



EUROPA-FACHBUCHREIHE
für Kraftfahrzeugtechnik

Fachwissen E-Bike

Technik der Leicht-Elektrofahrzeuge

4. Auflage

Verlag Europa-Lehrmittel · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsseldorfer Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 24015

Autoren

Dipl.-Ing. Michael Gressmann	Borken (He)
Dipl.-Ing. Ludwig Retzbach	Riederich

Bildbearbeitung

Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, 73760 Ostfildern

Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

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

Der Verlag und die Autoren bedanken sich bei Herrn Eberhard Müller, dem Lektor und Mitautor der ersten und zweiten Auflage „Fachwissen E-Bike“. Weiterer Dank für Text- und Bildbeiträge gebührt den Herren Ernst Brust und Carsten Bielmeier von der Fa. velotech.de (Schweinfurt).

4. Auflage 2021

Druck 5 4 3 2 1

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

ISBN 978-3-7585-2136-2

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

© 2021 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz und Layout: Grafische Produktionen Jürgen Neumann, 97222 Rimpar

Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald

Umschlagfoto: © Markus Mainka – Stock.adobe.com

Druck: RCOM Print GmbH, 97222 Würzburg-Rimpar

Die Zeit scheint reif für Elektrofahrzeuge. Doch während das Elektroauto noch mit Kosten- und Reichweitenproblemen kämpft, hat sich das Elektrofahrrad längst durchsetzen können.

Laut dem Zweirad-Industrie-Verband (ZIV) lag der Absatz im Jahr 2020 bei rund 2 Millionen Elektrofahrrädern – eine Steigerung von fast 50 % zum Vorjahr. Daneben wächst die E-Scooter-Flotte. Im Mai 2021 belief sich die Anzahl der elektrischen Tretroller allein in Berlin auf über 26 000.

E-Fahrräder haben binnen weniger Jahre einen hohen technischen Stand und ein großes Maß an Ausreifung erreicht. Doch wie bei jeder jungen Technik fehlt es an allgemeinem und speziellem Fachwissen. Zu sehr sind unsere Vorstellungen über die Antriebstechnik noch vom Verbrennungsmotor geprägt.

Im Vergleich zu Autos und Motorrädern bedient sich das Fahrrad einer überschaubaren Technik. Das Elektrofahrrad verändert die Situation grundlegend. Mit ihm halten komplizierte Steuerungselektroniken, neuzeitliche Energiespeicher und modernste Antriebstechniken Einzug.

Neu aufgenommen (oder erweitert) in die vorliegende 4. Auflage sind die Themen

- Getriebearten
- Feldorientierte Steuerung und Vektorsteuerung
- Drehmoment-Sonsortechnik mit der Anwendung der Magnetostriktion
- Elektronisches Schaltsystem am Beispiel der Rohloff-E14 Speedhub Getriebeababe
- Automatisches Bremssystem am Beispiel der ABS von Bosch und Magura

Rechenbeispiele mit den Themen „interne und externe Getriebeübersetzung, Bremsstechnik und Radgröße“ ergänzen die einzelnen Sachgebiete.

Die Autoren des Buches, ein Maschinenbau- und ein Elektroingenieur, haben sich bemüht, die Materie leicht und verständlich darzustellen. Der Schwerpunkt des Buches behandelt die elektrischen und mechanischen Komponenten des Zusatz-Antriebes und ihr Zusammenwirken. Nabenmotoren, Mittel- und Tretlagerantriebe, Controller, Bedien- und Steuerelemente und natürlich auch die Akkus, die einen wesentlichen Teil eines Elektrorades ausmachen, werden ausgiebig beschrieben.

Im Buch werden Themen wie „verwendungsgerechtes“ Elektrofahrrad, optimale Fahrweise, gesetzliche Vorschriften, Produktsicherheit und Einheitsstandards nicht vernachlässigt.

Als ein Vertreter der Elektro-Kleinstfahrzeuge ist der E-Scooter (Elektro-Tretroller) ausführlich beschrieben.

Mit der vorliegenden **4. Auflage** wurde die vorausgegangene Ausgabe komplett überarbeitet und erweitert sowie dem aktuell technischen und gesetzlichen Stand angepasst. Das Autorenteam und der Verlag wünschen viel Freude am Lernen und Arbeiten mit dem neuen „Fachwissen E-Bike“.

Die Erarbeitung von geeigneten Lehrmitteln für die junge E-Bike-Branche steht noch am Anfang. Änderungs- und Ergänzungswünsche sowie konstruktive Kritik nehmen wir per E-Mail gerne entgegen.

Sie erreichen uns unter lektorat@europa-lehrmittel.de.

1	Geschichte der Elektrofahrräder	7
2	Rechtliche Bestimmungen und Sicherheit	13
2.1	Definitionen	13
2.2	Unterteilung der E-Bikes	13
2.2.1	Pedelec 25, Pedal Electric Cycle	14
2.2.2	Pedelec 45 (S-Pedelec)	15
2.2.3	Elektro-Leichtmofas	16
2.3	Lichtanlage	17
2.4	Gesetzliche Bestimmungen in Österreich (Auszug)	17
2.5	Gesetzliche Bestimmungen in der Schweiz (Auszug)	17
2.6	Maschinenrichtlinie und EN-Norm	18
2.7	CE-Kennzeichnung und	18
2.8	Bauteiletausch	19
2.9	Manipulationen	19
2.9.1	Technische Konsequenzen	19
2.9.2	Rechtliche Konsequenzen	20
2.10	Tuning	20
2.11	Elektro-Kleinstfahrzeuge	21
2.11.1	E-Scooter	21
2.11.2	Segway	23
2.11.3	Elektroboard, Hoverboard	23
2.11.4	Elektrisches Einrad	24
3	Systemvergleich unterschiedlicher Motoren	25
3.1	Verbrennungsmotor	25
3.2	Muskelmotor	26
3.3	Elektromotor	29
3.4	Vergleich E-Motor und Verbrennungsmotor	30
3.5	Hybridantrieb	31
4	Mechanik	33
4.1	Übersetzungen	33
4.2	Fahrwiderstände	35
4.3	Leistung und Drehmoment	39
4.4	Bremsen	42
4.5	Radgröße	43
4.6	Wirkungsgrade	44
5	Getriebe	51
5.1	Reibradgetriebe	52
5.2	Zahnradgetriebe	53
5.3	Riemengetriebe	55
5.4	Wellgetriebe	56
6	Antriebskonzepte	59
6.1	Nabenantrieb	60
6.1.1	Vorderrad-Nabenantrieb	60
6.1.2	Hinterrad-Nabenantrieb	61
6.2	Tretlagerantrieb	62
6.3	Sitzrohrantrieb	64
6.4	Nachrüstmöglichkeiten	65
6.4.1	Reibrad-/Reibrollenantrieb	65
6.4.2	Bausatz-Radnabenantrieb	67
6.4.3	Bausatz-Tretlagerantrieb	68
6.4.4	Individuelle Antriebslösungen	69
6.5	Rekuperation und Freilaufsysteme	70
6.6	Antriebstuning	72
7	Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik	74
7.1	Elektrischer Strom	74
7.1.1	Spannung	74

7.1.2	Strom	74
7.1.3	Stromarten	75
7.1.4	Elektrischer Widerstand	75
7.1.5	Elektrische Arbeit	76
7.1.6	Elektrische Leistung	76
7.1.7	Wirkungsgrad	76
7.1.8	Kondensator	77
7.2	Magnetische Grundlagen	78
7.2.1	Dauermagnetismus	79
7.2.2	Elektromagnetismus	79
7.2.3	Elektromotorisches Prinzip	80
7.2.4	Generatorprinzip: Induktion	81
7.2.5	Lenz'sche Regel	81
7.2.6	Transformator	82
7.2.7	Selbstinduktion	82
7.2.8	Induktivität	83
7.3	Elektronische Bauelemente	83
7.3.1	Diode	83
7.3.2	Transistor	85
7.3.3	Hallsensor, GMR-Sensor	88
8	Elektromotor und Antriebssteuerung	89
8.1	Wirkungsgrad	89
8.2	Physikalische Grundlagen	89
8.3	Funktionsweise von Elektromotoren	91
8.4	Motoroptimierung	92
8.4.1	Bürstenlose Motoren	94
8.4.2	3-Phasen-Steuerung	99
8.5	Kommutierung	101
8.5.1	Sensorkommutierung	101
8.5.2	Sensorlose Kommutierung	101
8.5.3	Feldorientierte Steuerung	102
8.5.4	Vektorsteuerung	103
8.6	Drehzahlsteuerung	104
8.7	Rekuperationssteuerung	105
8.8	Motor-Betriebsbereiche	106
8.9	Antriebssteuerung	108
8.9.1	Drehgriffsensor	108
8.9.2	Pedalsensor	109
8.9.3	Drehmomentsensor	110
8.10	Zusammenwirken	112
8.11	Steuerelektronik (Controller)	113 113
9	Akkumulatoren (Akkus)	117
9.1	Grundlagen	118
9.1.1	Der Ionenstrom	118
9.1.2	Der Lösungsdruck – die treibende Kraft	120
9.2	Bauarten elektrochemischer	122
9.3	Elektrische Grundbegriffe in der Batterietechnik	124
9.3.1	Zellenspannung und Innenwiderstand	124
9.3.2	Kapazität und Stromrate	126
9.3.3	Energie, Leistung und Wirkungsgrad	126
9.3.4	Temperaturverhalten und Selbstentladung	128
9.3.5	Zyklenzahl, Alterung und Lagerung	129
9.3.6	Ladeverfahren	130
9.3.7	Verbinden von Zellen zu Batterien	131
9.4	Bleiakkus	132
9.5	Alkalische Akkus	134
9.6	Lithium-Ionen-Akkus	137

8 Elektromotor und Antriebssteuerung

Ein Elektromotor wandelt elektrische Leistung P_{el} in mechanische Leistung P_{mech} . Er erledigt dies effizienter als jeder andere Motor in Natur und Technik und gilt daher als die Zukunft der Fahrzeugantriebe.

8.1 Wirkungsgrad

Bei diesem Umsetzungsprozess fällt Verlustleistung P_v in Form von Wärme an. Damit bleibt der Wirkungsgrad η (griechisch eta), das Verhältnis von abgegebener mechanischer Leistung zu aufgenommener elektrischer Leistung wie bei allen anderen Energiewandlern stets unter 1 ($< 100\%$).

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{abgegebene Leistung}}{\text{aufgenommene Leistung}}$$

$$\eta = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{el}}} = \frac{P_{\text{mech}}}{P_{\text{mech}} + P_v}$$

info

Allein diese Verlustleistung ist es, welche der Leistung des Motors (abgesehen von dessen mechanischer Festigkeit) Grenzen setzt. Deshalb zählt ein hoher Wirkungsgrad bei Elektromotoren zu den primären Konstruktionszielen.

Ein Zahlenbeispiel mag dies verdeutlichen: Stellt man einen Motor mit einem $\eta = 80\%$ einem anderen mit $\eta = 90\%$ gegenüber, so unterscheiden sich beide in der Belastbarkeit nicht etwa nur um 10 %, sondern tatsächlich um 100 %. Grund: Ein 80 %-Motor erzeugt mit 20 % doppelt so viel Verlustleistung wie sein effektiver arbeitendes Pendant, bei dem nur 10 % „Heizleistung“ anfallen.

