

---

# 1

## Grundlagen

---



### Dieses Kapitel beantwortet folgende Fragen:

- Wie sind Drehstrommotoren aufgebaut?
  - Welche unterschiedlichen Berechnungsarten für elektrische Maschinen gibt es?
  - Was ist der Unterschied zwischen numerischer und analytischer Berechnung?
  - Welche Anforderungen an rotierende elektrische Maschinen gibt es?
- 

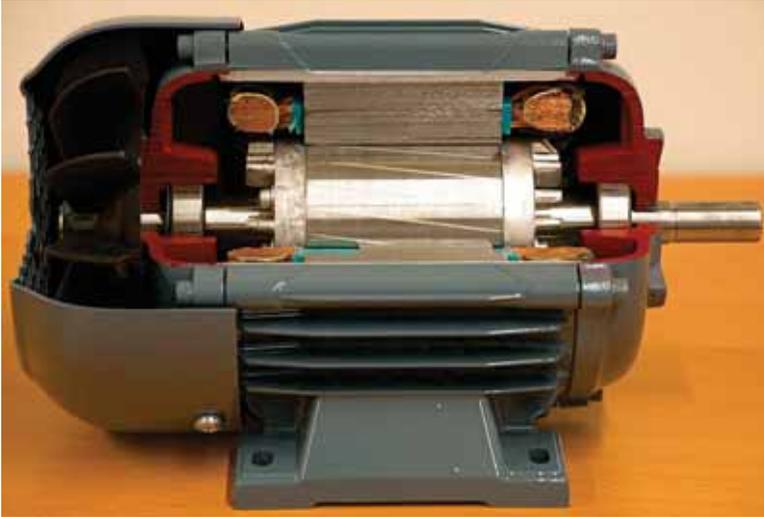
### 1.1 Aufbau elektrischer Maschinen

Für alle elektrischen Maschinen wird unterschieden zwischen elektromagnetisch **aktiven Bauteilen** und **inaktiven Bauteilen** (tragend oder führend) [MP06]. Zu den aktiven Bauteilen gehören folgende:

- flussführende Eisenteile (magnetischer Kreis), meist aufgebaut als Paket aus dünnen Elektroblechen (auch Dynamobleche genannt)
- Wicklung mit Leitermaterial (Kupfer, Aluminium) und Isolation
- Permanentmagnete
- Kommutator, Bürsten und Schleifringe

Zu den tragenden und führenden Bauteilen zählen folgende:

- Lager mit Lagerschild
- Welle
- Gehäuse mit Flansch oder Füßen
- Kühlsystem (z. B. Lüfter)

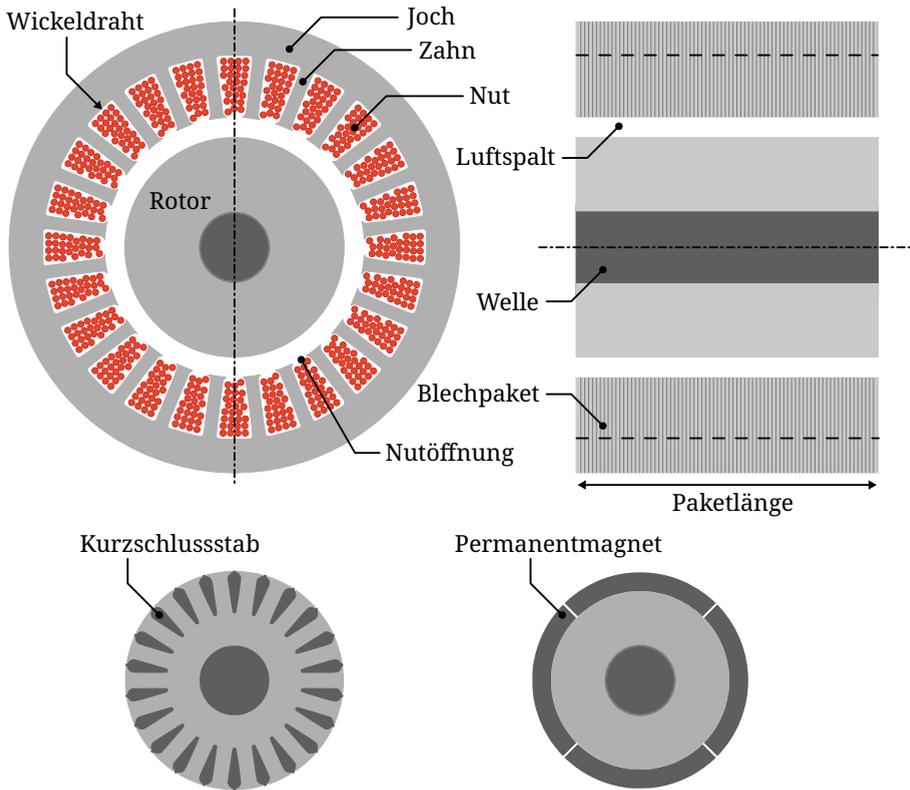


**Bild 1.1** Normmotor (Asynchronmotor mit Kurzschlusskäfig-Rotor)

Für zwei Typen elektrischer Maschinen werden in den Folgekapiteln die Grundlagen zur Auslegung beschrieben: Asynchronmotor mit Kurzschlussläufer (ASM) und permanenterregter Synchronmotor (PMSM). Daher sollen die aktiven Bauteile dieser beiden Drehstrommotoren genauer erläutert werden, damit die korrekten Begriffe ab hier eingeführt und einheitlich genutzt werden. Trotz der Konkretisierung bleiben viele Begriffe, Aussagen und Zusammenhänge allgemeingültig und könnten genauso für dieselben Maschinen im Generatorbetrieb oder auch Gleichstrommaschinen verwendet werden. Die folgende Beschreibung orientiert sich am Aufbau von Norm- oder Standardmotoren. [Bild 1.1](#) zeigt einen Normmotor. Normmotoren sind Drehstrom-Asynchronmotoren mit standardisierten Eigenschaften. Wellendurchmesser, Achshöhe und weitere mechanische Parameter sind nach IEC 60072-1 [[IEC91](#)] festgelegt. Die elektrischen Eigenschaften gelten entsprechend Normreihe DIN EN 60034<sup>1)</sup> „Drehende elektrische Maschinen“. Der erste Teil beschreibt die Bemessung und das Betriebsverhalten [[DIN11a](#)].

