

Handbuch | VLT®-Frequenzumrichter

# Wissenswertes über Frequenzumrichter



# Vorwort

Im Jahr 1968 begann Danfoss als erstes Unternehmen weltweit mit der Serienfertigung von Frequenzumrichter für die variable Drehzahlregelung von Drehstrom-Asynchronmotoren. Heute gewinnen Frequenzumrichter zunehmend an Bedeutung, um Motorbetrieb sowie das mit dem Motor verbundene System zu optimieren. Frequenzumrichter kommen in einer stetig steigenden Zahl an Anwendungen mit folgenden Zielen zum Einsatz:

- *Optimierung der Energieeffizienz:* Die Umstellung von fester auf variable Drehzahl bildet bei Anwendungen mit unterschiedlicher Last einen wichtigen Schritt auf dem Weg zu Energieeinsparungen. Tatsächlich erfordert eine moderne Motortechnologie heutzutage immer eine hochentwickelte Regelung, um einen optimalen Betrieb bei allen Drehzahlen zu ermöglichen.
- *Leistungsfähige Fabrikautomatisierung:* Die ständig steigende Nachfrage nach einem höheren Durchsatz in der Produktion, die zu einer zunehmenden Automatisierung führt, beinhaltet auch einen wachsenden Bedarf nach Lösungen mit variabler Drehzahl.
- *Prozessregelung und -optimierung:* Eine verbesserte Prozessregelung erfordert Motorsteuerungssysteme mit variabler Drehzahl und führt abhängig von der jeweiligen Anwendung zu einer präziseren Regelung, einem höheren Durchsatz, höherer Qualität oder mehr Komfort.

Die Grundlagen der Frequenzumrichtertechnologie bleiben weiterhin bestehen, gleichzeitig ändern sich aber viele Elemente in rasender Geschwindigkeit. Die heutigen Produkte enthalten zunehmend Software, die neue Funktionen bietet und es ermöglicht, dass Frequenzumrichter im System weiter an Bedeutung gewinnen. Es gibt neue Motortypen, die zusätzliche Anforderungen an die Motorsteuerung stellen. Das bedeutet wiederum, dass Frequenzumrichter in der Lage sein müssen, immer mehr unterschiedliche Motortypen zu regeln, ohne den Endanwender mit höherer Komplexität zu belasten. Außerdem führen neue Anforderungen an die Energieeffizienz zu mehr Anwendungen mit variabler Drehzahl, wodurch voraussichtlich Frequenzumrichter in Zukunft nahezu alle Motoren mit variabler Drehzahl betreiben und regeln werden.

Mit dieser Aktualisierung von „Wissenswertes über Frequenzumrichter“ möchte Danfoss die Reihe der früheren Ausgaben dieses Buchs fortsetzen. Wir sind stolz auf unsere Leistungen, und unsere Leidenschaft gilt Frequenzumrichter. Mit diesem Buch hoffen wir, auch Sie für diese Technologie zu begeistern.

Wenn Sie mehr erfahren möchten, dann können Sie uns gerne kontaktieren.

*Jakob Fredsted*  
*Vice President, Research & Development*  
*Danfoss Power Electronics A/S*

# Inhalt

	<b>Seite</b>
<b>0 Einführung</b> .....	7
0.1 Drehzahlregelung von Elektromotoren.....	7
0.2 Warum Drehzahlregelung? .....	8
0.3 Möglichkeiten zur Anpassung der Motordrehzahl.....	8
0.4 Frequenzumrichter.....	9
<b>1 Elektromotoren</b> .....	10
1.1 Übersicht.....	10
1.2 Grundlagen .....	11
1.2.1 Stator und Rotor.....	11
1.2.2 Leistung und Drehmoment .....	12
1.2.3 Drehstrom- und Gleichstrommotoren.....	13
1.2.4 Elektromagnetische Induktion .....	13
1.2.5 Pole, synchrone und asynchrone Drehzahl.....	14
1.2.6 Wirkungsgrad und Verluste.....	15
1.3 Asynchronmotoren .....	17
1.3.1 Rotierendes Feld .....	17
1.3.2 Käfigläufermotor.....	19
1.3.3 Schlupf, Drehmoment und Drehzahl.....	21
1.3.4 Typische Betriebsbedingungen.....	23
1.3.5 Drehzahländerung .....	24
1.3.6 Motor-Typenschild und Stern- oder Dreieckschaltung.....	27
1.4 Synchronmotoren.....	29
1.4.1 Permanentmagnetmotoren (PM-Motoren).....	29
1.4.1.1 Gegen-EMK.....	31
1.4.1.2 Drehmoment- und Drehzahlbereich .....	32
1.4.2 BLDC-Motoren (Brushless DC) oder ECM-Motoren (Electronically Commutated Motor) .....	33
1.4.3 LSPM-Motor (Line Start PM Motor) .....	34
1.4.4 Reluktanzmotoren.....	35
1.4.5 Synchron-Reluktanzmotor mit Käfigläufer.....	36
1.4.6 Synchron-Reluktanzmotor (SynRM).....	37
1.4.7 Schaltbarer Reluktanzmotor (SRM) .....	39
<b>2 Frequenzumrichter</b> .....	41
2.1 Direktumrichter .....	41
2.2 Umrichter mit Zwischenkreis.....	42
2.3 Gleichrichter.....	44
2.3.1 Ungesteuerte Gleichrichter.....	45

	<b>Seite</b>
2.3.2 Halbgesteuerte Gleichrichter .....	46
2.3.3 Gesteuerte Gleichrichter .....	47
2.3.4 Active Front-End/Active Infeed.....	48
2.4 Zwischenkreis.....	48
2.4.1 Variabler Zwischenkreis.....	49
2.4.2 Konstanter Zwischenkreis.....	51
2.5 Wechselrichter .....	52
2.6 Modulationsverfahren .....	55
2.6.1 Pulsamplitudenmodulation (PAM) .....	55
2.6.2 Pulsbreitenmodulation (PWM).....	56
2.6.3 Asynchrone PWM.....	59
2.6.3.1 SFAVM .....	59
2.6.3.2 60° AVM .....	62
2.7 Steuerkreis und Regelverfahren .....	63
2.7.1 Einfaches Regelverfahren .....	65
2.7.2 Skalare Regelung mit Ausgleich.....	66
2.7.3 Raumvektor mit und ohne Rückführung .....	67
2.7.3.1 Raumvektor (ohne Rückführung) .....	67
2.7.3.2 Raumvektor (mit Rückführung).....	68
2.7.4 Flux-Vektor-Regelung mit und ohne Rückführung .....	69
2.7.4.1 Flux-Vektor (ohne Rückführung).....	69
2.7.4.2 Flux-Vektor (mit Rückführung).....	70
2.7.5 Servoantriebssteuerung.....	70
2.7.6 Schlussfolgerungen zur Steuerung.....	71
2.8 Danfoss-Steuerverfahren .....	71
2.8.1 Danfoss VVCplus-Steuerung.....	72
2.8.2 Danfoss Flux-Vektor-Steuerung.....	76
2.9 Normen und Gesetzgebung .....	77
<b>3 Frequenzumrichter und Motoren .....</b>	<b>78</b>
3.1 Grundlegende Prinzipien .....	78
3.1.1 U/f-Betrieb und Feldschwächung.....	78
3.1.2 87-Hz-Betrieb .....	80
3.1.3 Betrieb an der Stromgrenze.....	82
3.2 Kompensationen.....	82
3.2.1 Lastunabhängiger Startausgleich.....	83
3.2.2 Lastabhängiger Startausgleich .....	83
3.2.3 Lastausgleich.....	84
3.2.4 SchlupfAusgleich.....	84
3.2.5 PM-Motor- und SynRM-Ausgleich .....	85

	<b>Seite</b>
3.3 Autom. Motoranpassung (AMA).....	86
3.4 Betrieb.....	87
3.4.1 Regelung der Motordrehzahl .....	87
3.4.2 Reversierung.....	88
3.4.3 Beschleunigungs- und Verzögerungsrampen (Rampe auf und ab).....	89
3.4.4 Drehmomentregelung.....	91
3.4.5 Watchdog .....	92
3.5 Dynamischer Bremsbetrieb.....	93
3.5.1 Erweiterung der Verzögerungsrampe.....	94
3.5.2 Der Motor als Bremswiderstand.....	94
3.5.3 Bremschopperschaltung (Bremsmodul) und Bremswiderstand .....	95
3.5.4 Verwendung einer regenerativen Bremseinheit.....	95
3.6 Statischer Bremsbetrieb .....	96
3.6.1 Stopp mit Motorfreilauf.....	97
3.6.2 DC-Bremung .....	97
3.6.3 DC-Halten .....	97
3.6.4 Elektromechanische Bremse.....	97
3.7 Motorerwärmung und thermische Überwachung.....	98
3.8 Funktionale Sicherheit .....	100
<b>4 Energie sparen mit Frequenzumrichtern .....</b>	<b>104</b>
4.1 Potenzial.....	104
4.2 Effizienz von Motor und Frequenzumrichter.....	105
4.3 Klassifizierung der Energieeffizienz.....	106
4.4 Energieeffizienter Motorstart .....	109
4.5 Energieeffiziente Motorsteuerung .....	111
4.6 Lastprofile über die Zeit.....	113
4.6.1 Anwendungen mit variablem Drehmoment.....	113
4.6.2 Anwendungen mit konstantem Drehmoment.....	115
4.7 Lebenszykluskosten.....	116
4.8 Systemeinsparungen.....	117
4.9 Nutzung zurückgespeicherter Leistung.....	119
<b>5 Elektromagnetische Verträglichkeit.....</b>	<b>122</b>
5.1 EMI und EMV.....	122
5.2 EMV und Frequenzumrichter.....	123
5.3 Erdung und Abschirmung.....	125
5.4 Anlagen mit Frequenzumrichtern .....	130
5.5 Gesetzgebung und Normen .....	131

	<b>Seite</b>
<b>6 Schutz gegen elektrischen Schlag und andere Gefahren durch elektrische Energie</b> .....	133
6.1 Allgemeines .....	133
6.2 Netzversorgungssystem .....	134
6.3 Zusätzlicher Schutz .....	137
6.4 Sicherungen und Trennschalter.....	139
<b>7 Netzstörungen</b> .....	142
7.1 Was sind Oberschwingungen?.....	142
7.1.1 Lineare Lasten .....	142
7.1.2 Nicht lineare Lasten .....	143
7.1.3 Einfluss von Oberschwingungen in einer Energieverteilungsanlage.....	145
7.2 Normen und Anforderungen zur Oberschwingungsbegrenzung .....	147
7.3 Verfahren zur Reduzierung von Oberschwingungen in Frequenzumrichtern.....	147
7.3.1 Passive Reduzierung von Oberschwingungen .....	149
7.3.2 Aktive Reduzierung von Oberschwingungen .....	150
7.4 Instrumente zur Oberschwingungsanalyse .....	152
7.4.1 VLT® Motion Control Tool MCT 31 .....	153
7.4.2 Harmonic Calculation Software (HCS).....	153
<b>8 Schnittstellen</b> .....	154
8.1 Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI) .....	154
8.2 Betriebsprinzipien von seriellen Schnittstellen .....	156
8.3 Serielle Standardschnittstellen in Frequenzumrichtern .....	158
8.4 Feldbus-Schnittstellen in Frequenzumrichtern .....	159
8.5 Standardisierung von Feldbussen .....	161
<b>9 Dimensionierung und Auswahl von Frequenzumrichtern</b> .....	164
9.1 Korrekte Einstellung der Nennleistung des Frequenzumrichters .....	164
9.2 Nennwert der Frequenzumrichter aufgrund der Motorspezifikationen .....	165
9.3 Überlastfähigkeit.....	166
9.3.1 Energieeffizienzbelange.....	168
9.4 Regelbereich.....	169
9.5 Leistungsreduzierung von Frequenzumrichtern.....	170
9.6 Generatorische Energie .....	171
9.7 Motorkabel.....	172
9.8 Umwelt.....	173
9.9 Zentrale und dezentrale Installation im Vergleich.....	175
9.10 Beispiele .....	177

## 0 Einführung

Ein Frequenzumrichter (auch: Frequenzumsetzer) ist definitionsgemäß ein elektronisches Gerät, das bei Wechselstrom (AC) einer bestimmten Frequenz die Frequenz verändert. Ursprünglich handelte es sich hierbei um elektromechanische Geräte (Motorgeneratoren). Sie werden manchmal „dynamische“ Frequenzumrichter genannt. Die Entwicklung der Festkörperelektronik machte es möglich, vollständig elektronische Frequenzumrichter zu bauen, oft als „statische“ Frequenzumrichter bezeichnet (keine beweglichen Teile).

Auch wenn das Prinzip der Konvertierung der festen Netzspannung und -frequenz in variable Werte nahezu unverändert geblieben ist, hat es seit den ersten Frequenzumrichtern, die mit Thyristoren und analoger Technologie ausgestattet waren, viele Verbesserungen gegeben, die zu den heutigen mikroprozessorgesteuerten und digitalen Geräten geführt haben.

Aufgrund der ständig zunehmenden industriellen Automatisierung gibt es einen konstanten Bedarf nach stärker automatisierten Steuerungen. Darüber hinaus steigen die Produktionszahlen stetig, weshalb kontinuierlich bessere Methoden gesucht werden, die Effizienz der Produktionsanlagen weiter zu steigern.

Heute ist der drehzahlgeregelte, dreiphasige Motor ein Standardelement in allen automatisierten Prozessanlagen, Geschäfts- und öffentlichen Gebäuden. Hocheffiziente Asynchronmotoren, aber insbesondere auch Motortechnologien wie Permanentmagnetmotoren, EC-Motoren und Synchron-Reluktanzmotoren, erfordern eine Steuerung über Frequenzumrichter; bei vielen Motortypen ist der direkte Betrieb über eine 3-phasige Standardstromversorgung sogar überhaupt nicht mehr möglich.

### 0.1 Drehzahlregelung von Elektromotoren

Systeme, die die Drehzahl von Elektromotoren regeln oder verändern können, sind unter unterschiedlichen Bezeichnungen bekannt. Zu den am häufigsten verwendeten Begriffen gehören:

- Frequenzumrichter (Frequency Converter, FC)
- Drehzahlveränderlicher Antrieb (Variable Speed Drive – VSD)
- Antrieb mit Drehzahlregelung (Adjustable Speed Drive – ASD)
- Frequenzgesteuerter Antrieb (Adjustable Frequency Drive – AFD)
- Antrieb mit variabler Frequenz (Variable Frequency Drive – VFD)

Während sich VSD und ASD auf die Drehzahlregelung im Allgemeinen beziehen, sind AFD und VFD direkt mit der Anpassung der Einspeisefrequenz eines Motors verbunden. In diesem Zusammenhang wird auch die Abkürzung „Umrichter“ verwendet. Dieses Handbuch verwendet vor allem den Begriff Frequenzumrichter. Die Wortwahl trägt dem leistungselektronischen Teil dieser Geräte und unterstützenden Komponenten wie Stromwandlern, Ein-/Ausgabe-Schnittstellen und Mensch-Maschine-Schnittstellen (HMI) Rechnung.

## 0.2 Warum Drehzahlregelung?

Es gibt zahlreiche Gründe für die Anpassung der Drehzahl einer Anwendung:

- Einsparung von Energie und Verbesserung der Effizienz von Systemen
- Anpassung der Drehzahl an die Prozessanforderungen
- Anpassung des Drehmoments oder der Leistung eines Antriebs an die Prozessanforderungen
- Verbesserung des Arbeitsumfelds
- Reduzierung mechanischer Belastung von Maschinen
- Niedrigeres Geräuschniveau, etwa bei Lüftern und Pumpen

Je nach Anwendung überwiegt der eine oder andere Vorteil. Die Drehzahlregelung bringt jedoch erwiesenermaßen in vielen Anwendungen wesentliche Vorteile.

## 0.3 Vorgehensweise zur Anpassung der Motordrehzahl

Es gibt im Wesentlichen drei Technologien, um im industriellen Einsatz eine Drehzahlregelung vorzunehmen. Jede hat bestimmte Alleinstellungsmerkmale:

### Hydraulisch

- Hydrodynamischer Typ
- Statische Typen

Typische Anwendungen sind Förderbandanwendungen, insbesondere in Erdbewegungs- und Bergbaumaschinen. Das basiert vor allem auf der „Softstart-Fähigkeit“ dieser Hydrauliklösungen.

### Mechanisch

- Riemen- und Kettenantriebe (mit verstellbarem Durchmesser).
- Friktionsantriebe (metallisch)
- Verstellgetriebe

Auch heute noch bevorzugen viele Ingenieure (insbesondere Maschinenbauingenieure) mechanische Lösungen für einige Anwendungen, hauptsächlich aufgrund ihrer Einfachheit und ihren geringen Kosten.

### Elektrisch

- Frequenzumrichter mit Elektromotor
- Servosysteme (zum Beispiel Servoverstärker und Servo-PM-Motoren)
- Gleichstrom (DC)-Motor mit Regelelektronik
- Schleifringläufermotor (Asynchronmotor mit Schlupfregelung und gewickeltem Rotor)

Früher waren elektrische Geräte zur Drehzahlregelung kompliziert in der Handhabung und teuer in der Anschaffung. Sie kamen nur in äußerst anspruchsvollen Aufgaben zum Einsatz, wenn keine anderen Alternativen verfügbar waren.

Die nachstehende Liste von technischen Lösungen zur Drehzahlregelung von Motoren ist nicht vollständig und soll lediglich einen Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten geben. Der Fokus dieses Buchs liegt auf der Drehzahlregelung von Elektromotoren mit Frequenzumrichtern.

## 0.4 Frequenzumrichter

Moderne Frequenzumrichter erlauben, die Drehzahl oder das Drehmoment einer angetriebenen Maschine mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,5\%$  anzupassen und aufrecht zu erhalten. Das ist unabhängig von der Last, im Gegensatz zum Asynchronmotor im Betrieb mit konstanter Drehzahl, bei dem die Drehzahl zwischen Leerlauf und Betrieb bei Volllast um bis zu 3-5 % schwanken kann (Schlupf).

Um hohe Wirkungsgrade bei Elektromotoren zu erreichen, arbeiten Motorhersteller an unterschiedlichen Konzepten. Anwendern fällt es mitunter schwer, die wichtigsten Vorteile einer Technologie gegenüber der anderen zu sehen, aber sie erkennen schnell, dass energieeffiziente Motoren eine technologisch hochwertige Steuerung benötigen.

Im Prinzip lassen sich fast alle Motoren über Steueralgorithmen betreiben, die speziell auf den jeweiligen Motortyp abgestimmt sind. Einige Hersteller von Frequenzumrichtern orientieren die Gestaltung der Algorithmen an einer kleinen Gruppe von Motortechnologien, aber viele Hersteller bauen mehrere Algorithmen gleichzeitig ein und ermöglichen eine entsprechende Auswahl bei der Inbetriebnahme.

Für den Anwender ist eine unkomplizierte Inbetriebnahme der Frequenzumrichter auf Grundlage der üblicherweise für den jeweils eingesetzten Motortyp zur Verfügung stehenden Daten von großer Bedeutung. Nach der Inbetriebnahme muss er die Sicherheit haben, dass das System wirklich so einfach zu bedienen ist, wie erwartet, weshalb Online-Messungen des tatsächlichen Energieverbrauchs sowie ein einfacher Zugang zu wichtigen Daten zum Betrieb von grundlegender Bedeutung sind.

Um die Auswahl der richtigen Lösung zu vereinfachen und die Einhaltung der gesetzlichen Vorgaben zur Senkung des Energieverbrauchs sicherzustellen, gibt es eine starke Motivation, ein vollständiges Regelwerk zu erstellen.

Hierbei ist zu beachten, dass jede einzelne Systemkomponente für potenzielle Energieeinsparungen wichtig ist. Laut dem Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI) lassen sich im Antriebssystem ungefähr 10 % des erreichbaren Einsparpotenzials durch die Verwendung effizienter Motoren erreichen, 30 % durch eine variable Drehzahl und sogar 60 % durch die Optimierung des gesamten Systems.

In diesem Sinne möchten wir Sie bitten, dieses Handbuch vollständig zu lesen und daran zu denken, dass man ein System nicht nur aufgrund von einer oder weniger seiner Komponenten beurteilen sollte.

*Wir wünschen Ihnen eine interessante Lektüre.*

# 1 Elektromotoren

## 1.1 Übersicht

Ein Elektromotor ist ein elektromechanisches Gerät, das elektrische Energie in mechanische Energie umwandelt. Der umgekehrte Vorgang der Erzeugung von elektrischer Energie aus mechanischer Energie erfolgt durch einen Generator.

Die Betriebsanforderungen an den Elektromotor sind insbesondere in der Industrie enorm. Robustheit, Zuverlässigkeit, Größe, Energieeffizienz und der Preis sind nur einige der Kriterien. Unterschiedliche Anforderungen haben zur Entwicklung von verschiedenen Arten von Elektromotoren geführt. Das folgende Diagramm gibt einen allgemeinen Überblick über die gängigsten Elektromotortechnologien.

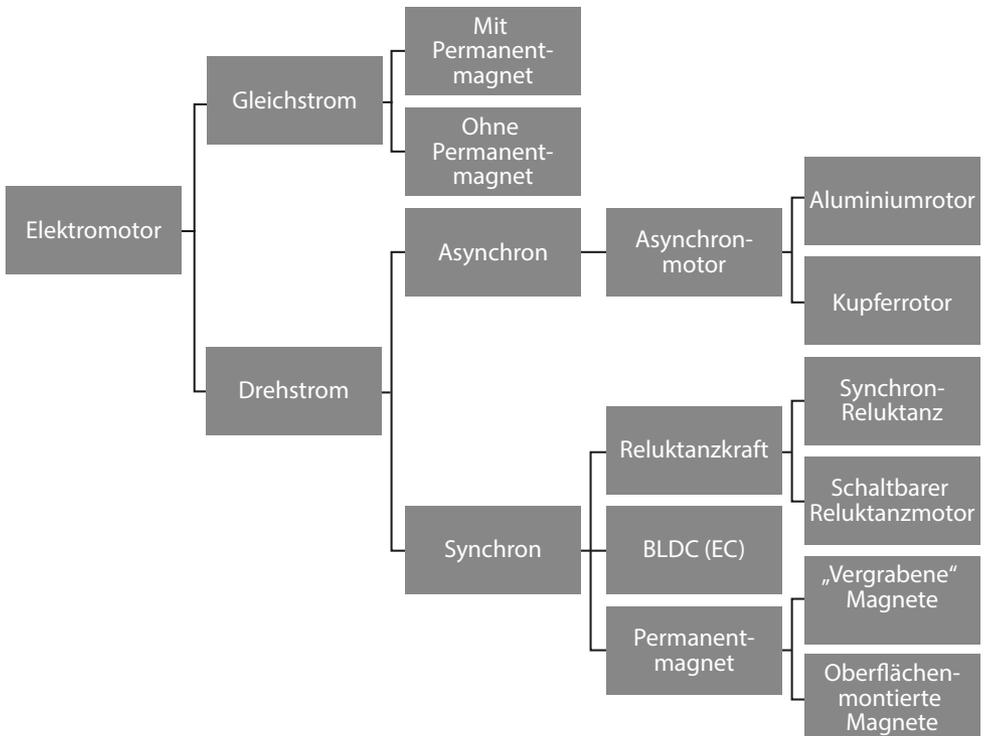


Abb. 1.1 Überblick über die gängigsten Elektromotortechnologien

## 1.2 Grundlagen

### 1.2.1 Stator und Rotor

Alle rotierenden Elektromotoren bestehen im Prinzip aus zwei Hauptbestandteilen.

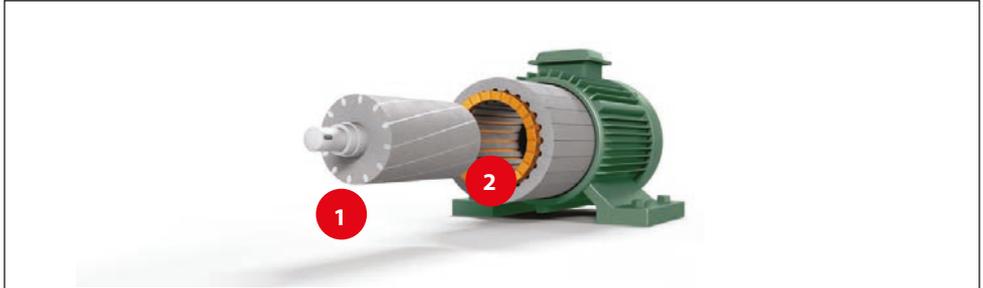


Abb. 1.2 Aufbau des Asynchronmotors

#### **Stator**

Der Stator (1) ist der nicht bewegliche Teil des Motors, der aus Blechpaketen besteht, in denen sich elektrische Wicklungen befinden.

#### **Rotor**

Der Rotor (2) ist der sich drehende Teil des Motors, der an der Motorwelle angebracht ist. Ebenso wie der Stator besteht der Rotor aus dünnen Stahlblechen, in denen die Rotorwicklungen eingelagert sind.

Eine Variante ist der Motor mit Außenrotor. Anders als beim Innenrotor befindet sich der Stator in der Mitte des Motors, und der Rotor dreht sich um den Stator. Diese Konstruktion findet in einigen Lüfteranwendungen Verwendung, bei denen die Lüfterflügel direkt auf dem Rotor montiert sind. Soweit nicht anders angegeben, beziehen sich die folgenden Erklärungen auf die Innenrotorkonstruktion.

IEC-Normen definieren die Anschlussabmessungen von typischen Industriemotoren. Es erfüllen jedoch nicht alle Motoren diese Anforderungen. So weichen beispielsweise die Abmessungen von NEMA-Rahmenmotoren aufgrund der Umrechnung vom metrischen zum angloamerikanischen Maßsystem von den IEC-Normen ab.

## 1.2.2 Leistung und Drehmoment

Der Ausgangsnennstrom von Elektromotoren ist innerhalb eines Standardbereichs festgelegt. Durch diese Standardisierung können Anwender bei bestimmten Anwendungen zwischen verschiedenen Motorherstellern wählen. Der „standardmäßige“ Ausgangsbereich und seine Inkremente sind von Land zu Land und von Region zu Region unterschiedlich. Es ist empfehlenswert herauszufinden, wie die Hersteller in ihren Katalogen den Standard definieren. Durchschnittlich lassen sich Motoren mit einer Gerätebaugröße bis 315 (ca. 200 kW) als Standardmotoren mit Standardabmessungen einstufen.

Pferdestärken [PS] sind eine angloamerikanische Einheit zur Messung der Motorleistung. Wenn diese Einheit angegeben ist, lässt sie sich folgendermaßen umrechnen: 1 PS = 0,736 kW oder 1 kW = 1,341 PS.

Tabelle 1.1 zeigt die typische Ausgangsnennleistung für gängige Industriemotoren in [kW] und [PS].

<b>kW</b>	0,18	0,25	0,37	0,55	0,75	1,10	1,50	2,20	3,00	4,00	5,50	7,50	11,0
<b>PS</b>					1,00		2,00	3,00		5,00	7,00	10,00	15,0
<b>kW</b>	15,0	18,5	22,0	30,0	37,0	45,0	55,0	75,0	90,0	110,0	132,0	160,0	200,0
<b>PS</b>	20,0		30,0	40,0	50,0	60,0	75,0	100					

Tabelle 1.1 Ausgangsnennleistungen von Motoren

Neben der Leistung ist das Drehmoment ein wichtiges Merkmal eines Motors. Das Drehmoment gibt die Drehstärke der Motorwelle an. Die Leistung steht in direkter Verbindung zum Drehmoment und kann berechnet werden, wenn Drehmoment und Drehzahl bekannt sind.

$$P = \frac{M \times n}{9550}$$

P = Leistung [kW]

M = Drehmoment [Nm]

n = Drehzahl [U/min]

Der in der Formel verwendete Faktor 9550 geht aus der Umrechnung der Einheiten hervor:

- Leistung von der Basiseinheit W (Watt) zur Typenschild-Einheit kW (Kilowatt)
- Drehzahl von der Basiseinheit  $s^{-1}$  (Umdrehungen pro Sekunde) zur Typenschild-Einheit  $min^{-1}$  (Umdrehungen pro Minute)

### 1.2.3 AC- und DC-Motoren

Der erste Elektromotor, ein Gleichstrommotor, wurde um das Jahr 1833 herum gebaut. Die Drehzahlregelung ist bei diesem Motortyp einfach und hat die Anforderungen von vielen unterschiedlichen Anwendungen zu dieser Zeit erfüllt. Die Steuerung des Gleichstrommotors erfolgt durch eine Stromversorgung mit Gleichspannung, deren Höhe die Drehzahl des Rotors beeinflusst. Die auf die Stator- und Rotorwicklungen angelegte Spannung führt zur Entstehung von Magnetfeldern, die sich anziehen oder abstoßen und auf diese Weise zu einer Bewegung des Rotors führen. Die dem Rotor zugeführte Energie wird über Bürsten, die gewöhnlich aus Graphit sind, auf einen Kommutator übertragen. Der Kommutator stellt sicher, dass die nächste Wicklung mit Strom versorgt wird, um eine kontinuierliche Drehung zu erreichen. Die Bürsten sind mechanischem Abrieb ausgesetzt und müssen gewartet oder regelmäßig ausgewechselt werden. Die Bedeutung von Gleichstrommotoren ist im Laufe der Zeit gesunken, und sie werden heutzutage nur noch selten in Leistungsbereichen über wenigen hundert Watt eingesetzt.

Im Vergleich zu Gleichstrommotoren sind Drehstrommotoren viel einfacher und robuster. Drehstrommotoren haben jedoch gewöhnlich eine feste Drehzahl- und Drehmomentkennlinie. Aufgrund dieser festen Kennlinien eigneten sich Drehstrommotoren viele Jahre lang nicht für viele unterschiedliche oder spezielle Anwendungen. Sie kommen aber dennoch in den meisten Anwendungen zur Umwandlung von elektrischer in mechanische Energie zum Einsatz.

Das Funktionsprinzip von Drehstrommotoren basiert auf der Wirkung eines rotierenden Magnetfelds. Das rotierende Feld erzeugt entweder eine Mehrphasen-Wechselstromversorgung (normalerweise eine Dreiphasen-Stromversorgung) oder eine Einphasen-Stromversorgung, unterstützt durch Kondensatoren oder Induktivitäten, die eine Phasenverschiebung erreichen.

Der Fokus dieses Buchs liegt auf Drehstrommotoren, insbesondere auf Asynchronmotoren, da sich die Anforderungen für den Betrieb mit Frequenzumrichtern in Anwendungen mit Antrieben mit Drehzahlregelung für verschiedene Motortypen aus dieser Motortechnologie herleiten lassen. Gleichstrommotoren werden nicht weiter behandelt.

### 1.2.4 Elektromagnetische Induktion

Bei den meisten Elektromotoren erfolgt die Krafterzeugung über eine Interaktion von Magnetfeldern und stromdurchflossenen Leitern. Das ist der umgekehrte Vorgang der Erzeugung von elektrischer Energie aus mechanischer Energie durch einen Generator (z. B. durch einen Wechselstromgenerator oder ein Fahrraddynamo).

#### **a) Generatorprinzip, Induktion durch Bewegung**

Wenn eine Kraft ( $F$ ) auf einen Leiter einwirkt und ihn durch ein Magnetfeld ( $B$ ) bewegt, wird eine Spannung induziert. Wenn der Leiter Teil eines geschlossenen Stromkreises ist, fließt Strom ( $I$ ), siehe Abb. 1.3 „Prinzip der elektromagnetischen Induktion“.

### b) Motorprinzip

Motoren nutzen das Induktionsprinzip in umgekehrter Reihenfolge: Ein stromdurchflossener Leiter, der sich in einem Magnetfeld befindet, wird durch eine Kraft (F) beeinflusst, was zu einer Bewegung führt.

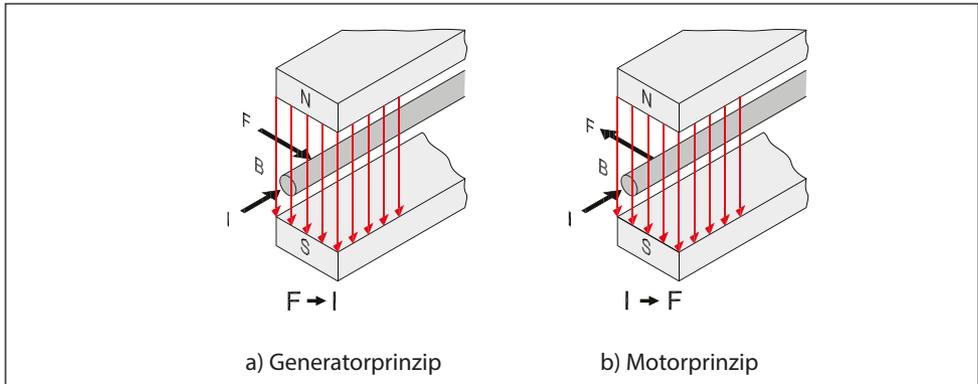


Abb. 1.3 Prinzip der elektromagnetischen Induktion

In beiden Fällen ist ein Magnetfeld erforderlich. In Abb. 1.3 „Prinzip der elektromagnetischen Induktion“ erzeugt ein Permanentmagnet das Magnetfeld, in einem Motor erfolgt die Magnetfelderzeugung dagegen im Stator. Normalerweise wird dies durch das Anlegen von Spannung auf die Statorwicklungen erreicht. Die von der elektromagnetischen Kraft beeinflussten Leiter befinden sich im Rotor.