Die Höhe des maximal erreichbaren Wirkungsgrades ist abhängig von der Motorgröße und der Bauart. Bei E-Bike-Antrieben erreicht er im günstigsten Falle 90 %. Die Motorgüte hängt von der Materialwahl und der Verarbeitungsqualität ab. Dabei spielt eine Rolle, ob die anfallende Verlustleistung durch Kühlung im praktischen Betrieb gut abgeführt werden kann. Denn heiß gewordene Elektromotoren tauchen in eine verhängnisvolle Teilschleife ein: Hohe Temperaturen lassen den Wicklungs-widerstand ansteigen und reduzieren damit

den Wirkungsgrad des Motors, wodurch noch mehr Wärme entsteht.

Wenn eine eingebaute Temperatursicherung dann nicht rechtzeitig greift, verschmort entweder die Wicklung, oder die Magnete verlieren ab einer kritischen Temperaturschwelle (80 bis 120 °C) ihre Kraft. Beides würde einen irreversiblen Motorausfall bedeuten.

Ein hoher Wirkungsgrad zählt zu den elementaren Qualitäten eines Elektromotors.

8.2 Physikalische Grundlagen

Der Wirkungsgrad eines Elektromotors ist nicht unter allen Betriebsbedingungen gleich. Daher besteht die Herausforderung beim Bau von Elektrofahrzeugen zusätzlich darin, dafür zu sorgen, dass die eingebauten Motoren unter den jeweiligen Einsatzbedingungen effizient arbeiten können. Dazu erscheint es hilfreich, die Wirkmechanismen eines Elektromotors genauer zu betrachten.

In **Bild 1** sind die beim Elektromotor von außen messbaren Größen im Wirkzusammenhang dargestellt. Ursache aller Vorgänge in einem E-Motor ist die angelegte Spannung U . Sie verlangt nach einer bestimmten Drehzahl an der Welle. Dieser Wert hängt zum einen von der Spannungshöhe ab, zum anderen von der spezifischen Drehzahl n_s (auch bezeichnet als n_{spez} oder k_v = Drehzahlkonstante des Motors).

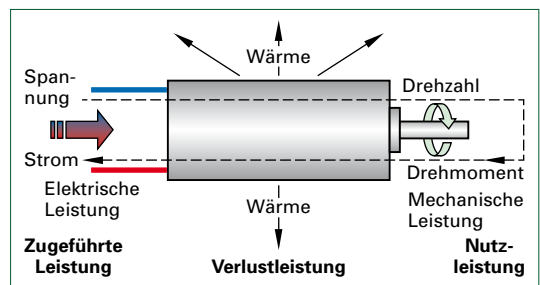


Bild 1: Wechselwirkung der elektrischen und mechanischen Motorgrößen

info

Die Drehzahlkonstante k_v gibt an, wie viele Umdrehungen pro Minute (U/min bzw. 1/s) der Motor je Volt angelegter Spannung im Leerlauf (ohne Last) ausführt:

$$k_v = \frac{n_0}{U}. \text{ Die Einheit ist } U/\text{min}/V \text{ bzw. } 1/Vs.$$

Die Drehzahlkonstante ist bauartbedingt. An ihr lässt sich beispielsweise ablesen, ob es sich bei dem Motor um einen Langsamläufer (niedrige k_v) oder einen Schnellläufer (hohe k_v) handelt.

Die Drehzahl, die sich bei unbelasteter Motorwelle einstellt, nennt man die Leerlaufdrehzahl n_0 .

Als empfohlene Betriebsspannung gilt die Nennspannung oder Bemessungsspannung U . Dabei stellt sich im Leerlauf die Nenndrehzahl n_0 ein. Die gewählte Betriebsspannung eines Motors darf (in Grenzen) davon abweichen.

Die Drehzahlkonstante k_v ist mit hinreichender Genauigkeit wie dargestellt zu ermitteln:

Beispiel: Ein Motor wird an einer Spannung von 10 V betrieben. Die Leerlaufdrehzahl n_0 wurde mit 9800 U/min gemessen. k_v errechnet sich dann aus (Bild 1):

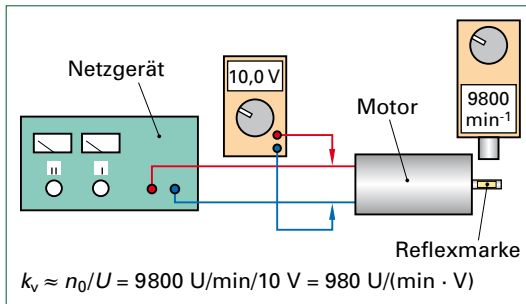


Bild 1: Anordnung zum Messen der k_v . Anstelle des Netzgerätes kann eine Batterie als Spannungsquelle dienen.

Soll der Motor an der Welle ein Drehmoment M aufbringen, muss er Strom I aufnehmen. Wie Drehzahl und Spannung, sind auch Strom und Drehmoment über die Motorkonstante k_v verknüpft.

$$M = \frac{I}{k_v \cdot 0,105}$$

oder

$$I = M \cdot k_v \cdot 0,105$$

info

Der Zahlenfaktor 0,105 resultiert aus der Umrechnung der Winkelgeschwindigkeit ω in die technisch übliche Angabe U/min. Dabei entspricht eine volle Umdrehung im Kreis dem Bogenmaß 2π und 1 Sekunde 1/60 Minute. Somit gilt $2\pi/60 = 1/9,55 = 0,105$. Für physikalische Berechnungen hat k_v die Einheit 1/Vs.

Hier ist der Vollständigkeit halber eine kleine Korrektur angebracht: Nicht der gesamte vom

Motor aufgenommene Strom steht für Antriebszwecke zur Verfügung. Ein (angestrebt) kleiner Teil des Stromes wird auch im Motor selbst „verheizt“. Man bezeichnet diesen Anteil als Leerlaufstrom I_0 . Er überwindet nicht nur die innere Reibung des Rotors (bei modernen bürstenlosen Motoren weniger als 1 %), sondern kompensiert auch die sog. Eisen- und Wirbelstromverluste, welche von wechselnden Magnetfeldern herrühren. Der Leerlaufstrom steigt grundsätzlich mit der Drehzahl an.

Die Drehmomentformel, welche I_0 mitberücksichtigt, sieht dann so aus:

$$M = \frac{I - I_0}{k_v \cdot 0,105}$$

info

Den Betrag von $I - I_0$ bezeichnet man auch als Wirkstrom. Es ist der Teil des zufließenden Motorstroms, der an der Welle ein nutzbares Drehmoment erzeugt.

Der Leerlaufstrom beeinflusst in geringem Maße die oben angeführte Berechnung von k_v . Um die rechnerische Darstellung zu vereinfachen, wird I_0 im Folgenden vernachlässigt, was bei elektronisch gesteuerten Motoren zulässig erscheint.

Beispiel:

Ein Motor mit der Motorkonstanten $k_v = 240 \text{ U}/(\text{min} \cdot \text{V})$ nimmt einen Strom von 15 A auf. Welches Drehmoment entwickelt er?

$$M = \frac{15 \text{ A}}{0,105 \cdot 240 \cdot \frac{1}{\text{Vs}}} \approx 0,6 \text{ VAs} \approx 0,6 \text{ Nm}^1)$$

Unter Mitberücksichtigung eines Leerlaufstroms von z. B. 0,5 A (Wirkstrom 14,5 A) ergibt die Berechnung $M = 0,575 \text{ Nm}$.

info

Wichtige Erkenntnis hieraus: Während die Motorspannung von außen vorgegeben ist, hängt der Motorstrom u. a. vom geforderten Drehmoment und damit von der Belastung des Motors ab.

Spannung U und Strom I ergeben zusammen die elektrische Leistung P_{el} . Sie muss von der Batterie bereitgestellt werden. Ihre Einheit ist Watt (W).

¹⁾ Zusammenhang: 1 Ws = 1 Nm = 1 J

$$P_{\text{el}} = U \cdot I \quad [V \cdot A = W]$$

Daraus ergibt sich mit dem Wirkungsgrad multipliziert die mechanische Leistung P_{mech} .

$$P_{\text{mech}} = \eta \cdot P_{\text{el}}$$

Die mechanische Leistung ist definiert als Produkt von Kraft und Geschwindigkeit.

$$P_{\text{mech}} = F \cdot v \quad [N \cdot m/s]$$

Wir setzen, um zu bekannten Größen in einer Kreisbewegung zu gelangen:

Kraft = Drehmoment M /Radius r ,

$$F = \frac{M}{r} \quad [N = Nm/m]$$

und Geschwindigkeit durch die Kreisfrequenz ω .
Somit ergibt sich

$$P_{\text{mech}} = F \cdot v = \frac{M}{r} \cdot 2 \pi \cdot r \cdot \frac{n}{60} = M \cdot n \cdot 0,105$$

Damit lässt sich die mechanische Leistung eines Motors aus seinen Ausgangsgrößen Drehmoment und Drehzahl bestimmen.

8.3 Funktionsweise von Elektromotoren

Die im obigen Anschnitt dargestellten Zusammenhänge gelten grundsätzlich für alle Arten von Elektromotoren. Bei Elektrofahrzeugen haben sich seit Langem Gleichstrom-(DC-)Motoren mit permanentmagnetischer Erregung durchgesetzt. Aus Sicht der klassischen Motortypeneinordnung entsprechen sie den Nebenschlussmotoren (**Bild 1**).

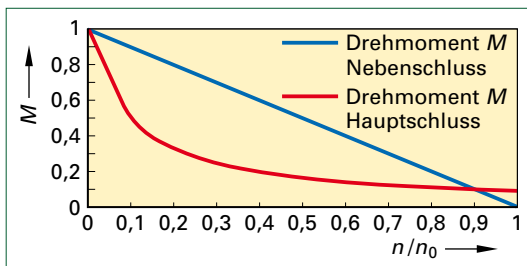


Bild 1: Drehmomentverläufe bei verschiedenen Motortypen

Die Dominanz dieses Motortyps ist eindeutig, obgleich dieses Prinzip nicht nur Vorteile bringt. So wären beispielsweise Motoren, die nach dem Hauptschlussprinzip arbeiten, drehzahlflexibler und billiger in der Herstellung, da bei ihnen keine (inzwischen teuren) Permanentmagnete verbaut werden müssen. Gleiches gilt für asynchron arbeitende Drehstrommaschinen. Diese Motortypen spielen jedoch bei marktüblichen Elektrofahrzeugen derzeit keine Rolle.

Die nachfolgende Darstellung beschränkt sich auf den permanentenerregten DC-Motor. Dabei ist es vorerst noch unwesentlich, ob es sich um herkömmliche mechanisch (mit sog. Bürsten) kommutierte Motoren handelt oder um moderne Exemplare mit elektronischer Kommutierung (bürstenlos oder engl. *brushless*). Die Grundzusammenhänge gleichen sich.

Das elektromotorische Prinzip wurde anhand der Auslenkung eines stromdurchflossenen Leiters bereits im Kapitel 7.2 erläutert. Die folgende Betrachtung lenkt den Blick primär auf die Kraftverhältnisse zwischen den verschiedenen magnetischen Polen in einem Gleichstrom-Elektromotor.