[Bild 1.2](#) zeigt zwei Schnittansichten einer Drehstrommaschine. Im Gehäuse sitzt der feststehende **Stator**. Der **Rotor** dreht sich in der Statorbohrung. Die Anordnung kann auch vertauscht werden, dann spricht man von einem Innenstator mit Außenrotor. Der Stator besteht aus einem sogenannten **Blechkpaket**, welches aus dünnen Einzelblechen (**Elektroblech**) gestapelt ist. Übliche Blechdicken liegen zwischen 0,35 – 0,65 mm [[DIN16a](#)]. Zur effektiven Kühlung gibt es auch aus mehreren kurzen Paketen aufgebaute Statoren, wobei zwischen zwei benachbarten Paketen **Kühlschlitze** entstehen.

<sup>1)</sup> Auch IEC 60034



**Bild 1.2** Schnittzeichnung einer elektrischen Drehstrommaschine

Im Statorblech sind **Nuten** ausgespart. Der Bereich zwischen zwei Nuten wird **Zahn** genannt. In den Nuten liegen isolierte **Leiter**, bei denen es sich häufig um **Kupferlackdraht** (siehe [Abschnitt 3.1.1](#)) handelt. Die Nuten können am Luftspalt einen **Nutschlitz (offene Nuten)** haben, aber dort auch geschlossen sein. Bei **geschlossenen Nuten** schränkt sich die Fertigung der Wicklung ein, da die einzelnen Drähte nicht über den Nutschlitz eingebracht werden können. Die Gesamtheit der Leiter einer Nut bilden eine **Spulenseite**, die zusammen mit einer zweiten Spulenseite (Rückführung) zu einer **Spule** wird. Alle Spulen zusammen nennt man **Wicklung**. Der Teil der Wicklung, der nicht im Blechpaket verläuft, wird **Wickelkopf** genannt. Der Bereich des Elektroblechs zwischen Nuten und Außendurchmesser heißt **Joch**. Der schmale Spalt zwischen Stator und Rotor wird **Luftspalt** genannt. Der Begriff wird auch dann genutzt, wenn im Spalt gar keine Luft, sondern Wasser oder Öl ist, wie es in Spezialmotoren der Fall sein kann. Am Stator selbst kann nicht unterschieden werden, ob es sich um einen ASM oder PMSM handelt.

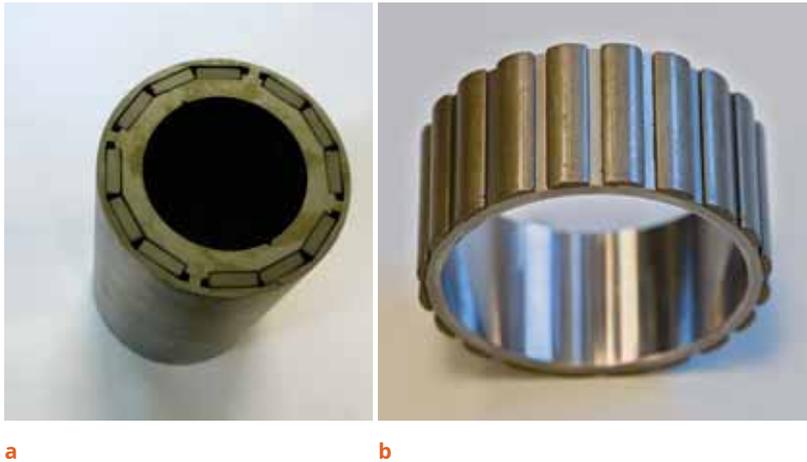
Bei den Rotoren existieren viele verschiedene Varianten, die Einfluss auf das Betriebsverhalten nehmen. Sowohl die Nutformen bei den ASM (siehe [Abschnitt 6.2.2](#)) als auch die Magnetanordnungen bei den PMSM (siehe [Abschnitt 5.4.2](#)) weichen daher im Einzelfall deutlich von den in [Bild 1.4](#) gezeigten Beispielen ab. Jeder Rotor hat eine **Welle**, die meist zweifach gelagert ist. Die Lager wiederum gehören zu Lagerschilden, die am **Gehäuse** befestigt werden. Die Seite des Motors, an der die Welle aus dem Gehäuse herausgeführt ist, wird Antriebsseite (DE, drive-end) genannt, die gegenüberliegende Seite Nicht-Antriebsseite (NDE, non-drive-end). Das **Wellenende** ist für die mechanische Verbindung an den Abtrieb vorbereitet (Welle-Nabe-Verbindung). Ein häufig gewählte Verbindung ist eine Nut zur Aufnahme einer Passfeder. Auf der Nicht-Antriebsseite rotiert häufig mit der Welle ein **Lüfterrad**, das einen Luftstrom zur axialen Durchströmung des Motors erzeugt.

Der Rotor eines Asynchronmotors ([Bild 1.3](#)) mit **Kurzschlusskäfig** besteht wie der Stator aus einem Blechpaket, das fest mit der Welle verbunden ist. Statt aus einzelnen Drähten besteht die Wicklung hier aus **Kupfer- oder Aluminiumstäben**, die in den Nuten liegen. Stirnseitig werden die Stäbe elektrisch verbunden mit **Kurzschlussringen**, die aus demselben Material wie die Stäbe bestehen. Die Ringe können zusätzlich mit Flügeln ausgestattet sein, um den konvektiven Wärmeübergang im Wickelkopfbereich zu verbessern. Beim Wuchten des Rotors wird an den Ringen Material abgenommen.



