

# BLDC-Motoren

Autor: Abas Seif Aldeen, Matrikel-Nr.: 7024352

Autor: Eike Frerichs, Matrikel-Nr.: 7023449

Autor: Matti Petersen, Matrikel-Nr.: 7022311

Autor: Moritz Bauer, Matrikel-Nr.: 7023428

Autor: Tomma Taute, Matrikel-Nr.: 7023396

Studiengang: Maschinenbau

Prof. Dr. Elmar Wings

Dipl.-Ing. Thomas Peetz

5. Juni 2024

- 1 Der BLDC-Motor
- 2 Aufbau und Funktionsweise
- 3 Ansteuerung von BLDC-Motoren
- 4 Motorkennlinien
- 5 Unterschied Gleich- und Wechselstrommotoren
- 6 Beispiele für die Verwendung der BLDC-Motoren
- 7 Quellen

# Der BLDC-Motor

# Definition BLDC-Motor I

Was ist ein BLDC-Motor?

Für Anwendungen mit geringer bis mittlerer Leistung werden immer häufiger Motoren mit Permanentmagneten im Rotor genutzt, die ohne Kohlebürsten auskommen. Diese Motoren, bekannt als bürstenlose Gleichstrommotoren (BLDC-Motoren) oder elektronisch kommutierte Motoren (EC-Motoren), benötigen Leistungskomponenten, die mit einer elektronischen Kommutierungseinheit ausgestattet sind. Solche Motoren sind wartungsfrei und bieten eine höhere Überlastfähigkeit, da sie keinen mechanischen Kommutator mehr besitzen.

[Pro22]

# Aufbau und Funktionsweise I

- BLDC-Motoren Gehören zu den Synchronmotoren
- Drei Anschlüsse (U,V und W)
- Am Rotor sind Permanentmagneten befestigt mit ein oder mehrere Polpaare 1
- Es gibt einen feststehenden Stator mit Spulenwicklungen
- Das Magnetfeld, das vom Stator generiert wird, ist im gleichen Frequenzbereich wie die des Rotors

[Stu23]

## Aufbau und Funktionsweise II

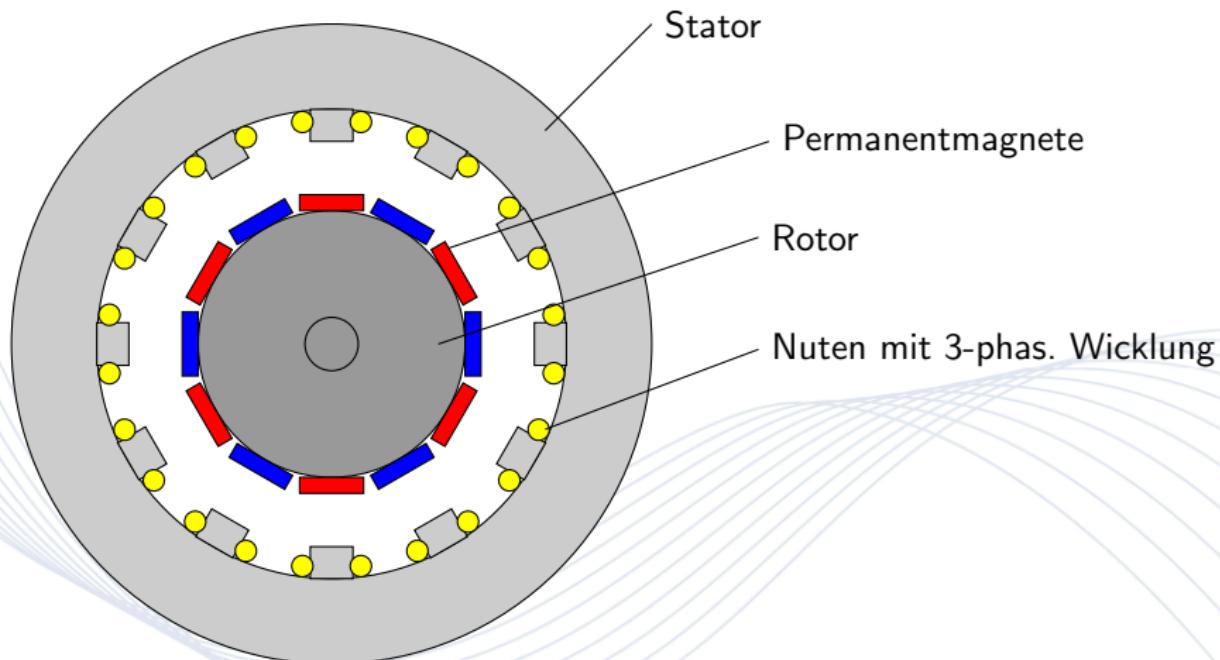


Abbildung: Querschnitt eines dreiphasigen BLDC Motors

# Drehfelderzeugung I

Drehfelderzeugung durch getakteten Gleichstrom

Es gibt drei Phasen:

- eine Phase ist stromlos
- eine Phase ist mit dem Pluspol der Spannungsversorgung verbunden
- eine Phase ist mit dem Minuspol der Spannungsversorgung verbunden

Die drei Phasen sind um  $120^\circ$  zeitlich zueinander verschoben  
[Stu23] [Con23]

## Drehfelderzeugung II

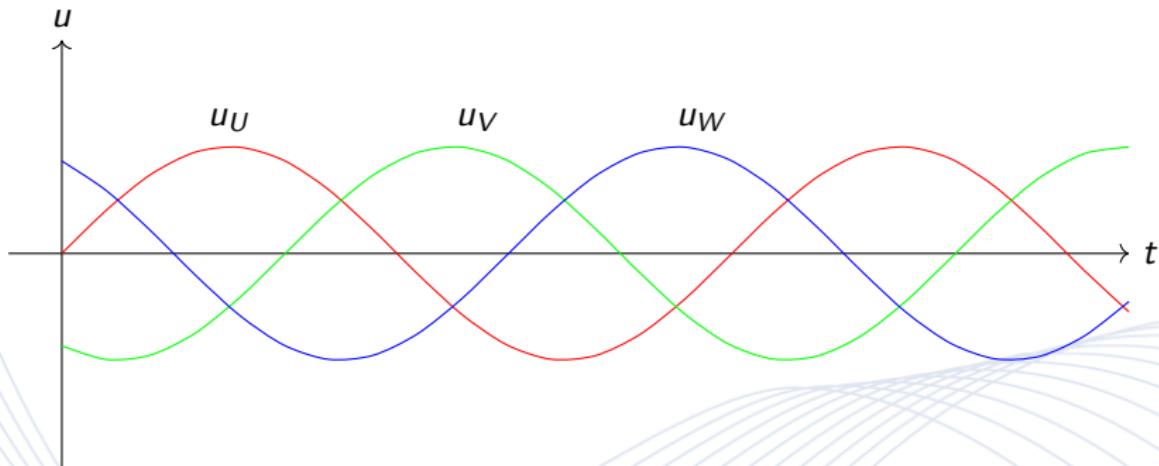


Abbildung: Spannungsverlauf Drehfelderzeugung

Die Abbildung zeigt die idealisierten Phasen bezogen auf die drei Anschlüsse ( $u_U$ ,  $u_V$  und  $u_W$ ) 2