Dieser besteht aus zwei verschiedenen Magnetssystemen. Eines davon ist fest mit dem Gehäuse verbunden. Man nennt es daher Statorsystem oder einfach Stator. Das andere ist drehbar gelagert; genannt Rotorsystem oder Rotor. Eines von beiden Systemen besteht aus Permanentmagneten. Bei diesen liegt die Polarität fest. Das andere System ist elektromagnetisch und kann seine Polarität mit der Stromrichtung wechseln.

Ungleiche Pole ziehen sich gegenseitig an. Ist diese Anziehung stark genug, um äußere Hemmnisse zu überwinden, bewegen sich die Pole des Rotors auf die des Stators zu. Ohne äußere Einwirkung käme die Bewegung zur Ruhe. Jetzt aber greift die Kommutierung, welche kurz vor dem Punkt größter Annäherung der Pole den Elektromagneten umpolt. Die angenäherten Pole stoßen sich nunmehr ab und der Rotorpol dreht weiter zum nächsten Anziehungspunkt, wo ihn dasselbe „Schicksal“ ereilt. Da sich dieses Polwechselspiel ständig wiederholt, versetzt es den Rotor in eine kontinuierliche Drehbewegung.

So weit die rein magnetische Betrachtung. Was sich dabei im Stromkreis des Elektromagnet-systems abspielt, zeigt das (vorläufig noch vereinfachte) Ersatzschaltbild (**Bild 1, Seite 92**).

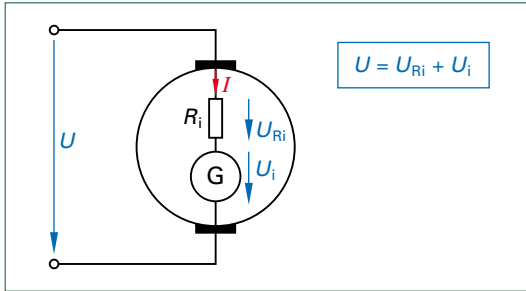


Bild 1: Vereinfachtes Ersatzschaltbild des Gleichstrom-Elektromotors

Es wird der Motor gedanklich durch eine Reihenschaltung eines Widerstandes R_i und eines Generators G ersetzt. R_i ist ein ohmscher Widerstand, der alle inneren Teilwiderstände des Motors gedanklich in sich vereint. Hauptkomponente ist dabei der Wicklungswiderstand.

R_i steht für die passive Komponente des Motors, an welcher der Motorstrom die Verlustwärme P_v erzeugt:

$$P_v = I^2 \cdot R_i$$

Zudem fällt an diesem Widerstand auch ein Teil der Motorspannung ab. Sie ist für die Bewegungsfunktion verloren.

$$U_{Ri} = I \cdot R_i$$

Der Generator G stellt die aktive Komponente des Motors dar. Er induziert bei Drehung des Rotors eine Spannung U_i , die der Anschlussspannung U entgegengerichtet ist.¹⁾ Hierbei ist es unerheblich, ob der Rotor von außen über die Welle angetrieben (Generatorbetrieb) oder von der eigenen Magnetkraft bewegt (Motorbetrieb) wird. Sie hat die Größe

$$U_i = \frac{n}{k_v}$$

Die Generatorspannung ist proportional der Rotordrehzahl n und wächst mit dem Kehrwert von der Drehzahlkonstanten k_v .

Wird an die Anschlüsse des stehenden Motors eine Spannung U angelegt, so ist im ersten Augenblick n und damit U_i noch bei Null. Somit liegt die volle Anschlussspannung an R_i und erzeugt einen großen Anlaufstrom I_A , auch als Blockierstrom bezeichnet, weil er bei stehender Welle auftritt.

$$I_A = \frac{U}{R_i}$$

Dieser hohe Strom erzeugt ein starkes Anlaufdrehmoment, das den Rotor entsprechend beschleunigt. Die Drehzahl steigt und damit die Gegenspannung U_i , was die Spannungsdifferenz an R_i verkleinert und den Strom sinken lässt. Bei unbelasteter Motorwelle endet das Anwachsen von U_i knapp unterhalb des Werts von U . Jetzt heben sich beide Spannungen nahezu auf, der Spannungsabfall an R_i wird minimal, weshalb nur noch ein kleiner Strom durch den Motor fließt, der Leerlaufstrom I_0 .

Belastet man die Motorwelle, sodass mehr Drehmoment aufgebracht werden muss, verschiebt sich das Gleichgewicht in Richtung höherer Ströme. Damit wächst U_{Ri} , womit weniger für U_i bleibt. Die Drehzahl sinkt mit steigender Belastung (Bild 2).

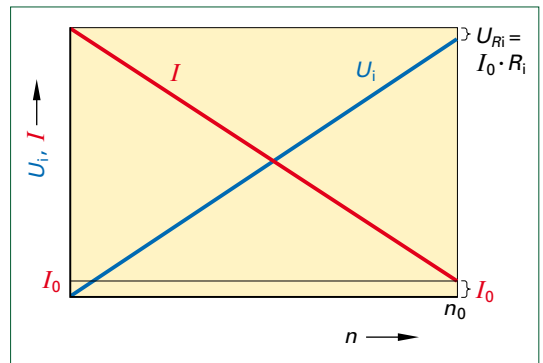


Bild 2: Verlauf von Motorstrom, Generatorspannung und Spannungsabfall am Innenwiderstand über der Drehzahl

8.4 Motoroptimierung

Das Verhältnis der Teilspannungen im Motor (Bild 1) lässt Rückschlüsse auf den Motorwirkungsgrad zu, denn U_i stellt den Nutzanteil der Spannungen dar. Für Motoren mit niedrigem Leerlaufstrom gilt in ausreichender Näherung:

$$\eta \approx \frac{U_i}{U} = \frac{U - U_{Ri}}{U} = 1 - \frac{U_{Ri}}{U} = 1 - \frac{I \cdot R_i}{U}$$

Betrachtet man den letzten Term $- I \cdot R_i / U$, so gilt es, diesen möglichst zu verringern, damit sich η dem Wert 1 (entspr. 100 %) annähert, was auf einfache Weise durch Reduktion von R_i möglich ist. Dies wird angestrebt, stößt aber an physikalische/technische Grenzen, vor allem, wenn es um die Herstellung der Wicklung geht.

¹⁾ U_i auch als Generatorspannung oder Gegenspannung bezeichnet.

Der Wert des Bruches verringert sich auch, wenn sich das Verhältnis von I/U in Richtung höherer Spannungen verschiebt. Aus diesem Grund werden E-Bike-Motoren mit höherer Leistung oft aus 48-V-Akkus versorgt, anstelle der üblichen 36-V-Batterien. Neben einem guten Wirkungsgrad ist es speziell bei Elektrofahrrädern wichtig, die Leistung über ein hohes Drehmoment anstatt über eine erhöhte Drehzahl zu generieren (siehe Kapitel 6). Dies erspart die Zwischenschaltung hoch unteretzender Getriebe.

Wichtige Voraussetzung für ein starkes Drehmoment an der Welle ist eine hohe Anziehungskraft der Magnetpole. Wie unter 7.2 bereits dargestellt, gehorcht diese Kraft F den Einflussgrößen Stromstärke I , Feldstärke B , Leiterlänge l und Windungszahl N :

$$F = I \cdot B \cdot l \cdot N$$

Es gilt die einfache Regel: Viel Strom schafft viel Kraft. Allerdings mahnt hier die begrenzte Batteriekapazität zu sparsamem Umgang. Die Anziehungskraft wächst auch mit der Flussdichte der eingesetzten Permanentmagneten.

Deshalb verwendet man bei modernen Motoren sog. Seltene-Erden-Magnete (meist Neodym-Eisen-Bor- oder NdFeB-Magnete) mit der höchstmöglichen Magnetstärke.

Das geht nicht ohne Kompromisse, denn je stärker die Magnete, desto temperaturempfindlicher werden diese. Dabei spielt die sog. Curie-Temperatur eine Rolle.

Info

Die Curie-Temperatur ist eine vom Magnetwerkstoff abhängige Temperatur, oberhalb derer sich die magnetischen Eigenschaften des Stoffes ändern. Die Anziehungskraft verschwindet oberhalb der Curie-Temperatur vollständig. Sie ist benannt nach dem französischen Physiker *Pierre Curie*.

Zur Optimierung der Flussdichte spielt die Magnetanordnung bzw. die Einbindung der Magnete in den Eisenkreis eine wesentliche Rolle. Der Magnetfluss soll möglichst vollständig durch Eisen verlaufen, da dieses den geringsten magnetischen Widerstand aufweist. Man erreicht dies unter anderem, indem man die Luftspaltweite zwischen Stator und Rotor auf

wenige Zehntelmillimeter minimiert, was aber eine hohe mechanische Präzision bei der Lagerung (Wälzlager) voraussetzt.

Die Leiterlänge im Magnetfeld (hier etwa gleich der Magnetpollänge in axialer Richtung) beeinflusst die Motorlänge, welche nicht unbegrenzt wachsen kann. Es bleibt als letzter Ausweg noch die Anzahl der Motorwindungen. Sie unterliegen prinzipiell keiner Beschränkung.

Doch leider ist der Wickelraum begrenzt, denn er konkurriert mit dem erforderlichen Eisenvolumen im Elektromagnetsystem. Eine Steigerung der Windungszahl erhöht bei unverändertem, voll ausgenutztem Wickelraum nicht nur die Drahtlänge. Sie ist nur möglich, wenn gleichzeitig der Drahtquerschnitt reduziert wird. Somit zieht eine Verdopplung der Windungszahl eine Vervierfachung des Wicklungswiderstandes nach sich.

Wichtig in diesem Zusammenhang ist die optimale Nutzung des vorgegebenen Wickelraums. Beim Herstellen der Wicklung (meistens Handarbeit) sollte nichts „verschenkt“ werden. Man spricht hier von einem guten Kupfer-Füllfaktor. Er beeinflusst den Wirkungsgrad, aber auch die Herstellungskosten.

Es existiert noch ein weiterer Faktor, der aus einer Kraft ein großes Drehmoment entwickeln kann: der Hebelarm.

Die Kraft eines Motors entsteht im magnetischen Luftspalt. Dies ist der ringförmige Zwischenraum, in dem sich Stator- und Rotormagnetfeld begegnen und ihre Kraftwirkung entfalten. Wenn es gelingt, diesen Spalt weit vom Drehpunkt entfernt nach außen zu verlegen, wächst mit der Hebellänge das Drehmoment. Daher baut man Direktantriebsmotoren (Nabenmotoren) mit großem Radius (**Bild 1**).

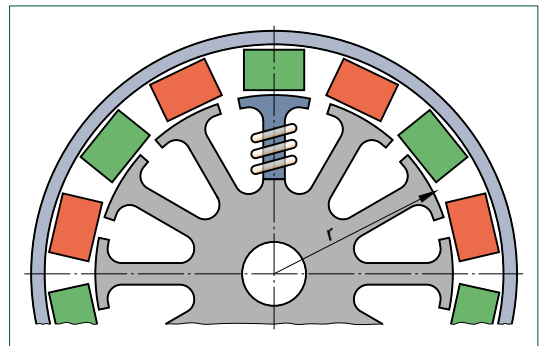


Bild 1: Luftspaltradius r

8.4.1 Bürstenlose Motoren

Bei *herkömmlichen* Gleichstrommotoren befinden sich die Permanentmagnete außen im Stator, die Elektromagnete innen auf dem Rotor. Damit lässt sich die Umschaltung der Rotorwicklung(en) mithilfe segmentierter Schleifringe auf der Rotorwelle mechanisch unkompliziert realisieren.