**Bild 1.3** Rotor eines ASM mit Kurzschlusskäfig aus Aluminium

Rotoren von PMSM (siehe [Bild 1.4](#)) werden entweder mit **Oberflächenmagneten** oder **eingebetteten Magneten** ausgeführt. Permanentmagnete in Schalen- oder Brotlaibform können direkt auf die Welle geklebt werden oder auf eine zusätzliche Buchse aus massivem Eisen. Bei einem Design mit eingebetteten Magneten werden diese zunächst in ein Blechpaket geklebt, das dann auf der Welle befestigt wird. Stirnseitige Scheiben werden verwendet, um die Magnete zu schützen, deren Herausrutschen zusätzlich zur Klebung zu verhindern und eine Möglichkeit zum Wuchten zu schaffen.



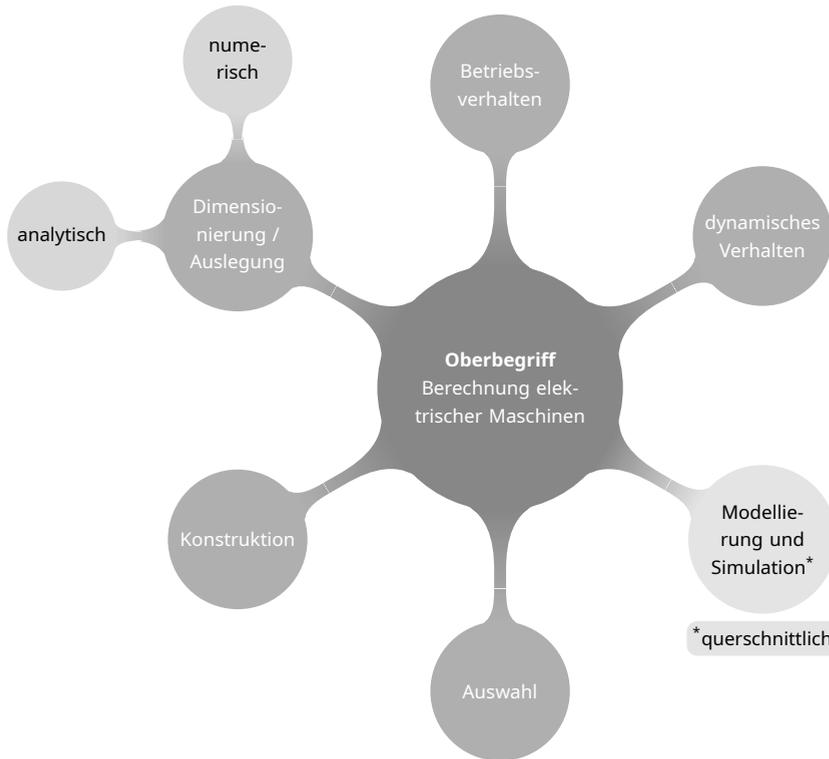
**Bild 1.4** Rotoren von PMSM: a) eingebettet, b) aufgeklebte Oberflächenmagnete

## 1.2 Berechnung elektrischer Maschinen

Veröffentlichungen mit dem Titel „Berechnung elektrischer Maschinen“ behandeln oft das Thema „Auslegung“. Damit sind Methoden gemeint, deren Ziel es ist, die äußeren Abmessungen, die Blechschnittgeometrie, die Wicklung usw. einer Maschine zu bestimmen, um gewünschte Eigenschaften im Betriebsverhalten zu erreichen. Im Englischen wird durchgängig das Wort „Design“ verwendet. Das genannte Thema ist auch der Kern dieses Buches. Als Einstieg sollen zunächst verschiedene Aufgabenstellungen, die alle mit dem Begriff „Berechnung“ überschrieben werden können, gegeneinander abgegrenzt werden (siehe [Bild 1.5](#)).

### Auswahl elektrischer Maschinen

Ist eine Antriebsaufgabe bekannt, so gilt es, die passenden Komponenten zu wählen und optimal aufeinander abzustimmen. Wenn z. B. ein Förderband angetrieben werden soll, könnten seine Geschwindigkeit und sein Wirkungsgrad die Eingangsparameter sein. Dann stellen sich folgende Fragen: Wie muss nun der passende Motor ausgewählt werden? Welche Nennleistung mit welchen Reserven und welche Drehzahl muss er haben? Muss noch ein Getriebe eingesetzt werden, um die Drehzahl zu reduzieren? Es geht um die Betrachtung des Gesamtsystems, wo das Zusammenspiel mechanischer und elektrischer Komponenten im Zentrum steht. Andere Aufgabenstellungen bei der Auswahl von Maschinen ergeben sich z. B. bei besonderen Anforderungen für den Bau-raum oder Randbedingungen wie Explosionsschutz. Ebenfalls in diese Gruppe fallen Komplexitätsoptimierungen, wenn z. B. eine ganze Produktlinie mit möglichst wenig



**Bild 1.5** Berechnung elektrischer Maschinen

unterschiedlichen Motoren ausgerüstet werden soll. Minimaler Aufwand für die Lagerhaltung, hohe Verfügbarkeit und schlanke Stücklisten sind hier die Zielgrößen.

### Berechnung des Betriebsverhaltens

Das Betriebsverhalten einer elektrischen Maschine wird charakterisiert durch ausgewiesene Punkte, unter anderem Nennpunkt, Leerlauf und Kurzschluss. Das Verhalten zwischen diesen Punkten kann durch eine statische Kennlinie verdeutlicht werden [Sei93; FN21]. Dabei meint statisch, dass jeder einzelne Betriebspunkt auf der Kennlinie als eingeschwungen gilt. Zeitliche Ableitungen bleiben unberücksichtigt. Das Erlernen dieser Zusammenhänge wird oft als Einstieg in die Thematik „Elektrische Maschine“ genutzt, und es zeigt sich, dass diese Betrachtungsweise tatsächlich auch für viele Anwendungen ausreichend ist. Dies gilt z. B. auch für die zuvor beschriebene „Auswahl elektrischer Maschinen“, wo meist auf statische Kennlinien zurückgegriffen werden kann. Die zu lösenden Gleichungen sind rein algebraisch, eine gewöhnliche Differentialgleichung muss hier nur integriert werden, wenn das Hochlaufverhalten näherungsweise simuliert werden soll. Für alle Maschinentypen kann das elektrische

Verhalten mit einem Ersatzschaltbild aus Widerständen und Induktivitäten beschrieben werden. Mit einer zusätzlichen Gleichung für das Drehmoment sind dann alle Betriebspunkte berechenbar. Das Modell kann z. B. für thermische Berechnungen erweitert werden. Die elektrischen Verluste sind im Ersatzschaltbild enthalten und können in einem thermischen Ersatzschaltbild als eingeprägte Wärmeleistung übernommen werden [PJH13].