# Stator I

Allgemein:

- Stator kommt vom lateinischen („stare“) und steht für „stillstehen“
- Stator ist der unbewegliche Teil beim Elektromotor
- Besteht aus Dauermagneten oder einem Elektromagneten

[Con23]

BLDC-Motoren:

- trapezförmiger Strom durchfließt die Spulen im Stator 3

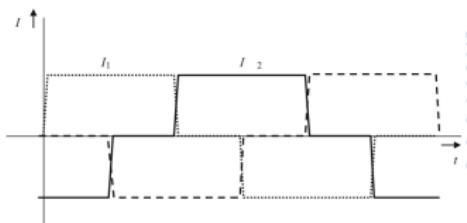


Abbildung: Trapezförmiger Strom [Bab14]

# Rotor im klassischen Gleichstrommotor I

- Wird auch „Anker“ genannt
- Ist der drehende Teil eines Elektromotors

Aufbau:

- Motorwelle
- Anker aus Eisenblech
- Ankerspule mit unterschiedlichen Wicklungen
- Schleifring zur Stromübertragung
- Optional noch Flügelräder am Anker um den Motor zu kühlen

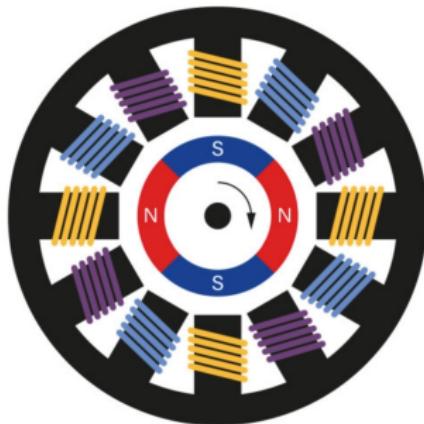
[Con23]

# Rotor eines BLDC-Motors I

- Ist der bewegliche Teil des Motors
- Sitzt entweder innen (Innenläufer) oder außen (Außenläufer)
- Besteht aus einem oder mehreren Permanentmagneten, die jeweils ein Polpaar bilden
- Ein Rotor mit weniger Polpaaren kann sich schneller drehen, aber mehrere Polpaare verbessern das Drehmoment bei niedrigen Drehzahlen
- Üblicherweise zwei bis acht Polpaare mit abwechselnden Nord- und Süd-Pol 4 5

[Stu23]

## Rotor eines BLDC-Motors II



4 Poles

Abbildung: Vierpoliger BLDC-Motor [Stu23]

## Rotor eines BLDC-Motors III

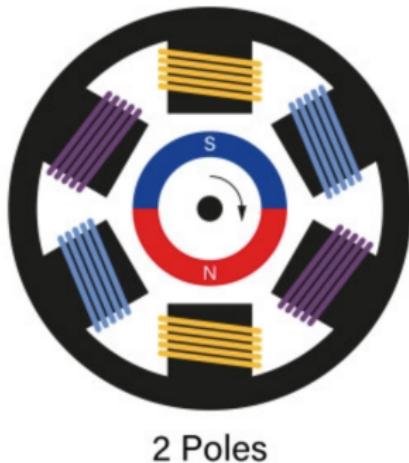


Abbildung: Zweipoliger BLDC-Motor [Stu23]

# Ausführungsarten I

## Innenläufer 6 7

- Rotor mit Dauermagneten innen
- Stator mit Wicklungen außen
- Hohe Drehzahlen möglich
- Geringes Drehmoment wird übertragen
- Statisches Gehäuse bietet mehr Befestigungsmöglichkeiten

[Con23] [Stu23]

## Ausführungsarten II



Abbildung: Innenläufer [Con23]

## Ausführungsarten III

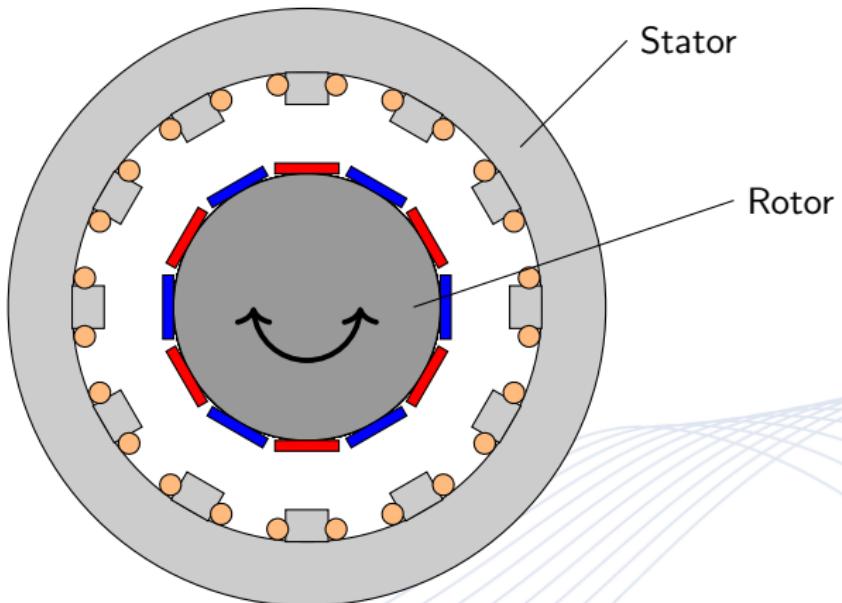


Abbildung: Anordnung eines Innenläufer

# Ausführungsarten IV

## Außenläufer 8 9

- Rotor mit Dauermagneten außen
- Stator mit Wicklungen innen
- Geringere Drehzahlen als Innenläufer
- Höheres Drehmoment als Innenläufer
- Verbesserte Kühlung