### 1.2.5 Pole, synchrone Drehzahl und asynchrone Drehzahl

Wenn die Netzfrequenz und die Polpaarzahl bekannt sind, lässt sich die Synchrondrehzahl eines Motors berechnen.

$$n_0 = \frac{f \times 60}{p}$$

f = Frequenz [Hz]

$n_0$  = Synchrondrehzahl [min<sup>-1</sup>]

p = Polpaarzahl

Die Frequenz oder der Frequenzumrichter bestimmt das Versorgungsnetz, die Zahl der Pole hängt jedoch davon ab, wie die Statorspulen verbunden sind.

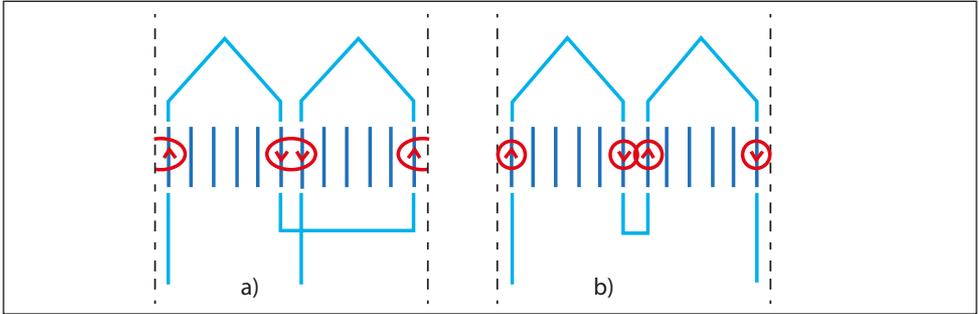


Abb. 1.4 Zwei Spulen in einer Phase geschaltet in Reihen zu a) zwei Polen b) vier Polen

Tabelle 1.2 „Polpaare (p) oder Polzahl und synchrone Motordrehzahl“ führt die Zahl der Pole entsprechend der Synchronzahl ( $n_0$ ) bei einer Stromversorgung von 50 und 60 Hz auf. Höhere Polzahlen sind möglich, werden heutzutage jedoch kaum verwendet.

Polpaare (p)	1	2	3	4	6
Polzahl (2p)	2	4	6	8	12
$n_0$ [min <sup>-1</sup> ] (50 Hz Stromversorgung)	3000	1500	1000	750	500
$n_0$ [min <sup>-1</sup> ] (60 Hz Stromversorgung)	3600	1800	1200	900	600

Tabelle 1.2 Polpaare (p) oder Polzahl und synchrone Motordrehzahl

Synchron bedeutet „gleichzeitig“ oder „gleich“. Bei Synchronmotoren bedeutet dies, dass die Drehzahl des Rotors und des rotierenden Felds gleich sind. Wenn die Rotordrehzahl von Schlupf betroffen ist (siehe auch Abschnitt 1.3.3 „Schlupf, Drehmoment und Drehzahl“) und daher niedriger ist als die Drehzahl des rotierenden Felds, wird der Motor als asynchron eingestuft, was „nicht gleichzeitig“ oder „nicht gleich“ bedeutet.

### 1.2.6 Wirkungsgrad und Verluste

Das Stromnetz versorgt den Motor mit Strom. Bei konstanter Last ist diese Leistung aufgrund von verschiedenen Verlusten im Motor höher als die mechanische Leistung, die der Motor an die Welle weitergeben kann. Das Verhältnis zwischen der Leistungsabgabe  $P_2$  und der Leistungsaufnahme  $P_1$  ergibt den Motorwirkungsgrad:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\text{Ausgangsleistung}}{\text{Eingangsleistung}}$$

Der Wirkungsgrad hängt vom Motorprinzip, den Komponenten (z. B. der Qualität der Beschichtung), der Menge des aktiven Materials (z. B. aufgrund der Beschichtung oder der Nutzung von Magneten), der Größe des Motors (Nennleistung) und der Zahl der Pole ab.

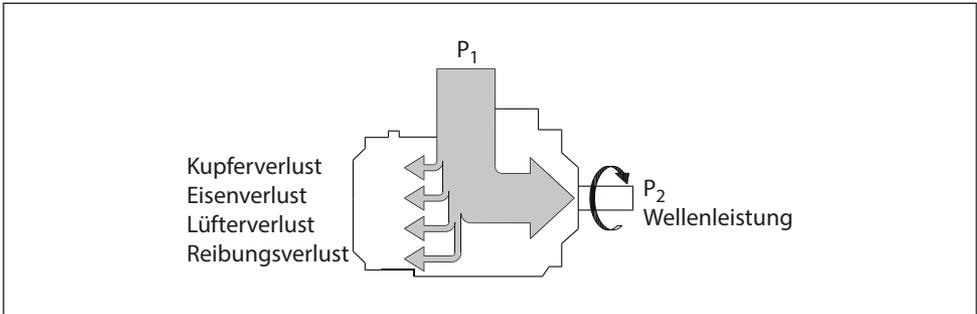


Abb. 1.5 Typische Verluste im Motor

Die in Abb. 1.5 „Typische Verluste im Motor“ dargestellten Verluste umfassen:

- Kupferverluste aufgrund der Widerstände der Stator- und Rotorwicklungen
- Eisenverluste, bestehend aus Ummagnetisierungsverlusten und Wirbelstromverlusten  
Ummagnetisierungsverluste kommen vor, wenn Eisen durch Wechselstrom (AC) magnetisiert wird.

Das Eisen wird wiederholt magnetisiert und entmagnetisiert (100 Mal in der Sekunde bei einer Stromversorgung von 50 Hz). Sowohl die Magnetisierung als auch die Entmagnetisierung benötigen Energie. Um die Ummagnetisierungsverluste auszugleichen, die sich bei einer Erhöhung der Frequenz und der Stärke der magnetischen Induktion auch erhöhen, führt der Motor Leistung zu.

Es kommt zu Wirbelstromverlusten, da die Magnetfelder in den Eisenkern, ebenso wie in jeden anderen Leiter, elektrische Spannungen induzieren (siehe Abb. 1.6 „Wirbelstromverluste werden durch die geblechte Form des Motorgehäuses reduziert“). Diese Spannungen erzeugen Ströme, die zu Wärmeverlusten führen. Die Ströme fließen in Stromkreisen im rechten Winkel zu den Magnetfeldern.

Die Wirbelstromverluste lassen sich durch die Aufteilung des Eisenkerns in dünne Schichten - sogenannte Lamellen - deutlich reduzieren.

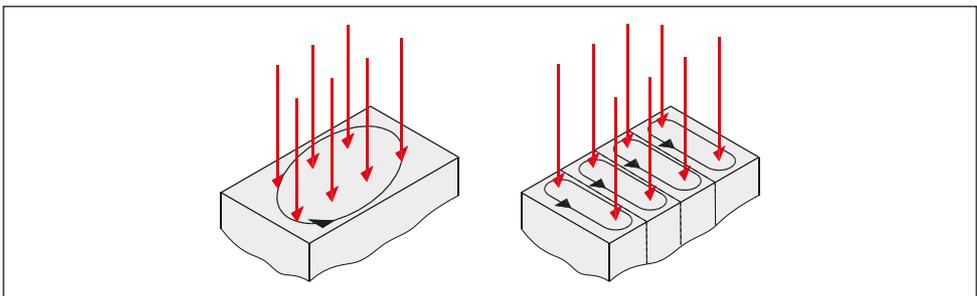


Abb. 1.6 Wirbelstromverluste werden durch die geblechte Form des Motorgehäuses reduziert

- Lüfterverluste treten aufgrund des Luftwiderstands des Motorlüfters auf
- Reibungsverluste treten in den Kugellagern auf, in denen der Rotor läuft

Bei der Bestimmung des Wirkungsgrads und der Motorausgangsleistung werden die Verluste im Motor gewöhnlich von der zugeführten Leistung abgezogen. Denn die zugeführte Leistung wird gemessen, wohingegen die Verluste oft berechnet oder experimentell ermittelt werden.

### 1.3 Asynchronmotoren

Um genau zu verstehen, wie ein Antriebssystem mit Drehzahlregelung funktioniert, ist es notwendig, die Prinzipien zu verstehen, auf deren Grundlage dieser Motortyp funktioniert. Obwohl die Grundkonstruktion sich in den vergangenen Jahrzehnten nicht verändert hat, haben moderne Isolationsmaterialien, computerbasierte Verfahren zur Optimierung des Motordesigns sowie automatisierte Herstellungsmethoden zu niedrigeren Kosten pro Kilowatt Leistung sowie zu einem höheren Wirkungsgrad für die jeweilige Motorgröße geführt.

Die Informationen in diesem Handbuch beziehen sich hauptsächlich auf den sogenannten „Dreiphasen-Käfigläuferasynchronmotor“, den Motortyp, der gewöhnlich mit Frequenzumrichter eingesetzt wird.

#### 1.3.1 Rotierendes Feld

Eine Mehrphasen-Wechselstromquelle (normalerweise eine Dreiphasen-Quelle) mit einem geeigneten Wicklungssystem erzeugt ein rotierendes Magnetfeld, das im Luftspalt zwischen Stator und Rotor rotiert. Wenn eine der Phasenwicklungen an eine Stromversorgungsphase angeschlossen ist, erzeugt sie ein Magnetfeld.

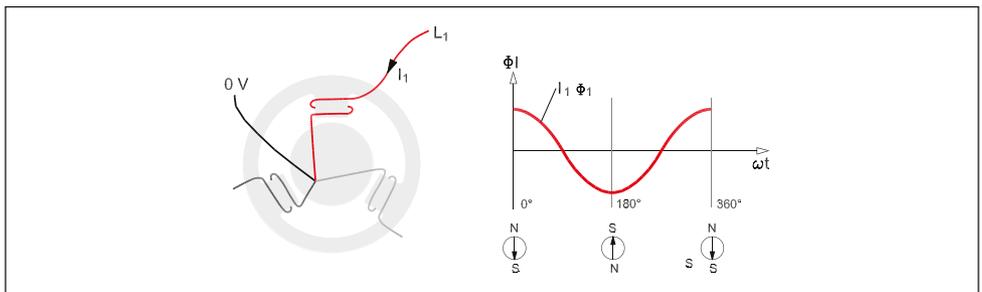


Abb. 1.7 Eine Phase erzeugt ein Wechselfeld

Das Magnetfeld hat eine feste Position im Stator, jedoch ändert sich seine Richtung, wie Abb. 1.7 „Eine Phase erzeugt ein Wechselfeld“ zeigt. Die Drehzahl wird durch die Netzfrequenz bestimmt. Bei einer Frequenz von 50 Hz ändert das Feld die Drehrichtung 50 Mal pro Sekunde.

Wenn zwei der Phasenwicklungen an die jeweiligen Stromversorgungsphasen angeschlossen sind, werden im Stator zwei Magnetfelder erzeugt. In einem zweipoligen Motor wird ein Feld um 120 Grad zu dem anderen Feld verschoben. Die maximalen Feldwerte werden ebenfalls verschoben, wie Abb. 1.8 „Zwei Phasen erzeugen ein asymmetrisches rotierendes Feld“ zeigt.

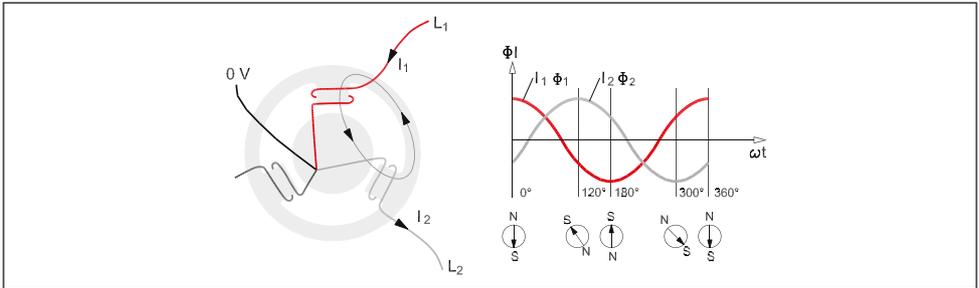


Abb. 1.8 Zwei Phasen erzeugen ein asymmetrisches rotierendes Feld

Dies erzeugt im Stator ein rotierendes Magnetfeld, das stark asymmetrisch ist, bis die dritte Phase angeschlossen ist. Wenn die dritte Phase angeschlossen ist, gibt es im Stator drei Magnetfelder. Es gibt eine Verschiebung um 120° zwischen den drei Phasen, wie Abb. 1.9 „Drei Phasen erzeugen ein symmetrisches rotierendes Feld“ zeigt.

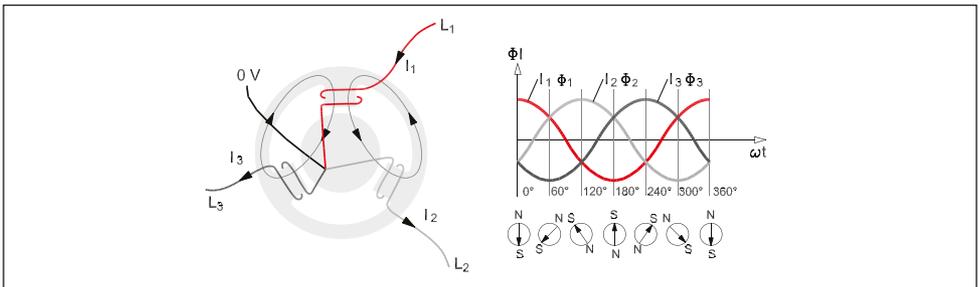


Abb. 1.9 Drei Phasen erzeugen ein symmetrisches rotierendes Feld

Der Stator ist jetzt an die Dreiphasen-Stromversorgung angeschlossen. Die Magnetfelder der einzelnen Phasenwicklungen bilden ein symmetrisches rotierendes Magnetfeld. Dieses Magnetfeld wird als rotierendes Feld des Motors bezeichnet.

Die Amplitude des rotierenden Felds ( $\varphi$ ) ist konstant und beträgt das 1,5-fache des Maximalwerts ( $\varphi_{\max}$ ) der Wechselfelder. Es rotiert mit der synchronen Drehzahl, die sich aus der Polpaarzahl und der Netzfrequenz ergibt (siehe auch Abschnitt 1.3.3 „Schlupf, Drehmoment und Drehzahl“).

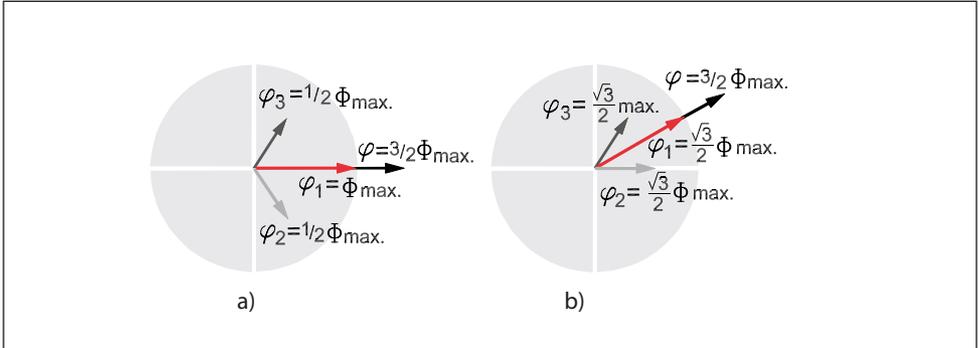


Abb. 1.10 Magnetische Feldkomponenten

Die Darstellung des rotierenden Felds als Vektor mit einer entsprechenden Winkelgeschwindigkeit beschreibt einen Kreis, wie Abb. 1.10 „Magnetische Feldkomponenten“ zeigt. Die Stärke des Magnetfelds  $\varphi$  aufgrund der Komponenten ( $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ,  $\varphi_3$ ) ist auch bei unterschiedlichen Momenten konstant (a und b). Als Zeitfunktion in einem Koordinatensystem beschreibt das rotierende Feld eine sinusförmige Kurve. Das rotierende Feld wird elliptisch, wenn die Amplitude sich während einer Rotation ändert.

Bei Einphasen-Motoren erzeugen ein Kondensator oder eine Induktivität die Phasenverschiebung, die die Drehrichtung des Motors bestimmt, was ebenfalls zu einem elliptischen Feld führt.

### 1.3.2 Käfigläufermotor

Der Käfigläufer ist der am häufigsten verwendete Rotortyp und wird in Käfigläufermotoren eingesetzt. Anders als beim Stator, bei dem die Spulen viele Wicklungen haben, befindet sich beim Käfigläufermotor nur eine Wicklung in den Nuten des Rotorblechs. Dies wird gewöhnlich mit Aluminium- oder Kupferstäben vorgenommen. Die Stäbe werden an jedem Ende des Rotors durch einen Ring aus gleichem Material kurzgeschlossen. Kupfer hat den Vorteil, dass es eine bessere Leitfähigkeit als Aluminium hat, was zu geringeren Verlusten und einem höheren Wirkungsgrad führt. Nachteile im Vergleich zum Aluminium sind der höhere Preis, niedrigere Anlaufmomente und eine höhere Schmelztemperatur, die das Gießen verkompliziert und zu einem höheren Fertigungsaufwand führt.

Eine Variante des Käfigläufers ist der Schleifringläufer, der über gewickelte Spulen für jede Phase verfügt. Die Spulen sind mit Schleifringen verbunden. Bürsten, die über den Schleifring gleiten, ermöglichen den Anschluss von externen Widerständen, die das Motorverhalten ändern (siehe auch Abschnitt 1.3.5 „Drehzahländerung“). Wenn die Schleifringe kurzgeschlossen sind, funktioniert der Rotor als Käfigläufer.

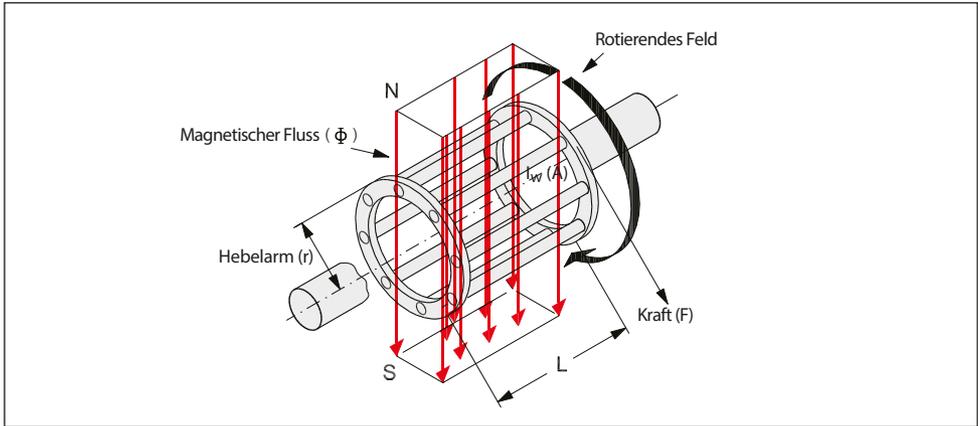


Fig. 1.11 Betriebsbereich und Käfigläufer

Die Rotorbewegung des Käfigläufermotors wird folgendermaßen erzeugt:

Ein im rotierenden Feld positionierter Stab wird von einer Reihe von magnetischen Feldern umströmt, wie Abb. 1.11 zeigt. Das Magnetfeld jedes Pols erzeugt einen Strom ( $I_W$ ) im Rotorstab, der von einer Kraft ( $F$ ) beeinflusst wird. Diese Kraft hängt von der Flussdichte ( $B$ ), dem erzeugten Strom ( $I_W$ ), der Länge ( $L$ ) des Rotors im Stator und dem Winkel ( $\theta$ ) zwischen Kraft und Flussdichte ab. Bei  $\theta = 90^\circ$  ist die Kraft:

$$F = B \times I_W \times L$$

Der nächste Pol, der den Stab umströmt, hat eine umgekehrte Polarität. Er erzeugt einen Strom in der entgegengesetzten Richtung zum vorherigen. Da sich auch die Richtung des Magnetfelds geändert hat, wirkt sich die Kraft in der gleichen Richtung aus wie zuvor, wie auch Abb. 1.12b „Induktion in den Rotorstäben“ zeigt.

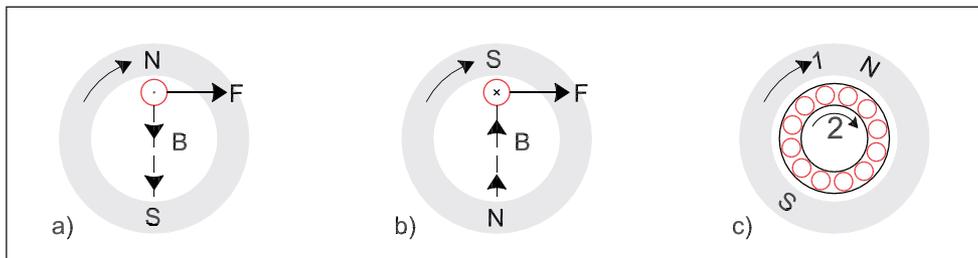


Abb. 1.12 Induktion in den Rotorstäben

Wenn der gesamte Rotor sich im rotierenden Feld befindet (siehe Abb. 1.12c „Induktion in den Rotorstäben“), sind die Rotorstäbe Kräften ausgesetzt, die den Rotor zum Drehen bringen. Die Rotordrehzahl (2) ist nicht so hoch wie die Drehzahl des rotierenden Felds (1), da in den Käfigstäben keine Ströme erzeugt werden, wenn der Rotor mit derselben Drehzahl rotiert wie das Feld.

### 1.3.3 Schlupf, Drehmoment und Drehzahl

Wie bereits in den Abschnitten 1.2.5 „Pole, synchrone Drehzahl und asynchrone Drehzahl“ und 1.3.2 „Käfigläufermotor“ beschrieben, ist die Rotordrehzahl ( $n_n$ ) von Asynchronmotoren unter normalen Umständen etwas geringer als die Drehzahl ( $n_0$ ) des rotierenden Felds. Die Differenz zwischen der Drehzahl des rotierenden Felds und des Rotors wird Schlupf ( $s$ ) genannt und folgendermaßen berechnet:

$$s = n_0 - n_n$$

Schlupf wird häufig als Prozentsatz der synchronen Drehzahl ausgedrückt und liegt normalerweise zwischen 1 und 10 Prozent.

$$s = \frac{(n_0 - n_n) \times 100}{n_0}$$

Die einzelnen Kräfte in den Rotorstäben bilden zusammen das Drehmoment ( $M$ ) der Motorwelle (siehe Abschnitt 1.3.2 „Käfigläufermotor“). Bei einem vorgegebenen Wert der Kraft ( $F$ ) und des Radius ( $r$ ) beträgt das Drehmoment des Motors:  $M = F \times r$ .

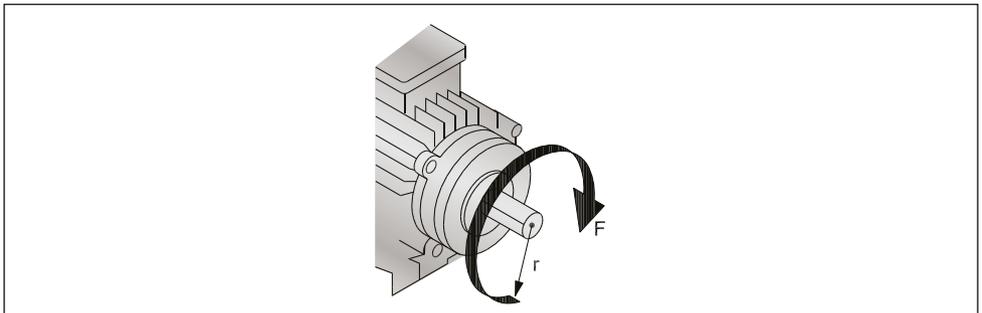


Abb. 1.13 Das Drehmoment der Motorwelle ergibt sich aus Kraft ( $F$ )  $\times$  Radius ( $r$ )

Das Verhältnis zwischen dem Drehmoment, der Drehzahl und dem Strom von Asynchronmotoren zeichnet sich durch eine charakteristische Kennlinie aus, siehe auch Abb. 1.14 „Wichtige Kennlinien von Motorstrom und Drehmoment“. Diese Kurve hängt von der Rotornutenkonstruktion und dem Material der Stäbe ab.

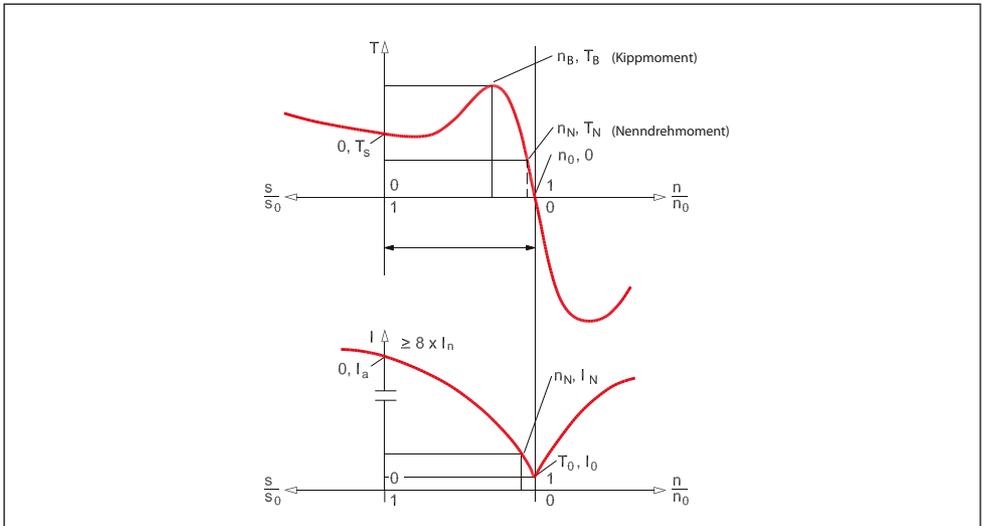


Abb. 1.14 Wichtige Kennlinien von Motorstrom und Drehmoment

Der Betriebsbereich des Motors ( $0 < n/n_0 < 1$ ) lässt sich in zwei Bereiche unterteilen:

- Anlaufbereich ( $0 < n/n_0 < n_k/n_0$ )
- Betriebsbereich ( $n_k/n_0 < n/n_0 < 1$ )

Diese Bereiche zeichnen sich durch die folgenden Kennlinien aus:

**Anlaufmoment**  $M_a$ . Das ist das Drehmoment, das der Motor mit der Nennspannung und Nennfrequenz bei Stillstand erzeugt.

**Kippmoment**  $M_k$  bei Überziehgeschwindigkeit  $n_k$ . Das ist das höchste Drehmoment, das der Motor bei der angelegten Nennspannung und Nennfrequenz erzeugen kann.

**Motornenndrehmoment**  $M_n$  bei Nenndrehzahl  $n_n$ .

Die Nennwerte des Motors sind die mechanischen und elektrischen Werte, für die der Motor gemäß der IEC 60034-Norm entwickelt worden ist. Die Nennwerte, auch Motorspezifikationen oder Motornennleistungen genannt, befinden sich auf dem Motor-Typenschild.

Die Nennwerte geben den optimalen Betriebspunkt für den Motor an, wenn er an das Stromnetz angeschlossen ist.

Abgesehen vom normalen Betriebsbereich des Motors gibt es zwei Bremsbereiche.

- $n/n_0 > 1$ : Der Motor wird von der Last über seiner Synchrondrehzahl ( $n_0$ ) angetrieben und funktioniert als Generator. In diesem Bereich erzeugt der Motor ein Gegenmoment und speist die Leistung in das Stromversorgungsnetz zurück.
- $n/n_0 < 1$ : Dieses Verfahren nennt man generatorische Bremsung.

Wenn zwei Phasen eines Motors plötzlich vertauscht werden, ändert das rotierende Feld die Richtung. Unmittelbar danach beträgt das Drehzahlverhältnis  $n/n_0 < 1$ . Der Motor, der vorher durch das Drehmoment  $M$  belastet wurde, bremst jetzt mit dem Bremsmoment. Wenn der Motor bei  $n = 0$  getrennt wird, wird er in der neuen Drehrichtung des Magnetfelds weiterlaufen.

### 1.3.4 Typische Betriebsbedingungen

Im Prinzip verfügen Asynchronmotoren über sechs Spulen: drei Spulen im Stator und drei Spulen im Käfigläufer (der sich magnetisch verhält, als ob er aus drei Spulen bestehen würde). Ein Satz dieser Spulen kann als Basis für die Erzeugung eines Ersatzschaltbilds dienen, das das Betriebsprinzip des Motors verständlicher macht, insbesondere, wenn sich die Frequenz der Versorgungsspannung ändert oder wenn sie variiert.

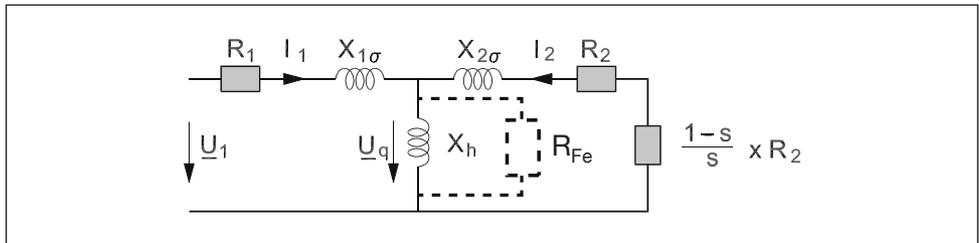


Abb. 1.15 Ersatzschaltbild (eine Phase) für einen Motor, der unter Last betrieben wird

Das Anlegen einer Versorgungsspannung ( $U_1$ ) führt zu einem Strom im Stator ( $I_1$ ) und im Rotor ( $I_2$ ), der von dem Widerstand im Stator ( $R_1$ ) und im Rotor ( $R_2$ ) sowie der Reaktanz im Stator ( $X_1 \sigma$ ) und im Rotor ( $X_2 \sigma$ ) begrenzt wird. Der Widerstand ist zwar unabhängig von der Netzfrequenz, jedoch hat die Reaktanz einen Einfluss.

$$X_L = 2 \times \pi \times f \times L$$

$X_L$  = Reaktanz [ $\Omega$ ]

$f$  = Frequenz [Hz]

$L$  = Induktivität [H]

Die Spulen beeinflussen sich über magnetische Induktion gegenseitig. Die Rotorspule erzeugt einen Strom in der Statorspule und umgekehrt. Diese gegenseitige Beeinflussung bedeutet, dass sich die beiden Stromkreise über ein gemeinsames Element miteinander verbinden lassen, bestehend aus  $R_{Fe}$  und  $X_{lv}$ , als Eisenverlustwiderstand und Hauptfeldreaktanz bezeichnet. Der Strom, den der Motor zur Magnetisierung des Stators und des Rotors aufnimmt, fließt durch dieses gemeinsame Element. Der Spannungsabfall in der „Querstromkreisverbindung“ ist die Induktionsspannung ( $U_q$ ). Da  $R_{Fe}$  sehr klein ist, wird es in den folgenden Erläuterungen nicht berücksichtigt.

### Standardbetrieb

Arbeitet der Motor innerhalb seines normalen Betriebsbereichs, ist die Rotorfrequenz aufgrund von Schlupf niedriger als die Frequenz des rotierenden Felds. Das Ersatzschaltbild zeigt die Auswirkung in Form einer Änderung des Rotorwiderstands  $R_2$  um den Faktor  $1/s$ .  $R_2/s$  kann als  $R_2 + R_2 \times (1 - s)/s$  ausgedrückt werden, wobei  $R_2 \times (1 - s)/s$  die mechanische Motorbelastung darstellt.

### Nulllast-Situation

Der Schlupf ist bei Nulllast-/Leerlaufbetrieb gering. Das bedeutet, dass  $R_2 \times (1 - s)/s$  hoch ist. Folglich kann fast kein Strom durch den Rotor fließen. Dies ist vergleichbar mit der Entfernung des Widerstands, der die mechanische Last aus dem Ersatzschaltbild darstellt.

Die induzierte Spannung ( $U_q$ ) wird oft mit der Motorklemmenspannung verwechselt. Das ist auf die Vereinfachung des Ersatzschaltbilds zurückzuführen, damit verschiedene Motorbedingungen einfacher zu verstehen sind. Die induzierte Spannung entspricht jedoch nur ungefähr der Motorklemmenspannung im Nulllastbetrieb.

### Situation blockierter Rotor

Der Schlupf nimmt mit zunehmender Motorlast zu. Daher sinkt  $R_2 \times (1 - s)/s$ . Wenn der Rotor gesperrt ist, ist der Schlupf 1, weshalb der Strom, der sich zusammen mit der Last erhöht, seinen Maximalwert erreicht.

Das Ersatzschaltbild entspricht somit den Bedingungen für den Asynchronmotor in der normalen Praxis. Es kann in zahlreichen Fällen zur Beschreibung der Bedingungen im Motor herangezogen werden.

## 1.3.5 Drehzahländerung

Die Motordrehzahl  $n$  hängt von der Drehzahl des Magnetfelds ab und lässt sich wie folgt ausdrücken:

$$n = n_0 - n_s = \frac{(1 - s) \times f}{p}$$

Die Motordrehzahl lässt sich also anpassen, indem man Folgendes ändert:

- die Polpaarzahl  $p$  des Motors (zum Beispiel bei polumschaltbaren Motoren),
- den Motorschlupf  $s$  (zum Beispiel bei Schleifringläufermotoren),
- die Motornetzfrequenz (für den Motor).