## Berechnung des dynamischen Verhaltens

Als Erweiterung zum vorangegangenen Punkt können den Motormodellen nun zusätzlich gewöhnliche Differentialgleichungen hinzugefügt werden. Damit entstehen differential-algebraische Gleichungssysteme, deren Lösung entsprechende Solver übernehmen. Die Drehstrommaschinen können mit der Methode der Raumzeiger<sup>2)</sup> modelliert werden, sodass statt der aufwendigen Berechnung aller drei Stränge, das Modell auf zwei sogenannte Achsen reduziert wird [Kov84; Kov59a; Kov59b; Sei91]. Dennoch resultiert ein höherer mathematischer Aufwand gegenüber den statischen Berechnungen, wenn das Hochlaufverhalten, Laststöße, Lastabwürfe und auch Schwingungen mit dem mechanischen Antrieb (Feder-Masse-System) untersucht werden sollen. Der Rechenaufwand steigt noch weiter an, wenn sogar die Finite-Elemente-Methode für dynamische Vorgänge eingesetzt wird und damit partielle Differentialgleichungen für die elektrischen und magnetischen Felder hinzukommen.

## Modellierung und Simulation

Modellierung und Simulation sind universelle Begriffe und Bestandteil aller Berechnungsarten. Insbesondere bei dynamischen Betrachtungen steigen die Anforderungen sowohl an das Tool, das den Solver bereithält, und als auch an die Modellierung selbst, da die Anfangsbedingungen für die Differentialgleichungen bekannt sein müssen, um die Simulation überhaupt zu ermöglichen. Des Weiteren steigt die Rechenzeit, wenn ein Antriebssystem statt statisch nun dynamisch simuliert werden soll. Modellierung und Simulation sollen daher gesondert genannt werden: Die besondere Aufgabe liegt in der Analyse und Optimierung der Modelle und dem Zusammenstellen der notwendigen Eingangsdaten und Randbedingungen. Dies ist erforderlich, um Ergebnisse überhaupt numerisch stabil erzeugen zu können, und das auch in akzeptabler Rechenzeit.

## Konstruktion elektrischer Maschinen

Unter der Konstruktion elektrischer Maschinen (siehe z. B. [Ton14]) soll hier die mechanische Auslegung verstanden werden. Die Bestandteile der Maschine müssen zum einen den statischen und dynamischen Belastungen im Betrieb standhalten. Zum anderen ist auch der Montageprozess zu berücksichtigen, der zusätzlichen Stress für

<sup>2)</sup> Siehe auch: Park-Transformation, 2-Achsen-Transformation

Bauteile bedeuten kann. Ein Beispiel ist das automatische Einziehen einer Wicklung, wodurch Isolation und Kupfer stark gestresst werden. Es sind folglich die Auswirkungen auf die elektrischen Eigenschaften der Wicklung zu bewerten [Ste17]. Die vorläufigen elektrischen und magnetischen Berechnungsergebnisse dienen als Eingangsgröße für die Berechnung der Maschinenelemente. In entgegengesetzter Richtung gilt dies wiederum genauso. Die Ergebnisse der mechanischen Auslegung müssen hinsichtlich elektrischer und magnetischer Auswirkungen überprüft werden, sodass ein iterativer Prozess gestartet wird. Auftretende Widersprüche müssen bewertet und aufgelöst oder toleriert werden. Ein einfaches Beispiel stellt der Wellendurchmesser dar, der elektromagnetisch möglichst klein sein sollte, um viel Raum für Elektroblech zu haben. Mechanisch sollte der Wellendurchmesser für eine geringe Durchbiegung möglichst groß sein. Überlegungen zur Konstruktion, Fertigung und Montage einer Maschine werden auch zu Beginn eines Motorprojekts für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit mit Hilfe von Schätzungen einbezogen.

## Dimensionierung/Auslegung

Das vorliegende Buch behandelt genau dieses Teilgebiet. Es geht darum, wie eine Maschine gestaltet werden muss, damit sie bestimmte technische Eigenschaften erfüllt, wobei die Gestaltung sich auf die elektrisch aktiven Teile bezieht (magnetischer Kreis, Wicklungen). Bei dieser Auslegung gibt es viele Freiheitsgrade, die anhand von empirischen Kenntnissen und weiteren Randbedingungen reduziert werden, sodass der Lösungsraum eingeschränkt und die Aufgabe schließlich lösbar wird. Die Freiheitsgrade betreffen die Abmessungen und Geometrie des Motors sowie die Materialauswahl. Folgende Eingangsparameter für eine Auslegung sind zu nennen: Spannung, Frequenz, Leistung, Drehzahl, zulässige Temperaturen, Überlastfähigkeit, weitere Betriebspunkte oder sogar eine vollständige Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie. Zu berücksichtigende Randbedingungen können folgende sein: Bauraum, Lebensdauer und Grenzen für bestimmte Betriebspunkte (z. B. maximaler Anlaufstrom). Die Auslegung erfolgt in iterativen Schritten: Festlegung der Hauptabmessungen (Grobauslegung), Berechnung des magnetischen Kreises, Berechnung von Kennlinien (Betriebsverhalten) und Optimierung. Für den magnetischen Kreis wird zwischen analytischer und numerischer Berechnung unterschieden. Eine Übersicht der Vor- und Nachteile zeigt [Tabelle 1.1](#).

