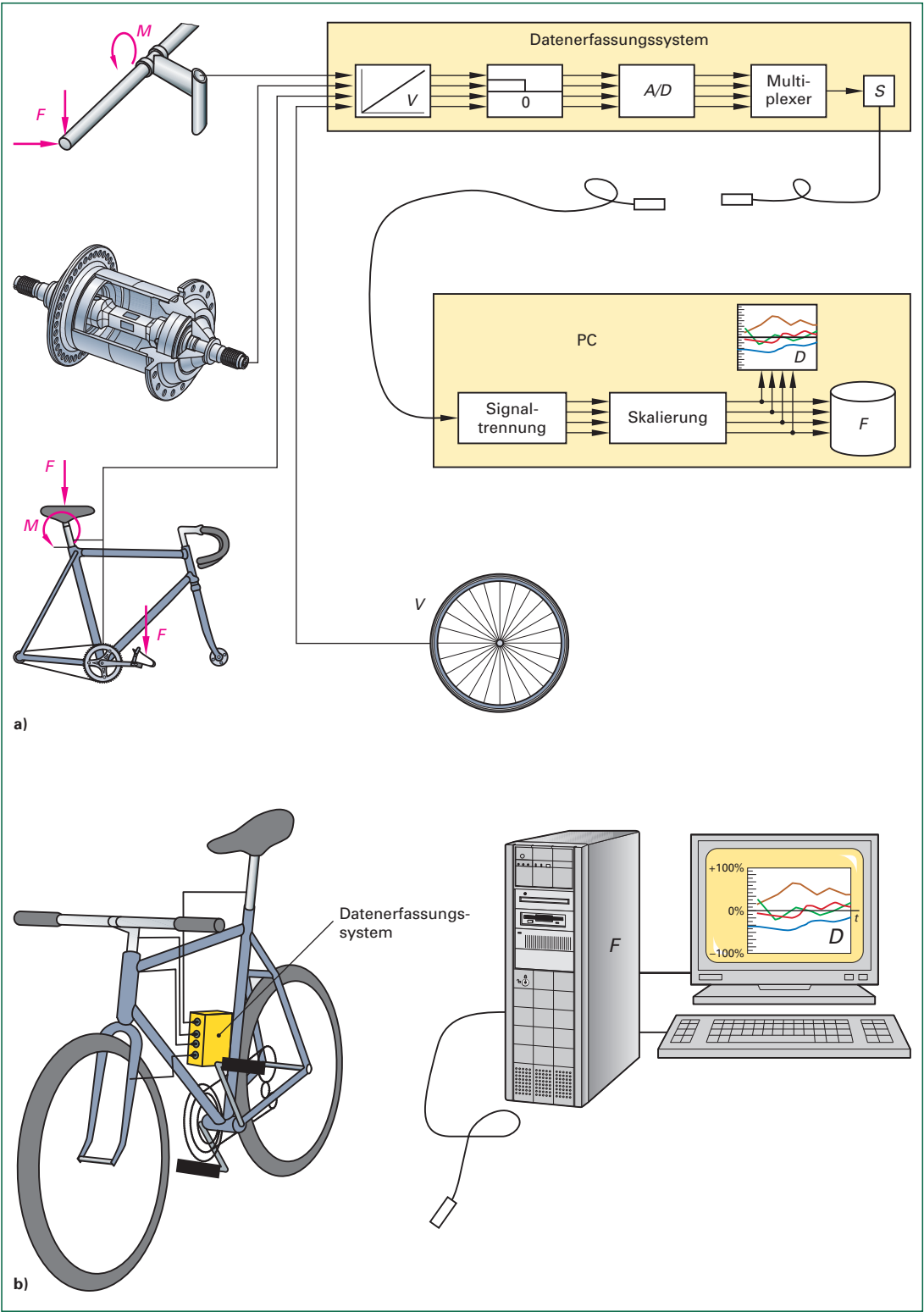


Bild 1: Datenerfassungsanlage a) Schematische Darstellung der Messkette b) Messaufbau

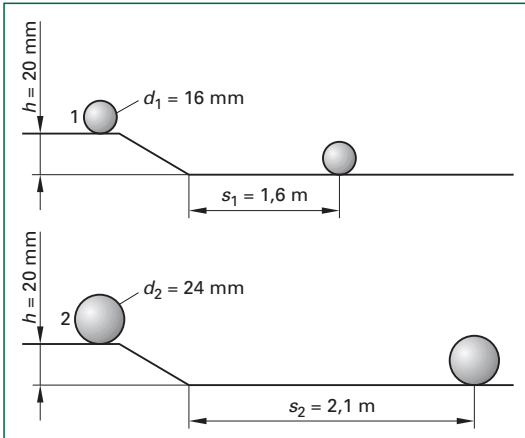


Bild 1: Bestimmung der Abrollwiderstandszahl c_R

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 .

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

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

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 ρ , 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.

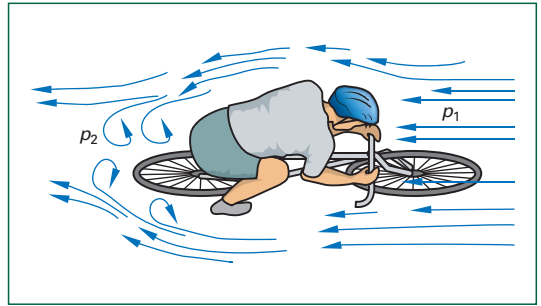


Bild 2: Luftwiderstand beim Radfahren

Die Formel zur Berechnung des Luftwiderstandes lautet:

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

Die Luftdichte ρ 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.

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

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

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

Bestimmen Sie den Luftwiderstand eines aufrecht fahrenden Tourenradfahrers ($A = 0,6 \text{ m}^2$, $c_w = 1,1$), der bei einer Geschwindigkeit von 20 km/h einen Gegenwind von 15 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 525**). Der Steigungswiderstand F_{St} hängt von dem Gewicht des Systems F_G (Rad + Fahrer) und dem Steigungswinkel α ab. Statt des Steigungswinkels kann man auch die Steigung p in % angeben:

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