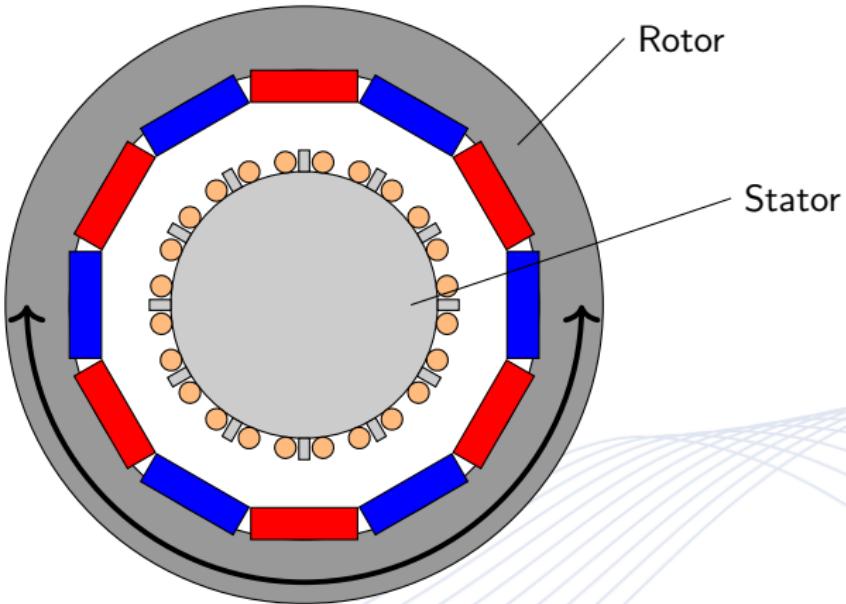
[Con23] [Stu23]

## Ausführungsarten V



Abbildung: Außenläufer [Con23]

## Ausführungsarten VI



## Abbildung: Anordnung eines Aussenläufers

## Funktionsweise I

Wirkprinzip sehr ähnlich zu Drehstrommotoren: Das Magnetfeld der Permanentmagnete vom Rotor reagiert auf das Magnetfeld der Spulenwicklung

- Dadurch beginnt der Rotor zu rotieren
- Die Spulen müssen dazu in der richtigen Reihenfolge geschaltet werden

[Pro22]

# Drehstrommotoren I

- Einsatz bei größerem Leistungsbedarf (Industrie, Produktion, elektrische Maschinen)
- Es stehen grundsätzlich immer drei stromführende Leitungen (Phasen) vor
- Die drei Phasen sind um  $120^\circ$  zeitlich zueinander verschoben
- Drei Drahtspulen werden mit den drei Phasen verbunden und rund um den Rotor positioniert
- Die Drahtspulen bauen so ein Magnetfeld auf, welches sich im Rhythmus der Netzfrequenz dreht
- Der Rotor dreht sich durch das Polpaar mit dem drehenden Magnetfeld mit
- Braucht keinen Kommutator

[Stu23]

# Sternschaltung I

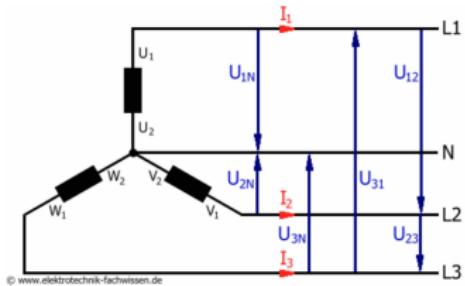


Abbildung: Sternschaltung [Ele24]

In einer Sternschaltung: 10

- Jeweils ein Anschluss jeder Spule ( $U_2$ ,  $V_2$ ,  $W_2$ ) wird mit einem Anschluss einer anderen Spule verbunden
- Es entsteht ein Knotenpunkt (Sternpunkt oder Mittelpunkt)
- Der Neutralleiter  $N$  (auch Mittelleiter oder Sternpunktleiter) wird am Knotenpunkt angeschlossen

## Sternschaltung II

- Die restlichen Anschlüsse der Spulen ( $U_1$ ,  $V_1$ ,  $W_1$ ) werden mit den Phasenleitern ( $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$ ) verbunden
- Die meisten BLDC-Motoren verfügen über drei Stator-Wicklungen
- Von jeder Spule wird jeweils ein Spulenanschluss mit dem einer anderen Spule verbunden
- Es entsteht eine Sternschaltung
- Der Knotenpunkt wird auch Sternpunkt genannt
- Am Knotenpunkt wird der Neutralleiter  $N$  angeschlossen
- An den Spulenanschlüssen  $U$ ,  $V$  und  $W$  werden die drei Außenleiter  $L_1$ ,  $L_2$  und  $L_3$  angeschlossen
- Insgesamt können sechs Spannungen gemessen werden:
- Drei Spannungen zwischen den jeweiligen Außenleitern (Nenn- bzw. Leiterspannungen:  $U_{12}$ ,  $U_{23}$ ,  $U_{31}$ )

# Sternschaltung III

- Drei Spannungen an den Erzeugerspulen (Strangspannungen: U1N, U2N, U3N)
- Hinweis: Die Indizes geben die Bezugsrichtung der Spannungen an:
- U12 bedeutet die Spannung vom Außenleiter L1 zum Außenleiter L2

[Ele24]

Statorströme:

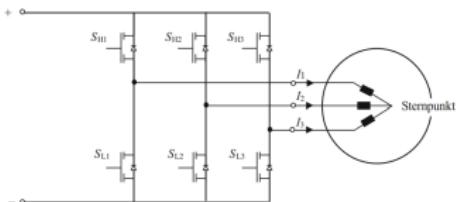


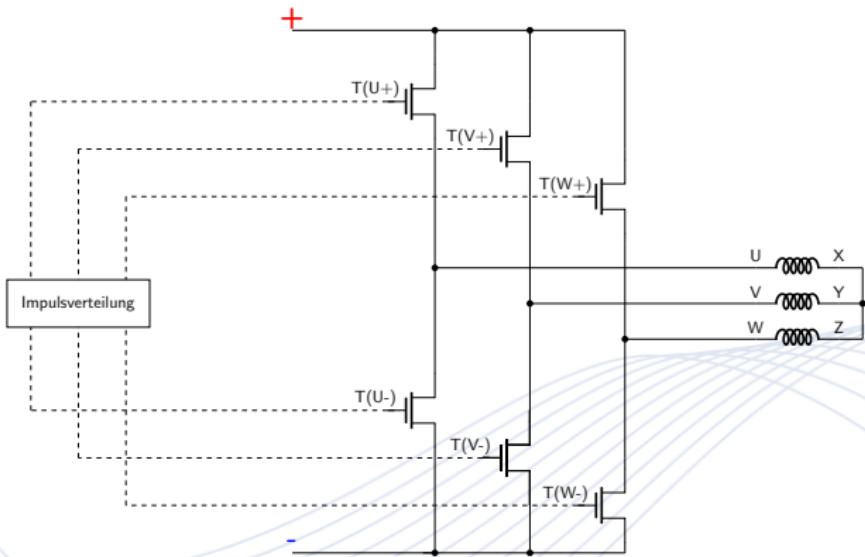
Abbildung: Schaltskizze [Bab14]