**Analytische Berechnung:** Die einzelnen Abschnitte des magnetischen Kreises der Maschine werden als konzentrierte Elemente in Analogie zu einem elektrischen Kreis modelliert. Das Ergebnis der Berechnung zeigt die Lage der verschiedenen Arbeitspunkte auf der Magnetisierungskennlinie des Eisens (Elektroblech) und bei PMSM auch den Arbeitspunkt auf der Entmagnetisierungskennlinie des Permanentmagneten. Die Punkte können mit Hilfe festgelegter Kriterien bewertet werden. Die Berechnungen enthalten zwar die nichtlineare Kennlinie des Elektroblechs, bleiben aber eindimensional und sind mit Hilfe eines Solvers einfach und sehr schnell durchführbar, sodass die Ergeb-

**Tabelle 1.1** Vor- und Nachteile von analytischer und numerischer Magnetkreisberechnung

	Vorteile	Nachteile
analytisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Beschreibung mit einfachen algebraischen Gleichungen</li> <li>■ Übersichtlichkeit der Ergebnisse</li> <li>■ pragmatische Ansätze seit Jahrzehnten bewährt</li> <li>■ Berechnungen auch „auf dem Papier möglich“ (Einsatz spezieller Software nicht zwingend erforderlich)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Vereinfachungen müssen auf Zulässigkeit bewertet werden unter Umständen Vernachlässigung signifikanter Effekte</li> <li>■ Beschränkung auf Grundwelle<sup>1</sup></li> <li>■ Großteil der empirischen Ansätze basiert historisch bedingt auf ASM und kann nicht in vollem Umfang auf PMSM übertragen werden</li> </ul>
numerisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Analyse erfasst alle Bereiche des magnetischen Kreises durch Modellierung der realen Geometrie</li> <li>■ eingängige Ergebnisvisualisierung durch DichtepLOTS</li> <li>■ weiterführende Analysen zu Effekten höherer Ordnung möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ vergleichsweise hoher Rechenaufwand (3D noch deutlich höher als 2D)</li> <li>■ Eingabe von Randbedingungen zur Problemlösung erforderlich</li> <li>■ vermeintliche Genauigkeit der Ergebnisse kann über ungenaue Eingangsdaten hinwegtäuschen (Missinterpretation der Ergebnisse)</li> <li>■ aufwendige Fehlersuche</li> <li>■ Gefahr der Kritiklosigkeit des Anwenders („Ich nutze ein teures und genaues FEM-Tool, die Ergebnisse müssen stimmen.“)</li> </ul>

<sup>1</sup> Modelle zur analytischen Berücksichtigung von Effekten höherer Ordnung grundsätzlich vorhanden, aber mit erhöhtem Aufwand verbunden.

nisse sofort vorliegen. Parameterstudien mit Tausenden Varianten sind innerhalb von Sekunden möglich.

**Numerische Berechnung:** Numerische Berechnung elektrischer Maschinen, genauer numerische Magnetkreisberechnung, bedeutet die Lösung der partiellen Maxwell-Differentialgleichungen (Vektoranalysis). Auf Basis der tatsächlichen Geometrie des Blechschnitts können mit Hilfe der Methode der finiten Elemente (oder auch finite Differenzen [SS93]) alle Bereiche des magnetischen Kreises diskretisiert und berechnet werden [Bia05]. Neben der gängigen zweidimensionalen Berechnung ist es außerdem möglich, die Maschine dreidimensional zu modellieren, um z. B. Effekte in den Wickelköpfen zu erfassen. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt durch das Postprocessing, das aus den gewonnenen Daten für das magnetische Feld zum einen die kompilierten Ergebnisse zu Drehmomenten, Strömen und Spannungen liefert. Dies lässt einen Ver-

gleich mit der analytischen Berechnung zu. Zum anderen sind aber auch Analysen der Flussdichteverteilung in den verschiedenen Abschnitten des Blechschnitts möglich.

In diesem Buch werden ausschließlich die analytischen Methoden zur Auslegung von elektrischen Maschinen am Beispiel von ASM und PMSM beschrieben. Die Berechnung des magnetischen Kreises und auch die Darstellung von Ersatzschaltbildern basieren auf der Annahme, dass sich im Luftspalt ein rein sinusförmiges Magnetfeld ausbildet. Diese sogenannte **Grundwellenbetrachtung** erweist sich als ausreichend genau für die Festlegung der Motorgeometrie. Der Einfluss von Effekten höherer Ordnung wird nur indirekt z. B. durch Wicklungsfaktoren oder pauschale Zusatzverluste berücksichtigt. Die Berechnung der Oberwellen im magnetischen Kreis ist möglich, jedoch mit erheblichem Aufwand verbunden (siehe [Tabelle 1.1](#)). Es ist dann zu überlegen, auf numerische Berechnungen umzusteigen. An einigen Stellen werden zur Verifikation auch Ergebnisse aus FEM-Berechnungen hinzugezogen. Ausführliche Beschreibungen zur Auslegung und Analyse von elektrischen Maschinen mit FEM finden sich in [[Bia05](#)], [[BS03](#)] und [[Sal95](#)].

Es gibt bei der Auslegung elektrischer Maschinen noch eine weitere Unterscheidung, die Einfluss auf den Umfang und den Ablauf der Berechnungen nimmt.

## Neuentwicklung

Startet ein neues Projekt ohne Anknüpfung an Vorgänger, so spricht man von einer Neuentwicklung. Die Anzahl der Freiheitsgrade ist maximal. Das Potenzial, das gewünschte Ziel tatsächlich zu erreichen, z. B. eine wirkungsgradoptimale Maschine, ist es ebenso. Wenn der Anwendungsbereich ausreichend bekannt ist, können im Idealfall noch alle Komponenten des gesamten Antriebsstrangs aufeinander abgestimmt werden. Diese freie Auslegung kommt vorrangig bei sehr großen Maschinen mit geringer Stückzahl und Sondermaschinen vor. Ausgangspunkt für die Entwicklung sind entweder allgemeine Ausnutzungszahlen (siehe [Kapitel 4](#)) oder auch Erfahrungen aus ähnlichen Projekten.