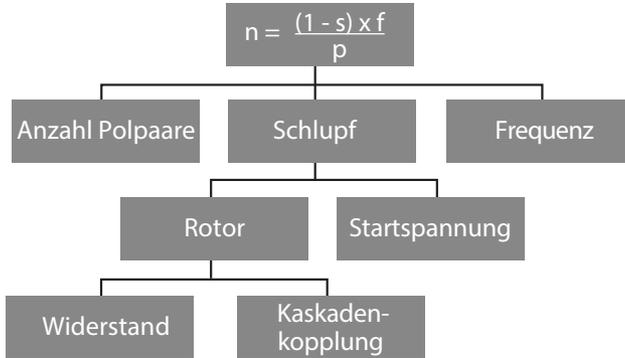


Abb. 1.16 Verschiedene Optionen für die Änderung der Motordrehzahl

**Regelung der Polzahl**

Die Drehzahl des Magnetfelds wird von der Zahl der Polpaare im Stator bestimmt. Im Falle eines zweipoligen Motors liegt die Drehzahl des Magnetfelds bei einer am Motor anliegenden Netzfrequenz von 50 Hz bei 3000 U/min. Bei einem vierpoligen Motor beträgt die Drehzahl 1500 U/min.

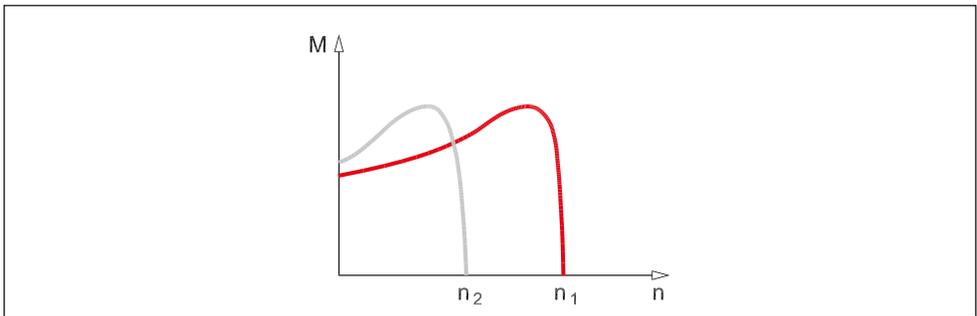


Abb. 1.17 Drehmomentkennlinie bei der Änderung der Polzahl

Motoren lassen sich so konstruieren, dass sie zwei oder mehr unterschiedliche Polpaarzahlen haben. Das wird durch eine spezielle Anordnung der Statorwicklungen (Dahlander-Wicklung) in den Nuten und/oder durch Verwendung einer größeren Zahl an separaten und isolierten Wicklung in der Nute bewerkstelligt.

Die Drehzahländerung erfolgt durch das Auswechseln der Statorwicklungen zur Änderung der Polpaarzahl im Stator. Durch das Wechseln von einer kleinen Polpaarzahl (hohe Drehzahl) zu einer hohen Polpaarzahl (niedrige Drehzahl) lässt sich die tatsächliche Motordrehzahl drastisch senken, beispielsweise von 1500 auf 750 U/min. Durch einen schnellen Wechsel von einer höheren zu einer niedrigeren Drehzahl läuft der Motor im generatorischen Bereich. Dadurch wirkt eine erhebliche Last auf den Motor und den Mechanismus der angetriebenen Maschine, was zu Schäden an Motor und Maschinen führen kann.

### Schlupfregelung

Die Regelung der Motordrehzahl mithilfe von Schlupf kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen: entweder durch die Änderung der Statorversorgungsspannung oder durch die Modifikation des Rotors. Hierbei ist anzumerken, dass diese Verfahren erhebliche Wärmeverluste zur Folge haben. Falls Sie weitere Informationen benötigen, entnehmen Sie diese bitte anderen Informationsquellen.

### Rotorregelung

Die Regelung der Motordrehzahl mithilfe des Rotors kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen:

- Durch Einfügen von Widerständen in den Rotorkreis. Die Bezeichnung für diese Arten von Motoren ist „Schleifringläufermotoren“. Die Folge dieses Verfahrens sind höhere Verlustleistungen im Rotor.
- Die Rotorstromkreise werden mit anderen elektrischen Maschinen oder Gleichrichterschaltungen kaskadiert. Der Rotorstromkreis wird dann über Schleifringe an DC-Maschinen oder gesteuerte Gleichrichterschaltungen statt an Widerstände angeschlossen. Die DC-Maschine versorgt den Rotorstromkreis mit einer zusätzlichen variablen Spannung und ermöglicht es somit, die Rotordrehzahl und die Magnetisierung zu ändern.

### Frequenzregelung

Mit einer frequenzvariablen Versorgung ist es möglich, die Motordrehzahl bei geringfügigen zusätzlichen Verlusten zu regeln. Die Drehzahl des Magnetfelds und somit auch die Rotordrehzahl ändern sich mit der Frequenz. Um das Drehmoment des Motors aufrechtzuerhalten, muss die Motorspannungsänderung zusammen mit der Frequenzänderung erfolgen, wie Abb. 1.18 „Drehmomentkennlinien bei Spannungs-/Frequenzregelung“ zeigt. Bei einem konstanten Verhältnis zwischen der Motorversorgungsspannung und der Frequenz bleibt auch die Magnetisierung im Nennbetriebsbereich des Motors konstant.

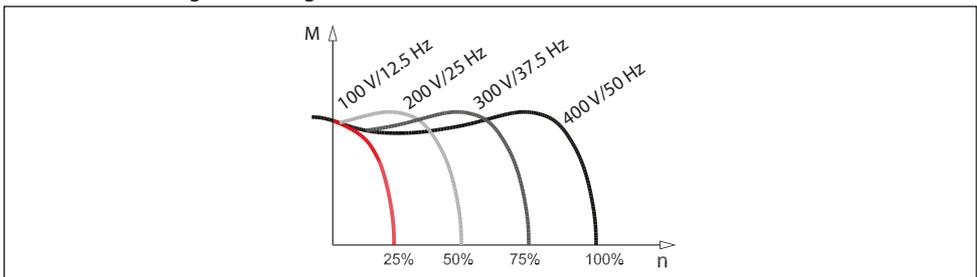


Abb. 1.18 Drehmomentkennlinien bei Spannungs-/Frequenzregelung

Bei einer geringen Drehzahl ist das Verhältnis anzupassen, um die ohmschen Verluste auszugleichen. In diesem Drehzahlbereich kann eine zusätzliche Fremdkühlung erforderlich sein.

### 1.3.6 Motor-Typenschild und Stern- oder Dreieckschaltung

In der Regel verfügt der Motor über ein Typenschild mit allen wesentlichen Motordaten. Zusätzliche Daten sind im Motorkatalog enthalten oder können vom Hersteller bezogen werden.

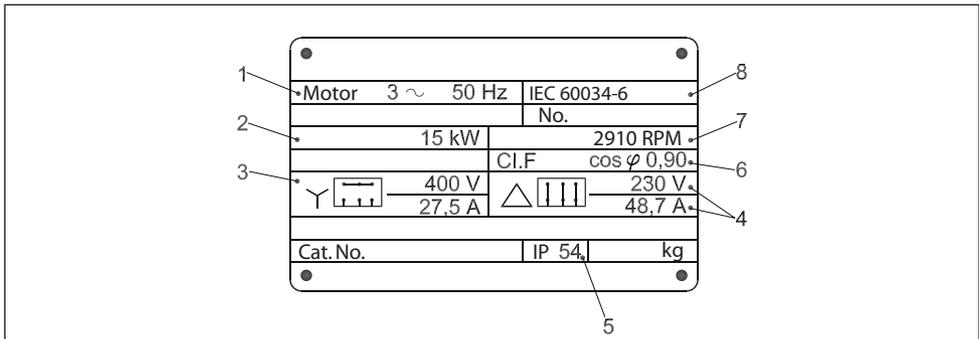


Abb. 1.19 Motor-Typenschild enthält wesentliche Daten

Das dargestellte Typenschild enthält die folgenden Informationen:

1. Es handelt sich um einen dreiphasigen Drehstrommotor mit einer Nennfrequenz von 50 Hz
2. Die (Wellen-)Nennleistung beträgt 15 kW
3. Die Statorwicklungen können in Reihe (Stern) mit einer Nennspannung von 400 V und einem Nenn-/Scheinstrom von 27,5 A geschaltet werden
4. Die Statorwicklungen können im Dreieck mit einer Nennspannung von 230 V und einem Nenn-/Scheinstrom von 48,7 A geschaltet werden
5. Er verfügt über einen IP54-Schutz
6. Isolationsklasse F (155 °C) und ein Leistungsfaktor ( $\cos \varphi$ ) von 0,90
7. Die Nenndrehzahl von 2910 U/min (ein zweipoliger Motor) ist die Motordrehzahl bei Nennspannung, Nennfrequenz und Nennlast
8. Erfüllt die Normen IEC 60034-6

Einige Motordaten (Drehmoment, Wirkungsgrad usw.) lassen sich anhand der Typenschilddaten berechnen. So lassen sich etwa die aktiven und reaktiven Komponenten des Motorstroms anhand des Leistungsfaktors berechnen.

Achten Sie insbesondere auf die Motornennspannung in Stern- und Dreieckschaltung. Wenn die Versorgungsspannung höher ist als die Nennspannung der angelegten Konfiguration, kann dies zu einer Beschädigung des Motors führen. Die Verbindung selbst lässt sich häufig durch die Neuordnung der Brücken an der Motorklemme ändern.

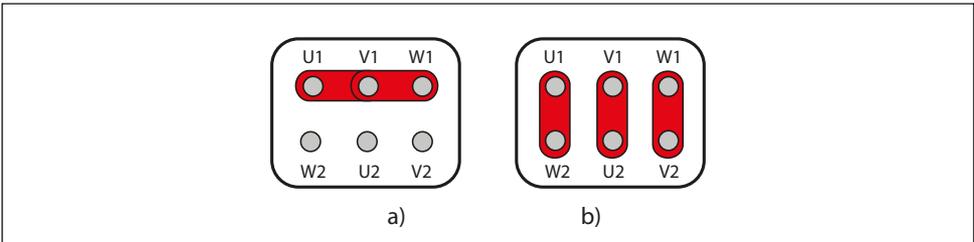


Abb. 1.20 Stern- (a) und Dreieckschaltung (b) von Motoren über Brücken am Klemmenblock

In der Dreieckschaltung wird an jede Motorphase die volle Versorgungsspannung angelegt, jedoch wird der Strom um den Faktor  $\sqrt{3}$  reduziert. Die Sternschaltung behält den Strom bei und die Spannung reduziert sich. Daher bleibt die Leistung unabhängig von der Schaltungsart gleich, da die Speisespannungen unterschiedlich sind.

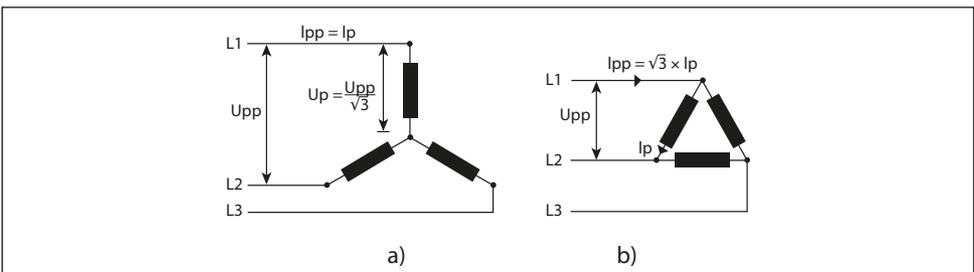


Abb. 1.21 Strom- und Spannungsverteilung bei der Stern- (a) und Dreieckschaltung (b)

Sogenannte Stern-/Dreieckstarter machen sich dieses Verhalten zunutze, um den Anlaufstrom eines Motors zu senken. In einer Dreieckschaltung muss der Motor zur Netzversorgung passen. Das bedeutet, dass der Motor bei einer Netzspannung von 400 V eine Nennspannung von 690 V in der Sternschaltung und eine Nennspannung von 400 V in der Dreieckschaltung haben muss. Beim Anlaufen ist der Motor in einer Sternschaltung angeschlossen, wodurch sich Stromstärke, Leistung und Drehmoment auf ein Drittel reduzieren. Wenn der Motor beschleunigt hat, wechselt die Verbindung zu einer Dreieckschaltung.

Die Angabe der Motorspannung erfolgt in Katalogen oft durch Bezugnahme auf die Stern- und Dreieckspannungen (Beispiel: 400/230 V Y/ $\Delta$  oder 690/400 V Y/ $\Delta$ ). Die niedrigere Spannung bezieht sich immer auf die Dreieckschaltung und die höhere auf die Sternschaltung.

Das Verhältnis der Stromstärke ist umgekehrt: Die niedrigere Stromstärke bezieht sich auf die Sternschaltung, und die höhere Stromstärke bezieht sich auf die Dreieckschaltung.

## 1.4 Synchronmotoren

Der Synchronmotor zeichnet sich dadurch aus, dass sich sein Rotor mit derselben Drehzahl dreht wie das Magnetfeld, das die Statorwicklungen erzeugen. Die Konstruktion des Stators ähnelt in vielen Fällen der Konstruktion bei Asynchronmotoren mit verteilten Wicklungen. Einige Hersteller verwenden konzentrische Wicklungen (in Nuten), die einen kompakteren Motoraufbau ermöglichen und die weniger Kupfer erfordern. Die durch die Verwendung von weniger Kupfer erreichten Energieeinsparungen werden jedoch häufig durch zusätzliche Verluste zunichte gemacht, die zu konstruktionsbedingten Oberschwingungen im Fluss im Luftspalt führen.

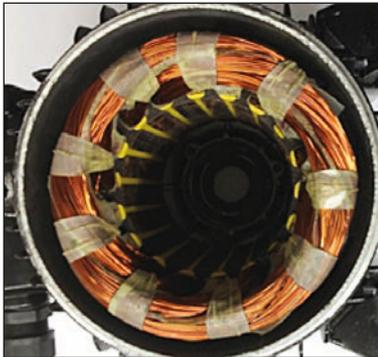


Fig. 1.22 Verteilte Wicklungen

### 1.4.1 Motoren mit Permanentmagneten (PM-Motoren)

Die einfachste Weise zum Bau eines Permanentmagnetmotors (PM-Motor) ist der Austausch des Käfigläufers eines Asynchronmotors durch einen Rotor, der über Permanentmagnete verfügt. Das Anlegen einer geeigneten Spannung am Stator erzeugt im Luftspalt ein rotierendes Magnetfeld. Der Rotor folgt dem Feld mit einer synchronen Drehzahl, da das rotierende Feld die Magnete anzieht. Wenn die Differenz zwischen der Drehzahl des Rotors und der Drehzahl des Magnetfelds zu groß ist, läuft der Motor nicht mehr synchron und hält an. Daher ist ein geeigneter Regler erforderlich, der sicherstellt, dass Drehzahländerungen erfolgen, indem er die Einspeisefrequenz kontinuierlich anpasst und nicht von einer Drehzahl zur anderen wechselt.

Früher kamen PM-Motoren häufig in Servoanwendungen mit einem Fokus auf einem schnellen und präzisen Betrieb zum Einsatz. Diese Servomotoren sind normalerweise schmal und lang, um eine geringe Massenträgheit für hochdynamische Anwendungen sicherzustellen. Um die hocheffizienten Eigenschaften von PM-Motoren auch in anderen Anwendungen einzusetzen, übertrugen Motorhersteller das Prinzip auf Motoren in IEC-Standardbaugrößen. Die Mehrzahl der PM-Motorsysteme können Standard-Frequenzumrichter verwenden, wenn diese über geeignete Steueralgorithmen verfügen.

Um den Motor so gut wie möglich zu magnetisieren, müssen Informationen zum Rotorwinkel kontinuierlich an den Regler weitergegeben werden. In vielen Anwendungen reichen Strategien ohne Geber zur Bestimmung des Rotorwinkels aus. In Fällen, in denen der Regler sich nicht für eine Regelung ohne Geber eignet, oder auch in hochdynamischen Anwendungen, kommen externe Positionsrückmeldungsgeräte zum Einsatz.

Das Ersatzschaltbild zeigt die Magnete in Form einer Spannungsquelle  $U_p$ , da das Drehen des Rotors zu einer Induktion von Spannung in den Stator führt. Diese Spannung heißt Gegen-EMK (siehe Abschnitt 1.4.1.1 „Gegen-EMK“). Das Fehlen von Motorschlupf, Rotorwiderstand und Induktivität weist darauf hin, dass es im Rotor zu keinen Verlusten kommt, was zu einem sehr guten Wirkungsgrad führt.

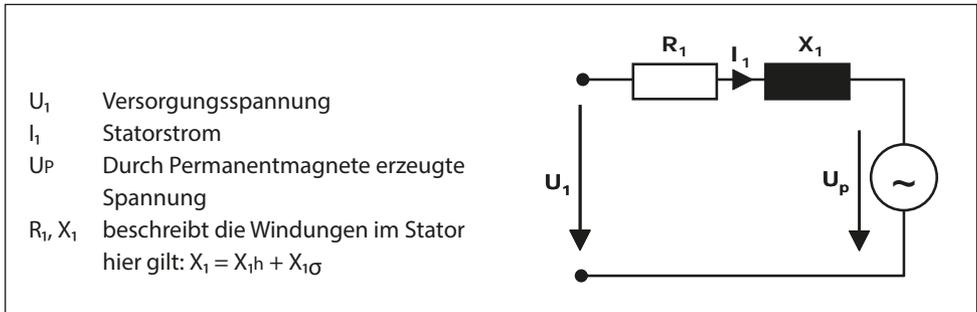


Abb. 1.23 Vereinfachtes Ersatzschaltbild für PM-Motor

Im Allgemeinen können PM-Motoren in Motoren aufgeteilt werden, bei denen die Magneten entweder auf der Oberfläche (SPM-Motor) der Rotoren montiert oder in sie eingelassen („vergraben“, IMP-Motor) sind. Die Position der Magneten führt zu unterschiedlichen Formen der so erzeugten Magnetfelder und wird mit den Induktivitäten  $L_d$  und  $L_q$  dargestellt.

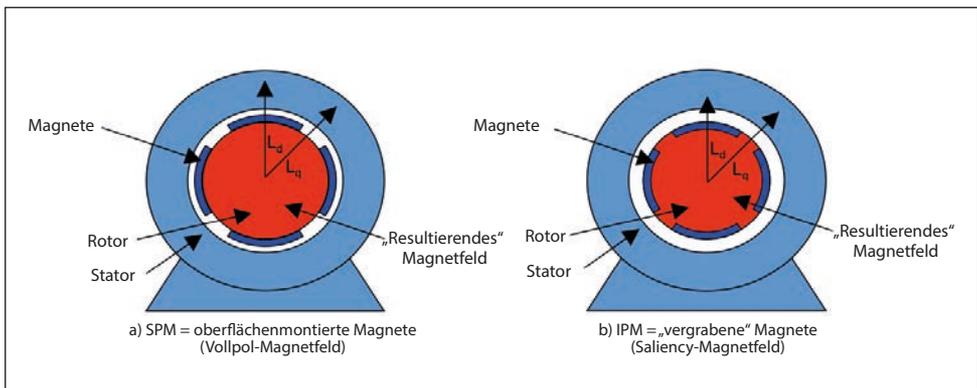


Abb. 1.24 Magnetposition bei a) SPM und b) IPM

Da die Magnete sich in Bezug auf das erzeugte Magnetfeld wie Luft verhalten, werden Schenkelpol- und Vollpolfelder erzeugt. Da bei SPM-Motoren  $L_d$  und  $L_q$  denselben Wert haben, wird ein Vollpolfeld erzeugt, während die unterschiedlichen  $L_d$  und  $L_q$  eines IPM-Motors zu einem Schenkelpolfeld führen, das ein zusätzliches Drehmoment im Feldschwächungsbereich erzeugt.

### 1.4.1.1 Gegen-EMK

Wenn die Welle eines PM-Motors gedreht wird, erzeugt der Motor an seinen Klemmen eine Spannung. Diese Spannung wird Gegen-EMK (EMK = elektromotorische Gegenkraft) genannt und stellt eine wichtige Eigenschaft des Motors dar. Je höher die Spannung, desto besser die Motoreffizienz. Abhängig vom Anschluss und der Positionierung der Wicklungen kann die Form des Gegen-EMK trapez- oder sinusförmig sein. Bei einer trapezförmigen Spannung ist eine sogenannte Blockkommutierung erforderlich, die in der Elektronik einfach umzusetzen ist, jedoch auch Nachteile hat, wie z. B. Geräuschentwicklung und Drehmoment-Rippel. Normalerweise erzeugen PM-Motoren eine sinusförmige Gegen-EMK und werden über sinusförmige Kommutierung betrieben.

Die Tatsache, dass der Motor aktiv eine Spannung erzeugt, ist nicht nur während des Betriebs zu berücksichtigen, sondern auch bei der Trennung des einspeisenden Frequenzumrichters vom Netz (Stromausfall, Betriebsstörungen, ausgeschaltet), da der Motor potenziell genug Energie erzeugen kann, um den Umrichter mit Energie zu versorgen, während die Welle rotiert (etwa im Motorfreilauf). Welche Spannung erforderlich ist, um den Frequenzumrichter mit Energie zu versorgen, hängt davon ab, für welche Netzspannung der Frequenzumrichter konstruiert worden ist.

Beispiel: Erforderliche Drehzahl eines PM-Motors mit 200 V Gegen-EMK, um einen Frequenzumrichter für eine Netzspannung von 400 V zu versorgen (erforderliche Zwischenkreisspannung ca. 320 V DC).

$$n_{\text{Netz-Ein}} = \frac{U_{\text{Zwischenkreis}}}{U_{\text{Gegen-EMK bei 1000 U/min}} \times 1000 \text{ U/min} = \frac{320 \text{ V}}{200 \text{ V}} \times 1000 \text{ U/min} = 1134 \text{ U/min}$$

Wenn die durch den Motor erzeugte Spannung zu hoch ist, kann dies zur Beschädigung des Umrichters führen. In der Praxis ist dies möglich, wenn der angeschlossene Frequenzumrichter ausgeschaltet wird, während der Motor bei sehr hoher Drehzahl läuft. Während des Betriebs begrenzt der Frequenzumrichter die Spannung, die vom Motor zurückfließt. Wird die Regelung plötzlich ausgeschaltet, kann die volle Gegen-EMK sofort zu den Klemmen zurückfließen. Diese kritische Drehzahl hängt von der Gegen-EMK des Motors und der Spannung ab, für die der Frequenzumrichter konstruiert worden ist.

Beispiel: 400 V Netzspannung,  $U_{\text{Gegen-EMK bei 1000 U/min}} = 100 \text{ V}$ ,  $U_{\text{DC kritisch}} = 1000 \text{ V}$

$$n_{\text{kritisch}} = \frac{U_{\text{DC kritisch}}}{U_{\text{Gegen-EMK bei 1000 UPM}} \times \sqrt{2}} \times 1000 \text{ U/min} = \frac{1000 \text{ V}}{100 \text{ V} \times \sqrt{2}} \times 1000 \text{ U/min} = 5656 \text{ U/min}$$

Der Einsatz eines Bremswiderstands kann solch kritische Situationen vermeiden.

Die Motorhersteller verwenden jedoch keine bestimmte Norm, nach der sie Informationen über die Gegen-EMK bereitstellen. Einige Hersteller geben die Gegen-EMK in Bezug auf 1000 U/min an, während andere sich an der Nenndrehzahl des Motors orientieren. Manchmal wird der Wert des Faktors  $k_e$  in Radianten angegeben und muss dann in U/min umgerechnet werden.

$$U_{\text{EMK}} = k_e \times \frac{1000}{60} \times 2\pi$$

Wenn die Spitzenwerte angegeben werden, muss die Spannung durch die Quadratwurzel aus zwei dividiert werden, um den Effektivwert zu erhalten.

Auch die Angabe von erweiterten Motordaten wie Motorwiderstand und -induktivitäten ist nicht einheitlich. Manchmal geben Hersteller sie als Phase/Phase-Werte an, manchmal als Phase/Sternpunkt-Werte.

$$U_{\text{EFF}} = \frac{U_{\text{Spitze}}}{\sqrt{2}}$$

### 1.4.1.2 Drehmoment- und Drehzahlbereich

Das Drehmoment eines PM-Motors verhält sich proportional zum Motorstrom, seine Drehzahl proportional zur Einspeisefrequenz. Bei Nenndrehmoment und -drehzahl ist eine bestimmte Spannung erforderlich. Kann der Frequenzumrichter eine höhere Spannung bereitstellen, lässt sich die Drehzahl weiter erhöhen. Das führt zu einer höheren Leistung bei einem konstanten Drehmoment. Wenn die Spannung eine Obergrenze erreicht hat, geht der Motor in den Feldschwächungsbereich über. Ein Betrieb im Feldschwächungsbereich ist nur mit geeigneten Frequenzumrichtern möglich. Motormechanik und -isolierung müssen die höhere Drehzahl unterstützen und der höheren Spannung standhalten können.

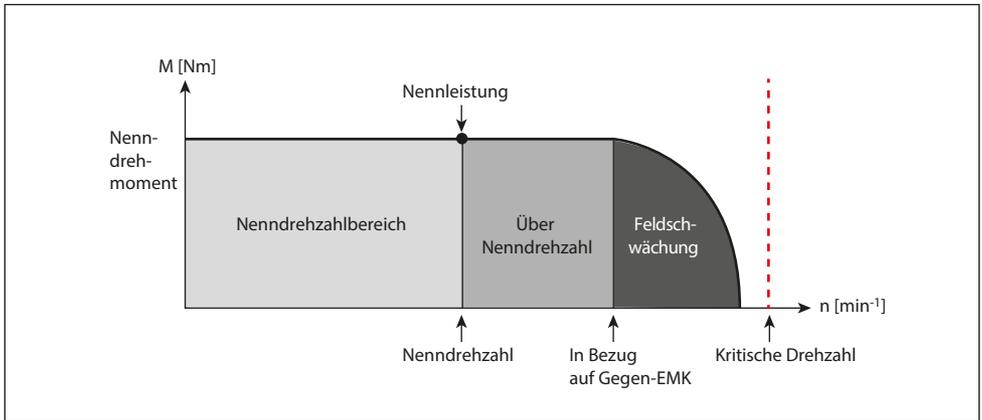


Abb. 1.25 Betrieb im Feldschwächungsbereich

Die größte Gefahr beim Betrieb im Feldschwächungsbereich ist ein Abschalten der Motorsteuerung bei zu hoher Drehzahl, da die hohe Gegen-EMK den Frequenzumrichter beschädigen könnte (siehe Abschnitt 1.4.1.1 „Gegen-EMK“).

Eine andere Möglichkeit zur Erweiterung des Drehzahlbereichs ist die Änderung der Sternschaltung eines Motors zur Dreieckschaltung, sofern der Motor dies ermöglicht. Ähnlich wie bei Asynchronmotoren führt eine Dreieckschaltung auch zu einer höheren Spannung an den Wicklungen, da sie nicht um den Faktor 1,73 oder  $\sqrt{3}$  reduziert wird, wie dies bei der Sternschaltung der Fall ist.

### 1.4.2 BLDC-Motoren (Brushless DC) oder ECM-Motoren (Electronically Commutated Motor)

ECM (Electronically Commutated Motor) und BLDC (Brushless DC) sind im Grunde unterschiedliche Bezeichnungen für dieselbe Technologie. Bei dem ursprünglichen BLDC-Konzept wurden nur zwei Phasen mit einer trapezförmigen Spannung mit Strom versorgt. Im Vergleich zu einer Verteilung über drei Phasen führt dies zu einem 1,22-fach höheren Strom. Zur Bestimmung der Rotorposition wurden Hall-Sensoren verwendet. Die Nachteile dieses Konzepts waren höhere Drehmoment-Rippel und Eisenverluste.

In der Praxis gibt es viele verschiedene Typen von ECM: So kommt er beispielsweise als kleiner Stellmotor mit wenigen Watt Leistung zum Einsatz, aber auch im Bereich der Gebäudeautomation mit ungefähr 10 kW. Im Allgemeinen haben BLDC/ECM den Ruf, einen extrem hohen Wirkungsgrad zu haben. Dies ist auch verdient, insbesondere bei sehr kleinen Geräten – dem ursprünglichen Einsatzgebiet für diese Motoren, bei dem sie dem Universal- oder Spaltpolmotor (ca. 30 %) deutlich überlegen sind. Bei Einsatzgebieten über einige hundert Watt hinaus ist ihr Wirkungsgrad mit dem von Standard-PM-Motoren vergleichbar.

Bei modernen EC/ECM kommen dieselben Steuerverfahren zum Einsatz wie bei PM-Motoren. In der Gebäudeautomation werden EC-Motoren oft als zentrales Element in Ventilatoren eingesetzt. Dadurch sind die Ventilatoren sehr kompakt und verfügen über einen sehr effizienten Motor. Bedauerlicherweise führt die Positionierung des Motors in der Mitte eines Radialventilators zu Luftturbulenzen, die die gesamte Ventilatoreffizienz reduzieren. Im Vergleich zu einem Ventilator mit Direktantrieb kann die Differenz bei gleicher Motoreffizienz 3-6 % betragen.

### 1.4.3 LSPM-Motor (Line Start PM Motor)

Ein LSPM-Motor ist ein Hybrid aus einem Asynchronmotor mit Käfigläufer und einem PM-Motor, bei dem die Magnete im Rotor unter den kurzgeschlossenen Läuferstäben platziert sind.

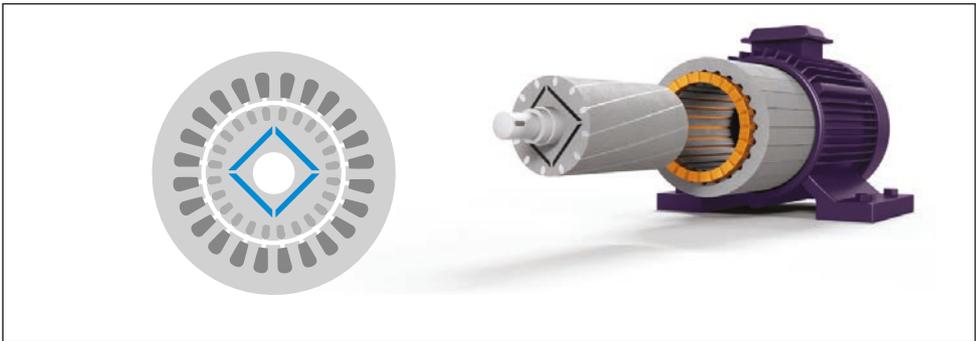


Abb. 1.26 Die Position der Magnete im Rotor beeinflusst die Motorkennndaten

Angeschlossen an ein dreiphasiges Netz, entwickelt der Motor ein Drehmoment und beschleunigt wie ein Standardasynchronmotor bis fast zur synchronen Drehzahl, wenn das Drehmoment des Motors über die gesamte Beschleunigungsphase höher ist, als das Last-Drehmoment. Wenn der Rotor etwa die Drehzahl des rotierenden Felds erreicht hat, wird aufgrund magnetischer Kopplung von dem rotierenden Statorfeld und den Rotorpolen ein synchronisierendes Drehmoment (Reaktionsdrehmoment) erzeugt, das den Rotor dann synchron laufen lässt.

Nach der Synchronisierung läuft der Motor mit synchroner Drehzahl weiter. Da es keine Differenz zwischen der Drehzahl des Magnetfelds und des Rotors gibt, werden im Käfig keine Ströme erzeugt. Das führt zu einer hohen Effizienz mit einem guten Leistungsfaktor. Wenn es zu Laständerungen kommt, funktioniert der Käfigläufer weiterhin als Dämpfer. Dies ist auch dann der Fall, wenn der Motorbetrieb über einen Frequenzumrichter erfolgt, bei dem der zusätzliche Dämpfer zu einer Senkung der Effizienz um ungefähr 5-10 % führen kann.

Wenn der Motor mit einem Drehmoment belastet wird, das höher ist als sein synchrones Kippmoment, läuft er nicht mehr synchron und funktioniert daraufhin wie ein Asynchronmotor bei lastabhängiger Drehzahl. Abhängig von der Konstruktion reagiert der Motor mehr oder weniger empfindlich auf Unterspannung, die dazu führen kann, dass er nicht mehr synchron



schlechteren  $\cos \varphi$  führt. Wie Abb. 1.28 „Maximaler Leistungsfaktor verglichen mit dem Saliency-Verhältnis“ verdeutlicht, hängt der maximale Leistungsfaktor vom  $L_d/L_q$ -Verhältnis ab. Je höher das Verhältnis, desto besser wird der  $\cos \varphi$ . Moderne Rotorkonstruktionen verfügen über ein Verhältnis von 4 bis 10.