## Sternschaltung IV

- Die drei Phasen der Statorwicklung, durch die ein Trapezförmiger Strom fließt, sind sternförmig miteinander verschaltet 11 12
- Die Summe aller Ströme im Sternpunkt ist Null
- Die Phasenverschiebung der Ströme beträgt  $120^\circ$
- Betrachtet man den Sternpunkt, sind die Ströme positiv und negativ, betrachtet man allerdings den Gleichstromkreis, fließt der Strom von positiv nach negativ

[Bab14]

## Sternschaltung V



## Abbildung: Schaltung Regelung

# Ansteuerung von BLDC-Motoren I

## Regelung des BLDC-Motors mit Hallsensoren

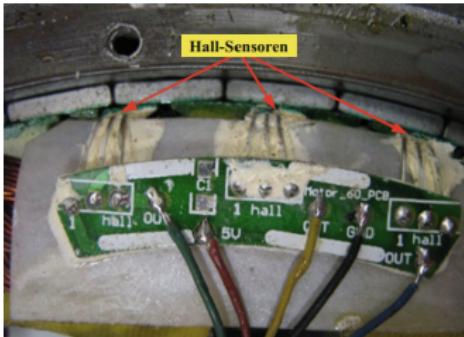


Abbildung: Hallsensoren [Bab14]

- Bei einem Motor mit gleichstromerregter Spule wird die Spule beim Anfahren kurzgeschlossen
- Die Maschine kann dadurch wie eine Asynchronmaschine hochlaufen

# Ansteuerung von BLDC-Motoren II

## Regelung des BLDC-Motors mit Hallsensoren

- Beim BLDC-Motor wird die relative Statorposition zur Rotorposition abgefragt, dadurch werden die richtigen Ströme zum richtigen Zeitpunkt durchgeschaltet
- Die Dauermagneten sind so angeordnet, dass abwechselnd der Südpol und der Nordpol Richtung Stator zeigen
- Die austretenden Feldlinien zeigen immer radial in die Rad-Mitte bzw. von der Rad-Mitte weg
- Die Elektromagnete auf dem Stator sind in gleicher Weise angeordnet
- Wenn die entsprechenden Phasen Strom führen, erzeugen sie ebenfalls Magnetfelder, die radial nach außen oder nach innen zeigen
- Magnetfelder, die in Stator und Rotor gleich gerichtet sind, ziehen sich an Magnetfelder, die entgegengesetzt gerichtet sind, stoßen sich ab

# Ansteuerung von BLDC-Motoren III

## Regelung des BLDC-Motors mit Hallsensoren

- Unterschiedliche Magnetfelddichten sorgen dabei für die Kraftentstehung in Rotationsrichtung
- Drei Hall-Sensoren überwachen kontinuierlich die Rotorposition und bestimmen die Drehzahl
- Die Hall-Sensoren im Radnabenmotor verhalten sich wie magnetfeldabhängige Schalter 13
- Sie schalten die über einen Pullup-Widerstand auf 5V gesetzte Sensorleitung nach Masse kurz
- Dies geschieht, wenn sich direkt über den Hall-Sensoren der magnetische Südpol eines Dauermagneten befindet
- Zustände der Hall-Sensoren können direkt über einen Microcontroller ausgewertet werden

# Ansteuerung von BLDC-Motoren IV

## Regelung des BLDC-Motors mit Hallsensoren

- Aufgrund der Anordnung der Hall-Sensoren gibt es genau sechs Kombinationen der Zustände, die immer in der gleichen Reihenfolge auftreten

[Bab14]

Hall-Sensor-Zustand	Hall-Sensor 1	Hall-Sensor 2	Hall-Sensor 3
Kombination 1	0	1	0
Kombination 2	0	1	1
Kombination 3	0	0	1
Kombination 4	1	0	1
Kombination 5	1	0	0
Kombination 6	1	1	0

- Bei negativer Drehrichtung erscheinen die Kombinationen in umgekehrter Reihenfolge

# Ansteuerung von BLDC-Motoren V

## Regelung des BLDC-Motors mit Hallsensoren

- Beim Übergang von einer Kombination zur nächsten ändert sich nur der Zustand eines Hall-Sensors
- Zwei Hall-Sensoren haben immer denselben Zustand, während der dritte den komplementären Zustand hat
- Es kommt nie vor, dass alle drei Hall-Sensoren denselben Zustand haben
- Es gibt genau sechs Möglichkeiten, entsprechend der sechs Hall-Sensor-Kombinationen, den Strom durch jeweils zwei der drei Phasen zu leiten

Strom-Phasen	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Kombination 1	High(+1)	Low(-1)	/
Kombination 2	High(+1)	/	Low(-1)
Kombination 3	/	High(+1)	Low(-1)
Kombination 4	Low(-1)	High(+1)	/
Kombination 5	Low(-1)	/	High(+1)
Kombination 6	/	Low(-1)	High(+1)

# Ansteuerung von BLDC-Motoren VI

## Regelung des BLDC-Motors mit Hallsensoren

- Die Nummerierung in der Tabelle (Folie davor) zeigt Abfolge der Kombinationen bei positiver Drehrichtung
- Jede Hall-Sensor-Kombination muss der passenden Phasen-Kombination zugeordnet werden
- Dies gilt sowohl für die Vorwärts-, als auch für die Rückwärts-Drehung
- Die Reihenfolgen der Kombinationen müssen beibehalten werden
  - Undefinierte Zustände können zu Kurzschläüssen und somit einem Systemausfall führen
  - andernfalls besteht die Gefahr von undefinierten Zuständen in der Transistorbrücke
- Bei Einhaltung der Reihenfolgen gibt es sechs Möglichkeiten, Hall-Sensor-Kombinationen mit Transistor-Brücke-Kombinationen zu verknüpfen

# Ansteuerung von BLDC-Motoren VII

## Regelung des BLDC-Motors mit Hallsensoren

Hall- Phasen- Ver- knüpf- ung	Ver- knüpf- ungs- möglich- keit 1	Ver- knüpf- ungs- möglich- keit 2	Ver- knüpf- ungs- möglich- keit 3	Ver- knüpf- ungs- möglich- keit 4	Ver- knüpf- ungs- möglich- keit 5	Ver- knüpf- ungs- möglich- keit 6
Hall- sensor- kombi- nation	Strom- phasen- kombi- nation	Strom- phasen- kombi- nation	Strom- phasen- kombi- nation	Strom- phasen- kombi- nation	Strom- phasen- kombi- nation	Strom- phasen- kombi- nation
1	1	2	3	4	5	6
2	2	3	4	5	6	1
3	3	4	5	6	1	2
4	4	5	6	1	2	3
5	5	6	1	2	3	4
6	6	1	2	3	4	5