## Maschinenanpassung

Etwas eingeschränkter ist der Lösungsraum, wenn die Aufgabenstellung „Anpassung einer Maschine“ lautet. Hier ist denkbar, dass bei unverändertem Bauraum einzelne Motorparameter verbessert werden sollen oder auch ein anderer Motortyp eingesetzt werden soll. Verbesserungen können z. B. durch erhöhte Materialausnutzung oder effektivere Kühlung erzielt werden. Restriktionen können sich zusätzlich durch eine schon vorhandene Steuerung oder geforderte mechanische oder elektrische Kompatibilität zum Vorgängermotor ergeben. Im einfachsten Fall könnte hier auch die Erstellung einer Variante vorliegen, die schon mit Hilfe der proportionalen Wicklungsumrechnung erreicht wird.

## Maschinenreihe

Eine besondere Aufgabe ist die Auslegung von Maschinenreihen bestehend aus mehreren Maschinen, die alle auf einem Blechschnitt basieren. Um eine Reihe zu realisieren, werden nur die Pakettlängen und Wicklungen angepasst. Dabei wird das Ziel eines einzelnen optimalen Motors aufgegeben. Stattdessen geht es darum, mit einem einzigen Blechschnitt möglichst gut einen großen Leistungsbereich abzudecken.

## 1.3 Anforderungen an rotierende elektrische Maschinen

Welche der in [Abschnitt 1.2](#) genannten Berechnungen durchgeführt werden und wie viele Optimierungsschleifen notwendig sind, hängt von den im Lastenheft beschriebenen Anforderungen ab. Hier sind folgende zu unterscheiden:

- Einteilung der Maschinen
  - Leistungsbereich (Kleinmaschine bis hin zur Großmaschine)
  - Einsatzgebiet (Industrie, Haushalt, Schiff, Bergbau ...)
  - Einbindung in Antrieb (Pumpe, Lüfter, Stellantrieb, Fahrtrieb ...)
  - Maschinentyp (Gleichstrom, Drehstrom, asynchron, synchron, linear ...)
  - Bestromung (direkt, Frequenzumrichter, Sanftstarter ...)
- Stückzahlen
  - Einzelstück
  - Serienfertigung (Kleinserie bis hin zur Großserie)
- Technische Randbedingungen
  - elektrisch
    - Spannungsversorgung, Stromgrenzen
    - Wirkungsgrad, Leistungsfaktor
    - Schutzart
    - Lebensdauer der Isolation
    - Betriebsarten (motorisch, generatorisch, Bremse)
    - Einschaltdauer (Dauerbetrieb, Aussetzbetrieb ...)
  - mechanisch
    - Geräusche
    - Abmessungen
    - Gewicht
    - Einbausituation

- Vibrationen
- Lebensdauer der Lager
- Drehmoment (stationäre Punkte oder dynamisch)
- Drehzahlbereich, Drehzahlregelung
- Trägheitsmoment (Dynamik)
- thermisch
  - Fremd-, Eigenkühlung
  - Kühlmedium (Luft, Wasser, ...)
  - Temperaturbereich Umgebung
  - Wicklungserwärmung

Nur ein Teil der Anforderungen und deren Wechselwirkungen sind Gegenstand dieses Buches. Die Liste zeigt die Komplexität einer vollständigen Entwicklung einer elektrischen Maschine. In vielen Fällen ist es tatsächlich ausreichend, sich auf wesentliche Eckpunkte bei der Auslegung zu beschränken und sogar Fehler bei der Vorausberechnung der elektrischen Daten der Maschine zu tolerieren. Man beachte, welche erheblichen Toleranzen auf Typenschilddaten z. B. bei ASM genormt sind [DIN11b]. Eine sehr exakte und umfassende Auslegung ist mit dem zu erwartenden Erkenntnisgewinn und dem Aufwand aus Zeit und Kosten zu bewerten. Daher bieten die folgenden Kapitel praxistaugliche und pragmatische Ansätze mit dem Fokus auf Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Modelle.

## 1.4 Aufgaben

### Verständnisfragen

1. Welche Aussagen zum Aufbau des Stators von Drehstrommotoren sind richtig?
  - Der Stator wird geblecht ausgeführt.
  - Die Nuten, in die die Wicklung eingelegt wird, können offen oder geschlossen sein.
  - Der Teil der Wicklung, der außerhalb des Blechpakets verläuft, wird Wickelende genannt.
2. Welche Aussagen zum Aufbau des Rotors von Drehstrommotoren sind richtig?
  - Rotoren mit Kurzschlusskäfig werden meist geblecht ausgeführt. Dies gilt für Rotoren von PMSM nicht grundsätzlich.
  - Bei PMSM wird zwischen Oberflächenmagneten und eingebetteten Magneten unterschieden.
  - Ein Kurzschlusskäfig besteht aus Stäben und zwei Kurzschlussringen.

3. Welche Aussagen zum Oberbegriff „Berechnung elektrischer Maschinen“ sind richtig?
  - Beim „Betriebsverhalten“ sind vorrangig Differentialgleichungen zu lösen.
  - Eine „Maschinenreihe“ meint das Ausnutzen eines Blechschnitts für mehrere Maschinen.
  - Bei der „Konstruktion“ stehen mechanische Berechnungen im Vordergrund.
4. Was gilt für die Dimensionierung (oder Auslegung) von Elektromotoren?
  - Die Dimensionierung beinhaltet die Berechnung des magnetischen Kreises.
  - Die Dimensionierung startet mit der detaillierten Berechnung der Abmessungen.
  - Die Dimensionierung umfasst stets das gesamte Spektrum des magnetischen Feldes.
5. Welche Aussagen zu analytischer und numerischer Magnetkreisberechnung sind richtig?
  - Die numerische Berechnung ist aufgrund ihrer Genauigkeit vorzuziehen.
  - Bei einer numerischen Berechnung ist die Berücksichtigung von Effekten höherer Ordnung meist einfach möglich.
  - Die analytische Berechnung enthält pragmatische und empirische Ansätze, die eine einfache Berechnung ermöglichen.