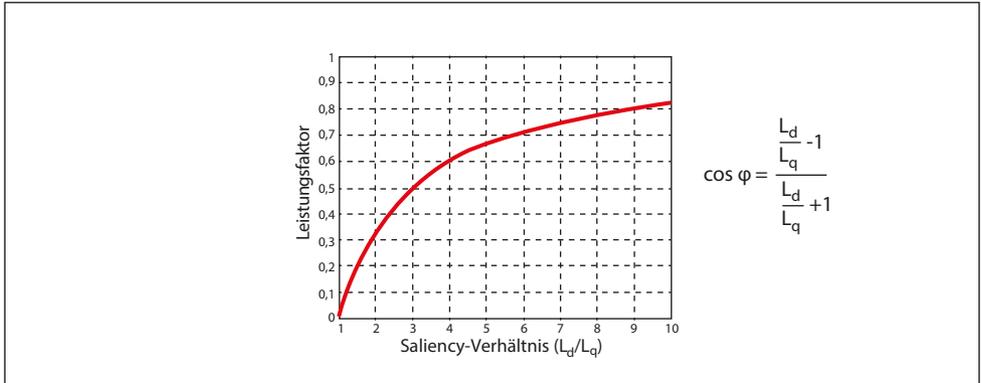


Abb. 1.28 Maximaler Leistungsfaktor verglichen mit dem Saliency-Verhältnis

Obwohl Reluktanzmotoren einen höheren  $\cos \varphi$  erfordern, ist die Energieeffizienz ziemlich hoch. Verluste treten im Rotor hauptsächlich durch Oberschwingungen im Luftspalt zwischen Stator und Rotor auf.

Das Reluktanzprinzip kam erstmals um das Jahr 1840 zum Einsatz. Im Laufe der Zeit führten verschiedene Optimierungen zu unterschiedlichen Motorprinzipien und -konstruktionen. Die nächsten Kapitel beschreiben die drei gängigsten Arten von Reluktanzmotoren.

### 1.4.5 Synchron-Reluktanzmotor mit Käfigläufer

Der Stator dieses dreiphasigen Reluktanzmotors ist identisch mit dem eines dreiphasigen Standard-Käfigläufermotors. Die Rotorkonstruktion wurde durch Entfernen der Wicklungen und Polspalten an der Abwicklung des laminierten Rotorkerns verändert. Die Spalten wurden wieder mit Aluminium gefüllt und die Endwicklungen reduziert.

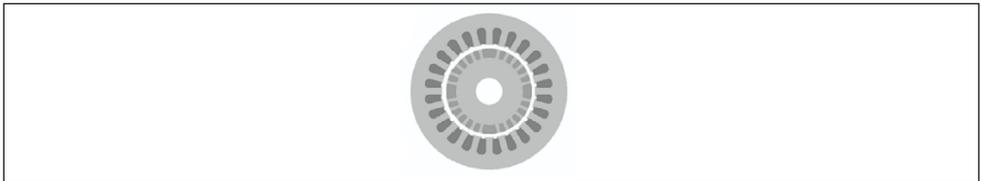


Abb. 1.29 Rotor mit Polspalten an der Abwicklung im Stator

Ähnlich wie bei der Konstruktion des LSPM-Motors (siehe Abschnitt 1.4.3 „LSPM-Motor (Line Start PM Motor)“) beschleunigt der Motor zu einer fast synchronen Drehzahl, sobald mit einem dreiphasigen Netz verbunden und wenn das erzeugte Drehmoment für die Last ausreichend ist. Wenn er sich der synchronen Drehzahl annähert, wird der Rotor synchronisiert und läuft trotz einer fehlenden Rotorerregung mit synchroner Drehzahl.

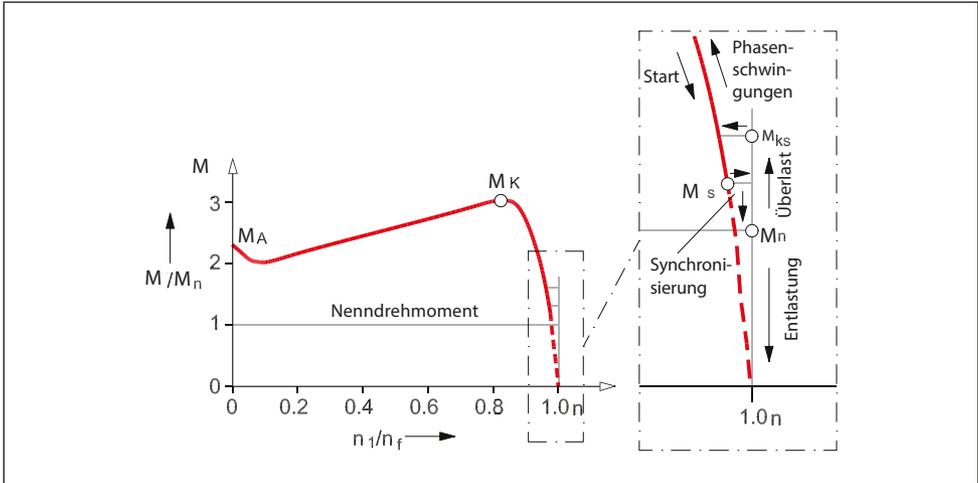


Abb. 1.30 Drehmomentkennlinie eines Reluktanzmotors

Unter Last eilen die Schenkelpolläufer dem rotierenden Feld des Stators um den Lastwinkel nach. Auch hier ist das Verhalten ähnlich wie beim LSPM-Motor, wenn das Lastdrehmoment zu hoch wird. Der Motor läuft nicht mehr synchron, läuft wie ein Asynchronmotor weiter und synchronisiert sich automatisch dann wieder, sobald das Lastdrehmoment unter das Synchronisierungsdrehmoment fällt.

Die Möglichkeit eines Direktstarts (DOL – direct on line) und eines Betriebs mit synchroner Drehzahl machen den Motor für verschiedene Anwendungen interessant. Der Leistungsbereich endet häufig bei etwa 10 kW. Ein Nachteil ist allerdings ein reduzierter Wirkungsgrad, insbesondere bei einem Betrieb mit Frequenzumrichtern, da die Rotorwicklungen als zusätzlicher Dämpfer wirken.

### 1.4.6 Synchron-Reluktanzmotor (SynRM)

Bei der Entwicklung einer neuen Generation von Reluktanzmotoren steht die Energieeffizienz im Mittelpunkt. Wenn von Synchron-Reluktanzmotoren die Rede ist, ist oft dieser hocheffiziente Motortyp gemeint. Er sollte nicht mit Reluktanzmotoren verwechselt werden, deren Fokus auf einer hohen Drehmomentdichte oder der Möglichkeit eines direkten Starts am Netz liegt. Der entscheidende Faktor zur Erzielung eines hohen Wirkungsgrads ist die neue Rotorkonstruktion.

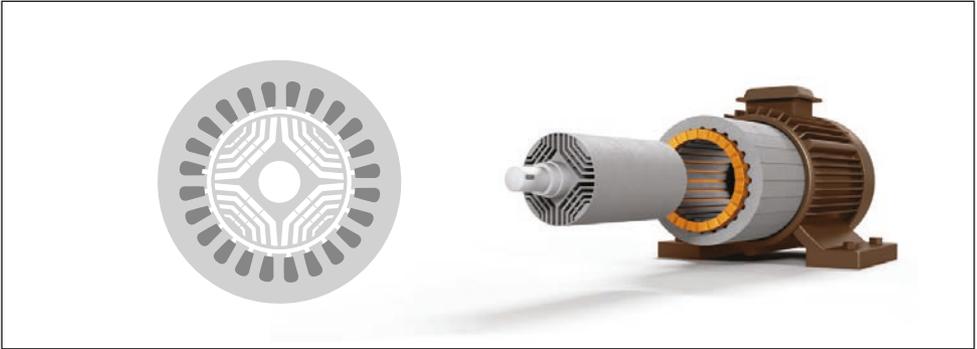


Abb. 1.31 Spezielle Gestaltung des Rotorblechs führt zu hohem Wirkungsgrad bei niedrigen Drehmoment-Rippeln

Die Konstruktion des Stators und die Wicklungen ähneln denen eines Asynchronmotors. Das Anlegen einer geeigneten Spannung an die verteilten Wicklungen erzeugt ein harmonisches Feld, das zu geringen Oberschwingungsverlusten führt. Auch die Gestaltung des Rotors ist so optimiert, dass sie die Oberschwingungsverluste reduziert und ein Betrieb mit geringen Drehmoment-Rippeln möglich ist.

Da der Motor nicht direkt am Netz starten kann, ist ein Frequenzumrichter zur Regelung des Motors erforderlich. Die Magnetisierung der Einschnitte im Rotorblech erfordert eine höhere Scheinleistung als bei Asynchronmotoren (siehe Abschnitt 1.4.4 „Reluktanzmotoren“). Wenn der Umrichter und die Kondensatoren im Zwischenkreis in geeigneter Größe ausgelegt sind, können sie den zusätzlichen Scheinstrom liefern. In diesem Fall wird das Netz nicht mit der höheren Scheinleistung und dem niedrigen  $\cos \varphi$  belastet.

Für den Betrieb des Motors benötigt der Frequenzumrichter Angaben über den Rotorwinkel. Abhängig vom Winkel versorgt der Umrichter die verschiedenen Wicklungen mit Spannung. Die Messung des Rotorwinkels erfolgt häufig ohne Geber und ohne ein zusätzliches Gerät. Um eine energieeffiziente Regelung zu erreichen, muss der Umrichter auch das Verhalten von  $L_d$  und  $L_q$  während des Betriebs berücksichtigen.

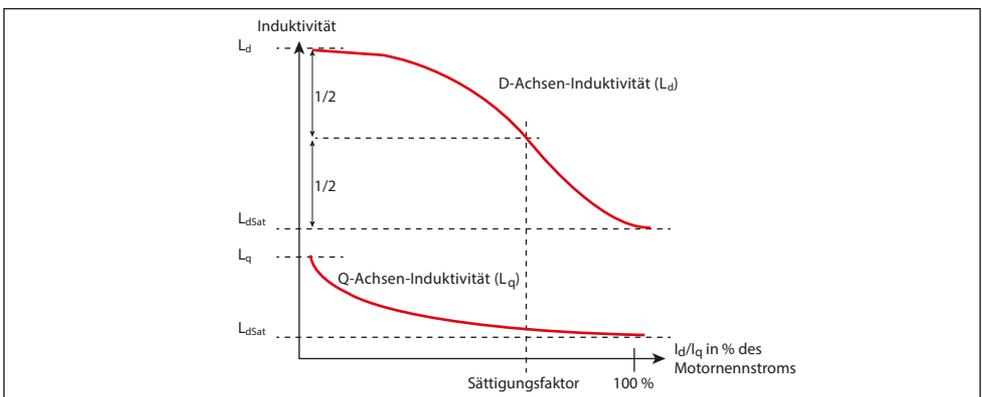


Abb. 1.32 Beispiel des Verhältnisses von  $L_d/L_q$  zu  $I_d/I_q$

Die Induktivitätskomponenten des SynRM-Rotors ändern sich aufgrund von Sättigungseffekten abhängig von der Last. Daher hängen die einzelnen Induktivitäten  $L_d$  und  $L_q$  vom Strom  $I_d$  und  $I_q$  ( $L_d(I_d, I_q)$  und  $L_q(I_d, I_q)$ ) ab. Ist dies berücksichtigt, ist ein Motorbetrieb mit sehr hoher Energieeffizienz möglich. Oberhalb eines bestimmten Leistungsbereichs hat der Wirkungsgrad im Teillastbetrieb Vorteile gegenüber anderen Motorkonzepten.

Über Jahrzehnte hinweg stellten Asynchronmotoren den neusten Stand der Technik dar, während andere Technologien nur als Nischenprodukte Verwendung fanden. Der Trend hin zu energieeffizienteren Motoren und die Möglichkeiten, die Frequenzumrichter bieten, haben zu innovativen Technologien wie dem verbesserten Synchron-Reluktanzmotor geführt. Weitere Verbesserungen und Optimierungen sind derzeit in Entwicklung.

### 1.4.7 Schaltbarer Reluktanzmotor (SRM)

Der Aufbau des Stators ähnelt beim SRM dem von Gleichstrommotoren, da auch hier konzentrische Wicklungen zum Einsatz kommen. Dies ermöglicht ein kompaktes Gehäuse. Das Rotorblech hat eine sehr klare Form mit einer niedrigen Trägheit und leicht zählbaren Polen. Auch wenn die Rotorpole bei zweipoligen Motoren auf die Statorpole ausgerichtet sind, ist das Polverhältnis normalerweise unterschiedlich. Dieses Prinzip kommt zwar auch bei anderen Motortypen zur Anwendung, jedoch ganz besonders bei geschalteten Reluktanzmotoren.

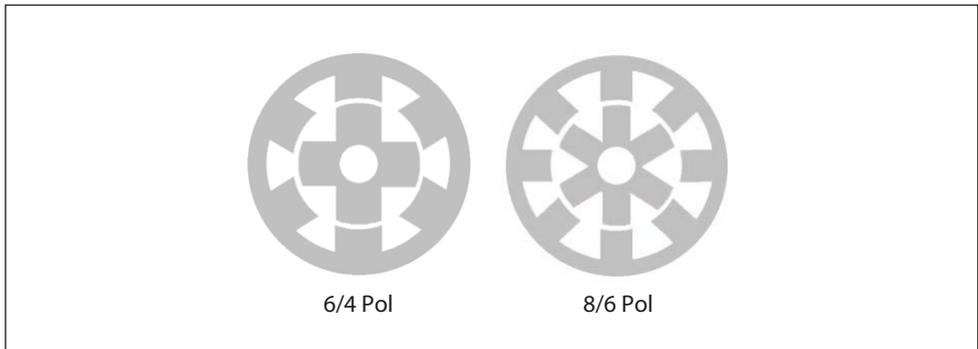


Abb. 1.33 Konfigurationsbeispiele von geschalteten Reluktanzmotoren

Für den Betrieb des Motors ist ein geeigneter Regler erforderlich, der die Statorwicklungen auf eine technisch ausgereifte Weise mit Spannung versorgt. Die Phasen werden nacheinander mit Spannung versorgt. Liegen die Wicklungen einer Phase an Spannung, erzeugt dies über die Statorpole und den Rotor einen Fluss, der zu einer Bewegung des Rotors führt. Nachdem sich der Rotor in Bewegung gesetzt hat, wird die Spannung an die nächste Phase weitergeleitet usw.

Ein direkter Start des Motors am Netz ist nicht möglich. Die Konstruktion ermöglicht ein Drehmoment von 100 % bei unbegrenzter Überziehgeschwindigkeit und einen hohen Wirkungsgrad sogar im Teillastbetrieb. Der doppelte Schenkelpol-Aufbau in Rotor und Stator ist sehr robust, führt jedoch auch oft zu hohen Drehmoment-Ripplern und einer niedrigen Dynamik bei vermehrten Geräuschen.

## 2 Frequenzumrichter

Seit den späten 1960er Jahren hat der Frequenzumrichter eine rasante Entwicklung erfahren. So trugen insbesondere die Entwicklungen in der Mikroprozessor- und Halbleitertechnologie sowie die daraus resultierenden Preissenkungen zu größeren Fortschritten bei. Das Grundprinzip des Frequenzumrichters ist jedoch weiterhin unverändert.

Wie in der Einleitung beschrieben, besteht die Hauptfunktion eines Frequenzumrichters darin, eine variable Spannung (beispielsweise 0 bis 400 V/0 bis 50 Hz) aus „festen“ Parametern (beispielsweise 400 V und 50 Hz) zu erzeugen. Für diese Umwandlung gibt es zwei Möglichkeiten, wodurch sich zwei Arten von Frequenzumrichtern ergeben: Direkt-Umrichter und Umrichter mit Zwischenkreis.

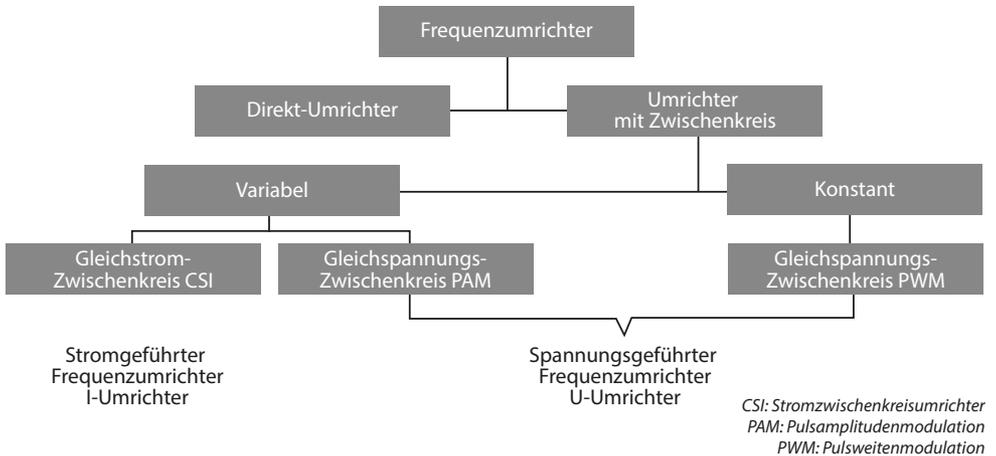


Abb. 2.1 Übersicht der Frequenzumrichtertypen

### 2.1 Direkt-Umrichter

Direkt-Umrichter wandeln ohne Zwischenkreis um.

Sie kommen normalerweise nur in Hochleistungsanwendungen (im Megawatt-Bereich) zum Einsatz. In diesem Buch beschäftigen wir uns mit dieser Art Umrichter nicht im Detail. Einige Merkmale sind jedoch erwähnenswert.

Direkt-Umrichter zeichnen sich durch Folgendes aus:

- Reduzierter Frequenzreglungsbereich (ca. 25 bis 30 Hz) bei einer Netzfrequenz von 50 Hz
- Häufig im Einsatz zusammen mit Synchronmotoren.
- Geeignet für Anwendungen mit hohen Anforderungen an die dynamische Leistung.

## 2.2 Umrichter mit Zwischenkreis

In den meisten Fällen verfügt der Frequenzumrichter über einen Zwischenkreis. Dieser Zwischenkreis wird auch „DC-Bus“ genannt. Bei den Umrichtern mit Zwischenkreis gibt es zwei Unterarten:

- konstanter Zwischenkreis
- variabler Zwischenkreis.

Frequenzumrichter mit Zwischenkreis bestehen aus vier Hauptbestandteilen, siehe Abbildung 2.2 „Blockschaltbild eines Frequenzumrichters mit Zwischenkreis“.

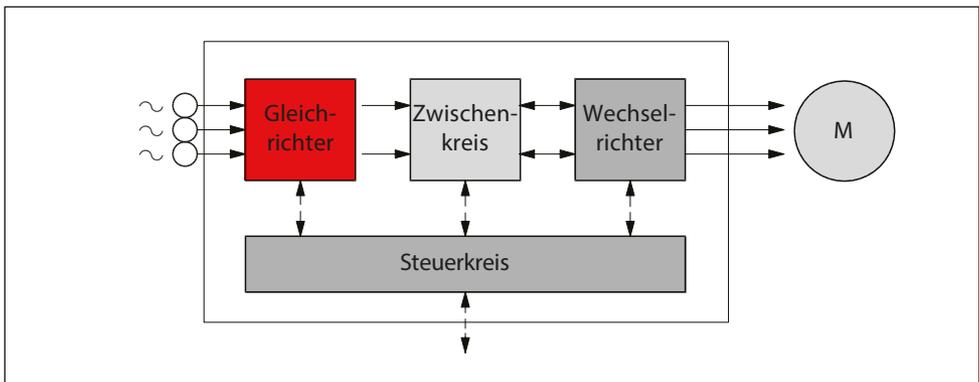


Abb. 2.2. Blockschaltbild eines Frequenzumrichters mit Zwischenkreis

### Gleichrichter

Der Gleichrichter wird an ein Einphasen- oder Dreiphasen-Versorgungsnetz angeschlossen und erzeugt eine pulsierende Gleichspannung. Es gibt vier Grundtypen von Gleichrichtern, wie in Abb. 2.3 „Topologien der Hauptbestandteile“ dargestellt:

- gesteuert
- halbgesteuert
- ungesteuert
- Active Front-End

**Zwischenkreis**

Beim Zwischenkreis gibt es zwei verschiedene Funktionsweisen; siehe Abb. 2.3 „Topologien der Hauptbestandteile – Zwischenkreis“:

- Umwandlung der Gleichrichterspannung in Gleichspannung
- Stabilisierung oder Glättung der pulsierenden Gleichspannung, um sie dem Wechselrichter zur Verfügung zu stellen

**Wechselrichter**

Der Wechselrichter übernimmt die Umwandlung der konstanten Gleichspannung des Gleichrichters in eine variable Wechselspannung. Er generiert zudem die Frequenz der Motorspannung. Alternativ können manche Wechselrichter auch zusätzlich die konstante Gleichspannung in eine variable Wechselspannung umwandeln. Siehe Abb. 2.3 „Topologien der Hauptbestandteile – Wechselrichter“.

**Steuerkreis**

Der Steuerkreis überträgt Signale an den Gleichrichter, den Zwischenkreis und den Wechselrichter und empfängt Signale von diesen. Die Auslegung des einzelnen Frequenzumrichters bestimmt, welche Teile gesteuert werden.

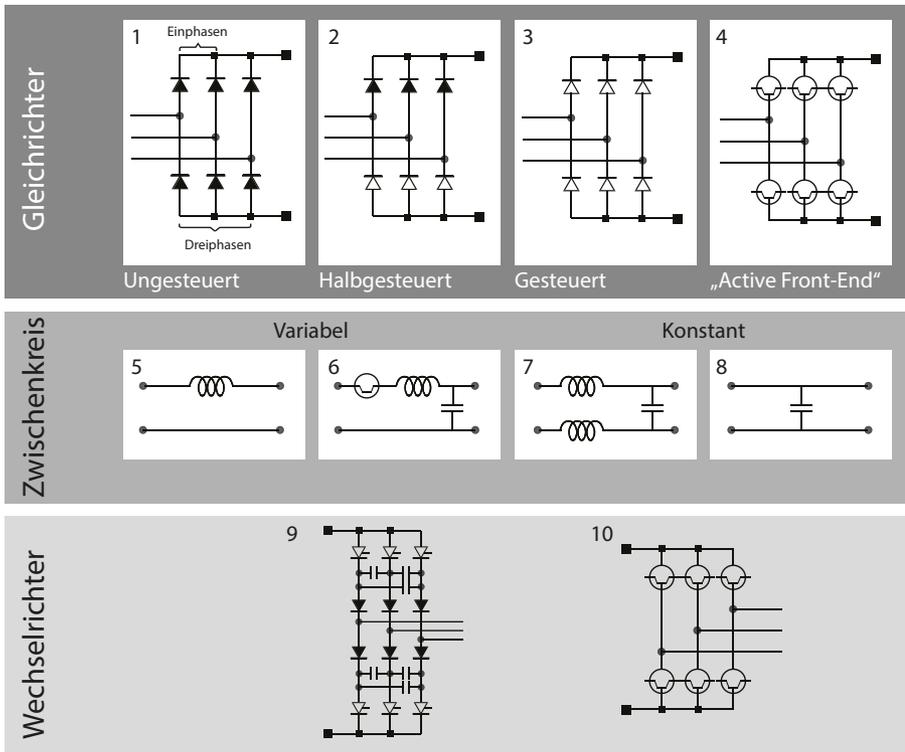


Abb. 2.3 Topologien der Hauptbestandteile

Bei der Konfiguration des Frequenzumrichters lassen sich die verschiedenen Hauptbestandteile kombinieren. Siehe Tabelle 2.1 „Beispiele für Konfigurationen von Frequenzumrichtern“.

Konfigurationsbeispiel	Abkürzung	Konfiguration: Bezug auf Komponenten in Abb. 2.3
Pulsamplitudenmodulierter Umrichter	PAM	1 oder 2 oder 3 und 6 und 9 oder 10
Pulsweitenmodulierter Umrichter	PWM	1 oder 2 oder 3 oder 4 und 7 oder 8 und 9 oder 10
Stromgeführter Umrichter	CSI	3, 5 und 9

Tabelle 2.1 Beispiele für Konfigurationen von Frequenzumrichtern

Gemeinsam ist allen Frequenzumrichtern, dass der Steuerkreis Signale nutzt, um die Halbleiter des Wechselrichters zu aktivieren und zu deaktivieren. Dieses Schaltmuster basiert auf verschiedenen Grundlagen. Je nach Schaltmuster, das die Versorgungsspannung zum Motor regelt, lassen sich Frequenzumrichter in weitere Typen unterteilen.

## 2.3 Gleichrichter

Die Spannungsversorgung erfolgt entweder als Dreiphasen-Wechselspannung oder Einphasen-Wechselspannung mit fester Frequenz.

*Beispiel:*

Dreiphasen-Wechselspannung: 3 x 400 V/50 Hz

Einphasen-Wechselspannung: 1 x 240 V/50 Hz

Der Gleichrichter eines Frequenzumrichters besteht aus Dioden oder Thyristoren, einer Kombination aus beidem oder bipolaren Transistoren (IGBT).

Abb. 2.3 „Topologien der Hauptbestandteile“ zeigt die vier heute verfügbaren Gleichrichtervarianten. In Anwendungen mit kleinen Leistungen (bis 30 kW, je nach Hersteller) kommen üblicherweise B6-Brückengleichrichter zum Einsatz. Halbgesteuerte Gleichrichter werden im Leistungsbereich ab 37 kW eingesetzt.

Die oben beschriebenen Gleichrichterschaltungen ermöglichen einen Energiefluss in eine Richtung von der Netzversorgung zum Zwischenkreis.

### 2.3.1 Ungesteuerte Gleichrichter

Ungesteuerte Gleichrichter bestehen aus Dioden; siehe Abb. 2.4 „Funktionsweise der Dioden“.

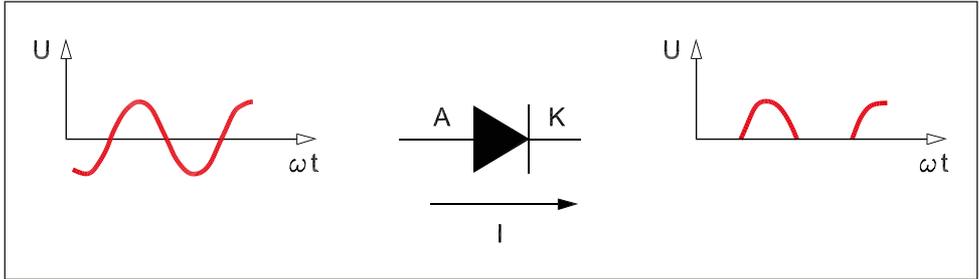


Abb. 2.4 Funktionsweise der Dioden

Eine Diode erlaubt einen Stromfluss in nur eine Richtung: von der Anode (A) zur Kathode (K). Der umgekehrte Fluss von Kathode zu Anode wird blockiert. Im Gegensatz zu einigen anderen Halbleitergeräten ist es nicht möglich, die Stromstärke zu steuern. Eine Wechselspannung über eine Diode wird in eine pulsierende Gleichspannung umgewandelt. Wenn ein ungesteuerter Dreiphasen-Gleichrichter mit Dreiphasen-Wechselspannung versorgt wird, pulsiert die Gleichspannung kontinuierlich.

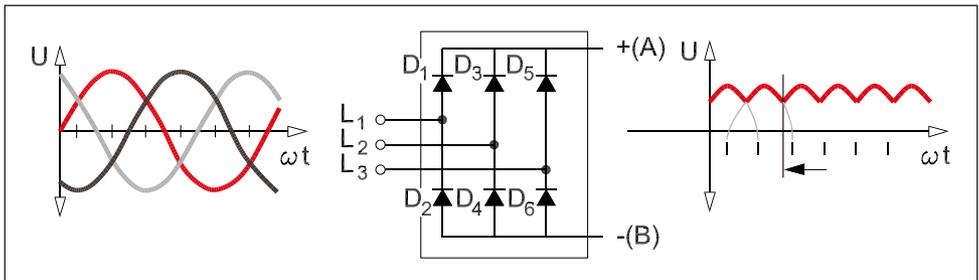


Abb. 2.5 Ungesteuerter Gleichrichter (B6-Diodenbrücke)

Abb. 2.5 „Ungesteuerter Gleichrichter (B6-Diodenbrücke)“ zeigt einen ungesteuerten Dreiphasen-Gleichrichter, der aus zwei Gruppen von Dioden besteht. Eine Gruppe mit den Dioden  $D_1, D_3$  und  $D_5$ . Die andere Gruppe mit den Dioden  $D_4, D_6$  und  $D_2$ . Jede Diode leitet während eines Drittels des Zeitraums  $T$  ( $120^\circ$ ).

In beiden Gruppen leiten die Dioden in Reihe. Phasen, in denen beide Gruppen leiten, sind um ein Sechstel des Zeitraums  $T$  ( $60^\circ$ ) versetzt. Die Diodengruppe  $D_{1,3,5}$  leitet die positive Spannung. Wenn die Spannung der Phase  $L_1$  den positiven Spitzenwert erreicht, wird der Wert der Phase  $L_1$  an Anschluss (A) eingestellt.

An den anderen beiden Dioden bestehen Gegenspannungen mit den Größen  $U_{L1-2}$  und  $U_{L1-3}$ .

Dasselbe Prinzip gilt für Diodengruppe  $D_{4,6,2}$ . Hier wird die negative Phasenspannung an Anschluss (B) eingestellt. Wenn  $L_3$  zu einer bestimmten Zeit den negativen Schwellenwert erreicht, leitet Diode  $D_6$ .

An den anderen beiden Dioden bestehen Gegenspannungen mit den Größen  $U_{L3-1}$  und  $U_{L3-2}$ .

Die Ausgangswechselspannung des ungesteuerten Gleichrichters ist konstant. Sie stellt die Differenz der Spannungen der beiden Diodengruppen dar. Der durchschnittliche Wert der pulsierenden Gleichspannung entspricht etwa dem 1,31- bis 1,41-fachen der Netzspannung bei Dreiphasen-Versorgung bzw. etwa dem 0,9- bis 1,2-fachen der Wechselspannung bei Einphasen-Versorgung.

Der Stromverbrauch der Dioden ist nicht sinusförmig. Infolgedessen erzeugen ungesteuerte Gleichrichter Netzstörungen. Um diese zu eliminieren, werden in zunehmendem Maße Frequenzumrichter mit B12- und B18-Gleichrichtern eingesetzt. B12- und B18-Gleichrichter verfügen über 12 bzw. 18 Dioden in 6er-Gruppen.

### 2.3.2 Halbgesteuerte Gleichrichter

Bei halbgesteuerten Gleichrichtern ersetzt eine Thyristorgruppe eine Diodengruppe (beispielsweise  $D_{4,6,2}$ ; siehe Abb. 2.5 „Ungesteuerte Gleichrichter (B6-Diodenbrücke)“). Die Thyristoren werden auch SCR (Silicon Controlled Rectifier) genannt. Man findet sie in vielen elektronischen Anwendungen, insbesondere zur Leistungsregelung.

Durch Steuern der Schaltzeiten der Thyristoren ist es möglich, die Einschaltströme der Einheiten zu begrenzen und eine sanfte Aufladung der Kondensatoren im Zwischenkreis zu erreichen. Die Ausgangsspannung dieser Gleichrichter ist dieselbe wie die von ungesteuerten Gleichrichtern erzeugte Spannung. Typischerweise findet man halbgesteuerte Gleichrichter in Frequenzumrichtern mit Leistungsgrößen ab 37 kW.

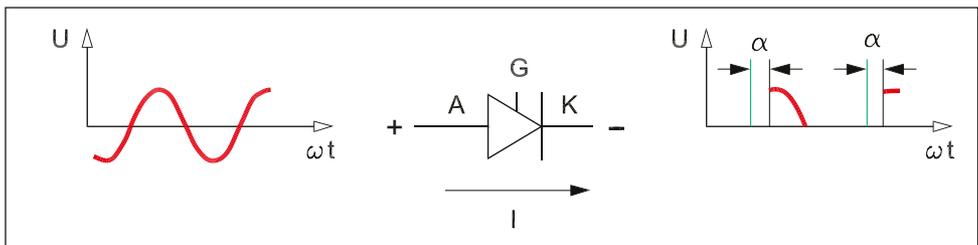


Abb. 2.6 Funktionsweise der Thyristoren

In Bezug auf Abb. 2.6, „Funktionsweise der Thyristoren“: Wenn  $\alpha$  zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  liegt, wird der Thyristorkreis als Gleichrichter genutzt. Wenn  $\alpha$  zwischen  $90^\circ$  und  $300^\circ$  liegt, wird der Thyristorkreis als Wechselrichter genutzt.

### 2.3.3 Gesteuerte Gleichrichter

Für (vollständig) gesteuerte Gleichrichter sind Thyristoren erforderlich. Wie bei einer Diode erlaubt der Thyristor nur einen Stromfluss von Anode (A) zu Kathode (K). Der Unterschied besteht jedoch darin, dass der Thyristor über einen dritten Anschluss, das sogenannte Gate (G), verfügt. Aktiviert ein Signal das Gate, leitet der Thyristor Strom, und zwar so lange, bis der Strom auf Null fällt. Der Stromfluss kann nicht durch das Senden eines Signals an das Gate unterbrochen werden.

Thyristoren werden in Gleichrichtern eingesetzt. Das an das Gate gesendete Signal ist das Steuersignal  $\alpha$  des Thyristors; dabei ist  $\alpha$  eine Zeitverzögerung ausgedrückt in Grad. Die Gradzahl definiert die Verzögerung zwischen dem Nulldurchlauf der Spannung und dem Zeitpunkt, an dem der Thyristor eingeschaltet wird.