# Ansteuerung von BLDC-Motoren VIII

## Regelung des BLDC-Motors mit Hallsensoren

- Aufgrund der unterschiedlichen Polzahl im Stator und Läufer gibt es nur zwei Kombinationen, die eine definierte Bewegungsrichtung garantieren
- Bei diesen Kombinationen sind die anziehenden Kräfte in Rotationsrichtung (vorwärts oder rückwärts) zwischen den Stator- und Rotorpolen gleichgerichtet
- Der gesamte Strang der Dauermagnete wird immer in dieselbe Richtung gezogen
- Die vier verbleibende Kombinationsmöglichkeiten ziehen die Dauermagnete teilweise in entgegengesetzte Richtungen an
  - Dadurch kann nicht sicher festgestellt werden, ob und in welche Richtung sich der Motor dreht
- Hall-Sensoren helfen bei der Auswahl der richtigen Phasen-Kombination

# Ansteuerung von BLDC-Motoren IX

## Regelung des BLDC-Motors mit Hallsensoren

- Mit Hall-Sensoren kann auch die Drehzahl des Motors bestimmt werden
- Bei einer Drehung des Rotors um  $15,66^\circ$  (zwei Dauermagnet-Breiten) werden alle sechs Hall-Sensor-Kombinationen durchlaufen
- Die Kommutation, also das Weiterschalten der Phasen-Kombinationen, ist direkt mit der Änderung der Hall-Sensor-Kombination verknüpft
- Das entspricht einem Drehfeldzyklus, welcher alle sechs Phasen-Kombinationen umfasst
- Bei einer vollen Umdrehung des Rotors läuft der Zyklus 23 Mal ab
- Das bedeutet, dass sich die Hall-Sensor-Kombination und die Phasen-Kombination bei einer vollen Umdrehung 138 Mal ändern
- Zustandsänderungen der Hall-Sensoren können über einen Mikrocontroller gezählt werden

# Ansteuerung von BLDC-Motoren X

## Regelung des BLDC-Motors mit Hallsensoren

- Über einen bestimmten Zeitraum, z.B. 1s, werden die Zustandsänderungen erfasst
- Teilt man den Zählerwert durch die berechneten 138, erhält man die Umdrehungen pro Sekunde (Drehzahl)
- Zur Berechnung der Geschwindigkeit in Meter pro Sekunde wird die Drehzahl mit dem Radumfang multipliziert ( $U_{\text{Rad}} = 1,34\text{m}$ )
- Umrechnung auf Kilometer pro Stunde erfolgt durch Multiplikation mit 3,6

$$n = \frac{690 \text{ Flanken/Sekunde}}{138 \text{ Flanken/Umdrehung}} = 5 \text{ s}^{-1}$$

$$v = 5 \text{ s}^{-1} \cdot 1,34 \text{ m} = 6,7 \text{ m/s} = 24,12 \text{ km/h}$$

# Ansteuerung von BLDC-Motoren XI

## Regelung des BLDC-Motors mit Hallsensoren

- Diese Methode ermöglicht die Überwachung der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit
- Erreicht die Geschwindigkeit die Höchstgrenze, kann der Duty cycle (Auslastungsgrad) des Steuersignals angepasst werden, um die Geschwindigkeit zu begrenzen
- Ein BLDC-Motor hat den Vorteil einer verschleißfreien (bürstenlosen) Kommutierung im Vergleich zu einem Gleichstrommotor mit mechanischem Kommutator
- Keine störenden Induktionsspannungen werden durch die Stromwendung erzeugt

[Bab14]

# Sensorlose Regelung von BLDC-Motoren I

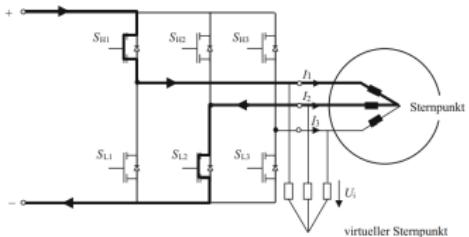


Abbildung: Schaltskizze [Bab14]

- Anstelle eines Hall-Sensors, kann die Regelung auch über die induzierte Spannung in der jeweils stromlosen Wicklung des Stators sensorlos geschehen
- Hochohmische Messwiderstände bilden dazu einen virtuellen Sternpunkt 14

## Sensorlose Regelung von BLDC-Motoren II

- Aufgrund des Induktionsgesetzes, induziert sich in der leistungsstromlosen Spule 3, wenn sich dies senkrecht unter dem Feld eines sich drehenden Rotormagneten befindet, eine Spannung
- Die induzierte Spannung ist proportional zur Flussänderung bzw. der Rotationsgeschwindigkeit und ist null wenn der Rotor steht
- Auch die Streu- und Rückflussanteile aus den Feldänderungen, die durch die beiden stromdurchflossenen Spulen entstehen, erzeugen Induktionsspannungsanteile
- Um die Rotorposition aus den Induktionsspannungen zu erkennen, erfordert Algorithmen und eine intelligente Vorgehensweise

Vorgehensweise:

- ① Bestromen der Drehstromwicklung, sodass zwei Spulen positiv und eine negativ mit Gleichstrom durchflossen werden
- ② Es entsteht ein definiertes magnetisches Gleichfeld im Stator
- ③ Die Permanentmagneten nehmen eine definierte Startposition ein

# Sensorlose Regelung von BLDC-Motoren III

- ④ Anlegen von einer der 6 sinnvollen Phasenfolge
- ⑤ Motorhochlauf starten

[Bab14]

# Rotorpositionserkennung I

- Effektive Methode zur Erkennung der Rotorposition mittels variabler Induktivität
- Funktioniert unabhängig von motorspezifischen Eigenschaften
- Methode funktioniert bei jedem BLDC-Motor, auch bei wechselnder Anfangslast
- Beruht auf der Tatsache, dass eine angelegte Spannung an einer Spule in Anwesenheit eines Permanentmagneten den Stromfluss verändert
- Führt zu einer Veränderung der Induktivität je nach Richtung des erzeugten Magnetfeldes
- Beim BLDC-Motor ist der Stator die Spule und der Rotor der Permanentmagnet
- Implementierung erfordert das Anlegen einer Spannung für eine festgelegte Zeit, um ein Magnetfeld in einer Wicklungsrichtung zu erzeugen