Zur Stromzuführung dienen sog. Kohlebürsten, welche durch Federkraft auf den Kommutator gedrückt werden, um einen guten Stromübergang zu bewirken. Leider bremsen solche Bürsten, was den Leerlaufstrom ansteigen lässt (**Bilder 1 und 2**).

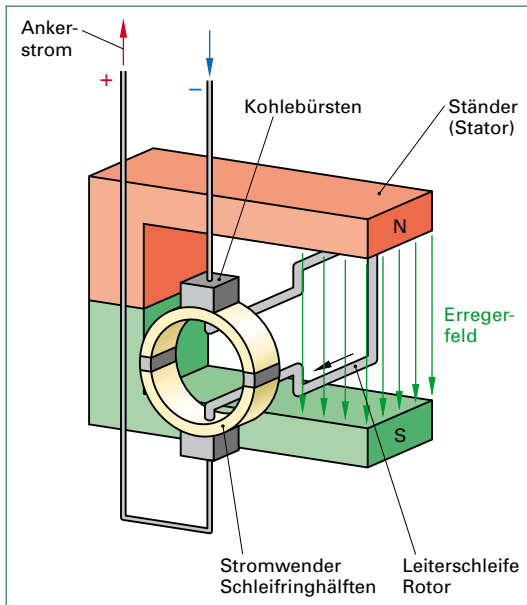


Bild 1: Prinzip eines Kollektor-Gleichstrommotors

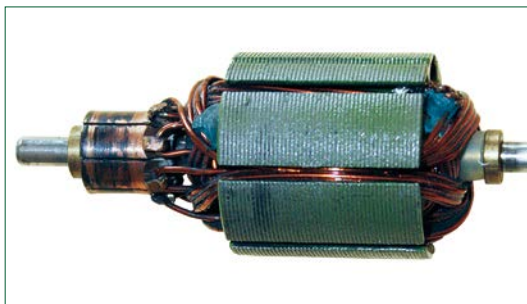


Bild 2: Rotor eines Bürstenmotors.
Oftmals nötig: Auswuchtmasse (grün) an der Wicklung

Darüber hinaus verursacht eine Kohle/Schleifringanordnung Übergangswiderstände, die den schädlichen Gesamtwiderstand R_i in die Höhe treiben.

Das Aufkommen von MOS-Feldeffekttransistoren (sog. MOS-FETs) und damit verbundene Fortschritte in der Leistungselektronik legten daher in den 1990er Jahren den Gedanken nahe, den mechanischen Polwender durch eine geeignete Elektronik zu ersetzen. Damit unterblieb nicht nur die zusätzliche Reibung, es verbesserten sich im Laufe der Jahre auch die Widerstandsverhältnisse.

Anders ausgedrückt: Eine moderne MOS-FET-Schaltstufe verursacht weniger Spannungsverluste als der klassische Stromübergang von Kupferlitzen-Kohlebürsten-Kommutatorlamellen. Zudem unterliegen Kohle und Lamellen bei leistungsfähigen Motoren erheblichem Verschleiß. Bei bürstenlosen Motoren entfallen diese „Problemzonen“.

Elektronisch kommutierte Gleichstrommotoren werden auch als *bürstenlose Gleichstrommotoren* (BLDC-Motoren) bezeichnet. Sie benötigen zum Betrieb einen sogenannten Motorcontroller, der neben anderen Aufgaben, wie z. B. der Überwachung und Drehzahlsteuerung, als Hauptaufgabe die Kommutierung übernimmt (Kapitel 8.5).

Der wesentliche Unterschied gegenüber herkömmlichen Motoren besteht darin, dass nun die Elektromagnete, nachdem die Kommutierung nicht mehr durch Verdrehung mechanisch erfolgt, unverrückbar auf dem Stator Platz finden können (**Bild 1, S. 95** und **Bild 1, S. 96**).

Neben den dynamischen Eigenschaften des Rotors, bei dem sich nur noch ein unbewickelter Permanentmagnet dreht, ist die verbesserte thermische Bilanz des BLCD-Motors hervorzuheben. Zum einen entstehen direkt im Motor keine Kommutierungsverluste mehr. Diese werden nun in den Controller „ausgelagert“ und sind dank moderner Leistungshalbleiter deutlich geringer als bei einem klassischen mechanischen Kommutator.

Nicht vernachlässigbare Verluste erzeugen die Kupferdrahtwicklung (stromabhängig) und der sie einbettende Eisenkern (drehzahlabhängig).

Um die Eisenverluste – sie entstehen aufgrund wechselnder Magnetfelder – zu minimieren, sind Stator und Rotor nicht aus massivem Eisen gefertigt, sondern bestehen aus einem geschichteten Paket dünner, voneinander isolierter Eisenbleche. So können sich im Blechpaket keine verlusterzeugenden Wirbelströme ausbilden.

Da beim Elektromotor die Verlustleistung das Leistungslimit bestimmt, gilt es, die verbleibenden Wärmeverluste möglichst rasch abzuführen. Auch hier ist der BLDC-Motor im Vorteil, denn der bewickelte Stator als Hauptverlustquelle ist fest mit dem Motorgehäuse verbunden, während beim herkömmlichen Motor der verlusterzeugende Rotor durch einen Luftspalt an der direkten Wärmeabgabe gehindert wird. Auf diese Weise entstehen Motoren mit extrem hoher Leistungsdichte.

Um selbst geringste Verlustquellen noch zu eliminieren, kann der Rotor aus dünnen Blechscheiben aufgebaut (geblecht) sein. Die Magnete liegen dann außenseitig. Diese Anordnung hat den Nachteil, dass die Rotormagnete einer drehzahlabhängigen Fliehkraftbelastung ausgesetzt sind. Es genügt dann nicht mehr, die Magnete mit dem Blechkern zu verkleben. Stattdessen werden die Magnete im Rotoreisen eingelassen (man spricht bei dieser Anordnung auch von „vergrabenen“ Magneten, **Bild 1**). Die dünnen Haltebrücken zwischen den einzelnen Magnetsegmenten tragen aufgrund starker magnetischer Sättigung kaum zur Feldschwächung bei.



Bild 1: Geblechter Panasonic-Rotor mit „vergrabenen“ Magneten

E-Bike-Motoren sollen ihre Leistung bei möglichst hohem Drehmoment (und damit geringer Drehzahl) bereitstellen, damit Getriebe mit nur wenigen Übersetzungsstufen auskommen. Hierbei hat sich eine Rotorbauart bewährt, die auf die *Flussleitkeil-Technik* setzt.

Bei dieser Variante sind die Magnete nicht mehr tangential (entsprechend **Bild 1**), sondern radial in das Rotorblechpaket eingelassen (**Bild 2**). Durch diese Anordnung entsenden benachbarte Magnete ihre Feldlinien von zwei Seiten in das dazwischenliegende keilförmige Eisensegment. Auf diese Weise entsteht eine Flussverdopplung mit entsprechend positiver Auswirkung auf das erzeugte Drehmoment.

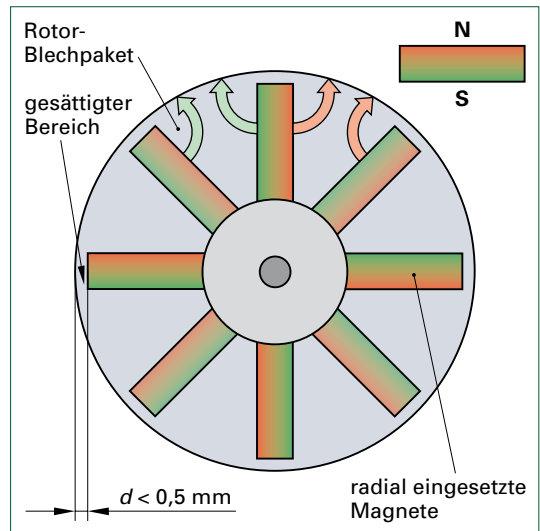


Bild 2: Flussverdopplung durch radial eingesetzte Magnete

Die Flexibilität der Magnetplatzierung schafft noch weitere Freiheitsgrade: Wenn man den Stator konzentrisch innerhalb des Rotors anordnet, erhält man einen sog. Außenläufermotor (engl. *Outrunner*) (**Bild 3** und **Bild 1, S. 96**).

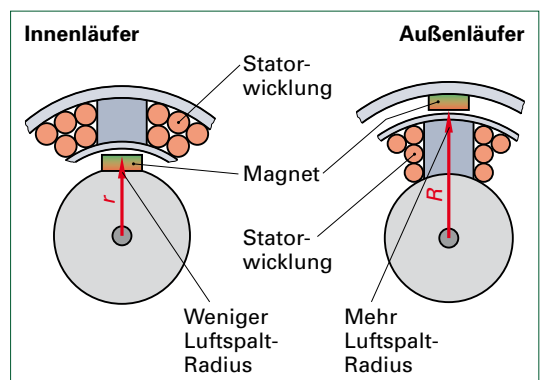


Bild 3: Durch den Platztausch von Magnet und Wicklung vergrößert sich beim Außenläufer der wirksame Hebelarm ($R > r$)

8.8 Motor-Betriebsbereiche

Betrachtet man das Verhalten eines permanent-erregten DC-Motors, der an einer konstanten Spannung betrieben wird, als Funktion des Motorstroms, so steigt das Drehmoment M , proportional zum Strom I . Analog dazu sorgt der steigende Spannungsabfall an R_i **Bild 1, S. 104** für einen gegenseitig sinkenden Verlauf der Drehzahl n . Im Diagramm sind diese Zusammenhänge für eine konstante Spannung zusammen mit Leistung und Wirkungsgrad dargestellt.

Überraschen mag die parabelartige Kurve der Leistungsabgabe P_{mech} . Sie erreicht in der Mitte zwischen Leerlauf- und Blockierstrom ihr Maximum, mit der bedrückenden Konsequenz, dass rechts davon trotz steigenden Stroms die Abgabeleistung sogar sinkt (siehe auch Bild 1, S. 181).

Betrachtet werden die einzelnen Betriebsbereiche: Wenig attraktiv für den Nutzer ist der Schwachlastbereich, da hier kaum Leistung zur Verfügung steht und die Wirkungsgradkurve nach unten hin steil abfällt. Ein Motor, der in diesem Abschnitt betrieben wird, bleibt unterhalb seiner Möglichkeiten und würde besser durch einen kleineren und leichteren Typ ersetzt werden.

Von besonderem Interesse ist der charakteristische Verlauf der Wirkungsgrad- (η) -Kennlinie. Sie verlässt beim Überschreiten des Leerlaufstroms den Nullpunkt, um dann steil anzusteigen. Wie zu erkennen, liegt ihr Maximum in der hier gewählten Darstellung bei vergleichsweise niedrigen Strom- bzw. Leistungswerten. Idealerweise sollte man den Motor genau im η_{max} -Punkt betreiben. Dies ist bei einem dynamisch belasteten System wie bei einem Landfahrzeug nicht durchgängig möglich.