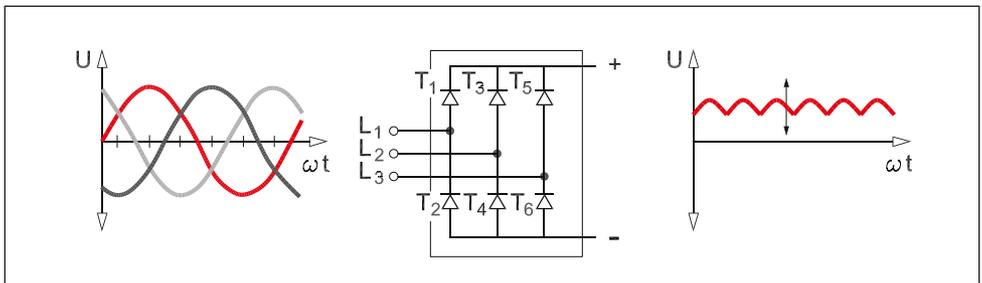


Abb. 2.7 (Vollständig) gesteuerter Dreiphasen-Gleichrichter

Gesteuerte Dreiphasen-Gleichrichter lassen sich in zwei Thyristor-Gruppen unterteilen: T1, T3 und T5 sowie T4, T6 und T2. Bei ihnen wird  $\alpha$  ab dem Zeitpunkt berechnet, zu dem die entsprechende Diode in einem ungesteuerten Gleichrichter normalerweise mit dem Leiten beginnen würde, d. h.  $30^\circ$  nach dem Nulldurchgang der Spannung. Ansonsten unterscheiden sich die Funktionsweisen von gesteuerten und ungesteuerten Gleichrichtern nicht.

Die Amplitude der gleichgerichteten Spannung lässt sich durch das Regeln von  $\alpha$  variieren. Gesteuerte Gleichrichter liefern eine Gleichspannung mit einem durchschnittlichen Wert  $U$ ; dabei gilt:

$$U = 1,35 \times \text{Netzspannung} \times \cos \alpha.$$

Verglichen mit dem ungesteuerten Gleichrichter verursacht der vollständig gesteuerte Gleichrichter größere Verluste und Störungen im Versorgungsnetz, weil diese Gleichrichter einen großen Blindstrom aufnehmen, wenn die Thyristoren für kurze Zeiten leiten. Das ist einer der Gründe, warum Thyristoren hauptsächlich im Wechselrichterbereich der Frequenzumrichter eingesetzt werden. Der Vorteil vollständig gesteuerter Gleichrichter ist jedoch, dass sie generatorische Bremsleistung im Zwischenkreis in das Versorgungsnetz zurückspeisen können.

### 2.3.4 Active Front-End/Active Infeed

Bei einigen Frequenzumrichteranwendungen arbeitet der Motor in manchen Betriebszuständen als Generator. In diesem Fall können Anwender die Energiebilanz durch Zurückspeisen von Energie ins Versorgungsnetz verbessern.

Solche Frequenzumrichter benötigen einen gesteuerten (aktiven) Gleichrichter, sodass die Energie rückwärts fließen kann. Aus diesem Grund heißen diese Geräte Active Front-End (AFE) oder Active Infeed Converter (AIC). Um Energie ins Versorgungsnetz rückspeisen zu können, muss das Spannungsniveau im Zwischenkreis höher sein als die Netzspannung. Diese höhere Spannung muss unter allen Betriebsbedingungen vorliegen. Mithilfe verschiedener Strategien lassen sich Verluste im Standby- und Motorbetrieb verringern, vollständig verhindern lassen sie sich jedoch nicht. Zudem ist eine zusätzliche Filterung im generatorischen Betrieb erforderlich, da die erzeugte Spannung ohne Filterung nicht zur Sinuskurvenform des Versorgungsnetzes passt.

## 2.4 Zwischenkreis

Je nach Auslegung hat der Zwischenkreis folgende Funktionen:

- Energiepuffer, sodass der Motor Energie über den Wechselrichter vom Versorgungsnetz ziehen bzw. in dieses speisen kann, um Überlaststöße abzufangen
- Trennung des Gleichrichters vom Wechselrichter
- Verringerung von Netzstörungen

Der Zwischenkreis basiert auf einem von vier verschiedenen Grundkreisen; siehe Abb. 2.3 „Topologien der Hauptbestandteile“. Die Art des Zwischenkreises hängt von der Art des Gleichrichters oder Wechselrichters ab, mit dem er kombiniert wird.

Die grundlegenden Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten von Zwischenkreisen werden in den folgenden Abschnitten erklärt.

### 2.4.1 Variabler Zwischenkreis

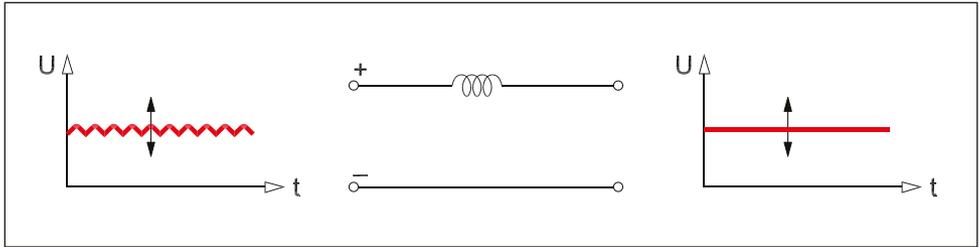


Abb. 2.8 Variabler Gleichstromzwischenkreis

Bei dieser Art des Zwischenkreises gibt es eine sehr große Spule, auch bekannt als „Drossel“, die mit einem vollständig gesteuerten Gleichrichter kombiniert wird (siehe Abb. 2.3 „Topologien der Hauptbestandteile“, Teil 5, und Abb. 2.8 „Variabler Gleichstromzwischenkreis“).

Die Spule wandelt die variable Spannung des gesteuerten Gleichrichters in einen variablen Gleichstrom um. Die Last bestimmt die Höhe der Motorspannung. Der Vorteil dieser Art des Zwischenkreises besteht darin, dass die Bremsleistung vom Motor ohne zusätzliche Komponenten zurück in das Versorgungsnetz gespeist werden kann. Die Spule wird in Stromzwischenkreisumrichtern (I-Umrichtern) verwendet.

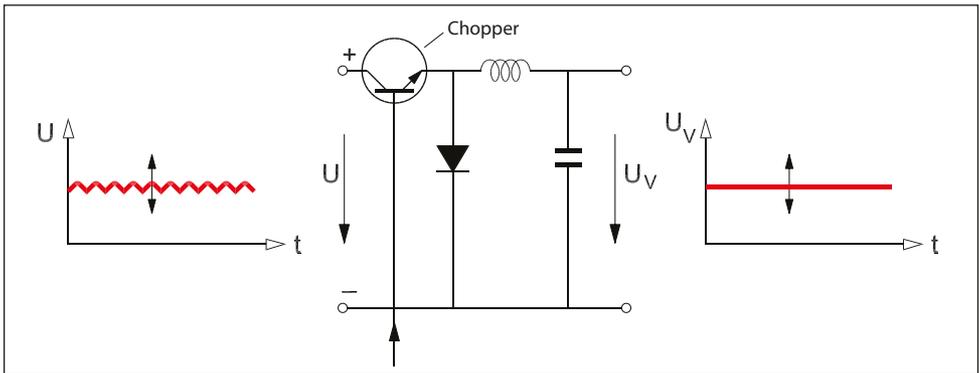


Abb. 2.9 Variabler Gleichspannungszwischenkreis

Schlussendlich kann vor einem Filter ein Chopper eingebaut werden; siehe Abb. 2.9 „Variabler Gleichspannungs-Zwischenkreis“. Der Chopper enthält einen Transistor, der als Schalter für das An- und Ausschalten der gleichgerichteten Spannung dient. Der Steuerkreis regelt den Chopper durch das Vergleichen der variablen Spannung nach dem Filter ( $U_V$ ) mit dem Eingangssignal.

Wenn diese Werte sich unterscheiden, wird das Verhältnis zwischen der Zeit  $t_{\text{on}}$  (wenn der Transistor leitet) und der Zeit  $t_{\text{off}}$  (wenn der Transistor sperrt) angepasst, und variiert auf diese Weise den Effektivwert der Gleichspannung abhängig von der Zeit, während der der Transistor leitet. Anders gesagt:

$$U_V = U \times \frac{t_{\text{off}}}{t_{\text{on}} + t_{\text{off}}}$$

Unterbricht der Chopper-Transistor den Strom, versucht die Filterspule (oder „Drossel“), eine unendlich hohe Spannung über den Transistor zu erzeugen. Um dies zu verhindern, schützt eine Freilaufdiode den Chopper; siehe Abb. 2.9 „Variabler Gleichspannungs-Zwischenkreis“.

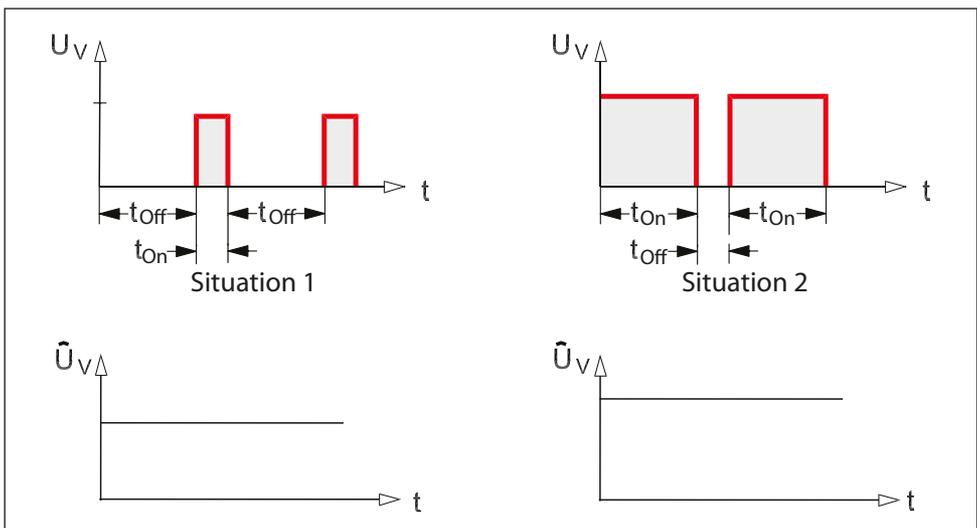


Abb. 2.10 Chopper-Transistor regelt die Zwischenkreisspannung mit entsprechendem Effektivwert

Der Filter im Zwischenkreis glättet die Rechteck-Spannung nach dem Chopper und hält die Spannung konstant bei einer gegebenen Frequenz. Die zur Spannung gehörende Frequenz erzeugt der Wechselrichter.

### 2.4.2 Konstanter Zwischenkreis

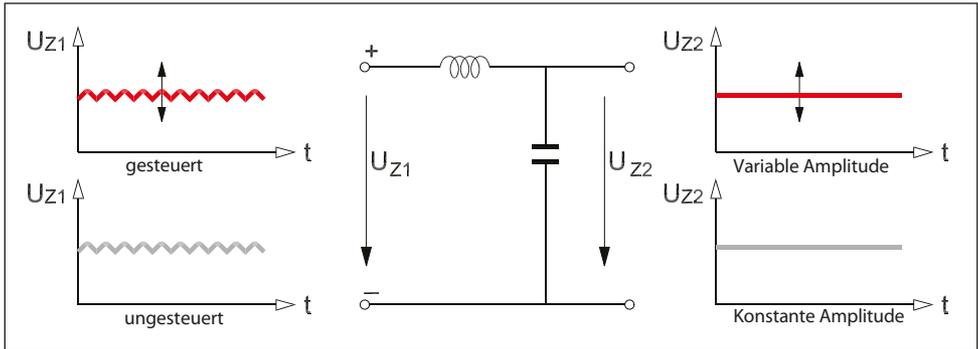


Abb. 2.11 Konstanter Gleichspannungszwischenkreis

Der Zwischenkreis kann aus einem Filter bestehen, der einen Kondensator und/oder eine Spule (Drossel) enthält. Normalerweise werden aufgrund ihrer hohen Energiedichte Elektrolytkondensatoren verwendet. Auch wenn Kondensatoren eine begrenzte Lebensdauer haben, bieten sie folgende Vorteile:

- Glätten der pulsierenden Gleichspannung ( $U_{Z1}$ )
- Energiereserve bei Abfall der Versorgungsspannung
- Energiespeicher für Laststöße und generatorischen Betrieb des Motors

DC-Spulen bieten folgende Vorteile:

- Der Frequenzumrichter ist gegenüber Netztransienten geschützt
- Glätten der Stromwelligkeit, was wiederum die Lebensdauer der Komponenten des Zwischenkreises, insbesondere der Kondensatoren, erhöht
- Verringern der Netzstörung und optional kleinere Versorgungsleiterquerschnitte. Diese Funktion lässt sich auch durch dem Frequenzumrichter vorgeschaltete Leitungsdrosseln erreichen.

Beim Planen einer Installation ist es wichtig zu beachten, dass Spulen schwer sind und heiß werden können. Dadurch können heiße Stellen auftreten.

Diese Art des Zwischenkreises kann mit verschiedenen Gleichrichtertypen kombiniert werden. Bei vollständig gesteuerten Gleichrichtern wird die Spannung bei einer bestimmten Frequenz konstant gehalten. Deshalb ist die dem Wechselrichter zugeführte Spannung eine reine Gleichspannung ( $U_{Z2}$ ) mit variabler Amplitude.

Bei halbgesteuerten und ungesteuerten Gleichrichtern ist die Spannung am Wechselrichter-Eingang eine Gleichspannung mit konstanter Amplitude (etwa das  $\sqrt{2}$ -fache der Netzspannung). Die erwartete Spannung und Frequenz werden beide im Wechselrichter erzeugt.

Eine Designalternative sind Geräte mit deutlich reduzierten Kondensatorkapazitäten im Zwischenkreis. Diese Schaltungen sind unter der Bezeichnung „schlanker“ Zwischenkreis bekannt und setzen häufig auf günstige Folienkondensatoren. Die schlanken Zwischenkreise führen zu folgenden Effekten:

- Senkung der Konstruktionskosten
- Kompaktere Bauweise, geringeres Gewicht
- Reduzierte Netzrückwirkung (40 % der fünften Oberschwingung)
- Anfällig bei Netzspannungseinbrüchen. Das bedeutet, dass der Frequenzumrichter bei Spannungseinbrüchen aufgrund von Transienten im Versorgungssystem deutlich schneller abschaltet
- Netzrückwirkungen können im Hochfrequenzbereich auftreten
- Die hohe Welligkeit im Zusammenhang mit dem Zwischenkreis reduziert die Ausgangsspannung um ca. 10 % und führt zu höherer Motorleistungsaufnahme
- Die Neustartzeit beim Betrieb kann länger sein, da die folgenden drei Prozesse ablaufen:
  - Initialisierung des Frequenzumrichters
  - Magnetisierung des Motors
  - Hochfahren (Rampe auf ) bis zum erforderlichen Sollwert für die Anwendung

## 2.5 Wechselrichter

Der Wechselrichter ist das letzte Glied der Hauptbestandteile eines Frequenzumrichters. Die Wechselrichterprozesse bilden beim Erzeugen der Ausgangsspannung und Frequenz die letzte Stufe. Wenn der Motor direkt ans Netz angeschlossen ist, liegen die idealen Betriebsbedingungen beim Nennbetriebspunkt vor.

Der Frequenzumrichter garantiert gute Betriebsbedingungen über den gesamten Drehzahlbereich hinweg, indem er die Ausgangsspannung an die Lastbedingungen anpasst. So ist es möglich, die Magnetisierung des Motors auf einem optimalen Level zu halten.

Aus dem Zwischenkreis erhält der Wechselrichter eine der folgenden Ausgangsgrößen:

- Variablen Gleichstrom
- Variable Gleichspannung
- Konstante Gleichspannung

Auf jeden Fall muss der Wechselrichter sicherstellen, dass am Motor eine Wechselspannung anliegt. Mit anderen Worten: er muss die Frequenz für die Motorspannung erzeugen. Die Steuermethode des Wechselrichters hängt davon ab, ob er einen variablen oder konstanten Wert empfängt. Mit variablem Strom oder variabler Spannung muss der Wechselrichter nur die entsprechende Frequenz erzeugen. Bei konstanter Spannung erzeugt er Frequenz und Amplitude der Spannung.

Das Grundprinzip der Wechselrichter ist immer dasselbe, auch wenn sich ihre Funktionsweise unterscheidet. Die Hauptbestandteile sind gesteuerte Halbleiter in Paaren in drei Verzweigungen, siehe Abb. 2.3 „Topologien der Hauptbestandteile“.

Transistoren ersetzen zunehmend Thyristoren in den Wechselrichterbaugruppen des Frequenzumrichters, und das hat gute Gründe. Erstens gibt es Transistoren jetzt für hohe Ströme, hohe Spannungen und hohe Schaltfrequenzen. Außerdem beeinflusst der Nulldurchgang des Stroms Transistoren im Gegensatz zu Thyristoren und Dioden nicht. Transistoren können jederzeit in den leitenden oder blockierenden Zustand wechseln, indem sie einfach die Polarität der an den Steuerklemmen anliegenden Spannung ändern. Die in den letzten Jahren erreichten Fortschritte in der Halbleitertechnologie haben die Taktfrequenz der Transistoren deutlich erhöht. Die obere Schaltgrenze liegt jetzt bei einigen Hundert kHz.

Dadurch können magnetische Störungen durch Pulsmagnetisierung innerhalb des Motors vermieden werden. Ein weiterer Vorteil der hohen Taktfrequenz ist eine variable Modulation der Frequenzumrichter-Ausgangsspannung. Damit lässt sich ein sinusförmiger Motorstrom erreichen, wie Abb. 2.12 „Auswirkungen der Taktfrequenz auf den Motorstrom“ zeigt. Der Steuerkreis des Frequenzumrichters muss die Wechselrichtertransistoren lediglich mit einem passenden Muster aktivieren und deaktivieren.

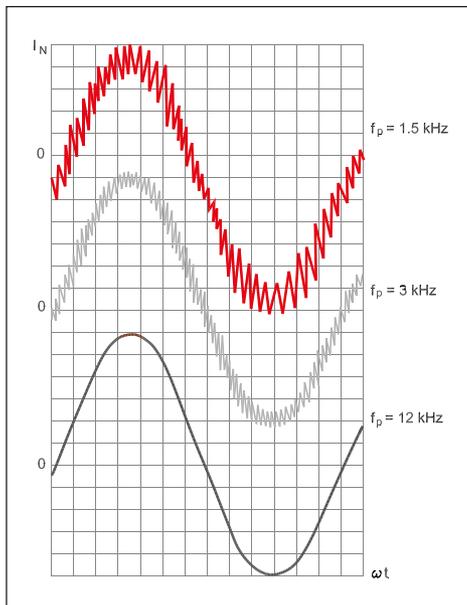


Abb. 2.12 Auswirkungen der Taktfrequenz auf den Motorstrom

Die Wahl der Wechselrichter-Taktfrequenz ist ein Kompromiss aus Verlusten im Motor (Sinusform des Motorstroms) und Verlusten im Wechselrichter. Mit steigender Taktfrequenz steigen die Verluste im Wechselrichter in Abhängigkeit der Anzahl der Halbleiterkreise.

Hochfrequenztransistoren können in drei Haupttypen unterteilt werden:

- Bipolar (LTR)
- Unipolar (MOSFET)
- Insulated Gate Bipolar (IGBT)

Tabelle 2.2 „Vergleich der Leistungstransistor-Merkmale“ zeigt die Hauptunterschiede zwischen MOSFET-, IGBT- und LTR-Transistoren.

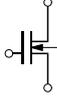
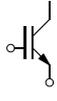
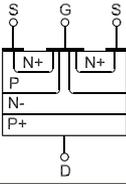
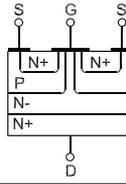
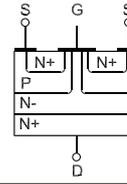
Eigenschaften	Halbleiter		
	MOSFET	IGBT	LTR
<b>Symbol</b>			
<b>Design</b>			
<b>Leitfähigkeit</b> Stromleitfähigkeit Verluste	Niedrig Hoch	Hoch Vernachlässigbar	Hoch Vernachlässigbar
<b>Blockierbedingungen</b> Obere Grenze	Niedrig	Hoch	Mittel
<b>Schaltbedingungen</b> Anschaltzeit Abschaltzeit Verluste	Kurz Kurz Vernachlässigbar	Mittel Mittel Mittel	Mittel Niedrig Hoch
<b>Steuerbedingungen</b> Leistung Treiber	Mittel Spannung	Mittel Spannung	Hoch Strom

Tabelle 2.2 Vergleich der Leistungstransistor-Merkmale.

IGBT-Transistoren sind eine gute Wahl für Frequenzumrichter hinsichtlich Leistungsbereich, hoher Leitfähigkeit, hoher Taktfrequenz und einfacher Steuerung. Sie kombinieren die Merkmale von MOSFET-Transistoren mit den Ausgangsmerkmalen bipolarer Transistoren. Die tatsächlichen Schaltkomponenten und die Wechselrichtersteuerung sind normalerweise kombiniert, um ein einziges Modul, ein IPM („Intelligent Power Module“), also intelligente Leistungselektronik, zu schaffen.

Eine Freilaufdiode ist zu jedem Transistor parallel geschaltet, weil über die induktive Ausgangslast hohe Induktionsspannungen auftreten können. Die Dioden zwingen die Motorströme, weiter in ihre Richtung zu fließen, und schützen die Schaltkomponenten gegen eingeprägte Spannungen. Auch die vom Motor geforderte Reaktanzleistung können die Freilaufdioden verkraften.

## 2.6 Modulationsverfahren

Die Halbleiter im Wechselrichter leiten oder blockieren – je nachdem, welche Signale der Steuerkreis erzeugt. Zwei Grundprinzipien (Modulationsarten) erzeugen die variablen Spannungen und Frequenzen:

- Pulsamplitudenmodulation (PAM) und
- Pulsweitenmodulation (PWM)

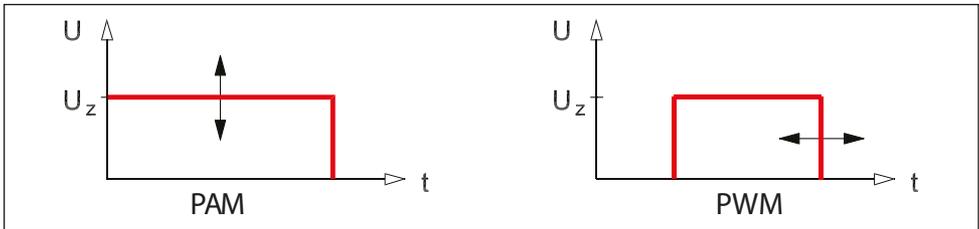


Abb. 2.13 Modulation von Amplitude und Pulsbreite

### 2.6.1. Pulsamplitudenmodulation (PAM)

PAM kommt in Frequenzumrichtern mit variabler Zwischenkreisspannung oder variablem Zwischenkreisstrom zum Einsatz. In Frequenzumrichtern mit ungesteuerten oder halbgesteuerten Gleichrichtern erzeugt der Zwischenkreis-Chopper die Amplitude der Ausgangsspannung; siehe Abb. 2.9 Variabler Gleichspannungs-Zwischenkreis. Ist der Gleichrichter vollständig gesteuert, wird die Amplitude direkt erzeugt. Das bedeutet, dass die Ausgangsspannung für den Motor im Zwischenkreis zur Verfügung gestellt wird.

Die Intervalle, während denen die individuellen Halbleiter leiten oder sperren, werden in einem bestimmten Muster gespeichert. Dieses Muster wird abhängig von der gewünschten Ausgangsfrequenz ausgelesen.

Dieser Halbleiter-Schaltmodus steuert die Höhe der variablen Spannung oder des variablen Stroms im Zwischenkreis. Kommt ein spannungsgesteuerter Oszillator zum Einsatz, folgt die Frequenz immer der Amplitude der Spannung.

Die Pulsamplitudenmodulation kann in bestimmten Anwendungen wie Hochgeschwindigkeitsmotoren (10.000 bis 100.000 U/min) zu verringerten Motorgeräuschen und geringfügigen Effizienzvorteilen führen. Allerdings eliminiert dies nicht die Nachteile, wie höhere Kosten für höherwertige Hardware und Steuerprobleme (z. B. höhere Drehmoment-Rippel bei niedrigen Geschwindigkeiten).

## 2.6.2 Pulsweitenmodulation (PWM)

Frequenzumrichtern mit konstanter Zwischenkreisspannung nutzen die Pulsweitenmodulation, die am weitesten verbreitete und bestentwickelte Methode. Im Vergleich zur PAM sind die Hardwareanforderungen für diese Modulation geringer, bei niedrigen Geschwindigkeiten funktioniert die Steuerleistung besser und der Bremswiderstandbetrieb ist jederzeit möglich. Einige Hersteller verzichten auf Elektrolytkondensatoren und Spulen (Drosseln).

Die Motorspannung lässt sich durch das Aufschalten der Zwischenkreisspannung (DC) an die Motorwicklungen für eine bestimmte Dauer variieren. Ebenso variiert die Frequenz durch das Verschieben der positiven und negativen Spannungspulse während der zwei Halbperioden entlang der Zeitachse.

Da diese Technologie die Weite der Spannungspulse verändert, heißt das Verfahren Pulsweitenmodulation oder PWM. Bei herkömmlichen PWM-Techniken bestimmt der Steuerkreis die Aktivierung und Deaktivierung der Halbleiter so, dass der Motorspannungsverlauf so sinusförmig wie möglich ist. Auf diese Weise lassen sich die Verluste in den Motorwicklungen reduzieren, und ein sanfter Motorbetrieb kann sogar bei niedrigen Drehzahlen erreicht werden.

Die Ausgangsfrequenz passt das System durch das Anschließen des Motors an die Hälfte der Zwischenkreisspannung während einer bestimmten Zeit an. Die Ausgangsspannung lässt sich anpassen, indem man die Spannungspulse der Ausgangsklemmen des Frequenzumrichters in eine Reihe engerer individueller Pulse mit Unterbrechungen dazwischen unterteilt. Das Verhältnis von Puls zu Unterbrechung kann abhängig vom erforderlichen Spannungsniveau variiert werden. Das bedeutet, dass die Amplitude der negativen und positiven Spannungspulse immer der halben Zwischenkreisspannung entspricht.

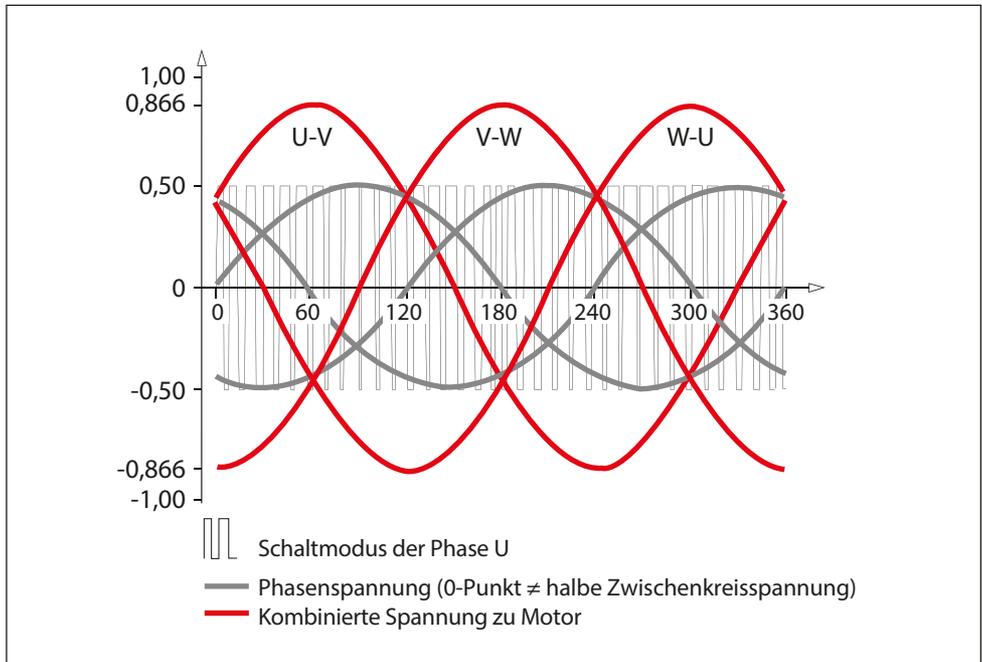


Abb. 2.14 Ausgangsspannung PWM

Niedrige Statorfrequenzen haben längere Perioden zur Folge. Dabei können diese so lang werden, dass es nicht länger möglich ist, die Dreieck-Frequenz beizubehalten.

Werden allerdings die spannungsfreien Zeiträume zu lang, läuft der Motor unregelmäßig. Vermeiden lässt sich dies durch die Verdoppelung der Frequenz der Dreieckskurve bei niedrigen Frequenzen.

Die niedrigen Taktfrequenzen führen zu lauterem Motorgeräuschen. Um die Geräuschentwicklung zu minimieren, lässt sich eine höhere Taktfrequenz einstellen. Dies machten Fortschritte bei der Halbleitertechnologie möglich, die heute die Modulation einer etwa sinusförmigen Ausgangsspannung und die Erzeugung eines etwa sinusförmigen Stroms erlaubt. Ein PWM-Frequenzumrichter, der ausschließlich auf sinusförmiger Referenzmodulation basiert, kann bis zu 86,6 % der Nennspannung erzielen (siehe Abb. 2.14 „Ausgangsspannung PWM“).

Die Phasenspannung an den Ausgangsklemmen des Frequenzumrichters entspricht der halben Zwischenkreisspannung dividiert durch  $\sqrt{2}$ , d. h. der halben Versorgungsspannung. Die Netzspannung der Ausgangsklemmen entspricht dem  $\sqrt{3}$ -fachen der Phasenspannung, d. h. dem 0,866-fachen der Netzversorgungsspannung.

Die Ausgangsspannung des Frequenzumrichters kann die Motorspannung nicht erreichen, wenn die volle sinusförmige Kurvenform benötigt wird. Die Ausgangsspannung liegt dann um ca. 13 % unter der Motorspannung. Die zusätzlich benötigte Spannung kann jedoch erzielt werden, indem man die Anzahl der Pulse reduziert, wenn die Frequenz etwa 45 Hz übersteigt. Nachteilig an dieser Methode ist, dass die Spannung sprunghaft schwankt und der Motorstrom so instabil wird. Verringert man die Anzahl der Pulse, steigt zudem der Oberschwingungsanteil an den Frequenzumrichterausgängen. Dies führt zu höheren Verlusten im Motor.

Alternativ können zur Behebung dieses Problems andere Referenzspannungen anstelle der drei Sinuskurven verwendet werden. Diese Spannungen könnten jede Kurvenform haben, z. B. trapez- oder stufenförmig.

Beispielsweise nutzt eine gemeinsame Referenzspannung die dritte Oberschwingung der Sinuskurve. Erhöhen der Amplitude der Sinuskurve um 15,5 % und Hinzufügen der dritten Oberschwingung erzeugt ein Schaltmodus für die Halbleiter des Wechselrichters, durch den die Ausgangsspannung des Frequenzumrichters steigt. Die Steuerkarte überträgt alle Steuerwerte des Wechselrichters. Die verschiedenen Sollwertsignale zum Festlegen der Schaltzeiten sind in einer Tabelle im Speicher hinterlegt und werden dann entsprechend dem Sollwert ausgelesen und verarbeitet.

Es gibt weitere Möglichkeiten, die Aktivierungs- und Deaktivierungszeiten der Halbleiter zu bestimmen und zu optimieren. Die Steuerverfahren Danfoss VVC und VVCplus basieren auf Mikroprozessorberechnungen, die die optimalen Schaltzeiten für die Halbleiter der Wechselrichter bestimmen.

Die Softwarevorgaben zum Berechnen der Schaltzeiten sind herstellerspezifisch und werden in dieser Abhandlung nicht beschrieben.

Wenn strengere Anforderungen für Drehzahleinstellbereich und sanfte Laufeigenschaften gelten, müssen die PWM-Schaltzeiten durch einen zusätzlichen digitalen IC bestimmt werden (und nicht durch den Mikroprozessor), beispielsweise die PWM-Schaltzeiten durch einen ASIC (Application Specific Integrated Circuit). In diesem Bauteil enthält das bewährte Wissen des Herstellers. Inzwischen sind Mikroprozessoren auch für andere Steuerungsaufgaben verantwortlich.

### 2.6.3 Asynchrone PWM

Die folgenden zwei Abschnitte beschreiben zwei asynchrone PWM-Methoden:

- SFAVM (Statorfluss-orientierte asynchrone Vektormodulation)
- 60° AVM (asynchrone Vektormodulation)

Beide Verfahren können Amplitude und Winkel der Wechselrichterspannung stufenweise ändern.

#### 2.6.3.1 SFAVM

SFAVM (Statorfluss-orientierte asynchrone Vektormodulation) ist ein Raumvektor-Modulationsverfahren, das die Wechselrichterspannung nach Belieben stufenweise innerhalb der Schaltzeit (d. h. asynchron) verändern kann. Der Hauptaufgabe dieser Modulation besteht darin, den Statorfluss über den ganzen Statorspannungsbereich auf optimalem Niveau zu halten, um so Drehmoment-Rippel zu verhindern. Verglichen mit der Netzversorgung führt eine „Standard“-PWM-Versorgung zu Veränderungen bei der Stator-Flux-Vektor-Amplitude und dem Flux-Winkel. Diese Veränderungen beeinträchtigen das Drehfeld (Drehmoment) im Motorluftspalt und führen zu Drehmoment-Rippel. Die Auswirkungen durch Abweichung der Amplitude sind vernachlässigbar und lassen sich durch Erhöhen der Taktfrequenz verringern. Die Abweichung beim Winkel hängt von der Schaltsequenz ab und kann zu höherem Drehmoment-Rippel führen. Infolgedessen muss das System die Schaltsequenz so berechnen, dass die Abweichung beim Vektorwinkel minimal ist.