## Rotorpositionserkennung II

- Es müssen zwei Magnetfelder in entgegengesetzter Richtung für jede Wicklung erzeugt werden
- Zwei Phasen werden auf Masse gehalten und eine auf hohe Spannung geschaltet, um das vorwärtsgerichtete Magnetfeld zu erzeugen
- Danach werden zwei Phasen auf hohe Spannung geschaltet und eine auf Masse gehalten, um das entgegengesetzte Magnetfeld zu erzeugen
- Die beiden Spitzenströme aus den entgegengesetzten Magnetfeldern werden gemessen und verglichen
- Der höhere Spitzenstrom zeigt die Richtung des Magnetfeldes des Permanentmagneten an
- Dadurch kann die Polarität des Permanentmagneten und somit die Rotorposition innerhalb von 180 Grad bestimmt werden

## Rotorpositionserkennung III

- Die Abbildung 15 zeigt die erzeugten Stromspitzen, wenn die Prozedur mit Phase A durchgeführt wurde
- Der erste Spitzenstrom ist höher als der zweite, was bedeutet, dass das vorwärtsgerichtete Magnetfeld in dieselbe Richtung wie das Magnetfeld des Rotors zeigt
- Somit ist der Nordpol des Rotors innerhalb von 180 Grad bekannt

[Inf06]

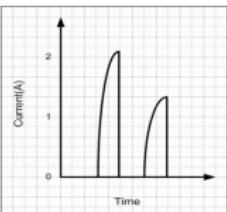


Abbildung: Rotorposition [Inf06]

# Darstellung und Diskussion von Motorkennlinien I

- Aus den Kennlinien lassen sich verschiedene Verhaltensweisen eines Motors ablesen 16 17
- Verhaltensweisen werden über das Drehmoment aufgetragen
- Kennwerte dienen zur:
  - Auswahl und Dimensionierung von Motoren
  - Optimierung des Betriebs
  - Entwicklung von Steuerungs- und Regelungsstrategien
  - Implementierung von Schutzmaßnahmen
  - Erhöhung der Sicherheit, Lebensdauer und Zuverlässigkeit
  - Senkung von Betriebskosten

[Mat24b] [Mat24a]

# Beispielkennlinien von BLDC-Motoren

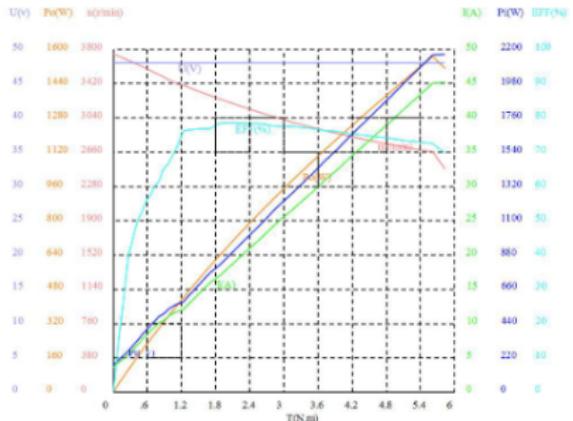


Abbildung: Kennlinie  
BM1109-1200Watt-48V

[Mat24b]

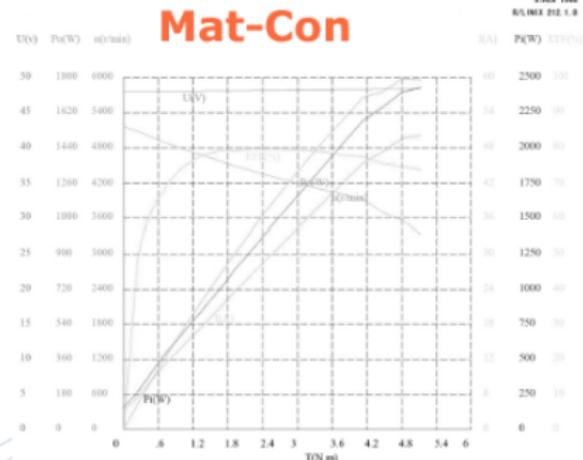


Abbildung: Kennlinie  
BM1109-1500Watt-48V

[Mat24a]

# Drehmoment-Strom-Kennlinie I

Das Drehmoment steigt linear mit dem Strom an, da das Drehmoment in einem BLDC-Motor direkt proportional zum Motorstrom ist. Diese Kennlinie ist hier in grün dargestellt. 18

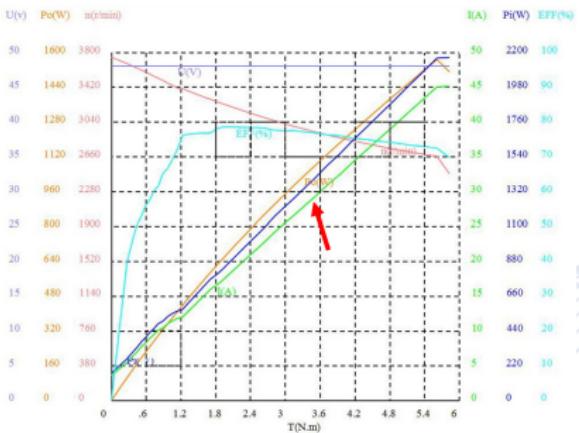


Abbildung: Drehmoment-Strom-Kennlinie

[Mat24b]

# Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie I

Typischerweise fällt das Drehmoment mit steigender Drehzahl ab. Das bedeutet, dass der Motor bei höherem Drehmoment langsamer läuft.  
Diese Kennlinie ist hier in rot dargestellt. 19

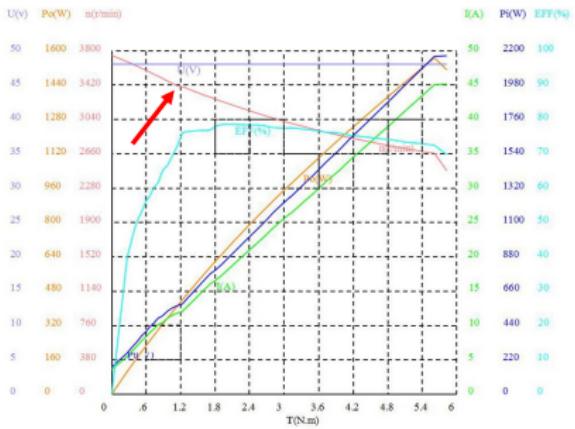


Abbildung: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie

[Mat24b]

# Leistungskennlinie I

Die maximale Ausgangsleistung kann aus der Leistungskennlinie abgelesen werden. Die Ausgangsleistung hängt von Der Eingangsleistung und dem Wirkungsgrad des Motors ab. Hier in orange dargestellt. 20 21