---

# 2

## Wicklungen

---



### Dieses Kapitel beantwortet folgende Fragen:

- Wie ist eine Drehstromwicklung aufgebaut?
  - Mit welchen Angaben werden Drehstromwicklungen spezifiziert?
  - Was ist ein Wickelschema und welche Informationen enthält es?
  - Welche Regeln sind beim Entwurf einzuhalten?
  - Was sind Wicklungsfaktoren und wie werden sie berechnet?
- 

### 2.1 Aufbau und Begriffe

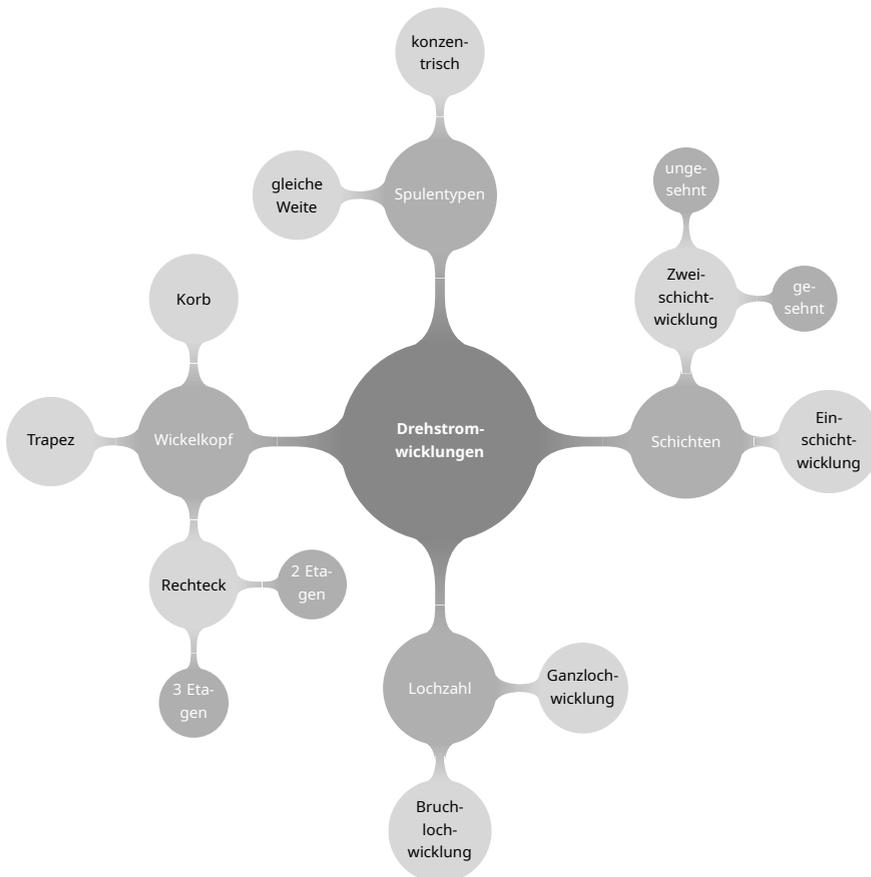
Wenn die Hauptabmessungen des Motors vorläufig festliegen, kann eine passende Statorwicklung unter verschiedenen Aspekten ermittelt werden. Selbst wenn schon eine Windungszahl während der Grobauslegung angenommen wurde, ist diese alleine nicht hinreichend, um die Wicklung zu spezifizieren. Im Detail kommt der Wahl der Wicklungsausführung eine große Bedeutung zu, da sie auf die im folgenden genannten Parameter Einfluss nimmt.

**Herstellungskosten und Fertigung:** Die Kosten zur Herstellung einer Wicklung sind verknüpft mit der Entscheidung für den Typ der Wicklung (Formspule oder Lackdrähte), für die Materialauswahl (Temperaturbeständigkeit) und auch für die Komplexität. Es ist immer zu überprüfen, ob nicht die einfachste vorstellbare Wicklung bereits den Anforderungen genügt. Schon der Übergang zu einer Zweischichtwicklung (siehe [Abschnitt 2.1.2](#)) oder die Forderung nach einem besonders hohen Füllfaktor (siehe [Abschnitt 2.1.5](#)) werden die Kosten steigen lassen, genauso wie die Auswahl besonderer Materialien. Die Anzahl möglicher Lieferanten für komplexere Wicklungen ist

geringer und auf einen hohen Automatisierungsgrad für hohe Stückzahlen muss unter Umständen verzichtet werden.

**Betriebsverhalten:** In der Grundwellenbetrachtung lässt sich das Betriebsverhalten des Motors mit Hilfe weniger Parameter der Wicklung vollständig beschreiben. Für eine Oberwellenanalyse müssen auch die zugehörigen Wicklungsfaktoren höherer Ordnung (siehe [Abschnitt 2.4](#)) berücksichtigt werden. Für ASM gibt es Tabellen, die die Auswahl geeigneter Kombinationen von Stator- und Rotornutzahlen erleichtern (siehe [Abschnitt 4.3.5](#)). Damit können unerwünschte Oberwellendrehmomente und magnetische Geräusche verringert oder sogar vollständig unterbunden werden. Analytische Erweiterungen zum Grundwellenmodell finden sich in [\[Kno12\]](#).

[Bild 2.1](#) zeigt eine Übersicht zur Einteilung der verschiedenen Arten von Wicklungen. Das Thema Wicklungen elektrischer Maschinen ist umfangreich und soll in kompakter Form und passend zu den Berechnungsbeispielen der Motoren beschrieben werden.