Jeder Wechselrichter-Zweig eines Dreiphasen-PWM-Wechselrichters kann zwei Zustände einnehmen (ON oder OFF); siehe Abb. 2.15 „Wechselrichter-Schaltzustände“. Die drei Schalter ergeben acht mögliche Schaltkombinationen. Daraus resultieren wiederum acht diskrete Spannungsvektoren am Wechselrichterausgang oder der Statorwicklung des angeschlossenen Motors. Wie unten dargestellt bilden diese Vektoren (100, 110, 010, 011, 001, 101) die Eckpunkte eines Hexagons, wobei 000 und 111 Nullvektoren sind.

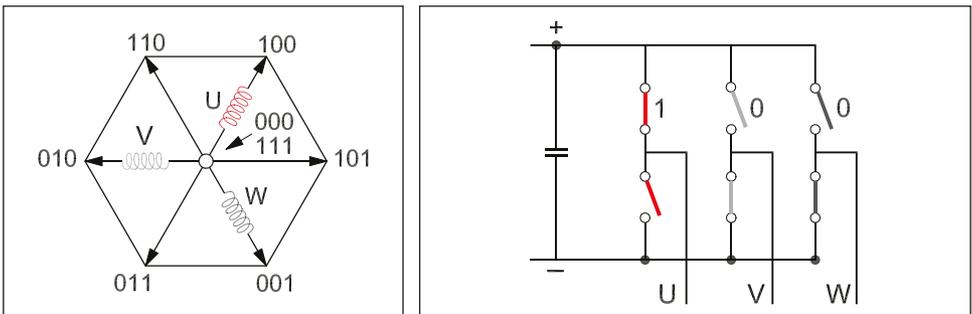


Abb. 2.15 Wechselrichter-Schaltzustände

Mit den Schalterkombinationen 000 und 111 ergibt sich dasselbe Potenzial an allen drei Ausgangsklemmen des Wechselrichters. Dieses ist entweder das positive oder negative Potenzial vom Zwischenkreis; siehe Abb. 2.15 „Wechselrichter-Schaltzustände“. Für den Motor ist das gleichbedeutend mit einem Kurzschluss an der Klemme, sodass eine Spannung von 0 V an den Motorwicklungen anliegt.

### Erzeugung der Motorspannung

Der stationäre Zustand beinhaltet das Steuern des Maschinenspannungsvektors  $U_{\omega t}$  auf einem kreisförmigen Pfad. Die Länge des Spannungsvektors ergibt sich aus der Motorspannung und der Drehzahl und entspricht der Betriebsfrequenz zu einem bestimmten Zeitpunkt. Die Motorspannung wird durch kurzes Pulsieren benachbarter Vektoren generiert, um einen Mittelwert zu erzeugen.

Einige Merkmale der SFAVM-Methode von Danfoss sind im Folgenden erläutert:

- Amplitude und Winkel des Spannungsvektors können in Abhängigkeit des Festsollwerts gesteuert werden, ohne dass es zu Abweichungen kommt.
- Der Startpunkt für eine Schaltsequenz ist immer 000 oder 111. Dadurch kann jeder Spannungsvektor drei Schaltzustände einnehmen.
- Der Spannungsvektor wird als Mittelwert kurzer Pulse benachbarter Vektoren sowie der Nullvektoren 000 und 111 erzeugt.

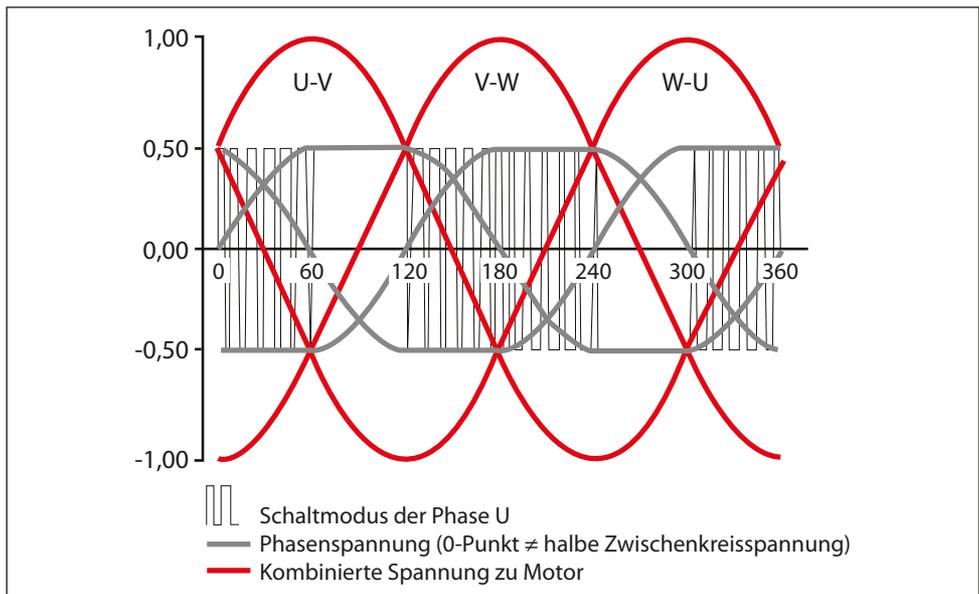


Abb. 2.16 Mit synchroner 60° PWM wird die volle Ausgangsspannung direkt erzeugt

SFAVM bietet eine Verbindung zwischen Steuerungssystem und Stromkreis des Wechselrichters. Die Modulation ist synchron zur Steuerfrequenz des Reglers und asynchron zur Grundfrequenz der Motorspannung. Die Synchronisierung zwischen Steuerung und Modulation ist ein Vorteil für Hochleistungsregelungen (beispielsweise Spannungsvektor oder Flux-Vektor), da das Steuerungssystem den Spannungsvektor direkt und ohne Einschränkungen steuern kann. Amplitude, Winkel und Winkelgeschwindigkeit sind steuerbar. Um die Online-Berechnungszeit deutlich zu verringern, sind Spannungswerte für verschiedene Winkel in einer Tabelle aufgeführt. Abb. 2.17 „Ausgangsspannung (Motor) – (Phase-Phase)“ zeigt die Motorspannung bei voller Drehzahl.

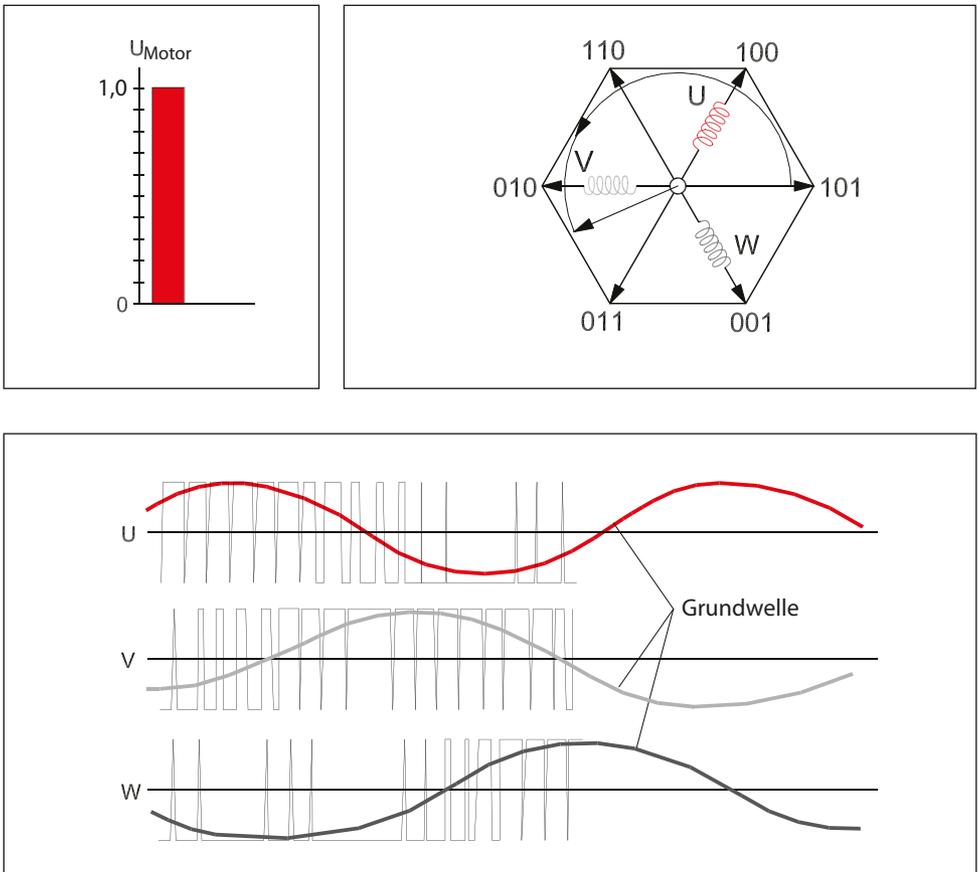


Abb. 2.17 Ausgangsspannung (Motor) – (Phase-Phase)

### 2.6.3.2 60° AVM

60° AVM (asynchrone Vektormodulation) bestimmt die Spannungsvektoren - im Gegensatz zur SFAVM - wie folgt:

- In einer Schaltperiode wird nur ein Nullvektor (000 oder 111) verwendet
- Ein Nullvektor (000 oder 111) wird nicht immer als Startpunkt für eine Schaltsequenz genutzt
- Eine Phase des Wechselrichters wird für 1/6 der Zeitspanne (60°) konstant gehalten. Der Schaltzustand (0 oder 1) bleibt während dieser Zeit derselbe. In den beiden anderen Phasen erfolgt das Schalten wie üblich

Abb. 2.18 „Schaltsequenz der Methoden 60° AVM und SFAVM für verschiedene 60°-Intervalle“ und Abb. 2.19 „Schaltsequenz der Methoden 60° AVM und SFAVM für mehrere Perioden“ vergleichen die Schaltsequenz der Methode 60° AVM mit der SFAVM-Methode für ein kurzes Intervall (Abb. 2.18) und mehrere Perioden (Abb. 2.19).

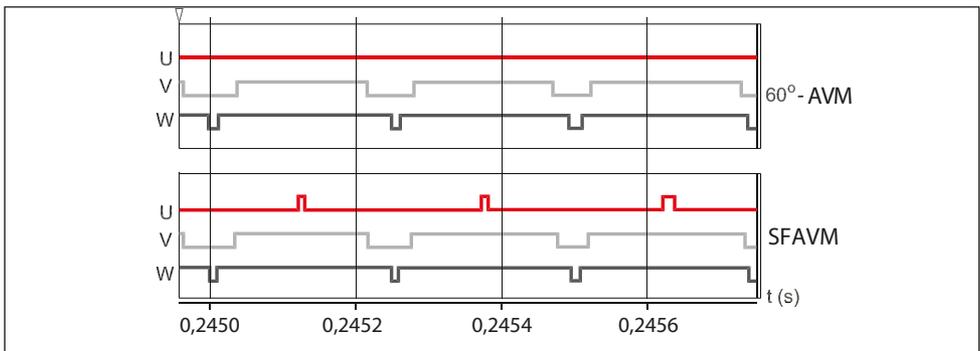


Abb. 2.18 Schaltsequenz der Methoden 60° AVM und SFAVM für verschiedene 60°-Intervalle

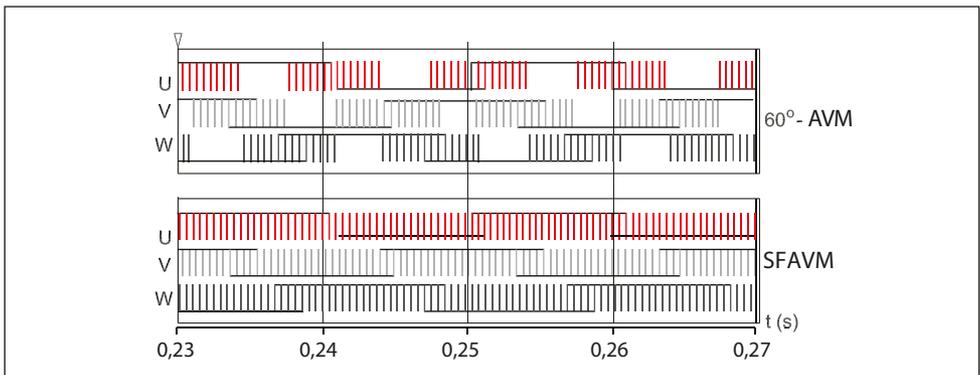


Abb. 2.19 Schaltsequenz der Methoden 60° AVM und SFAVM für mehrere Perioden

## 2.7 Steuerkreis und Methoden

Der Steuerkreis (oder die Steuerkarte) ist das vierte Hauptelement des Frequenzumrichters. Die drei bisher besprochenen Hardwarekomponenten (Gleichrichter, Zwischenkreis und Wechselrichter) basieren unabhängig vom Hersteller fast immer auf den gleichen Grundlagen und Komponenten. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um Standardkomponenten, die fast immer dieselben externen Hersteller zuliefern. Im Gegensatz dazu ist der Steuerkreis die Komponente, in die der Hersteller von Frequenzumrichtern sein gesamtes Wissen einbringt.

Generell hat der Steuerkreis vier Hauptaufgaben:

- Steuern der Halbleiter im Frequenzumrichter. Die Halbleiter bestimmen die antizipierte dynamische Kennlinie oder Genauigkeit
- Austausch der Daten zwischen Frequenzumrichter und Peripherie (SPS, Geber)
- Messen, Erkennen und Anzeige von Fehlern, Bedingungen und Warnungen
- Schutzfunktion für Frequenzumrichter und Motor

Die Mikroprozessortechnologie mit Single- oder Dual-Prozessoren macht es möglich, die Steuerkreisgeschwindigkeiten mithilfe von festen, im Speicher gespeicherten Pulsmustern zu steigern. Infolgedessen reduziert sich die Zahl der erforderlichen Berechnungen erheblich. Bei dieser Art von Steuerung ist der Prozessor in den Frequenzumrichter integriert und kann immer das optimale Pulsmuster für jede Betriebsphase bestimmen. Es gibt verschiedene Steuermethoden zur Bestimmung der dynamischen Kennlinie und Antwortzeit bei Veränderungen des Sollwerts oder Drehmoments sowie Positioniergenauigkeit der Motorwelle.

Die Grundfunktionen eines Frequenzumrichters lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Drehen und Positionieren des Rotors
- Drehzahlregelung mit oder ohne Rückführung vom Drehstrommotor
- Drehmomentregelung mit oder ohne Rückführung vom Drehstrommotor
- Überwachung und Signalisierung von Betriebszuständen

Bei der Einteilung der verschiedenen Spannungszwischenkreis-Umrichter auf dem Markt (nach Steuerart) lassen sich mindestens sechs verschiedenen Typen unterscheiden:

- Einfach (skalar) ohne Kompensationssteuerung
- Skalar mit Kompensationssteuerung
- Raumvektormodulation
- Flux-Regelung (feldbezogen) ohne Rückführung
- Flux-Regelung (feldbezogen) mit Rückführung
- Servo-gesteuerte Systeme

Abb. 2.20 „Drehzahlregelung“ und Abb. 2.21 „Drehmomentregelung“ zeigen diese Einteilung. Hier bezieht sich die Antwortzeit darauf, wie lange der Frequenzumrichter benötigt, um einen entsprechenden Signalwechsel an seinem Ausgang zu berechnen, wenn es einen Signalwechsel am Eingang gibt. Die Motorkennlinie bestimmt, wie lange es dauert, bis eine Antwort an der Motorwelle registriert wird, wenn ein Signal am Eingang des Frequenzumrichters anliegt.

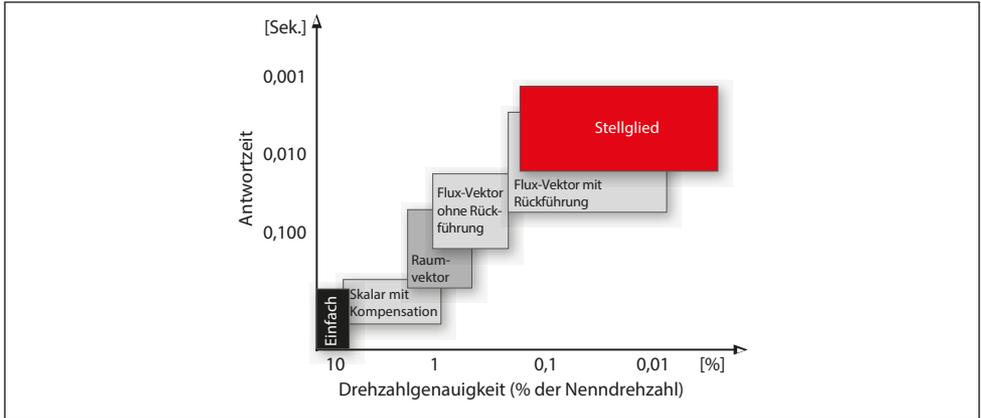


Abb. 2.20 Leistungsklassifizierung bei der Drehzahlregelung

Die Motornenndrehzahl ist die Basis für die Festlegung der Drehzahlgenauigkeit. In den meisten Ländern beträgt die Motornenndrehzahl 50 Hz, in den USA 60 Hz.

Frequenzumrichter lassen sich nach ihrem Preis-/Leistungsverhältnis einstufen. Das bedeutet, dass ein Frequenzumrichter mit einer einfachen Steuermethode für eine einfache Aufgabe ein besseres Preis-/Leistungsverhältnis bietet, als ein Frequenzumrichter mit feldbezogener Regelung für diese einfache Aufgabe.

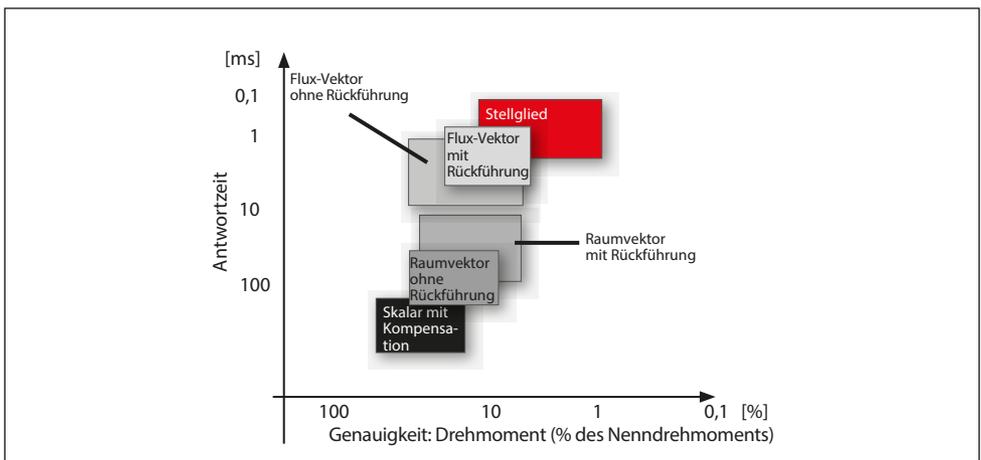


Abb. 2.21 Klassifizierung bei Drehmomentregelung

Die zu den einzelnen Frequenzumrichtertypen gehörenden Drehzahleinstellbereiche sind etwa wie folgt:

- |                                       |          |
|---------------------------------------|----------|
| • Einfach (skalar) ohne Kompensation  | 1:15     |
| • Skalar mit Kompensation             | 1:25     |
| • Raumvektor                          | 1:100(0) |
| • Flux (feldbezogen) ohne Rückführung | 1:1000   |
| • Flux (feldbezogen) mit Rückführung  | 1:10.000 |
| • Servoregler                         | 1:10.000 |

Somit ist folgende Einteilung der Drehmomentregelung möglich:

- Die Reaktionszeit lässt sich auf dieselbe Weise wie für die Drehzahlregelung definieren
- Die Genauigkeit wird in Abhängigkeit des Nenndrehmoments des Motors bestimmt

Bitte beachten Sie, dass Frequenzumrichter mit einfacher Steuermethode nicht für die Steuerung des Motordrehmoments mit oder ohne Rückführung geeignet oder verwendbar sind.

### 2.7.1 Einfache Steuermethode

Diese Steuerung wird heutzutage nur noch selten eingesetzt. Generell besteht die Steuerung aus einem festen Verhältnis zwischen gewünschter Motordrehzahl und Motorspannung. Auch wenn sich das Modell mehr oder weniger verfeinern lässt, bietet es jedoch folgende wesentlichen Nachteile:

- Instabile Motordrehzahl
- Schwieriger Motorstart
- Kein Motorschutz

Der einzige Vorteil einer einfachen Steuerung könnte der niedrige Preis sein. Da jedoch die Basiskomponenten für eine Motorüberwachung relativ kostengünstig sind, nutzen nur noch sehr wenige Hersteller diese Methode.

## 2.7.2 Skalare Steuerung mit Kompensation

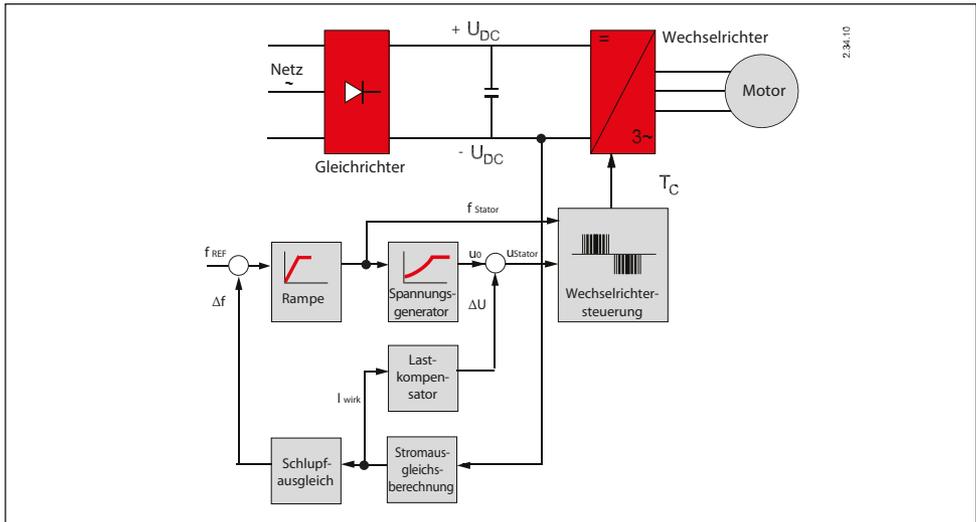


Abb. 2.22 Skalärer Frequenzumrichter mit Kompensation

Im Vergleich zu einer einfachen Steuerung verfügen Frequenzumrichter mit Kompensation über drei neue Steuerfunktionsblöcke; siehe Abb. 2.22 „Skalärer Frequenzumrichter mit Kompensation“.

Der Lastkompensator nutzt die Strommessung, um die zusätzliche Spannung ( $\Delta U$ ) zu berechnen, die zur Kompensation der Last an der Motorwelle erforderlich ist.

Der Strom wird normalerweise mithilfe eines Widerstands (Shunt) im Zwischenkreis gemessen. Dies basiert auf der Annahme, dass die Leistung im Zwischenkreis der vom Motor aufgenommenen Leistung entspricht. Bei Kombination mehrerer aktiver Schaltpositionen können diese dazu dienen, die gesamte Phasenstrom-Information zu rekonstruieren.

### Basisfunktionen:

- Spannung/Frequenz [U/f]-Steuerung mit Last- und Schlupfausgleich
- Regelung von Spannungsamplitude und -frequenz

### Typische Wellenleistung:

- Drehzahlstellbereich 1:25
- Drehzahlgenauigkeit  $\pm 1$  % der Nennfrequenz
- Beschleunigungsmoment 40-90 % des Nenndrehmoments
- Antwortzeit Drehzahländerung 200-500 ms
- Antwortzeit Drehmomentregelung Nicht verfügbar

**Typische Funktionen:**

- Verbesserte Steuereigenschaften im Vergleich zu einfacher Skalarsteuerung
- Ausgelegt für plötzliche Lastveränderungen
- Kein externes Istwertsignal erforderlich
- Resonanzprobleme können nicht gelöst werden
- Keine Drehmomentregelung
- Probleme bei der Steuerung von Hochleistungsmotoren
- Probleme bei Laständerungen im unteren Drehzahlbereich

### 2.7.3 Raumvektor mit und ohne Rückführung

Die Raumvektormethode ist mit und ohne externe Motordrehzahlrückführung verfügbar. Wie unten gezeigt, erhielt die Steuerung eine Funktion zur Polarttransformation des Motorstroms hinzu (in den für Magnetisierung und Drehmoment-erzeugenden Strom zuständigen Komponenten). Der Spannungswinkel ( $\theta$ ) wird zusätzlich zu Spannung (U) und Frequenz (f) reguliert.

**Basisfunktionen:**

- Spannungsvektorsteuerung in Bezug auf Kennwerte im stationären Zustand (statisch)

**Typische Funktionen:**

- Verbesserte dynamische Leistung im Vergleich zur Skalarsteuerung
- Sehr gute Stabilität bei plötzlichen Laständerungen (verglichen mit Skalar plus Kompensation)
- Betrieb an der Stromgrenze
- Möglichkeit aktiver Resonanzdämpfung
- Möglichkeit der Drehmomentregelung mit und ohne Rückführung
- Hohes Anlauf- und Haltemoment
- Probleme während schneller Reversierung verglichen mit Flux-Vektor
- Keine „schnelle“ Stromregelung

#### 2.7.3.1 Raumvektor (ohne Rückführung)

Bei Einsatz eines Raumvektors ohne externe Rückführung berechnet die Steuerungssoftware Drehzahl und Position basierend auf den Informationen über gemessenen Motorstrom und -frequenz (siehe Beispiel in Abb. 2.26 „Grundprinzipien der Danfoss VVCplus-Steuerung“).

**Basisfunktionen:**

- Spannungsvektorsteuerung in Bezug auf Kennwerte im stationären Zustand (statisch)

**Typische Wellenleistung:**

- Drehzahleinstellbereich 1:100
- Drehzahlgenauigkeit (stationärer Zustand)  $\pm 0,5\%$  der Nennfrequenz
- Beschleunigungsmoment 80-130 % des Nenndrehmoments
- Antwortzeit Drehzahländerung 50-300 ms
- Antwortzeit Drehmomentänderung 20-50 ms

**2.7.3.2 Raumvektor (mit Rückführung)**

Bei der Raumvektormethode mit Rückführung ist ein Drehgeber oder anderer Sensor zum Erkennen der Motordrehzahl oder -position erforderlich. Die Steuerungssoftware, die Auflösung der Rückführung und die Drehgeberauflösung bestimmen die Genauigkeit der Motorsteuerung.

**Typische Wellenleistung:**

- Drehzahleinstellbereich 1 : 1000 bis 10.000
- Drehzahlgenauigkeit (stationärer Zustand) Abhängig von der Auflösung der verwendeten Rückführung
- Beschleunigungsmoment 80 bis 130 % des Nenndrehmoments
- Antwortzeit Drehzahländerung 50 bis 300 ms
- Antwortzeit Drehmomentänderung 20 bis 50 ms

## 2.7.4 Flux-Vektor-Regelung mit und ohne Rückführung

Die Flux-Vektor-Regelung wird oft auch als feldbezogene Regelung bezeichnet. Die oben erwähnten Regelmethode steuern den Magnetfluss des Motors über den Stator. Bei der feldbezogenen Regelung wird der Rotorfluss direkt gesteuert. In diesem Kontext erfolgt die Steuerung der folgenden Motorvariablen:

- Drehzahl
- Drehmoment

Nach Eingabe der Nennwerte für den Motor lässt sich die erforderliche Spannung und der Winkel zum Sicherstellen der optimalen Motormagnetisierung mithilfe eines Magnetflussmodells bestimmen. Der gemessene Motorstrom wird in einen aus dem Drehmoment erzeugten Strom und einen Magnetisierungsstrom umgewandelt. Ein interner PID-Regler regelt die Drehzahl, wobei der Istwert auf Basis des gemessenen Motorstroms geschätzt wird.

### 2.7.4.1 Flux-Vektor (ohne Rückführung)

Die Flux-Regelung erfordert genaue Informationen über den Zustand, die Temperatur und die Rotorposition des Motors. Eine Regelung ohne Rückführung ist eine Herausforderung, wenn der Motorzustand simuliert wird. Das Erreichen der optimalen Leistung kann schwierig sein, vor allem bei niedrigen Motordrehzahlen.

#### **Typische Wellenleistung:**

- |  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| • Drehzahleinstellbereich                      | 1:50                              |
| • Drehzahlgenauigkeit<br>(stationärer Zustand) | $\pm 0,5 \%$ der Nennfrequenz     |
| • Beschleunigungsmoment                        | 100 bis 150 % des Nenndrehmoments |
| • Antwortzeit Drehzahländerung                 | 50 bis 200 ms                     |
| • Antwortzeit<br>Drehmomentänderung            | 0,5 bis 5 ms                      |

### 2.7.4.2 Flux-Vektor (mit Rückführung)

Die Flux-Vektor-Methode mit Rückführung erfordert einen Drehgeber oder anderen Sensor an der Motorwelle. Die Steuerungssoftware und die Auflösung der Rückführung bestimmen die Genauigkeit der Motorsteuerung.

Die Steuerung funktioniert genauso wie bei der Regelung ohne Rückführung. In diesem Fall wird die Drehzahl jedoch aus den Drehgebersignalen berechnet und nicht geschätzt. Abb. 2.23 „Flux-Vektor-Regelung mit Rückführung“ zeigt die Flux-Vektor-Regelung.

#### Typische Wellenleistung:

- Drehzahleinstellbereich 1:1000 bis 10.000
- Drehzahlgenauigkeit (stationärer Zustand) Abhängig vom verwendeten Istwertsignal (Drehgeber)
- Beschleunigungsmoment 100 bis 150 % des Nenn Drehmoments
- Antwortzeit Drehzahlregelung 5,00 bis 50 ms
- Antwortzeit Drehmomentregelung 0,50 bis 5 ms

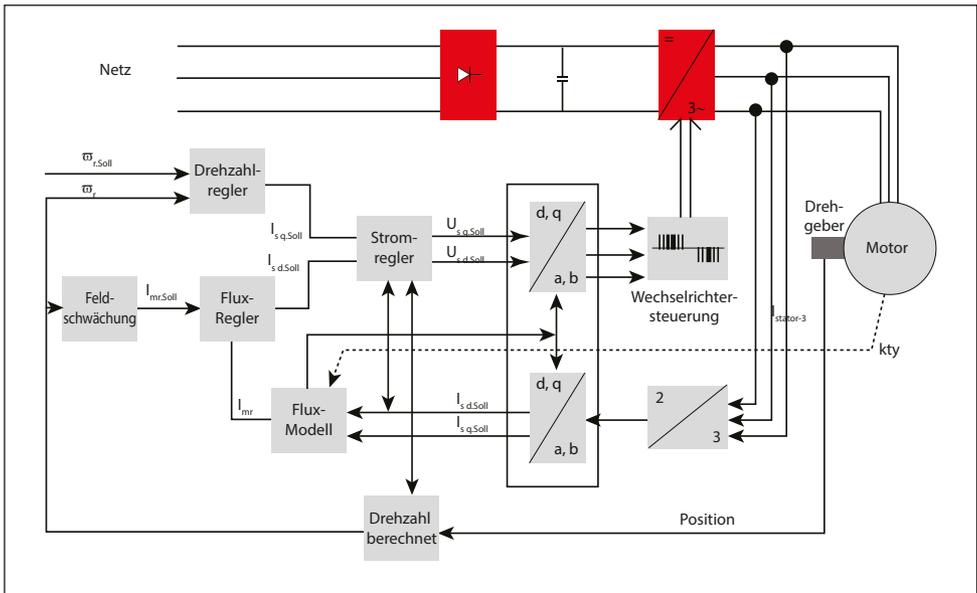


Abb. 2.23 Flux-Vektor-Regelung mit Rückführung

### 2.7.5 Servoantriebssteuerung

Die Regelmethode mit Servoumrichtern wird hier nicht im Detail behandelt. Es ist eine weitere häufig eingesetzte Methode, die der Flux-Regelung mit Rückführung sehr ähnlich ist. Um aber eine hochdynamische Antwort sicherzustellen, können die Leistungskomponenten und Hardware ausgebaut werden, sodass diese zwei, drei oder vier Mal im Frequenzumrichter zu finden sind, um verfügbaren Strom und Drehmoment sicherzustellen.

### 2.7.6. Schlussfolgerungen zur Steuerung

Alle Steuermethoden laufen hauptsächlich in der Software ab. Je dynamischer die Motorsteuerung sein muss, desto komplexer ist der erforderliche Steueralgorithmus.

Ein ähnliches Prinzip gilt für die anfängliche Verwendung eines Frequenzumrichters. Die anfängliche Verwendung eines einfachen Frequenzumrichters erfordert kein großes Maß an Programmierung. In den meisten Fällen reicht lediglich die Eingabe der Motordaten. Dagegen ist bei Anwendungen, die eine Flux-Vektor-Regelung erfordern oder bei kritischen Anwendungen wie Hubanwendungen, gleich von Beginn an eine komplexere Programmierung erforderlich.