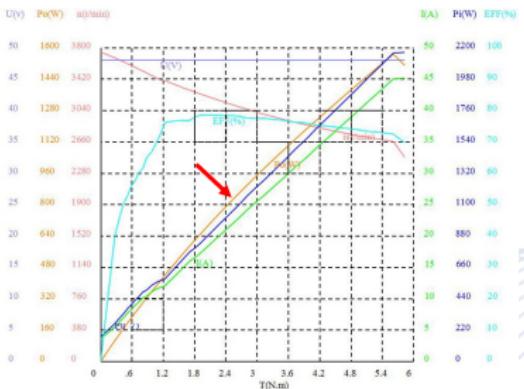


Abbildung: Ausgangsleistung

[Mat24b]

## Leistungskennlinie II

Die Eingangsleistung ist hier in blau dargestellt. 21

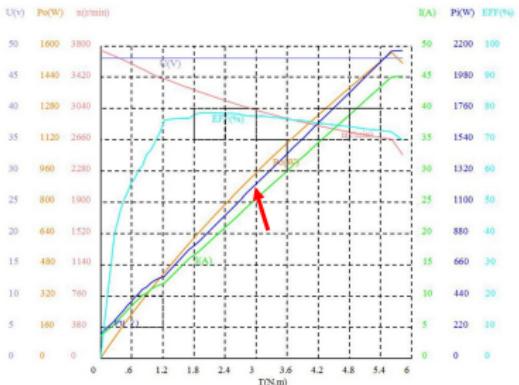


Abbildung: Eingangsleistung

[Mat24b]

# Wirkungsgradkennlinie I

Der Wirkungsgrad steigt typischerweise mit zunehmender Last bis zu einem Maximum und fällt dann wieder ab. Diese ist hier in türkis eingezeichnet. 22

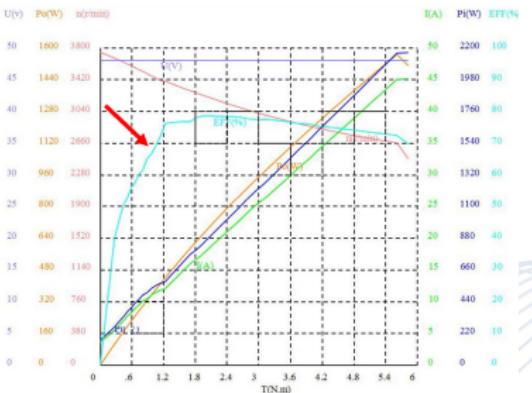


Abbildung: Wirkungsgrad

[Mat24b]

# Spannungskennlinie I

Die angelegte Spannung bleibt konstant. Diese ist hier lila eingezeichnet.  
23

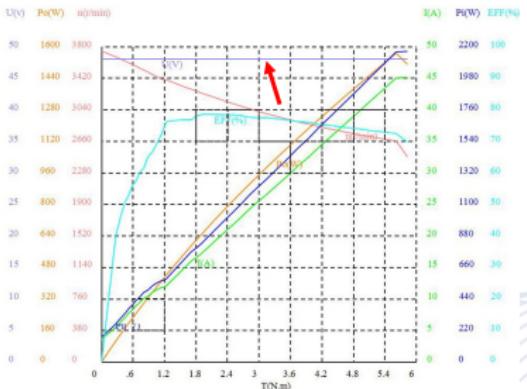


Abbildung: Spannung

[Mat24b]

# Unterschied Gleich- und Wechselstrommotoren I

- Gleichstrommotoren haben einen Dauermagneten als Stator
- Bei Gleichstrommotoren ändert sich durch Umpolen der Betriebsspannung die Drehrichtung des Motors
- Würde man einen Wechselstrom an einen Gleichstrommotor anschließen, würde dieser mehrfach pro Sekunde versuchen die Drehrichtung zu ändern. Das Magnetfeld des Stators müsste sich im gleichen Rhythmus ändern
- Der Stator bei Wechselstrommotor besteht nicht aus einem Dauermagneten sondern aus einem Paket an Blechstreifen

[Con23]

# Was ist der Unterschied zu bürstenbehafteten DC-Motoren? I

Kategorie	BLDC-Motor	Bürsten-Motor
Kommutierung	elektronisch	mechanisch
Lebensdauer	20-40 tausend Stunden	2-5 tausend Stunden
Wartungsaufwand	Geringer Wartungsaufwand, nur gelegentliche Reinigung erforderlich	Regelmäßige Wartung und Bürstenwechsel erforderlich
Energieeffizienz	Bis zu 90% effizienter als bürstenbehaftete Motoren	Nicht so effizient wie BLDC- Motoren

## Was ist der Unterschied zu bürstenbehafteten DC-Motoren? II

Kategorie	BLDC-Motor	Bürsten-Motor
Anwendungsbereiche	Industrielle Anwendungen, Elektrofahrzeuge, Haushaltsgeräte	Kleine Motoren, Haushaltsgeräte, ältere Industrieanwendungen
Kosten	Initial höher, langfristig niedriger aufgrund von Energieeinsparungen	Geringere Anschaffungskosten, höhere Betriebskosten aufgrund von höherem Energieverbrauch
Umweltfreundlichkeit	Umweltfreundlicher als bürstenbehaftete Motoren, keine Bürstenabrieb	Weniger umweltfreundlich aufgrund von Bürstenabrieb und geringerer Energieeffizienz

## Was ist der Unterschied zu bürstenbehafteten DC-Motoren? III

Kategorie	BLDC-Motor	Bürsten-Motor
Strom	Der interne Schaltkreis wandelt den Gleichstrom in Wechselstrom um, welcher die Spulen erregt	Wandelt elektrischen Gleichstrom in mechanische Arbeit um

[Jea24] [Bar23]

## Vor-/Nachteile im Vergleich zu anderen Motoren I

Vorteile	Nachteile
sehr gute Dynamik durch geringeres Gewicht	Sensorsysteme und aufwändige Steuerlogik erforderlich
hohe Überlastbarkeit	eingeschränkte Gleichlaufgüte (Drehmomentwelligkeit)
wartungsarm	höhere Systemkosten als bei Gleichstrommotoren
geringes Trägheitsmoment und besseres Leistungsgewicht	viele elektronische Bauteile

[Pro22]

# Beispiele für die Verwendung der BLDC-Motoren I

Antriebstechnik: [Ket24]

- Antrieb von fahrerlosen Transportsystemen und fahrerlosen Transportfahrzeugen
- Antrieb von Elektroautos
- Antrieb von Elektrofahrrädern
- Antrieb von Booten (z.B. Solarboot der Hochschule Emden/Leer 24)



Abbildung: Solarboot Sunderbird der Hochschule Emden/Leer [Ost24]

## Beispiele für die Verwendung der BLDC-Motoren II

Robotik: [Rob18]