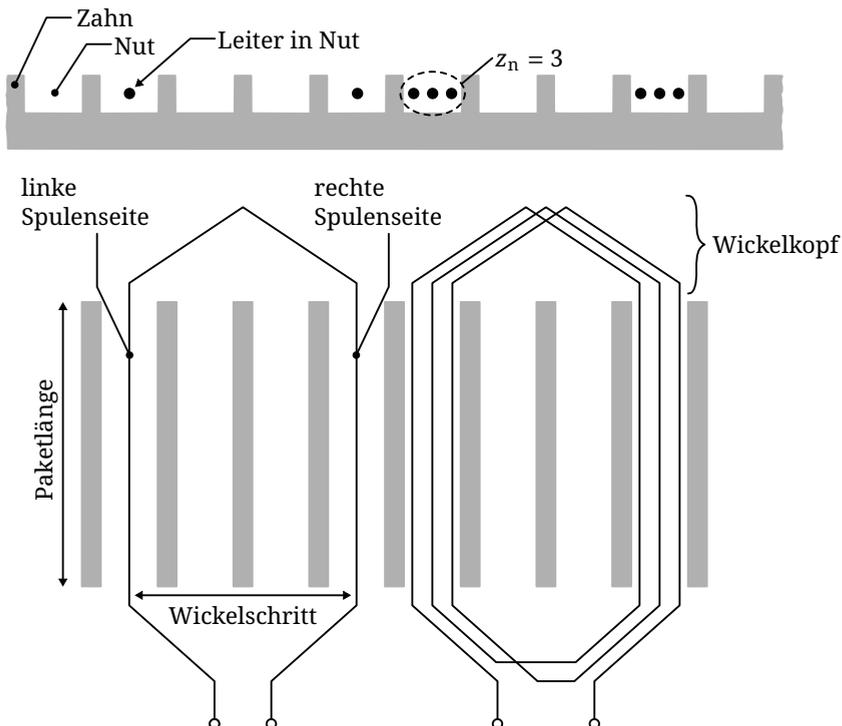


**Bild 2.1** Einteilung der Drehstromwicklungen

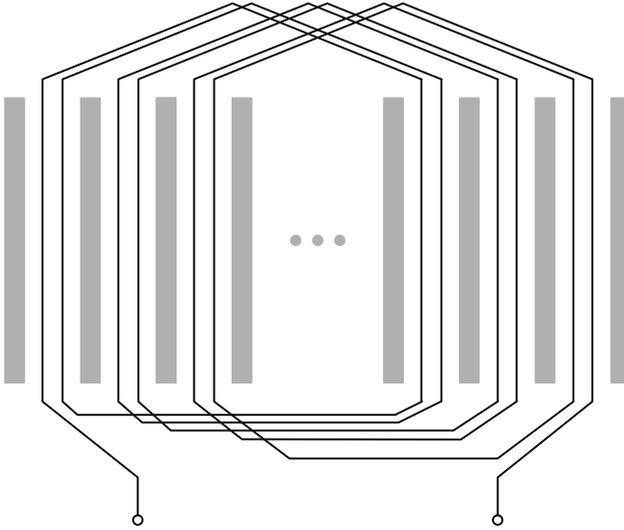
Ausführliche Darstellungen finden sich in [Hei53], [Seq50], [Muc83] und [BFL61]. Eine Kernaufgabe bei der Auslegung stellt die Erstellung des Wickelschemas dar. Die folgenden Abschnitte stellen ausgewählte Wickelschemata vor und verweisen auf die entsprechenden Zeichnungen dazu, die am Ende dieses Kapitels angefügt sind (siehe Abschnitt 2.6).

### 2.1.1 Einschichtwicklungen

Um Wicklungen besser zu visualisieren, wird der Stator in axialer Richtung „durchgeschnitten“, dann „ausgerollt“ und flach gezeichnet. Bild 2.2 zeigt ein Beispiel, um den Begriff Spule zu verdeutlichen. Die einfachste Form einer **Spule** hätte nur eine Windung, die sich wiederum unterteilt in zwei **Spulenseiten**. Die eine Seite wird als **positiv** bezeichnet, die andere als **negativ**. Beide belegen jeweils eine Nut. Wird die Spule  $w$ -mal gewickelt, bezeichnet  $w_1$  die **Windungszahl**, wobei mit  $z_1$ , der **Leiterzahl**, die Anzahl der Leiter in den zugehörigen Nuten beschrieben wird. Mit  $z_n$  wiederum wird die Anzahl Leiter in einer einzelnen Nut bezeichnet. Es ist wichtig, die Unterscheidung zwischen Leiter- und Windungszahl zu betonen, da je nach Autor die eine oder



**Bild 2.2** Im Stator eingelegte Spule mit Bezeichnungen



**Bild 2.3** Spulengruppe mit Spulen gleicher Weite und  $z_n = 2$ ,  $z_1 = 12$  sowie  $w_1 = 6$

andere Zahl vorrangig verwendet wird und Fehler um den Faktor zwei vermieden werden sollen, denn es gilt:

$$z_1 = 2 \cdot w_1 . \quad (2.1)$$

Oft wird eine Spule über mehr als zwei Nuten fortgeführt. Dann ist die erste negative Spulenseite kein freies Ende, sondern wird wiederum in eine Nut als neue positive Spulenseite gelegt, so wie in [Bild 2.3](#) dargestellt. Es entsteht damit eine sogenannte **Spulengruppe**. Diese wiederum kann aus **Spulen gleicher Weite**, d. h., alle Spulen haben denselben Durchmesser (siehe [Bild 2.3](#)), oder **konzentrischen Spulen** (siehe [Bild 2.4](#)) bestehen. Einzelne Spulengruppen können in Reihe oder auch parallel geschaltet werden. Der Abstand zwischen einer positiven und negativen Spulenseite wird **Spulenweite**  $W$  genannt. Sie wird oft nicht als Längenmaß, sondern bezogen verwendet. Eine wichtige Bezugsgröße ist die **Polteilung**  $\tau_p$ . Sie berechnet sich als Kreisbogen am Statorbohrungsdurchmesser pro Pol:

$$\tau_p = \frac{\pi D_{1i}}{2p} . \quad (2.2)$$

Der Quotient aus  $W/\tau_p$  ist wichtig für die Angabe der Sehnung einer Zweischiichtwicklung (siehe [Abschnitt 2.1.2](#)). Wird die Spulenweite auf die **Nutteilung**, ebenfalls definiert als Kreisbogen am Statorbohrungsdurchmesser

$$\tau_n = \frac{\pi \cdot D_{1i}}{N_1} , \quad (2.3)$$

bezogen, so kann der Begriff des dimensionslosen Wickelschritts eingeführt werden:

$$y = \frac{W}{\tau_n} . \quad (2.4)$$