Da die Steuerung hauptsächlich Aufgabe der Software ist, haben viele Hersteller verschiedene Steuermethoden in ihre Geräte eingebaut, beispielsweise U/f, Raumvektor oder feldbezogene Regelung. Parameter müssen von einer zur anderen Steuermethode wechseln, beispielsweise von der Raumvektorsteuerung zur Flux-Vektor-Methode. Mithilfe von Pop-up-Menüs können die Bediener die für die jeweilige Steuermethode erforderlichen Parameter einstellen, um so die Anforderungen der Anwendung zu erfüllen.

## 2.8 Danfoss-Steuerverfahren

Abb. 2.24 „Grundprinzipien der aktuellen Standard-Frequenzumrichter von Danfoss“ zeigt eine allgemeine Übersicht der Standardstromsteuerungsverfahren für die Frequenzumrichter von Danfoss.

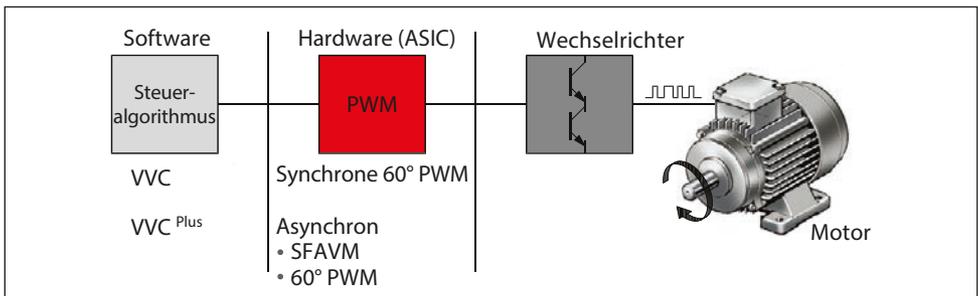


Abb. 2.24 Grundprinzipien der aktuellen Standard-Frequenzumrichter von Danfoss

Die Berechnung der PWM-Schaltmodi erfolgt für den Wechselrichter mithilfe ausgewählter Steueralgorithmen. Eine U/f-Steuerung eignet sich für Anwendungen mit

- Sondermotoren (z. B. Verschiebeankelektor)
- Parallel geschalteten Motoren.

Bei beiden oben erwähnten Anwendungen ist keine Kompensation des Motors erforderlich. Das Steuerverfahren VVCplus steuert Amplitude und Winkel des Spannungsvektors ebenso wie die Frequenz direkt. Das Herzstück dieser Methode ist ein einfaches, aber dennoch robustes Motormodell. Die entsprechende Steuerethode heißt Voltage Vector Control (VVC).

#### **Einige der integrierten Funktionen sind:**

- Verbesserte dynamische Eigenschaften im Niedrigdrehzahlbereich (0-10 Hz)
- Verbesserte Motormagnetisierung
- Drehzahlregelbereich: 1:100 ohne Rückführung
- Drehzahlgenauigkeit:  $\pm 0,5$  % der Nenndrehzahl ohne Rückführung
- Aktive Resonanzdämpfung
- Drehmomentregelung
- Betrieb an der Motorstromgrenze

### **2.8.1 Steuerverfahren Danfoss VVCplus**

Das Steuerverfahren Danfoss VVCplus nutzt eine Vektormodulationsmethode für konstante Spannungszwischenkreis-PWM-Wechselrichter. Abhängig vom Steuerungsbedarf der Anwendung nutzt es dafür ein vereinfachtes Motorersatzschaltbild (d. h. ohne Berücksichtigung der Eisen-, Kupfer- und Luftströmungsverluste) oder das vollständige und komplexe Ersatzschaltbild.

#### **Beispiel:**

Für die Steuerung einer einfachen Lüfter- oder Pumpenanwendung kommt ein vereinfachtes Motordiagramm zum Einsatz. Eine dynamische Hubanwendung mit Flux-Vektor-Regelung erfordert jedoch ein komplexes Motorersatzschaltbild, das alle Verluste im Steueralgorithmus berücksichtigt.

Die Berechnung des Wechselrichter-Schaltmodus erfolgt entweder mit dem Verfahren SFAVM oder  $60^\circ$  AVM, um das pulsierende Drehmoment im Luftspalt möglichst klein zu halten. Der Anwender kann das bevorzugte Betriebsverfahren auswählen; alternativ wählt die Steuerung automatisch ein Verfahren anhand der Kühlkörpertemperatur. Wenn die Temperatur unter  $75^\circ\text{C}$  liegt, kommt das SFAVM-Verfahren zur Steuerung zum Einsatz; bei Temperaturen über  $75^\circ\text{C}$  das  $60^\circ$  AVM-Verfahren.

**Der Steueralgorithmus berücksichtigt zwei Betriebsbedingungen:**

- Keine Last (Leerlauf); siehe Abb. 2.25a „Motor-Ersatzschaltbild ‘keine Last’“. Im Leerlauf wirkt keine Last auf die Motorwelle. Bei Fördereinrichtungen bedeutet „keine Last“, dass sie keine Produkte transportieren. Es wird einfach angenommen, dass der vom Motor aufgenommene Strom nur für Magnetisierung und Ausgleich der Verluste benötigt wird. Der Wirkstrom wird nahe Null angenommen und die Spannung ohne Last ( $U_L$ ) anhand der Motordaten (Nennspannung, Strom, Frequenz, Drehzahl) bestimmt.

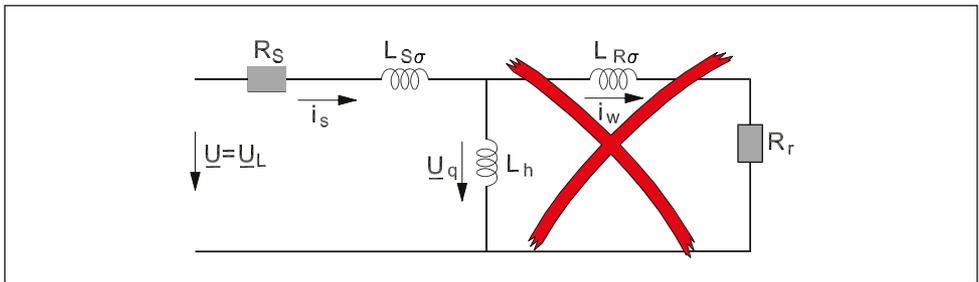


Abb. 2.25a Motor-Ersatzschaltbild „keine Last“

- Lastzustand**

Die Motorwelle steht unter Last, d. h. bei obiger Anwendung, Produkte werden transportiert, wie Abb. 2.25b „Motor-Ersatzschaltbild ‘unter Last’“ zeigt.

Der Motor nimmt mehr Strom auf, wenn er unter Last ist. Um das erforderlich Drehmoment zu erzeugen, benötigt er den Wirkstrom ( $I_W$ ). Verluste im Motor (hauptsächlich im Niedrigdrehzahlbereich) sind auszugleichen. Der Motor erhält eine lastabhängige Zusatzspannung ( $U_{Comp}$ ):

$$U = U_{LOAD} = U_L + U_{Comp}$$

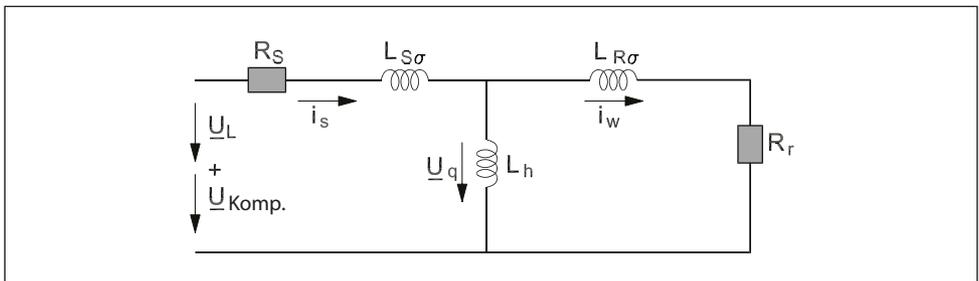


Abb. 2.25b Motor-Ersatzschaltbild „unter Last“

Die zusätzliche Spannung  $U_{Comp}$  wird mithilfe der Ströme, die unter den zwei oben genannten Bedingungen (mit und ohne Last) auftreten, sowie des Drehzahlbereichs bestimmt: niedrige oder hohe Drehzahl. Die Bestimmung von Spannungswert und Drehzahlbereich erfolgt dann anhand der Nennmotordaten. Das untenstehende Blockschaltbild zeigt das Steuerverfahren:

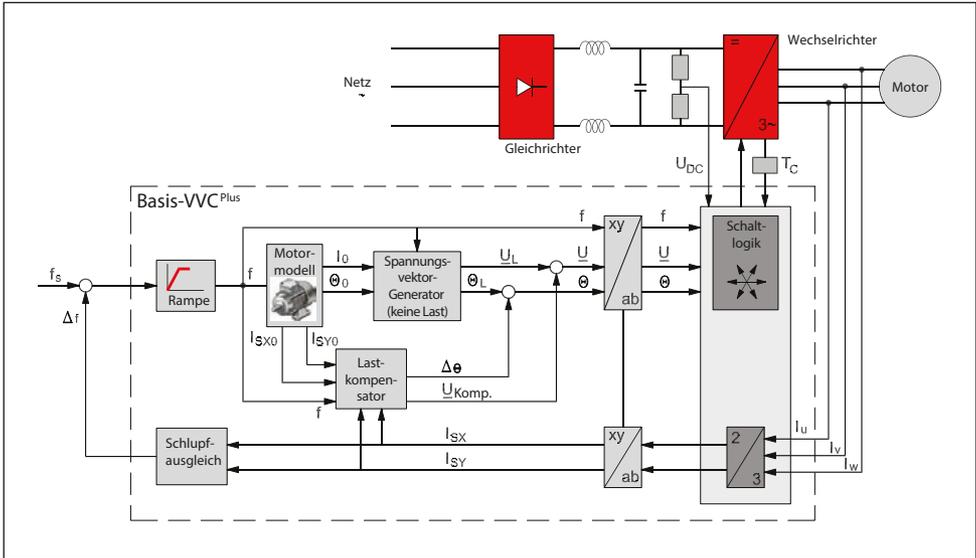


Abb. 2.26 Grundprinzipien der VVCplus-Steuerung

Wie Abb. 2.26 „Grundprinzipien der VVCplus-Steuerung“ zeigt, berechnet das Motormodell die lastlosen Sollwerte (Ströme und Winkel) für den Lastkompensator ( $I_{SX}$ ,  $I_{SY}$ ) und den Spannungsvektorgenerator ( $I_0$ ,  $\theta_0$ ).

Der Spannungsvektorgenerator berechnet die lastlose Spannung ( $U_L$ ) und den Winkel ( $\theta_L$ ) des Spannungsvektors anhand des lastlosen Stroms, des Statorwiderstands und der Statorinduktivität. Anhand der gemessenen Motorströme ( $I_u$ ,  $I_v$  und  $I_w$ ) erfolgt die Berechnung der Komponenten mit Blindstrom ( $I_{SY}$ ) und Wirkstrom ( $I_{SX}$ ).

Basierend auf den gemessenen Strömen ( $I_{SX0}$ ,  $I_{SY0}$ ,  $I_{SX}$ ,  $I_{SY}$ ) und den aktuellen Werten des Spannungsvektors schätzt der Lastkompensator das Luftspalt-Drehmoment und berechnet, wie viel zusätzliche Spannung ( $U_{Comp}$ ) erforderlich ist, um die Magnetfeldstärke auf dem Sollwert zu halten. Er korrigiert dann die Winkelabweichung ( $\Delta\theta$ ), die er aufgrund der Last an der Motorwelle erwartet. Der Ausgangsspannungsvektor wird in polarer Form (p) dargestellt. Dadurch ist eine direkte Übermodulation und Anbindung an den PWM ASIC möglich.

Eine Spannungsvektorsteuerung ist besonders bei niedrigen Drehzahlen sinnvoll. Sie kann hier die dynamische Leistung des Antriebs durch eine entsprechende Steuerung des Spannungsvektorwinkels deutlich verbessern (verglichen mit einer U/f-Steuerung). Außerdem verbessert sich das Verhalten im stationären Zustand, da das Steuerungssystem das Last-Drehmoment anhand der Vektorwerte für Spannung und Strom besser abschätzen kann, als es anhand der Skalarsignale (Amplitudenwerte) möglich wäre.

$f$	Interne Frequenz
$f_s$	Eingestellter Frequenz-Sollwert
$\Delta f$	Berechnete Schlupffrequenz
$I_{SX}$	Blindstrom (berechnet)
$I_{SY}$	Wirkstrom (berechnet)
$I_{SX0}, I_{SY0}$	Leerlaufstrom der x/y-Achse (berechnet)
$I_U, I_V, I_W$	Gemessener Phasenstrom (U, V, W)
$R_s$	Statorwiderstand
$R_r$	Rotorwiderstand
$\theta$	Winkel des Spannungsvektors
$\theta_0$	Thetawert „Leerlauf“
$\Delta\theta$	Lastabhängiger Winkelausgleich (Kompensation)
$T_c$	Kühlkörpertemperatur (gemessen)
$U_{DC}$	Zwischenkreisspannung
$U_L$	Leerlaufspannungsvektor
$U_s$	Statorspannungsvektor
$U_{Comp}$	Lastabhängiger Spannungsausgleich
$U$	Motorversorgungsspannung
$X_h$	Reaktanz
$X_1$	Statorstreureaktanz
$X_2$	Rotorstreureaktanz
$\omega_s$	Statorfrequenz
$L_s$	Statorinduktivität
$L_{Ss}$	Statorstreuinduktivität
$L_{Rs}$	Rotorstreuinduktivität

Tabelle 2.3 Erklärung der in den folgenden Abbildungen verwendeten Symbole:

Abb. 2.23 Flux-Vektor-Regelung mit Rückführung

Abb. 2.24 Grundprinzipien der aktuellen Standard-Frequenzumrichter von Danfoss

Abb. 2.25a Motor-Ersatzschaltbild „keine Last“

Abb. 2.25b Motor-Ersatzschaltbild „unter Last“

Abb. 2.26 Grundprinzipien der VVCplus-Steuerung



## 2.9 Normen und Gesetzgebung

Wie bei anderen Produkten auch gibt es überall auf der Welt gesetzliche Vorschriften und technische Normen, um einen sicheren Betrieb des Frequenzumrichters zu gewährleisten. Die Gesetze erlässt die gesetzgebende Gewalt der nationalen oder lokalen Regierung und sie können sich natürlich in den verschiedenen Ländern unterscheiden. Die Einhaltung der Gesetze ist jedoch verpflichtend. Gesetze sind politische Dokumente, meist frei von spezifischen technischen Details – diese Details findet man in den Normen.

Experten der relevanten Normierungsgremien (z. B. die Internationale Elektrotechnische Kommission, kurz: IEC, oder das Europäischen Komitee für elektrotechnische Normung, kurz: CENELEC) verfassen diese Normen. Sie haben die Aufgabe, eine gemeinsame technische Grundlage zu schaffen, um eine Kooperation auf dem Markt zu ermöglichen. IEC-Normen akzeptieren üblicherweise die meisten Länder, und lokale Normen (EN, NEMA) werden darauf abgestimmt.

Hersteller müssen die Übereinstimmung mit der lokalen Gesetzgebung nachweisen und dokumentieren, indem sie die Normen erfüllen. Ansonsten dürfen sie ihr Produkt nicht auf dem lokalen Markt verkaufen. Auf dem Produkt wird diese Einhaltung durch Symbole angegeben.

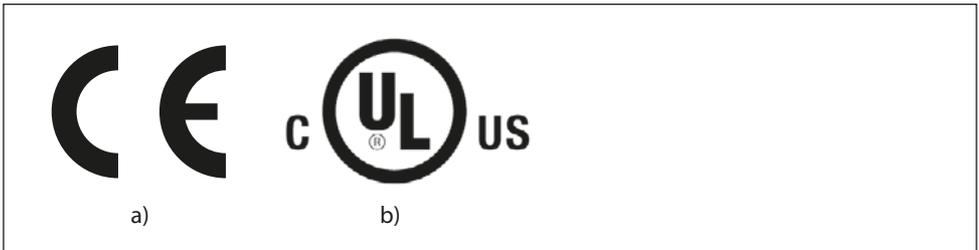


Abb. 2.28 CE-Kennzeichen (a) und ul-Listing (b)

In Europa gibt beispielsweise die Konformitätserklärung an, welche Normen der Hersteller angewandt und welche Gesetze er eingehalten hat. Zum besseren Verständnis erwähnt diese Abhandlung verschiedene für Frequenzumrichter geltende Normen und einige relevante Gesetze.

## 3 Frequenzumrichter und Motoren

Die vorangegangenen Kapitel haben Motor und Frequenzumrichter separat betrachtet. Dieses Kapitel beschreibt nun die Interaktion zwischen den zwei Komponenten.

### 3.1 Grundprinzipien

#### 3.1.1 U/f-Betrieb und Feldschwächung

Die technischen Hauptmerkmale eines Motors stehen auf seinem Typenschild. Diese Informationen sind sehr wichtig für den Elektroinstallateur, da die Werte für Spannung, Frequenz und Vollaststrom angegeben sind. Wichtige Informationen für die mechanische Auslegung fehlen jedoch. Diese stehen im Datenblatt oder dem Katalog bzw. können direkt beim Motorhersteller erfragt werden.

Diese Informationen für die mechanische Auslegung sind u. a. Daten zum Starten des Motors und zum intermittierenden Betrieb sowie das verfügbare Drehmoment an der Motorwelle. Das Drehmoment an der Welle kann ganz einfach aus den Typenschilddaten berechnet werden.

Bei gegebener Last gilt Folgendes:

$$M = \frac{P \times 9550}{n} = \frac{\eta \times \sqrt{3} \times U \times I \times \cos \varphi \times 9550}{f \times \frac{60}{p}} = \frac{k \times U \times I}{f}$$

Daraus ergibt sich die folgende Beziehung:

$$M \sim \frac{U}{f} \times I$$

Diese Beziehung nutzen Spannungszwischenkreis-Umrichter, die ein festes Verhältnis zwischen Spannung (U) und Frequenz (f) halten. Das konstante Verhältnis (U/f) bestimmt die magnetische Flussdichte ( $\Phi$ ) des Motors und ergibt sich aus den Motor-Typenschilddaten (z. B. 400 V/50 Hz = 8 [V/Hz]). Die konstante Flussdichte garantiert ein optimales Drehmoment des Motors. Idealerweise bedeutet das Verhältnis 8 [V/Hz], dass bei jeder Veränderung der Ausgangsfrequenz um 1 Hz eine Veränderung von 8 V in der Ausgangsspannung auftritt. Diese Steuerung der Ausgangswerte des Frequenzumrichters heißt „U/f“-Steuerung.

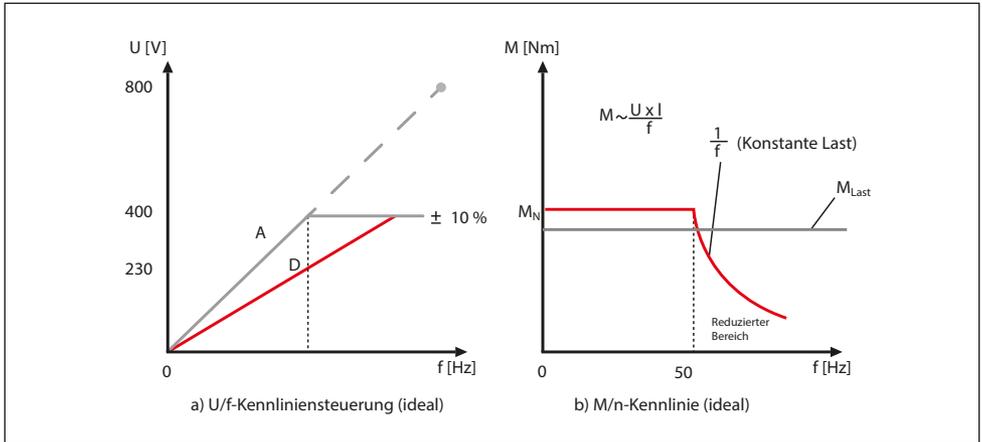


Abb. 3.1 U/f-Kennlinie und Drehmoment

Abb. 3.1 „U/f-Kennlinie und Drehmoment“ zeigt die ideale Kurve der U/f-Kennlinie für einen 50-Hz-Motor mit Sternschaltung. Bis 50 Hz legt der Frequenzumrichter ein konstantes U/f-Verhältnis an den Motor an, was ein konstantes Drehmoment beim Motor hervorruft.

Bei einem Motorbetrieb mit 100 Hz sollte die Ausgangsspannung für ein konstantes U/f-Verhältnis idealerweise auf 800 V erhöht werden (gestrichelte Linie in Abb. 3.1a „U/f-Kennlinie und Drehmoment“). Da diese hohe Spannung jedoch kritisch für die Motorisolierung ist, kommt diese Strategie im Allgemeinen nicht zur Anwendung. Typischerweise ist die Ausgangsspannung des Frequenzumrichters auf den Wert des Eingangs (z. B.  $400 \pm 10\%$ ) beschränkt.

Das bedeutet, dass der Frequenzumrichter nur bis zu einer bestimmten Frequenz ein konstantes U/f-Verhältnis beibehalten kann. Oberhalb dieser Frequenz kann er die Frequenz, aber nicht die Spannung weiter aufrechterhalten. Da dies das U/f-Verhältnis beeinflusst, sinkt die magnetische Flussdichte. Deswegen heißt dieser Drehzahlbereich auch Feldschwächung (Abb. 3.1b U/f-Kennlinie und Drehmoment). Das abgeschwächte Magnetfeld führt zu einem geringeren maximalen Drehmoment. Das Nenndrehmoment sinkt um  $1/f$ , das Stillstands-Drehmoment um  $1/f^2$ .

Bitte beachten Sie, dass es sich bei den abgebildeten Kurven um Idealkurven handelt, die eine gewisse Kompensation erfordern. Dies wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

### 3.1.2 87-Hz-Kennlinien

Typischerweise werden Asynchronmotoren, die mit Frequenzumrichtern arbeiten, auf die Nennspannung des Netzes hin konfiguriert. Das bedeutet, dass ein 400 V/230 V-Motor in Sternschaltung angeschlossen ist, wenn er von einem 400 V-Frequenzumrichter betrieben wird. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, entsteht bei einem 50 Hz-Motor eine Feldschwächung, wenn eine weitere Spannungserhöhung nicht mehr möglich ist. Um den Drehzahlbereich zu erweitern, ist eine Motorkonfiguration mit Dreieckschaltung möglich.

#### Beispiel

Motor: 15 kW, 400 V/230 V Y/ $\Delta$ , 27,5A/48, 7A, 50 Hz

Bei 50 Hz beträgt die Leistung in Stern- und Dreieckschaltung aufgrund der unterschiedlichen Netzspannung 15 kW, da diese zu unterschiedlichen Motorströmen führt.

$$P_Y (50 \text{ Hz}) = \sqrt{3} \times 400 \text{ V} \times 27,5 \text{ A} \times \cos \varphi \times \eta = 14,92 \text{ [kW]}$$

$$P_{\Delta} (50 \text{ Hz}) = \sqrt{3} \times 230 \text{ V} \times 48,70 \text{ A} \times \cos \varphi \times \eta = 15,19 \text{ [kW]}$$

Abb. 3.2, „87-Hz-Kennlinie“ zeigt, dass der Motor mit Dreieckschaltung im Gegensatz zur Startkonfiguration mit einem konstanten U/f-Verhältnis bis 230 Volt läuft. Wenn der Frequenzumrichter jedoch von einer 400-Volt-Quelle gespeist wird, kann er das konstante U/f-Verhältnis und den hohen Strom tatsächlich bis 400 Volt halten,

$$P_{\Delta} (87 \text{ Hz}) = \sqrt{3} \times 400 \text{ V} \times 48,70 \text{ A} \times \cos \varphi \times \eta = 26,42 \text{ [kW]}$$

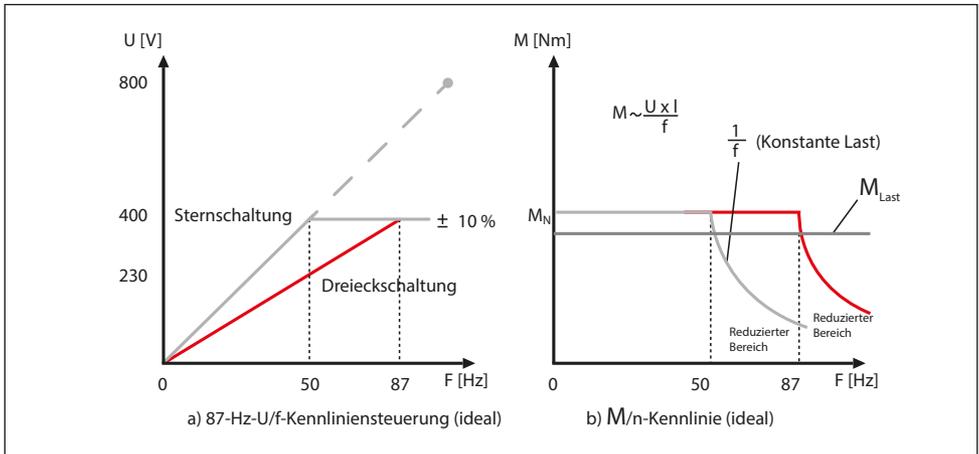


Abb. 3.2 87-Hz-Kennlinie

Hier liegt also die Nennflussdichte ( $\Phi$ ) bis 400 Volt vor, sogar wenn der Motor für 230 Volt ausgelegt ist. Mit dieser höheren Spannung lässt sich die maximale Frequenz mit Nennfluss auf 87 Hz erhöhen.

**Folgendes ist die Voraussetzung für die Umsetzung dieses Wissens:**

- Der gewählte Frequenzumrichter muss in der Lage sein, den höheren Dreiecksstrom (48,70 A) problemlos zu bewältigen.
- Der Motor muss so gewickelt sein, dass er die erforderliche, vom Frequenzumrichter gelieferte Betriebsspannung (normalerweise höher bei Dreieckschaltung) aushält (d. h., bei 690-V-Versorgungsspannung und 690-V-Frequenzumrichter ist diese Anwendung nur mit einer Motorwicklung für 690 V/400 V  $\Delta$  möglich).
- Das Drehmoment an der Motorwelle bleibt für beide Konfigurationen für bis zu 50 Hz gleich. Über 50 Hz beginnt für einen Motor mit Sternschaltung der Bereich der Feldschwächung. Bei Dreieckschaltung beginnt dieser Bereich erst bei ca. 90 Hz. Unter Berücksichtigung der Frequenzumrichter-Toleranz von  $\pm 10\%$  beginnt der Bereich der Feldschwächung bei 55 Hz bzw. 95 Hz. Das Drehmoment nimmt ab, weil die Motorspannung nicht weiter steigt.

**Diese höhere Motorleistungsnutzung bietet folgende Vorteile:**

- Ein bestehender Frequenzumrichter kann mit einem größeren Drehzahlregelbereich betrieben werden.
- Der Einsatz eines Motors mit geringerer Nennleistung ist möglich. Dieser Motor kann ein niedrigeres Trägheitsmoment haben, was eine höhere Dynamik erlaubt. Dies verbessert die dynamischen Eigenschaften des Systems.

Bitte beachten Sie, dass der Betrieb eines 400 V/230 V  $\Delta$ -Motors in Dreieckschaltung bei 400 V mit einem Frequenzumrichter nur aufgrund der höheren Speisefrequenz von 87 Hz möglich ist. Betrieb direkt am 400-V-/50-Hz-Netz zerstört den Motor!

### 3.1.3 Betrieb an der Stromgrenze

Wie bereits erläutert, zeigt die Beziehung zwischen Drehmoment an der Motorwelle und Motorstrom, dass das Drehmoment unter Kontrolle ist, wenn der Motorstrom geregelt werden kann. Wenn eine Anwendung zeitweise ein maximales Drehmoment benötigt, ist es wesentlich, dass der Frequenzumrichter für einen kontinuierlichen Betriebsstrom bis zur Stromgrenze ausgelegt ist, und dass diese nicht überschritten wird bzw. der Frequenzumrichter abschaltet.

Es gibt verschiedene Strategien, um den Betrieb des Frequenzumrichters an der Stromgrenze zu ermöglichen. Die am häufigsten verwendete Strategie ist die Verringerung des Drehmoments bei Verringerung der Drehzahl. Wie nachfolgende Erläuterungen zeigen werden, kann es jedoch Anwendungen geben, bei denen diese Strategie nicht anwendbar ist oder sogar zu größeren Problemen führt.

## 3.2 Ausgleich

Bisher war es schwierig, einen Frequenzumrichter auf einen Motor abzustimmen, da einige Ausgleichsfunktionen wie „Startspannung“, „Startausgleich“ und „Schlupfausgleich“ in der Praxis schwer umzusetzen sind.

Dieser Ausgleich ist erforderlich, weil Motorkennlinien nicht linear sind. Ein Asynchronmotor erfordert beispielsweise einen höheren Strom bei niedriger Drehzahl, um Magnetisierungsstrom und Drehmoment erzeugenden Strom für den Motor bereitzustellen. Die integrierten Kompensationsparameter garantieren eine optimale Magnetisierung und dadurch ein maximales Drehmoment:

- Während des Anlaufens
- Bei niedrigen Drehzahlen
- Im Bereich bis zur Nenndrehzahl des Motors

In der neusten Generation Frequenzumrichter stellt das Gerät automatisch die erforderlichen Kompensationsparameter ein, sobald die Programmierung der Nennwerte des Motors im Frequenzumrichter abgeschlossen ist. Dazu gehören Spannung, Frequenz, Strom und Drehzahl. Dies gilt für ca. 80 % der Standardanwendungen wie Fördereinrichtungen und Zentrifugalpumpen. Normalerweise lassen sich diese Kompensationseinstellungen zur Feinabstimmung manuell ändern, wenn dies für Anwendungen wie Hubeinrichtungen oder Verdrängungspumpen erforderlich ist.

### 3.2.1 Lastunabhängiger Startausgleich

Eine Möglichkeit ist die Erhöhung der Ausgangsspannung im niedrigen Drehzahlbereich durch das manuelle Einstellen einer zusätzlichen Spannung, auch Startspannung genannt.

**Beispiel**

Ein Motor, der viel kleiner als die empfohlene Motorgröße für einen Frequenzumrichter ist, erfordert ggf. eine zusätzliche, manuell einstellbare Spannungsanhebung, um die statische Reibung zu überwinden oder eine optimale Magnetisierung im niedrigen Drehzahlbereich zu garantieren.

Wenn verschiedene Motoren nur von einem Frequenzumrichter (Parallelbetrieb) gesteuert werden, ist es empfehlenswert, den lastunabhängigen Ausgleich zu deaktivieren.

Die lastunabhängige Ergänzung (Startspannung) garantiert ein optimales Drehmoment während des Startens.

### 3.2.2 Lastabhängiger Startausgleich

Die lastabhängige Spannungsergänzung (Start- und SchlupfAusgleich) wird über eine Strommessung (Wirkstrom) bestimmt.

Dieser Ausgleich heißt normalerweise  $I \times R$ -Ausgleich, Boost, Drehmomentanhebung oder – bei Danfoss – Startausgleich.

Diese Regelung erreicht ihre Grenzen, wenn Störungen schlecht zu messen sind und die Last sehr variabel ist (beispielsweise bei Motoren mit Veränderungen im Betrieb beim Wicklungswiderstand von bis zu 25 % zwischen heiß und kalt).

Die Spannungserhöhung kann zu verschiedenen Ergebnissen führen. Ohne Last kann es zur Sättigung des Motorflusses kommen. Bei Sättigung fließt ein höherer Blindstrom, der zur Erwärmung des Motors führt. Wenn der Motor unter Last betrieben wird, entwickelt er aufgrund des schwachen Hauptflusses wenig Drehmoment und stoppt eventuell.

Im Allgemeinen entsprechen die echten U/f- und M/n-Kennlinien der Darstellung in Abb. 3.3 „Echte U/f- und M/n-Kennlinien“.

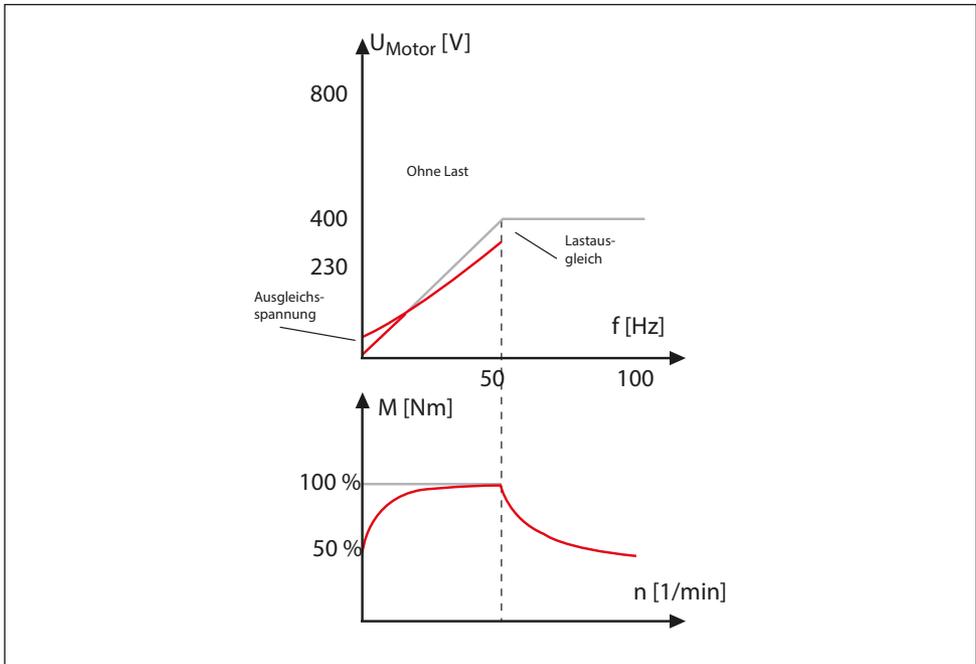


Abb. 3.3 Echte  $U/f$ - und  $M/n$ -Kennlinien

Abb. 3.3 zeigt, wie der Motor bei niedrigen Drehzahlen als Ausgleich zusätzliche Spannung erhält.