Rechts von η_{max} hingegen steigt die Abgabeleistung bei moderat fallender Effizienz deutlich an. Dies ist der angestrebte Arbeitsbereich eines Elektroantriebs. Hier bewegt man sich unter normalen Betriebsbedingungen.

Der Betrieb lässt sich allerdings nicht beliebig nach rechts (in Richtung höherer Ströme) ausdehnen, denn allmählich beginnt die Verlustleistung ein Maß anzunehmen, bei dem der Motor die entstehende Verlustwärme nicht mehr vollständig abführen kann.

Bei längerer Betriebsdauer droht Überhitzung. Daher ist in der Nähe des Leistungsmaximums nur noch Kurzzeitbetrieb möglich.

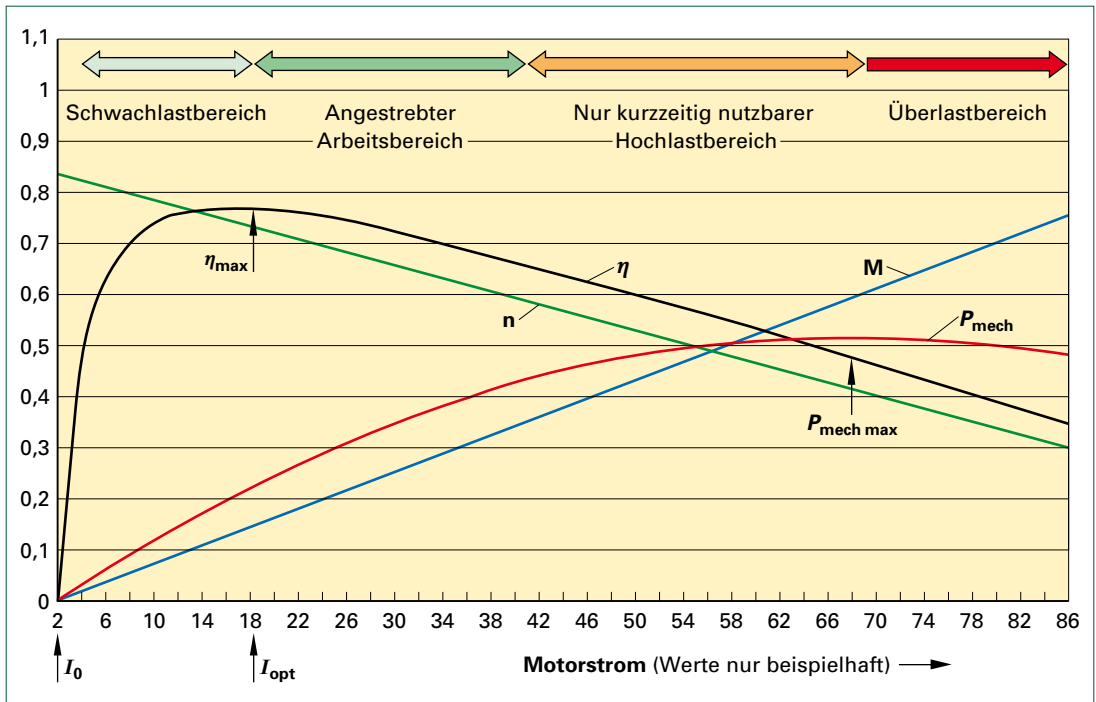


Bild 1: Kennlinien eines permanent-erregten DC-Motors

Jenseits des Leistungsmaximums $P_{\text{mech max}}$ macht der Motorbetrieb aufgrund stark gesunkener Effizienz nur noch wenig Sinn, denn die Abgabeleistung fällt nun trotz zunehmenden Stroms sogar ab. Im Überlastbereich steigt nur noch die Verlustleistung.

Überträgt man die Erkenntnisse aus **Bild 1, S. 106** auf das E-Bike, wird die Fahrrad-Geschwindigkeit als Funktion der Motordrehzahl n zur steuerbaren Veränderlichen (**Bild 1**).

Das Motor-Drehmoment erzeugt zusammen mit dem vom Fahrer eingebrachten Drehmoment über den Radradius die Antriebskraft. Bei einem Pedelec endet die elektrische Unterstützung gesetzlich bei 25 km/h. Die Wirkungsgradkurve erreicht das Maximum bei etwa 22 km/h. Dies ist der Bereich schnellen unterstützten Fahrens, wo eine hohe Antriebsseffizienz willkommen ist. Hier deckt sich die Charakteristik des permanentenregten Gleichstrommotors nahezu perfekt mit dem Anforderungsprofil eines Pedelecs.

Anders verhält es sich bei geringer Geschwindigkeit und gleichzeitig hohem Bedarf an Antriebskraft, wie es bei Bergauffahrt oder starkem Gegenwind zutrifft. Unterhalb von ca. 12 km/h fällt der elektrische Antrieb schnell in den ineffizienten Bereich ab.

Um Batterie, Motor und Mechanik zu schützen, ist es erforderlich, die Steuerelektronik leistungslimitierend eingreifen zu lassen. Dies geschieht, indem die Motorstromaufnahme und damit die Anfahrkraft begrenzt werden. Nun muss die Batterie keine unsinnig hohe

Leistung mehr abgeben, die überwiegend der Aufheizung dient und sie in kurzer Zeit „leersaugt“.

Die Effizienz bleibt im Langsamfahrbetrieb unbefriedigend. Denn die Leistung, die der Motor dauerhaft vertragen kann, ohne zu überhitzen, wird hier (Pedelec 25) durch den Punkt P_N (**Bild 1**, Nennleistung 250 W) markiert.

Die einzige Möglichkeit, den Wirkungsgrad des Antriebs im Langsamfahrbereich zu verbessern, führt über eine Spannungsreduktion, denn Spannung und Drehzahl sind aneinander gekoppelt.

Die Batterie als Energiequelle liefert allerdings eine ziemlich konstante Spannung, deren Wert allenfalls mit dem Ladezustand und dem Belastungsgrad gering variiert.

Bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen ging man in der Vergangenheit daher oftmals den Weg, die Batterie bei „Schleichfahrt“ anzuzapfen, d. h. nur einen Teil der reihengeschalteten Zellen für den Motor zu nutzen. Damit war einerseits keine kontinuierliche Spannungssteuerung möglich. Zum anderen entstehen bei diesem Verfahren ladetechnische Probleme, weil die Batterie damit nicht gleichmäßig entladen wurde.

Die moderne Leistungselektronik schafft hier Abhilfe. Es besteht nun die Möglichkeit, die effektiv am Motor wirkende Spannung mithilfe eines Spannungswandlers (Kapitel 8.6) zu reduzieren. Vermindert man die Spannung beispielsweise um 20 %, so ergeben sich die in **Bild 1, S. 108** dargestellten Verhältnisse.

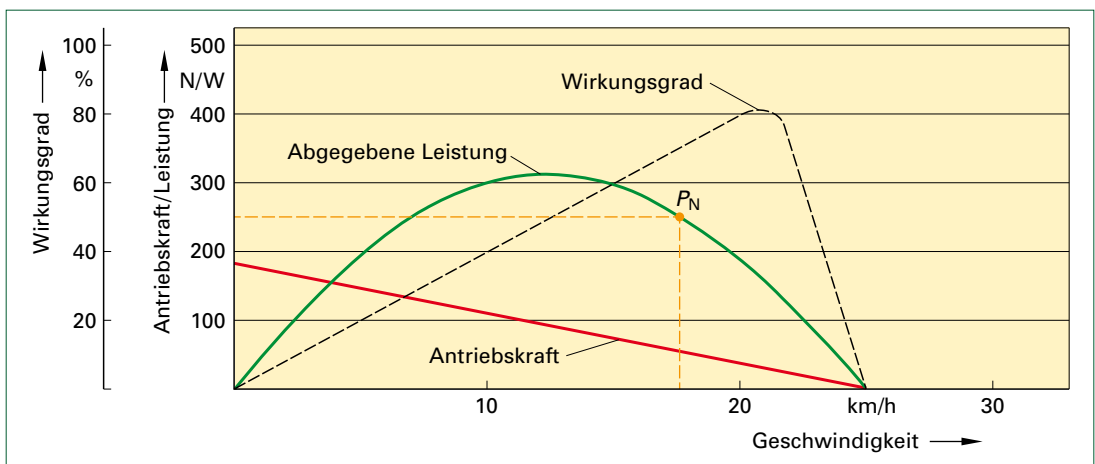


Bild 1: Wirkungsgrad und Antriebskraft abhängig von der Fahrgeschwindigkeit. Nennleistung $P_N = 250 \text{ W}$

Die höchstmögliche Geschwindigkeit liegt nun nur noch bei 20 km/h. Gleichzeitig sinkt die maximale Antriebskraft in gleichem Maße.

Solange sich das Verhältnis von Spannung und Strom nicht ändert, erleidet der Wirkungsgrad keine wesentlichen Einbußen. Mit der Span-

nungsvorwahl beeinflusst der Nutzer letztlich den maximal möglichen Unterstützungsgrad.

Dieser ist aber proportional zum vom Motor erzeugten Drehmoment. Was sich hier als Spannungssteuerung darstellt, lässt sich somit auch als Drehmomentsteuerung einsetzen.

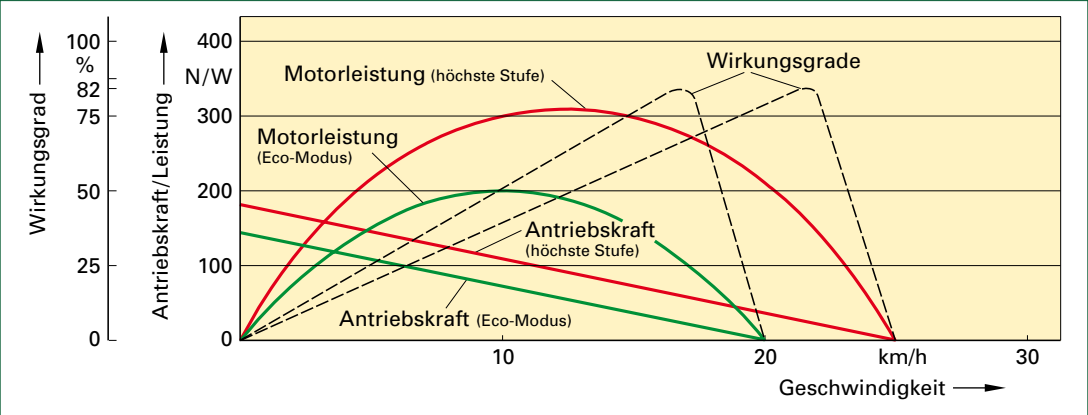


Bild 1: Wirkungsgradverhältnisse bei reduzierter Leistung

8 8.9 Antriebssteuerung

Die Steuerung des Antriebs kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Eine ausschlaggebende Rolle spielen dabei die gesetzlichen Vorgaben der einzelnen Länder, die selbst innerhalb der Europäischen Union keineswegs einheitlich sind.

Der Fahrer kann den Antrieb ein- und ausschalten und bei allen modernen Varianten den Unterstützungsgrad kontinuierlich, meist in Stufen (z. B. Eco, Tour und Sport) einstellen. Dafür benutzt er gewöhnlich ein LCD-Display mit Steuertasten oder Touchscreen- Funktion (siehe Bild 1, S. 158).