- Einsatz als künstliche Muskeln 25
- Bieten genügend Laufruhe und eine lange Lebensdauer
- Positionserfassung und Steuerung ermöglichen komplexe Bewegungen durch präzise Ansteuerung mehrerer Motoren



Abbildung: Universal Robot der Firma Cobot [KPI24]

## Beispiele für die Verwendung der BLDC-Motoren III

Medizin: [Tru20]

- Chirurgische Handinstrumente
- Roboterassistierte Chirurgie 26
- Sterilisierbare Motoren: speziell Entwickelte Motoren, welche dem Prozess der Sterilisation standhalten (Druck, Temperatur und Feuchtigkeit)



Abbildung: Roboterassistierte Chirurgie [Uni24]

## Beispiele für die Verwendung der BLDC-Motoren IV

Weitere Anwendungsbereiche:

- Modellbau 27
- Handwerk 28
- Bereiche in welchen wartungsfreie Motoren benötigt werden



Abbildung: Außenläufer für Flugzeugmodelle [Der24]

## Beispiele für die Verwendung der BLDC-Motoren V



Abbildung: Akkuschrauber [Seb20]

Vielen Dank  
für Ihre Aufmerksamkeit

# Quellen

## Quellen I

Nachfolgend werden die Quellen angegeben, die für diese Präsentation verwendet worden sind.

- [Bab14] Gerhard Babiels. *Elektrische Antriebe in der Fahrzeugtechnik*. 3., verbesserte und erweiterte Auflage. Springer Verlag, 2014. ISBN: 978-3-658-03334-7.
- [Bar23] Jonathan Bartlett. *Elektronik fuer Einsteiger*. 1. Springer Verlag, 2023. ISBN: 978-3-662-66243-4.
- [Con23] Conrad. *Elektromotoren: Aufbau, Funktionsweise und Arten einfach erklärt*. [letzter Zugriff 05.06.2024](#). 2023. URL: <https://www.conrad.de/de/ratgeber/industrie-40/elektromotor.html>.
- [Der24] Derkum Modellbau. *Brushless Motoren*. [letzter Zugriff 05.06.2024](#). 2024. URL: <https://www.derkum-modellbau.com/motoren/e-motoren-fuer-flugmodelle/d-power-e-motoren/brushless-motoren>.

## Quellen II

- [Ele24] Elektrotechnik Fachwissen. *Sternschaltung*. [letzter Zugriff 05.06.2024](https://www.elektrotechnik-fachwissen.de/wechselstrom/sternschaltung.php). 2024. URL: <https://www.elektrotechnik-fachwissen.de/wechselstrom/sternschaltung.php>.
- [Inf06] Infineon Technologies AG. *AP08018 Start-up Control Algorithm for Sensorless and Variable Load BLDC Control Using Variable Inductance Sensing Method*. [letzter Zugriff 05.06.2024](https://www.infineon.com/dgdl/ap0801810_Sensorless_Variable_Inductance_Sensing.pdf?fileId=db3a304412b407950112b40c7c150b39). 2006. URL: [https://www.infineon.com/dgdl/ap0801810\\_Sensorless\\_Variable\\_Inductance\\_Sensing.pdf?fileId=db3a304412b407950112b40c7c150b39](https://www.infineon.com/dgdl/ap0801810_Sensorless_Variable_Inductance_Sensing.pdf?fileId=db3a304412b407950112b40c7c150b39).
- [Jea24] Jean Rohland. *Die Welt der BLDC Motoren: Grundlagen, Funktionsweise und Anwendungsbereiche*. [letzter Zugriff 05.06.2024](https://motorentraum.de/bldc-motoren/). 2024. URL: <https://motorentraum.de/bldc-motoren/>.

## Quellen III

- [Ket24] Ketterer. *BLDC-Motoren von Ketterer - Krafvoll, praezise und trotzdem klein.* [letzter Zugriff 05.06.2024](#). 2024. URL: <https://www.ketterer.de/produkte/bldc-motoren/>.
- [KPI24] KPI GmbH. *Leichtbauroboter UR16e.* [letzter Zugriff 05.06.2024](#). 2024. URL: <https://www.kpi.de/produkte/cobot-ur16e/>.
- [Mat24a] Mat-Con. *R/LINIX 212.1.8.* [letzter Zugriff 04.06.2024](#). 2024. URL: <http://www.mat-con.net/produktbilder/kennlinien/bm1109-1500W-48V-kl.jpg>.
- [Mat24b] Mat-Con. *Test Report.* [letzter Zugriff 04.06.2024](#). 2024. URL: <http://www.mat-con.net/produktbilder/kennlinien/bm1109-1200W-48V-kl.jpg>.
- [Ost24] Ostfriesisches Landesmuseum Emden. *Arrived! - Ist da!* [letzter Zugriff 05.06.2024](#). 2024. URL: <http://www.landesmuseum-emden.de/1798-0-12>.

## Quellen IV

- [Pro22] Uwe Probst. *Servoantriebe in der Automatisierungstechnik.* 3., erweiterte und aktualisierte Auflage. Springer Verlag, 2022. ISBN: 978-3-658-37423-5.
- [Rob18] Robotik und Produktion. *BLDC-Motoren fuer die Robotik.* letzter Zugriff 04.06.2024. 2018. URL:  
<https://robotik-produktion.de/fachartikel/mehr-power-und-lebensdauer/>.
- [Seb20] Sebastian Stoll. *Guter Antrieb ist alles.* letzter Zugriff 05.06.2024. 2020. URL:  
<https://www.festool.de/blog/inside/tech-talk-brushless-motor-technology>.
- [Stu23] Stuart Cording. *Steuerung von BLDC-Motoren: Ein Leitfaden fuer Anfaenger.* letzter Zugriff 04.06.2024. 2023. URL: <https://www.elektormagazine.de/articles/steuerung-von-blcd-motoren-ein-leitfaden-fr-anfnger>.

## Quellen V

- [Tru20] Trummer, Rainer. *Die passenden BLDC-Motoren fuer chirurgische Anwendungen auswaehlen.* letzter Zugriff 04.06.2024. 2020. URL: <https://www.digital-engineering-magazin.de/die-passenden-bldc-motoren-fuer-chirurgische-anwendungen-auswaehlen>.
- [Uni24] Universitätsklinikum Jena. *Transorale roboter-assistierten Chirurgie.* letzter Zugriff 05.06.2024. 2024. URL: [https://www.uniklinikum-jena.de/hno/Schlagwrter/Roboter\\_assistierte+Chirurgie-p-7732.html](https://www.uniklinikum-jena.de/hno/Schlagwrter/Roboter_assistierte+Chirurgie-p-7732.html).