8.9.1 Drehgriffsensor

Die einfachste Variante ist die Drehgriffsteuerung (Bild 2). Sie entspricht in ihrer Funktion dem Gasdrehgriff bei Krafträdern. Die Größe des Drehwinkels beeinflusst dabei die Motorspannung.



Bild 1: Gasdrehgriff mit Anschlusskabel

Sie ist auch in Form eines sog. Daumengasgriffs zu finden. Hierbei dient ein kleines, mit dem Daumen zu bedienendes Hebelchen am Lenker als „Gas“-Geber. Eine Rückstellfeder sorgt dafür, dass die Geber beim Loslassen in die Aus-Stellung zurückkehren.

Moderne Drehgriffsteuerungen enthalten analoge Hallensoren (Bild 3). Die Bauteile geben abhängig vom sie durchflutenden Magnetfeld eine variable Signalspannung (z. B. 1 ... 4 V) ab. Sie dient als Steuergröße und beeinflusst die Motorspannung. Die Höhe der Signalspannung hängt von Richtung und Stärke des den Sensor durchsetzenden Feldes ab. Daher sind die Magnete gegeneinander gepolt.

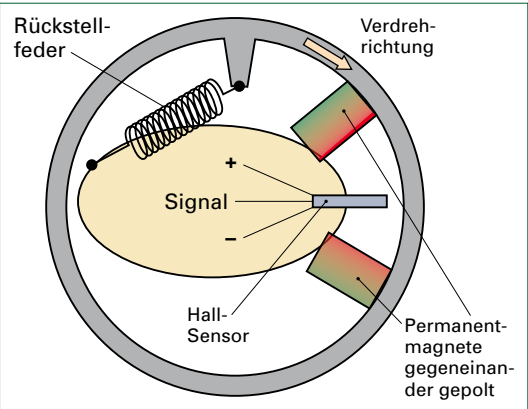


Bild 3: Prinzip eines Gasdrehgriffs mit Hallgeber

8.9.2 Pedalsensor

Pflicht ist in Deutschland ein Pedal- oder Tretsensor. Er erfasst die Pedalbewegung, ohne die bei Pedelegs der Antrieb nicht arbeiten darf (außer im Schiebetrieb bis max. 6 km/h). Die Anordnung hat die Form eines runden Kunststoffrings, in den mehrere Magnete eingelassen sind (Bild 1).

Innenseitig sorgen kleine federnde Zapfen für einen klemmenden Kontakt zur Pedalwelle. Die rotierenden Magnete erzeugen am Hallsensor eine Serie von Impulsen, welche die Motorsteuerung aktiviert. Durch die größere Zahl (meist 5) der Magnete kann schon eine Teilumdrehung erkannt werden, damit der Motorlauf nicht erst verzögert einsetzt.

Umgekehrt ist es wichtig, bei Tret-Stop sofort den Motor auszuschalten. Oftmals ist jedoch wegen der Massenträgheit bei Motoren mit Getriebe im Antriebssystem und integrierenden Zeitgliedern in der Steuerelektronik ein gewisser Nachlauf (ca. 0,5 s) zu bemerken.

Einfache Tretsensoren arbeiten unabhängig von der Bewegungsrichtung. Es könnte bei Vorhandensein eines Pedalfreilaufs auch durch Rückwärtstreten ein Startsignal an den Motor geleitet werden. Deshalb kommen meist sog. bipolare Latch-Hallsensoren zum Einsatz. Das sind Sensoren mit nachgeschaltetem Speicherbaustein (bistabiles Flipflop). Dieses kippt bei einem vorbeiziehenden Nordpol in eine Richtung und kann erst wieder durch einen folgenden Südpol zurückgesetzt werden. Baut man die Magneten mit tangentialer Polfolge in den Kunststoffring ein, so entsteht ein drehrichtungsabhängiges Steuersignal (Bild 2).

Eine Variante ist die Brose-Pedalwelle mit Zahnriemen-Großrad und Zahnscheibe, die beim Pedalieren den Magnetfluss zum Pedalsensor moduliert (Bild 3). Dank der Vielzahl von Magnetzähnen werden bereits kleinste Pedalbewegungen vom Sensor erfasst und in ein Signal umgewandelt.

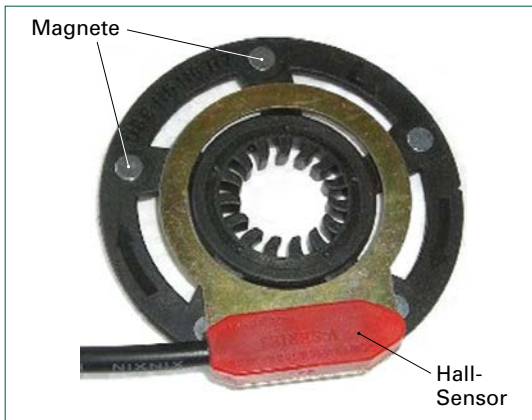


Bild 1: Pedalsensor

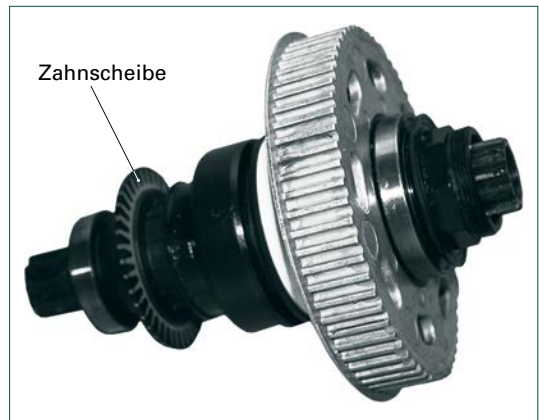


Bild 3: Brose Pedalwelle

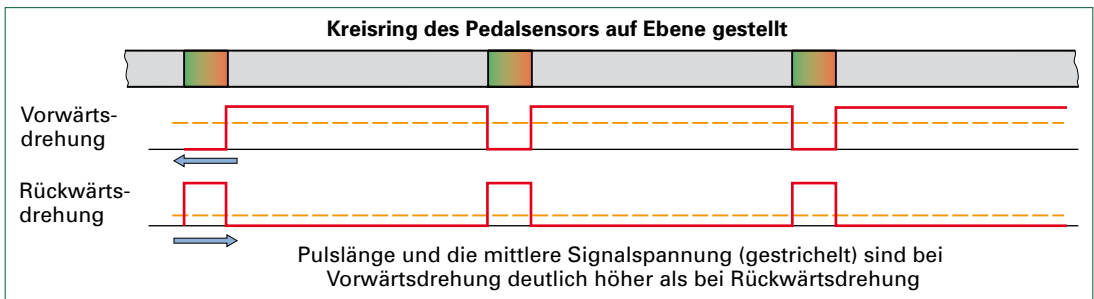


Bild 2: Drehrichtungsabhängige Impulsabgabe bei einem Pedalsensor

8.9.3 Drehmomentsensor

Ein Pedelec, dessen Motor allein durch einen Tretsensor überwacht wird, bringt ein fest (z. B. über einen Drehgriff) eingestelltes Drehmoment auf das Antriebsrad. Der Pedalist darf wegen des Pedalsensors zwar nicht untätig bleiben, hat aber mit seiner eigenen Tretkraft für den Elektroantrieb nur unterstützende Funktion. Die Kraft, die er selbst einbringt, entlastet den Motor und hat damit stromsparenden Einfluss. Man sollte den damit verbundenen erzieherischen Effekt nicht gering achten. Diese Art des Zusammenwirkens von Mensch und Elektromotor gilt als Bewegungssteuerung. Sie vermittelt dem Fahrer ein Gefühl, als würde eine Kraft Schubhilfe leisten. Die Mehrzahl der Pedelecfahrer bevorzugt dagegen eine aktive elektrische Unterstützung ihrer Muskelkraft. Anders ausgedrückt: Der Fahrer wünscht sich einen Elektroantrieb als proportionalen Kraftverstärker. Hierzu ist ein Drehmomentsensor nötig.

8

Das System erfasst zuerst das vom Fahrer aufgebraachte Moment an der Kurbelwelle (**Bild 1**). Dieser Wert wird nun – mit einem in Grenzen wählbaren Verstärkungsgrad multipliziert – unterstützend in das Antriebssystem eingeleitet.

Das Motordrehmoment braucht nicht direkt gemessen zu werden, denn es entspricht dem Motorstrom. Direkt beeinflussbar ist dieser aber nur über die Motorspannung. Aufgabe der Drehmomentsteuerung ist es, die Spannung so anzupassen, dass sich über den resultierenden Motorstrom die gewünschte Unterstützung ergibt.

Das Momenten-Messsystem von Panasonic kann als Klassiker im Pedelec-Bereich gelten. Grundlage der Messung bildet die Verwindung (Torsion) der Pedalwelle. Die Erfassung erfolgt induktiv über zwei Spulenpaare.

Einfacher funktioniert die Drehmomentmessung über indirekte Messmethoden. Dabei macht man sich die Verbiegung des Fahrradrahmens unter dem Einfluss der Tretkraft zunutze.

Als klassisch zu bezeichnen ist die Messung am Ausfallende des Fahrradrahmens, weil auch die Hinterachse durch die via Kette an das hintere Ritzel weitergeleitete Trittkraft eine elastische Verbiegung erfährt. Dort befindet sich ein auf Zugkraft reagierender Dehnungssensor, der Signale an die Steuerung gibt (**Bild 2**). Die Messmethode ist nicht geeignet für Mittelmotorantriebe, da sich hier beim Kettenzug die Pedalkraft und die unterstützende Motorkraft überlagern.

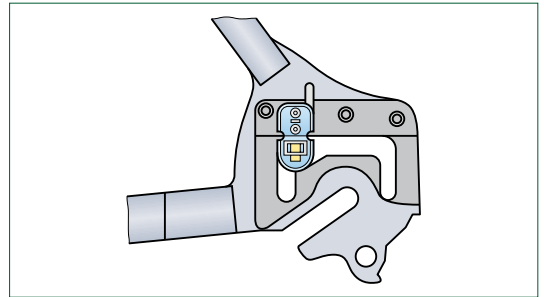


Bild 2: Indirekte Drehmomenterfassung am Ausfallende

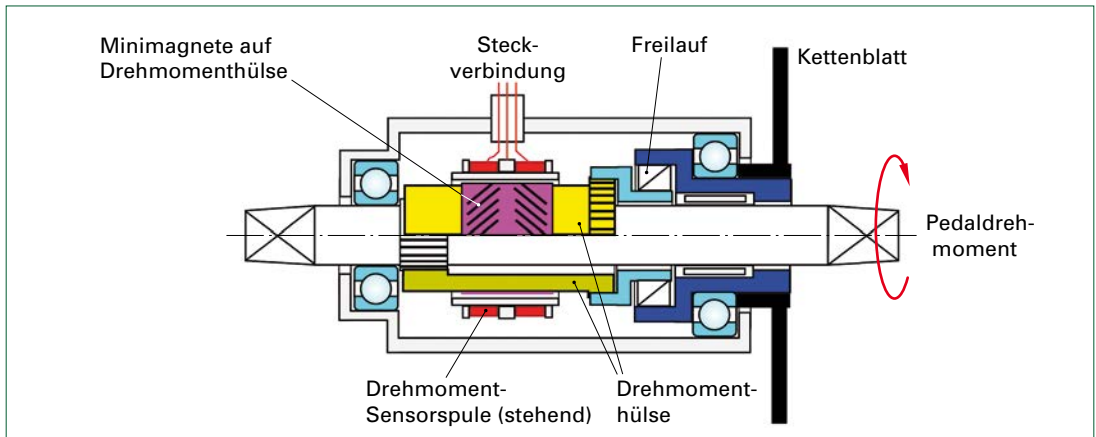


Bild 1: Drehmomentsensor System Panasonic

Einer indirekten Methode zur Erfassung des Drehmoments bedient man sich auch im Boschantrieb der 2. Generation. Es nutzt die Erkenntnis, dass Stirnradgetriebe nicht nur tangentielle Kräfte übertragen, sondern auch radiale Kräfte zwischen den Zahnrädern wirken. Diese können dann, durch einen Kraftsensor an der Lagerung der Zwischenwelle, abgegriffen werden (**Bild 1**). Die Drehmomentsteuerung vermittelt dem Fahrer ein Gefühl zugewonnener Stärke, denn er spürt unmittelbar am Vortrieb, wie der Motor seine Tretkraft unterstützt.

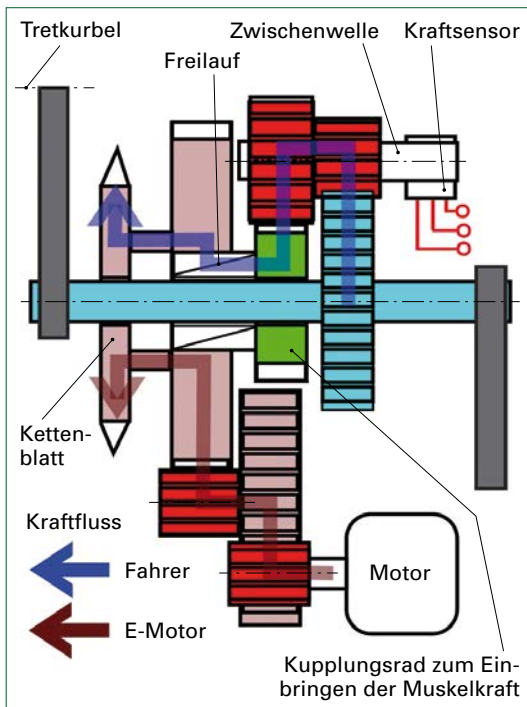


Bild 1: Prinzipdarstellung des Boschantriebs der 2. Generation

Ein neu entwickeltes Drehmoment-Messverfahren beruht auf dem Prinzip der **Magnetostriktion**. Prinzip: Wird ein ferromagnetischer Gegenstand magnetisiert, führt dies zu einer Verzerrung des Kristallgitters. Umgekehrt wird dieser Effekt genutzt, indem man bei einem magnetisierten Werkstoff die Änderung der Magnetisierung misst, die aufgrund einer mechanischen Belastung eintritt. Nach der Belastung findet das Magnetfeld stets in seine ursprüngliche Ausrichtung zurück.

Bild 1 zeigt vereinfacht dargestellt, wie sich die Richtung der Gitterstruktur bei einer Belastung (z. B. die Einwirkung eines Drehmomentes) ändert.

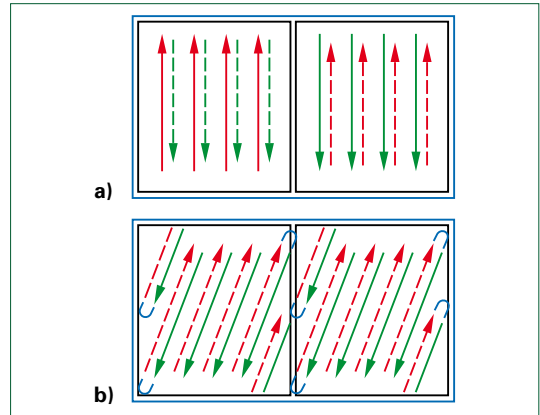


Bild 2: a) Gitterstruktur eines magnetisierten Werkstoffes b) Gitterstruktur nach Einwirken einer äußeren Kraft (Darstellung Firma NCTE)

In der praktischen Anwendung am Pedelec ist der ferromagnetische Gegenstand eine Messhülse, die auf die Tretlagerwelle aufgebracht wird (**Bild 1, S. 112**). Der Messkörper erfährt eine elastische Längenänderung, ohne dass sich sein Volumen ändert. So kann eine geringfügige Längenänderung ein Drehmomentsignal von der Tretlagerwelle zum Steuergerät signalisieren.

Zusätzlich zu dem Drehmomentsignal wird die Trittfrequenz (Kadenz) gemessen. Erst mit dieser Information kann die tatsächliche Leistung errechnet werden, die dann für die Regelung verwendet wird.

Meist wird die Trittfrequenz mit einem Hall- oder GMR-Sensor (siehe S. 88), der über einem magnetischen Polrad auf der Messwelle schwebt, erfasst. Das magnetische Polrad weist verschiedene magnetisierte Bereiche auf. Bei einer Drehung der Messwelle erkennt der Hallsensor die Polbereiche und registriert deren Wechsel.

Die Verwendung eines Hall- oder GMR-Sensors kann auch ohne magnetisches Polrad realisiert werden. Dabei wird auf die Messhülse eine mechanische Signatur aufgebracht (in diesem Fall ein einfaches kleines ferromagnetisches Zahnrad). In dieser Anordnung erkennt der Sensor nicht eine Poländerung, sondern einen veränderten magnetischen Fluss. Befindet sich unter dem Zahnrad eine Vertiefung, ist der magnetische Fluss kleiner als bei einer Erhöhung. Mit diesen Informationen können die meisten Pedelecsysteme arbeiten. Zusätzlich kann eine Absolutwinkelmessung durchgeführt werden (diese steht im Verdacht, aufwändig und teuer zu sein – daher ist sie oft nicht vorgesehen).

Trafag (Bild 1) hat eine einfache Möglichkeit geschaffen, einen Absolutwinkel $<1^\circ$ aufzulösen.

Das Funktionsprinzip basiert darauf, dass vier Induktivitäten im 90° -Abstand um die Messwelle angeordnet sind. Eine Sinusscheibe, die auf der Messwelle integriert ist, verändert aufgrund ihrer Wirbelstromeigenschaften die Induktivitäten. Aus der Änderung der Induktivitäten kann der Winkel und über die zeitliche Winkeländerung die Kadenz berechnet werden.

Info

Zu Bild 1: Ein Messdraht aus ferromagnetischem Material befindet sich entlang der Messstrecke in einem robusten Gehäuse. Das externe Magnetfeld des Positionsgebers markiert die Messposition. Die spontane Ummagnetisierung wird durch das Zusammenwirken des externen Magnetfeldes und einem kurzen Stromimpuls, der durch den Wellenleiter fließt, ausgelöst. Die Torsionswelle pflanzt sich im Messdraht (dem „Wellenleiter“) fort. Die Zeit zwischen der Anregung und dem Empfang der Torsionswelle wird in einem Wandler zu dem entsprechenden Positionswert umgesetzt.

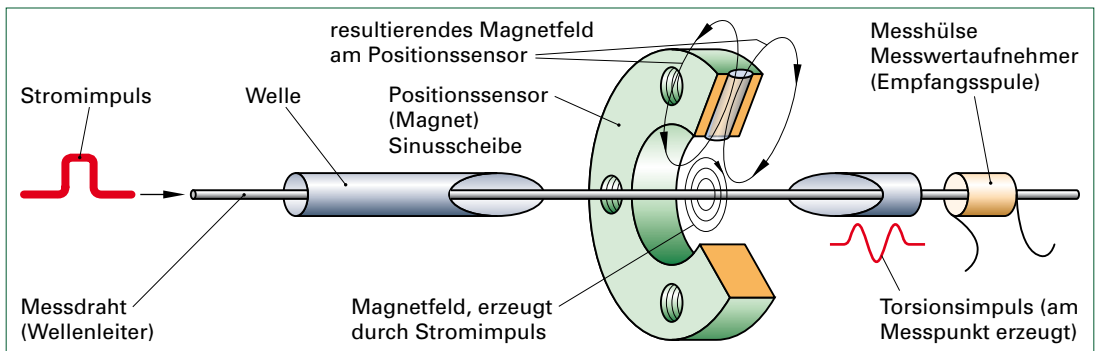


Bild 1: Prinzip der Magnetostriktion. Beim E-Bike kommt ein ähnliches Verfahren zur Anwendung.

8.10 Zusammenwirken von Mensch und Motor

Ein Pedelec, bei dem der Motor rein als Kraftverstärker auftritt, übernimmt quasi den Fahrstil des Pedalisten in leistungsgesteigerter Form. Er verstärkt indirekt die Fahrleistung, direkt aber die Tretkraft.

Es ist davon auszugehen, dass der durchschnittliche Radfahrer keinen perfekten Runden Tritt beherrscht, denn dazu müsste er über sog. Klickpedale (Systempedale) fest mit den Pedalen verbunden sein. Die Krafteinleitung geschieht in Form von gleichgerichteten Sinushalbwellen, wobei der Maximalwert sich bei annähernd

waagrecht, der Minimalwert (nahe Null) bei senkrechter Kurbelstellung ergibt (Bild 2).

Die pulsierende Gesamtkraft bringt damit nur einen (nach rechts ansteigenden) Mittelwert auf das Antriebsrad. Die Belastungsspitzen für Kette und Zahnräder entsprechen den Scheitelwerten der Sinuswellen. Die Auswirkungen sind besonders gravierend im Bereich der Schaltung. Namentlich die Nabenschaltung verträgt es nicht, wenn unter erhöhter Krafteinwirkung die Gänge gewechselt werden.

Um diesem Problem zu begegnen, haben sich verschiedene Lösungsansätze herausgebildet. Einige Systeme nehmen beim Gangwechsel mittels Shift-Sensor kurz die Antriebsleistung zu-

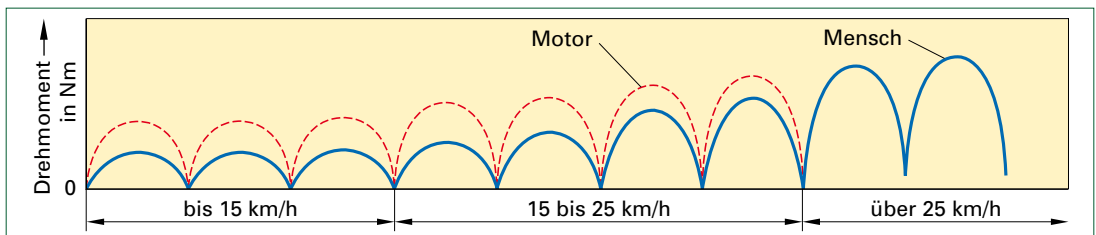


Bild 2: Kraftverteilung bei reiner Drehmomentensteuerung

10.11 Elektronisches Schaltsystem

Das elektronische Schaltsystem E 14 der Fa. Rohloff in Kombination mit der Mehrgang-Getriebeabene Speedhub 500/14 ermöglicht:

- Lastfreies Schalten in Verbindung mit dem Bosch- (oder Panasonic FIT) Antriebssystem
- Im Stand alle Gänge schaltbar
- Multishift-Funktion
- Erleichtertes Anfahren durch Anfahrangang/ Auto-Downshift
- Energieversorgung durch das E-Bike-Antriebssystem
- Erhöhter Fahrkomfort, größere Reichweite und damit eine Reduzierung der Anzahl der Akku-Ladezyklen

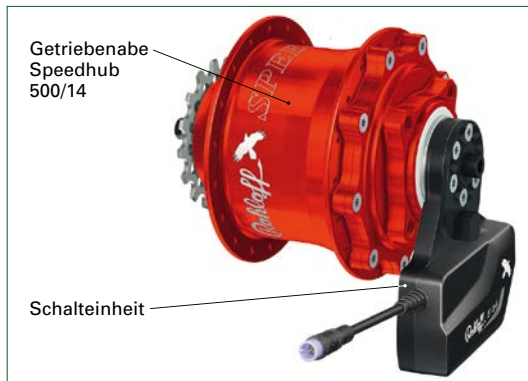


Bild 1: Rohloff Mehrgangnabe Speedhub 500/14 und Schalteinheit

Die Schalteinheit ist die elektromechanische Komponente, die die einzelnen Gänge der Speedhub 500/14 schaltet (**Bild 1**).

Durch die direkte Anbindung des CAN-Bus erfolgt die kontinuierliche Auswertung der aktuellen Unterstützungsrate, die aktuelle Antriebskurbelstellung und die Leistungsabgabe des Radfahrers.

Nach Drücken der „+“ oder „-“ Taste (**Bild 2**) wird der ideale Zeitpunkt zum Gangwechsel abgestimmt und

- die Unterstützungsleistung des Antriebsmotors heruntergeregelt,
- die Schaltanweisung an die Rohloff E-14 Schalteinheit gesendet,
- der gewünschten Gang in optimaler Kurbelstellung schnell und präzise geschaltet und
- die Unterstützungsleistung des Antriebsmotors hochgeregelt und der Schaltvorgang in ca. 0,2 Sekunden abgeschlossen.

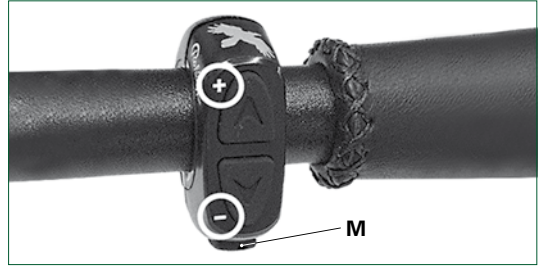


Bild 2: Lenkertaster Rohloff E-14 (N3)³

Für einen lastfreien Gangwechsel ist ein unterstützendes Verhalten durch den Radfahrer hilfreich. Optimal sind 50 – 80 Kurbelumdrehungen und das Vermeiden von hohen Lasten auf den Kurbeln während des Schaltvorgangs. Achtung: rechtzeitiges Zurückschalten vor Steigungen!

Bedienung des Bosch eBike Antriebssystems⁴

1. Einschalten durch Betätigung des Einschalt-symbols (**Bild 3**)



Bild 3: Einschalt-symbol (Display Bosch)

2. Ganganzeige aktivieren: Taste i am Display so oft drücken, bis im Display das Wort „Gang“ erscheint. Die Ganganzeige ist damit dauerhaft sichtbar (**Bild 4**). Befindet sich das Display in einer anderen Anzeige, wird nach jedem Schaltvorgang für 3 Sekunden der Gang angezeigt.



Bild 4: Ganganzeige (Display Bosch)

³ Neuer ergonomischer Lenkertaster für 2021 geplant

⁴ Bedienung des Panasonic-FIT-Antriebssystems siehe Handbuch Rohloff E-14

3. Schalten der Gänge Gänge einzeln schalten

Beim Bosch E-Bike Antriebssystem erfolgen die Gangwechsel durch Betätigung der Tasten des Rohloff E-14 Lenker-Tasters (siehe **Bild 2, S. 166**). Hier befinden sich drei Tasten:

„+“ Taste: Hochschalten in Richtung Gang 14

„-“ Taste: Runterschalten in Richtung Gang 1

Sofort nach dem ersten Klick am Taster schaltet die Schalteinheit einen Gang hoch (+ Taste) oder einen Gang herunter (- Taste).

Die M-Taste hat im normalen Betrieb keine Funktion, sie dient der Autokalibrierung oder für Systemfunktionen.

4. Mehrere Gänge gleichzeitig schalten (Multishift-Funktion)

Funktion: Wird am Lenker-Taster die Plus- oder Minustaste *dauerhaft* gedrückt, schaltet die E-14 erst einen Gang und dann erfolgen die weiteren Gangwechsel automatisch in Dreierschritten. Die Schalteinheit schaltet dann jeweils drei Gänge hoch, bis der 14. Gang erreicht ist (+ Taste) oder drei Gänge herunter, bis der 1. Gang erreicht ist (- Taste).

Zwischen den einzelnen Dreierschritten liegt jeweils eine Pause von einer halben Sekunde.

5. Anfahrgang einstellen (Auto-Downshift)

Die elektronische Schaltung bietet zusammen mit dem Bosch E-Bike Antriebssystem die Möglichkeit, einen Anfahrgang einzustellen (**Bild 1**).



Bild 1: Anfahrgang (Auto-Downshift) am Display

Ist die Funktion "Anfahrgang" eingeschaltet, wird bei Stillstand des Fahrrades länger als 3 Sekunden (bzw. weniger als 3,5 km/h) automatisch in den eingestellten Anfahrgang heruntergeschaltet (Auto-Downshift). Das allerdings nur, wenn der letzte geschaltete Gang höher als der eingestellte Anfahrgang ist und

die Fahrgeschwindigkeit zuvor schneller als 10 km/h war. Die Pedale sollten im Stillstand dazu entlastet sein.

Wird ein Anfahrgang eingestellt, ist die Funktion Auto-Downshift automatisch aktiviert. Wird kein Anfahrgang eingestellt, ist die Funktion automatisch deaktiviert.

Der Anfahrgang kann zwischen Gang 1 und Gang 9 eingestellt werden.

6. Einstellen des Anfahrganges am Beispiel „Intuvia Display“

- Nach dem Einschalten die Taste „Reset“ und die Taste „i“ gleichzeitig gedrückt halten, bis die Textanzeige „Einstellungen“ erscheint (**Bild 2**).



Bild 2: Einstellungen am Display

- Die Taste „i“ so oft drücken, bis die Textanzeige „Anfahrgang“ erscheint. Mit den Tasten „+“ oder „-“ an der Bosch Bedieneinheit den gewünschten Anfahrgang einstellen (**Bild 3**).



Bild 3: An der Bosch Bedieneinheit Anfahrgang einstellen

- Zum Speichern des gewählten Anfahrganges die Taste „Reset“ ca. 3 Sekunden drücken (**Bild 1, S. 168**).

⁵ Andere Bosch-Systeme sind Nyon- bzw. Kiox-Display

- Zum Speichern des gewählten Anfahranges die Taste „Reset“ ca. 3 Sekunden drücken (**Bild 1**).



Bild 1: Anfahrang speichern

- Zum Deaktivieren des Anfahranges das Antriebssystem einschalten (**Bild 3, Seite 166**). Taste „Reset“ und Taste „i“ gleichzeitig gedrückt halten, bis die Textanzeige „Einstellungen“ (siehe **Bild 2, Seite 167**) erscheint. Taste „i“ so oft drücken, bis Textanzeige „Anfahrang“ erscheint. Tasten + oder – so oft an der Bosch Bedieneinheit drücken, bis die Anzeige „- -“ erscheint. Zum Speichern der Aktivierung die Taste „Reset“ für ca. 3 Sekunden drücken.

Diagnose des elektronischen Schaltsystems (Rohloff) E-14 (**Bild 2**)

1. Überprüfung der Schalteinheit

- E-Bike-System abschalten, Akku entfernen.
- Trennen der Steckverbindung direkt vor der Schalteinheit (3).
- Diagnose-Schalteinheit (8) an die Steckverbindung anschließen.
- Akku einsetzen, E-Bike-System einschalten.
- Die Diagnose-Schalteinheit ...
 - piept beim Einschalten und schaltet die Gänge: Die Schalteinheit ist defekt.
 - piept *nicht* beim Einschalten und schaltet die Gänge nicht: Nächster Schritt: Überprü-

fung des E-14 Verbindungskabels und des Lenkertasters.

- piept beim Einschalten und schaltet die Gänge *nicht*: Nächster Schritt: Überprüfung des Lenkertasters

2. Überprüfung Lenkertaster

- E-Bike-System abschalten, Akku entfernen.
- Trennen der Steckverbindung des Lenkertasters (1).
- Diagnose-Lenkertaster an die Steckverbindung anschließen.
- Akku einsetzen, E-Bike System einschalten.
- Die Diagnose-Schalteinheit ...
 - piept beim Einschalten *und* schaltet die Gänge: Der Lenkertaster ist defekt. Alle anderen Diagnose-Komponenten durch Originalkomponenten ersetzen und erneut Funktion prüfen.
 - piept *nicht* beim Einschalten *und* schaltet die Gänge *nicht*: Nächster Schritt: Überprüfung der Verbindungskabel.
 - piept beim Einschalten *und* schaltet die Gänge *nicht*: Nächster Schritt: Überprüfung der Verbindungskabel.

3. Überprüfung Verbindungskabel und DC/DC-CAN-Konverter (**Bild 3**)

siehe Handbuch Rohloff.de/Service/E-14



Bild 3: DC/DC-CAN-Konverter

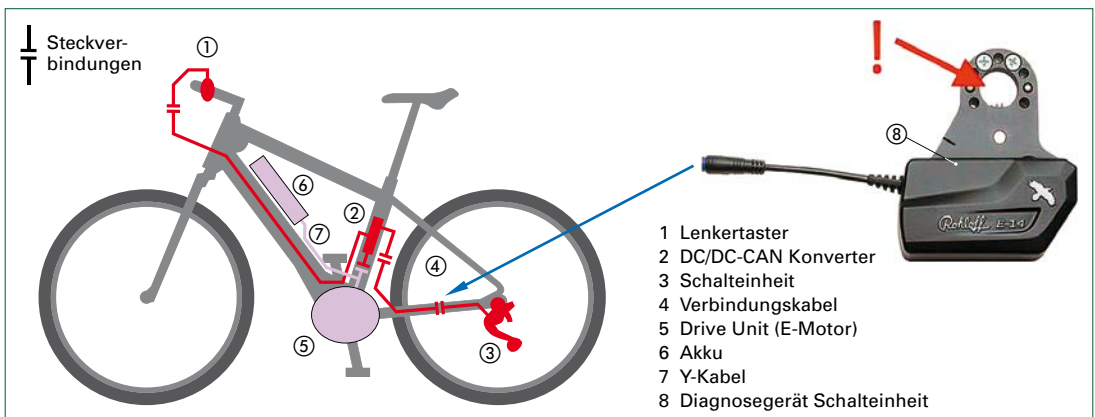


Bild 2: Übersicht elektronisches Schaltsystem E-14