### 3.2.3 Lastausgleich

Das System passt die Motorspannung unter Last an, wobei sich die Last aus dem gemessenen Motorstrom bestimmen lässt.

Die Ausgangsspannung erfährt eine Spannungsanhebung, die den Einfluss des DC-Widerstands der Motorwicklungen bei niedrigen Frequenzen und während des Starts effektiv kompensiert. Ein Anstieg der Ausgangsspannung führt zu einer Über-Magnetisierung des Motors. Das erhöht die thermische Belastung des Motors, sodass eine Verringerung des Drehmoments zu erwarten ist. Die Motorspannung wird im Leerlauf verringert.

### 3.2.4. Schlupausgleich

Der Schlupf eines Asynchronmotors ist lastabhängig und entspricht typischerweise etwa 5 % der Nennzahl. Bei einem zweipoligen Motor liegt der Schlupf bei etwa 150 U/min.

Der Schlupf liegt jedoch bei ca. 50 % der erforderlichen Drehzahl, wenn der Frequenzumrichter einen Motor bei 300 U/min steuert (10 % der Nennsynchrondrehzahl von 3000 U/min).

Muss der Frequenzumrichter den Motor auf 5 % der Nenndrehzahl herunter regeln, wird der Motor unter Last letztlich absterben. Diese Lastabhängigkeit ist jedoch nicht erwünscht. Der Frequenzumrichter kann diesen Schlupf vollständig ausgleichen, indem er eine effektive Messung des Wirkstroms zum Motor durchführt. Der Frequenzumrichter gleicht dann den Schlupf aus, indem er die Frequenz gemäß tatsächlich gemessenem Strom erhöht. Diese Funktion heißt aktiver Schlupf ausgleich.

Der Frequenzumrichter berechnet die Schlupffrequenz ( $f_{\text{Schlupf}}$ ) und den Magnetisierungs- oder Leerlauf-Strom ( $I_{\phi}$ ) aus den Motordaten. Die Schlupffrequenz wird linear in Bezug auf den Wirkstrom (Differenz zwischen Leerlauf- und Ist-Strom) skaliert.

### Beispiel

Ein 4-Pol-Motor mit einer Nenndrehzahl von 1455 U/min hat eine Schlupffrequenz von 1,5 Hz und einen Magnetisierungsstrom von ca. 12 A.

Mit einem Laststrom von 27,5 A und 50 Hz erzeugt der Frequenzumrichter eine Frequenz von ca. 51,5 Hz. Mit einem Laststrom zwischen  $I_{\phi}$  (12 A) und  $I_N$  (27,5 A) wird die Frequenz entsprechend zwischen 0 und 1,5 Hz eingestellt.

Wie das Beispiel zeigt, wird die Werkseinstellung des Schlupf ausgleichs häufig so skaliert, dass der Motor bei theoretischer Synchrondrehzahl läuft. In diesem Fall: 51,5 Hz - 1,5 Hz = 50 Hz.

## 3.2.5 Kompensation bei PM-Motor und SynRM

Bei Permanentmagnetmotoren sind Start- und Schlupf ausgleich irrelevant, andere Parameter dagegen wesentlich.

Das Magnetisierungsprofil unterscheidet sich natürlich vom Asynchronmotor; aber zusätzlich gibt es noch andere wichtige Daten und Kompensationen:

- Motornenndrehzahl und -frequenz
- Gegen-EMK
- Max. Drehzahl, bevor die Gegen-EMK den Frequenzumrichter schädigt
- Feldschwächung
- Für die Steuerung relevante dynamische Details

Für SynRM-Motoren sind wieder andere Parameter wesentlich, z. B.:

- Statorwiderstand
- d- und q-Achsen-Induktivitäten
- Sättigungsinduktivitäten und
- Sättigungsgrenze

### 3.3 Automatische Motoranpassung (AMA)

Motordaten auf dem Motor-Typenschild oder im Datenblatt des Motorherstellers enthalten Angaben für einen bestimmten Motorenbereich oder eine bestimmte Auslegung, aber diese Werte beziehen sich nur selten auf einen einzelnen Motor. Aufgrund von Abweichungen bei Motorherstellung und Einbau sind diese Motordaten nicht immer genau genug, um einen optimalen Betrieb sicherzustellen.

Wie bereits geschildert, gibt es auch hier verschiedene Ausgleichswerte, die einzustellen sind. Bei modernen Frequenzumrichtern kann diese Feinabstimmung auf den vorliegenden Motor und die Installation kompliziert und zeitaufwendig sein.

Um Installation und Inbetriebnahme zu erleichtern, setzen sich automatische Konfigurationsfunktionen wie die AMA (Automatische Motor Anpassung) von Danfoss zunehmend durch. Diese Funktionen messen beispielsweise Statorwiderstand und Induktivität. Zudem berücksichtigen sie Auswirkungen der Kabellänge zwischen Frequenzumrichter und Motor.

Die für verschiedene Motortypen erforderlichen Parameter unterscheiden sich bei wichtigen Details. Die Gegen-EMK ist beispielsweise wesentlich für PM-Motoren, dagegen ist der Sättigungspunkt für SynRM-Motoren wichtig. Aus diesem Grund sind verschiedene AMA-Funktionen erforderlich. Beachten Sie, dass nicht alle Frequenzumrichter die AMA-Funktion für alle Motortypen unterstützen.

#### **Generell kommen zwei verschiedene AMA-Funktionen zum Einsatz:**

##### **Dynamisch**

Die Funktion beschleunigt den Motor auf eine bestimmte Drehzahl, um Messungen durchzuführen. Für den „Identifikationsbetrieb“ muss der Motor normalerweise von der Last/Maschine abgekoppelt sein.

##### **Statisch**

Die Motormessung erfolgt im Stillstand. Das bedeutet, dass es in diesem Fall nicht notwendig ist, den Motor von der Maschine zu trennen. Es ist jedoch wichtig, dass die Motorwelle während der Messung nicht durch externe Einflüsse rotiert.

### 3.4 Betrieb

#### 3.4.1 Motordrehzahlsteuerung

Die Ausgangsfrequenz des Frequenzumrichters – und damit die Motordrehzahl – steuern ein oder mehrere Signale (0-10 V; 4-20 mA oder Spannungspulse) als Drehzahlsollwert. Wenn der Drehzahlsollwert steigt, steigt die Motordrehzahl, und der vertikale Teil der Drehmomentkennlinie verschiebt sich nach rechts (Abb. 3.4, „Beziehung zwischen Sollwertsignal und Motordrehzahl“).

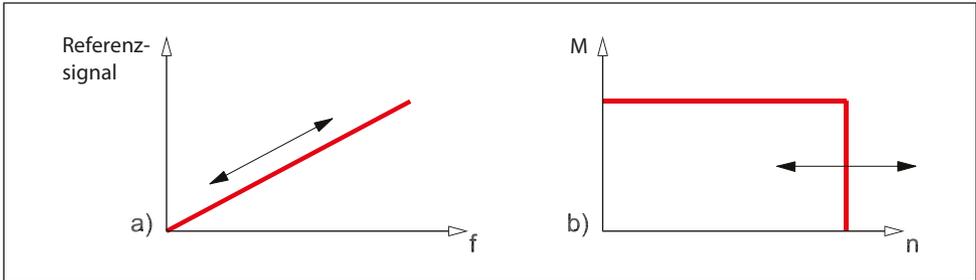


Abb. 3.4 Beziehung zwischen Sollwertsignal und Drehmoment des Motors

Wenn das Last-Drehmoment unter dem Motordrehmoment liegt, erreicht die Drehzahl den erforderlichen Wert. Wie Abb. 3.5 „Beziehung zwischen Stromgrenze und Überstromgrenze“ zeigt, schneidet die Last-Drehmoment-Kurve die Motordrehmoment-Kurve im vertikalen Teil (bei Punkt A). Wenn sich der Schnitt im horizontalen Teil (Punkt B) befindet, kann die Motordrehzahl den entsprechenden Wert nicht kontinuierlich überschreiten. Der Frequenzumrichter erlaubt ein kurzes Überschreiten der Stromgrenze ohne Abschaltung (Punkt C), aber die Zeitspanne dieses Überschreitens muss begrenzt werden.

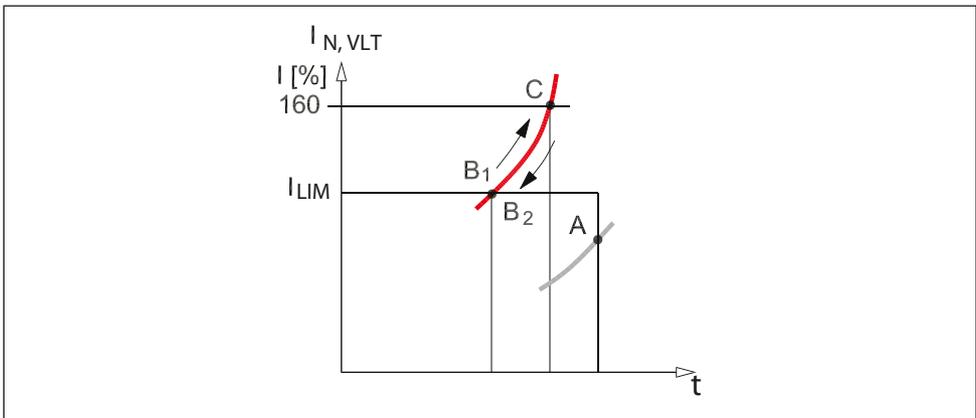


Abb. 3.5 Beziehung zwischen Stromgrenze und Überstromgrenze

### 3.4.2 Reversierung

Die Phasenfolge der Versorgungsspannung bestimmt die Drehrichtung der Asynchron- und Synchronmotoren. Sind zwei der Phasen vertauscht, ändert sich die Drehrichtung des Motors (der Motor läuft rückwärts).

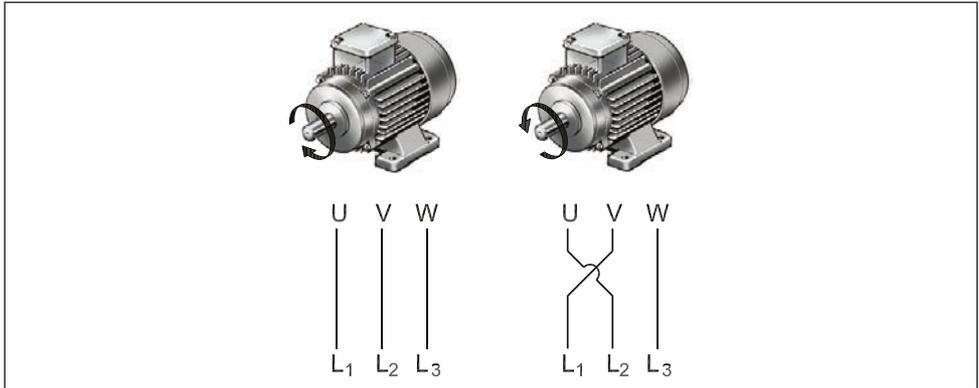


Abb. 3.6 Bei vertauschter Phasenfolge ändert sich die Drehrichtung des Motors

Ein Frequenzumrichter kann den Motor durch elektronische Änderung der Phasenfolge reversieren. Reversierung wird entweder durch einen negativen Drehzahlswert oder ein digitales Eingangssignal erreicht. Wenn der Motor eine bestimmte Drehrichtung für die Erstinbetriebnahme benötigt, ist es wichtig, die Werkseinstellungen des Frequenzumrichters zu kennen.

Da ein Frequenzumrichter den Motorstrom auf den Nennwert begrenzt, lässt sich ein von einem Frequenzumrichter gesteuerter Motor häufiger reversieren als ein Motor mit direktem Anschluss ans Netz.

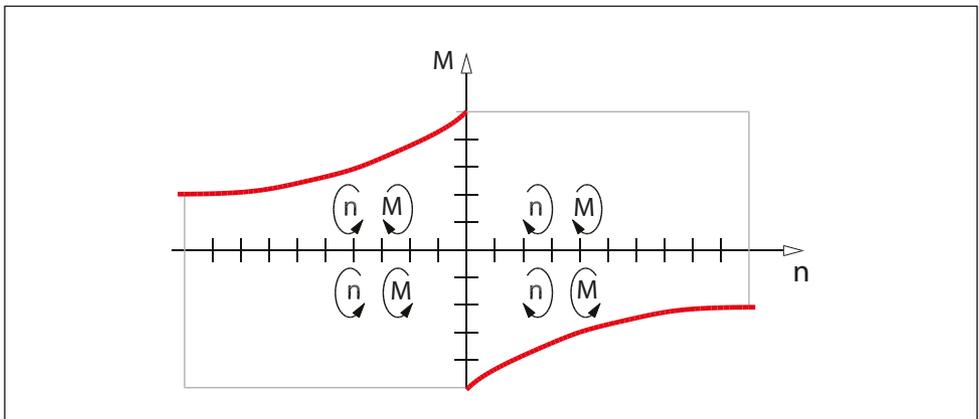


Abb. 3.7 Bremsmoment des Frequenzumrichters während der Reversierung

### 3.4.3. Rampen für Beschleunigung und Verzögerung (Auf- und Ab-Rampe)

Bei vielen Anwendungen darf die Änderung der Drehzahl aus verschiedenen Gründen nicht zu schnell erfolgen, sondern eher langsam oder mit sanften Übergängen. Dafür verfügen moderne Frequenzumrichter über Rampenfunktionen. Diese Rampen lassen sich je nach Anforderung anpassen und stellen sicher, dass der Drehzahlsollwert nur in festgelegten Grenzen steigen oder sinken kann.

Die Beschleunigungsrampe (Rampe-auf) zeigt, wie schnell die Drehzahl steigt. Sie wird als Beschleunigungszeit  $t_{Bes}$  angegeben und legt fest, wie schnell der Motor die neue Drehzahl erreichen soll. Diese Rampen beziehen sich meist auf die Motornennfrequenz. Eine Beschleunigungsrampe von 5 Sekunden bedeutet beispielsweise, dass ein Frequenzumrichter 5 Sekunden vom Stillstand bis zur Motornennfrequenz ( $f_n = 50$  Hz) benötigt.

Alternativ beziehen einige Hersteller die Beschleunigung und Verzögerung auf Werte zwischen minimaler und maximaler Frequenz.

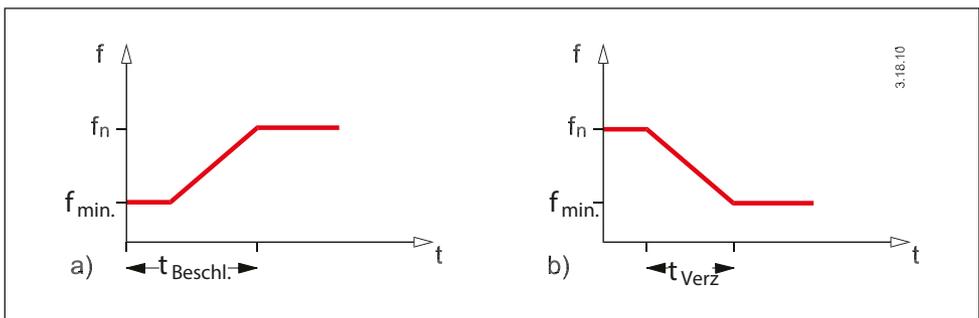


Abb. 3.8 Beschleunigungs- und Verzögerungszeiten

Die Verzögerungsrampe (Rampe-ab) zeigt, wie schnell die Drehzahl sinkt. Sie wird als Verzögerungszeit  $t_{Verz}$  angegeben und legt fest, wie schnell der Motor die neue verringerte Drehzahl erreichen soll.

Im Betrieb lässt sich direkt von Beschleunigung auf Verzögerung umschalten, weil der Motor immer der Ausgangsfrequenz des Wechselrichters folgt.

Für Rampenzeiten können so niedrige Werte eingestellt sein, dass der Motor der vorgegebenen Drehzahl manchmal nicht folgen kann. Dies führt zu einem Anstieg des Motorstroms, bis die Stromgrenze erreicht ist. Bei kurzen Rampe-ab-Zeiten kann die Spannung im Zwischenkreis so stark steigen, dass der Schutzkreis den Frequenzumrichter stoppt.

Ist die Trägheit von Motorwelle und Last bekannt, lassen sich optimale Beschleunigungs- und Verzögerungszeiten berechnen.

$$t_{\text{Bes}} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(M_{\text{Bes}} - M_{\text{Reib}}) \times 9,55}$$

$$t_{\text{Verz}} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(M_{\text{Bes}} + M_{\text{Reib}}) \times 9,55}$$

- $J$  ist das Trägheitsmoment von Motorwelle und Last [kgm<sup>2</sup>].  
 $M_{\text{Reib}}$  ist das Reibungsmoment des Systems [Nm].  
 $M_{\text{Bes}}$  ist das Überschussmoment für die Beschleunigung [s].  
 $M_{\text{Verz}}$  ist das Bremsmoment, das beim Verringern des Drehzahlsollwerts auftritt [s].  
 $n_1$  und  $n_2$  sind die Drehzahlen bei den Frequenzen  $f_1$  und  $f_2$  [min<sup>-1</sup>].

Wenn der Frequenzumrichter kurzzeitig ein Überlastmoment zulässt, wird für Beschleunigungs- und Verzögerungsdrehmoment das Motorenndrehmoment  $M$  eingestellt. In der Praxis sind Beschleunigungs- und Verzögerungszeit normalerweise gleich.

### Beispiel

Für eine Maschine gelten die folgenden Spezifikationen:

$$\begin{aligned}
 J &= 0,042 \text{ kgm}^2 \\
 n_1 &= 500 \text{ min}^{-1} \\
 n_2 &= 1000 \text{ min}^{-1} \\
 M_{\text{Reib}} &= 0,05 \times T_N \\
 M_N &= 27 \text{ Nm}
 \end{aligned}$$

Theoretische Beschleunigungszeiten lassen sich wie folgt berechnen:

$$t_{\text{Bes}} = J \times \frac{n_2 - n_1}{(M_{\text{Bes}} - M_{\text{Reib}}) \times 9,55} = \frac{0,042 \times (1000 - 500)}{(27,0 - (0,05 \times 27,0)) \times 9,55}$$

Die Rampenfunktionen stellen sicher, dass es keine abrupte Änderung der Drehzahl gibt, vorausgesetzt, die berechnete Beschleunigung ist beim Frequenzumrichter eingestellt.

Das ist wesentlich für viele Anwendungen, u. a.

- um sicherzustellen, dass Flaschen auf einem Flaschenförderer nicht umfallen
- zum Vermeiden von Wasserschlag in Pumpenanlagen
- für Komfort auf Rolltreppen oder in Aufzügen

In den meisten Fällen kommen lineare Rampen zum Einsatz. Für verschiedene Anwendungen sind jedoch unterschiedliche Kennlinien möglich, beispielsweise eine „S“- oder „S<sup>2</sup>“-Rampe.

Mit der „S“-Rampe sind die Übergänge zum Stillstand besonders sanft.

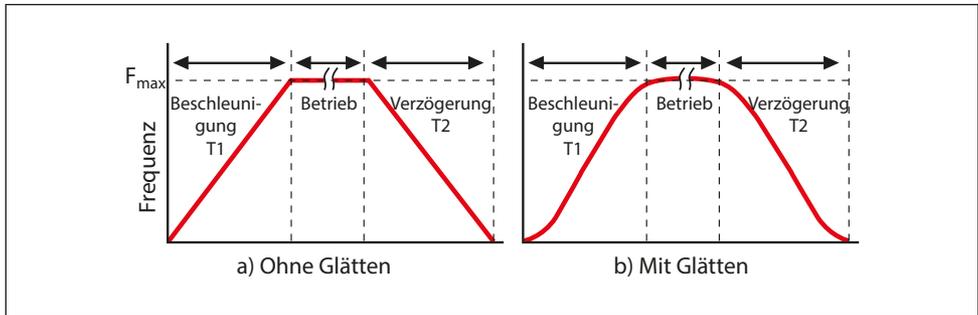


Abb. 3.9 Lineare Rampe (a) und S-Rampe (b)

### 3.4.4 Motordrehmomentregelung

Das Motordrehmoment ist ein weiterer Parameter, der wichtig für die Anwendung ist. Abb. 3.5 zeigt, dass sich die Stromgrenze des Motors kurzzeitig überschreiten lässt.

Das Drehmoment ist die Basis für die Rotation oder zur Bewegung der Last. Gründe für eine Regelung des Drehmoments sind u. a.

- Begrenzung des Drehmoments, um Schäden an der Maschine usw. zu verhindern
- Regelung des Drehmoments, um die Last auf mehrere Motoren zu verteilen.

Ist eine Anwendung plötzlich überlastet und der Frequenzumrichter für Überlast ausgelegt, kann die Maschine eine bestimmte Zeit lang im Überlastmodus arbeiten. Dieses exzessive Drehmoment kann jedoch die Lebensdauer der Maschine reduzieren oder sogar ihren Ausfall bedeuten. Aus diesem Grund lassen sich viele Frequenzumrichter so programmieren, dass sie bei Überlast eine Warnung ausgeben und das Drehmoment unter bestimmten Bedingungen beschränken.

Wie in Abschnitt 3.1 „Grundprinzipien“ angeführt, gibt es eine Beziehung zwischen Strom und Drehmoment. Dies ist keine direkte Beziehung, sondern hängt vom Schlupf, Cosinus  $\varphi$  und der Motortemperatur ab. Die Begrenzung, basierend auf den Strommessungen, ist nicht genau. Bei Frequenzumrichtern vom Typ Raumvektor oder Flux (siehe Kapitel 2 „Frequenzumrichter“) erfolgt die Strommessung in allen drei Motorphasen vektoriell. Die Verteilung der Stromkomponenten ist einfach. Mit dieser Information kann der Frequenzumrichter das Drehmoment genau genug berechnen, sodass der Schutz der Maschine gewährleistet ist.

Wenn mehrere Motoren in ein gemeinsames mechanisches System eingebunden sind, ist es wichtig, dass die Motoren die Last gleichmäßig verteilen. Wird der Schlupfausgleichsfaktor reduziert, gleichen die Motoren automatisch ihr Drehmoment aus, halten aber nicht unbedingt die gewünschte Drehzahl.

Eine weitere Funktion in einigen Frequenzumrichtern dient der Drehmomentverteilung. Drehmomentverteilung bedeutet, dass ein Motor die Drehzahl vorgibt und weitere Frequenzumrichter mit derselben Drehzahl arbeiten und automatisch das Drehmoment gleichmäßig auf die Motoren verteilen.

### **Beispiel**

Bei einem 100 Meter langen Förderband verteilen sich zahlreiche Antriebe über die gesamte Länge. Wenn einer der Motoren etwas schneller läuft als die anderen, muss dieser Motor ein höheres Drehmoment zur Verfügung stellen. Das kann zu Folgendem führen:

- Der Motor wird überlastet und überhitzt.
- Das Band kann aufgrund des höheren Drehmoments in einem Teilbereich beschädigt werden.
- Bei Rollen und Antriebstrummeln tritt Schlupf auf, was zu übermäßiger Abnutzung führt.

In diesen Situationen ist die Drehmomentverteilung wichtig.

## **3.4.5 Watchdog**

Frequenzumrichter können den gesteuerten Prozess überwachen und bei Störungen im laufenden Betrieb einschreiten. Diese Überwachung lässt sich in drei Bereiche unterteilen: Maschine, Motor und Frequenzumrichter.

Die Maschine wird überwacht durch Auswertung von

- Ausgangsfrequenz
- Ausgangsstrom
- Motordrehmoment.

Anhand dieser Werte lassen sich verschiedene Grenzwerte einstellen, die bei ihrer Überschreitung in die Regelung eingreifen. Mögliche Grenzwerte könnten sein: niedrigste zulässige Motordrehzahl (Mindestfrequenz), höchster zulässiger Motorstrom (Stromgrenze) oder höchstes zulässiges Motordrehmoment (Drehmomentgrenze). Wenn die Grenzwerte überschritten werden, kann durch die entsprechende Programmierung der Frequenzumrichter z. B.

- ein Warnsignal ausgeben,
- die Motordrehzahl verringern oder
- den Motor so schnell wie möglich stoppen.

### **Beispiel**

In einer Installation mit Keilriemen als Verbindung zwischen Motor und der übrigen Anlage kann der Frequenzumrichter den Keilriemen überwachen.

Wie erwartet steigt die Ausgangsfrequenz schneller als die eingestellte Rampe. Wenn der Keilriemen reißt, kann der Umrichter über die überwachte Frequenz entweder eine Warnung ausgeben oder den Motor stoppen.

### 3.5 Dynamischer Bremsbetrieb

Maschinen können potentielle oder kinetische Energie erzeugen, die aus Prozessgründen aus dem System abzuführen ist.

Potentielle Energie entsteht durch Einwirkung der Schwerkraft, wenn beispielsweise eine Last gehoben oder in einer Position gehalten wird.

Kinetische Energie entsteht durch Bewegung, wenn z. B. eine Zentrifuge mit einer bestimmten Drehzahl läuft und diese verringert oder ein Wagen gestoppt werden soll.

Die dynamischen Eigenschaften einiger Lasten erfordern einen 4-Quadranten-Betrieb. Durch eine Verringerung der Statorfrequenz (und -spannung) durch den Frequenzumrichter kann der Motor als Generator arbeiten und mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln.

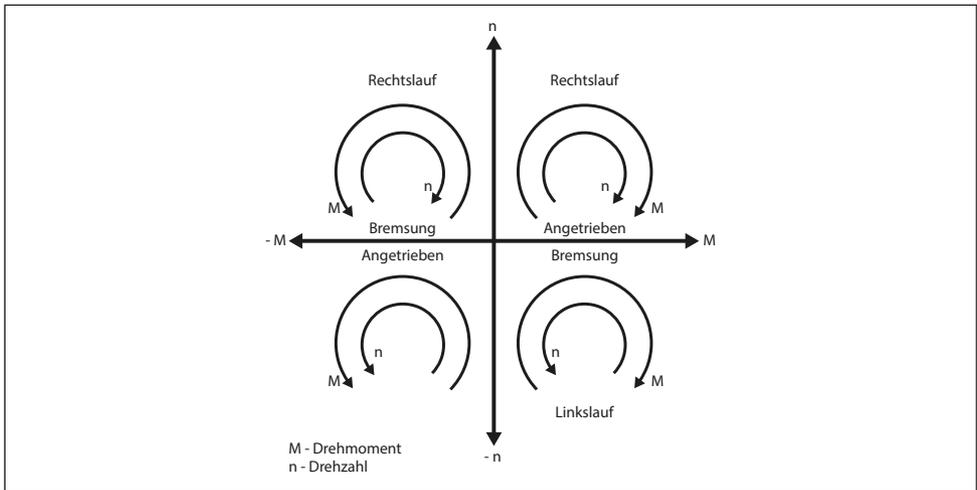


Abb. 3.10 Vier-Quadranten-Betrieb: Rechtslauf (R) und Linkslauf (L)

Direkt ans Netz angeschlossene Motoren liefern die Bremsleistung direkt zurück ans Netz.

Erfolgt die Motorsteuerung durch einen Frequenzumrichter, speichert der Zwischenkreis des Frequenzumrichters die Bremsleistung. Wenn die Bremsleistung die Verlustleistung des Frequenzumrichters überschreitet, steigt die Spannung im Zwischenkreis stark an (in einigen Fällen auf über 1000 V DC).

Übersteigt schließlich die Spannung die interne Spannungsgrenze, schaltet der Frequenzumrichter zum Schutz ab und gibt normalerweise eine Alarmmeldung oder den Fehlercode „Überspannung“ aus. Daher sind Maßnahmen vorzusehen, um eine Abschaltung des Frequenzumrichters zu verhindern, wenn der Motor eine zu hohe Bremsleistung zurückspeist.

Normalerweise sind dies folgende Maßnahmen:

- Verlängerung der Rampenzeit der Verzögerung
- Energieabbau im Motor. Das heißt, der Motor dient als Bremswiderstand
- Der Frequenzumrichter erhält einen elektronischen Bremschopper-Kreis und passende Bremswiderstände
- Einsatz einer generatorischen Bremseinheit zum Zurückspeisen der Energie ins Netz
- Einsatz von Frequenzumrichtern mit aktivem Gleichrichter zum Zurückspeisen der Energie ins Netz

Die ersten beiden Maßnahmen erfordern keine zusätzliche Hardware. Alle anderen Maßnahmen benötigen zusätzliche Komponenten und sind bereits bei der Auslegung der Maschine zu berücksichtigen.

### 3.5.1 Verlängerung der Verzögerungsrampe

Der Bediener kann durch Ändern der entsprechenden Parametereinstellung die Rampenzeit der Verzögerung verlängern, muss dann aber die Lastverhältnisse selbst beurteilen.

#### **Beispiel**

Ein Versuch, einen durch einen Frequenzumrichter betriebenen 22-kW-Motor innerhalb von einer Sekunde von 50 Hz auf 10 Hz abzubremesen, führt zur Abschaltung des Frequenzumrichters, weil der als Generator arbeitende Motor zu viel Energie zurückspeist. Der Anwender kann die Abschaltung des Frequenzumrichters verhindern, indem er die Rampe-ab-Zeit ändert (z. B. auf 10 Sekunden).

Alternativ haben moderne Frequenzumrichter Steuerfunktionen wie Überspannungssteuerung (OVC), die - einmal aktiviert - dazu dienen, eine Abschaltung des Frequenzumrichters zu verhindern oder automatisch die Rampen zu verlängern. Dann bestimmt der Frequenzumrichter die geeignete Rampenzeit. Diese Rampenverlängerung berücksichtigt normalerweise sich verändernde Lastträgheitsmomente. Vorsicht ist geboten, diese Funktion bei Maschinen mit vertikaler oder horizontaler Bewegung (wie Hubvorrichtungen, Aufzügen oder Portalkränen) einzusetzen, da eine Verlängerung der Rampenzeit auch eine Verlängerung des Fahrwegs bedeutet.

### 3.5.2 Motor als Bremswiderstand

Hersteller nutzen verschiedene Methoden, um einen Motor als Bremswiderstand einzusetzen. Das Grundprinzip basiert auf einer Ummagnetisierung des Motors. Die Bezeichnung dieser Methode ist herstellerabhängig, so gibt es z. B. AC-Bremse, Flux-Bremse oder Compound-Bremse. Diese Bremsung wird für hochdynamische Anwendungen (wie Hubanwendungen oder Aufzüge) nicht empfohlen, da durch die häufigere Bremsung der Motor aufheizt und infolgedessen sein Ausfall zu erwarten ist.

### 3.5.3 Bremschopper-Kreis (Bremsmodul) und Bremswiderstand

Der Bremschopper-Kreis besteht im Wesentlichen aus einem Transistor (z. B. IGBT), der die zu hohe Spannung „zerhackt“ und zum angeschlossenen Widerstand weiterleitet. Während der Inbetriebnahme erhält der Steuerkreis die Information, dass ein Bremswiderstand angeschlossen ist. So kann er auch prüfen, ob der Widerstand noch betriebsbereit ist. Normalerweise muss der Bremschopper schon ab Werk im Frequenzumrichter vorgesehen sein.

Oberhalb einer bestimmten Leistung führt die Verwendung eines Bremsmoduls und Bremswiderstands zu Wärmeentwicklung, Platz- und Gewichtsproblemen.

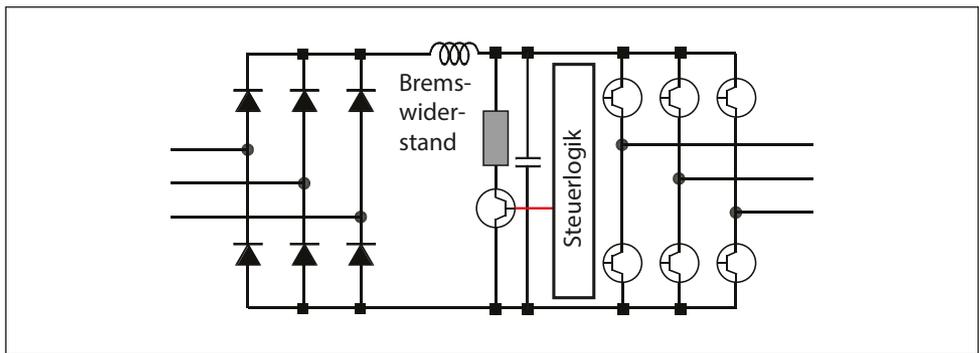


Abb. 3.11 Bremschopper und Bremswiderstand

### 3.5.4 Einsatz einer generatorischen Bremseinheit

Wenn die Last häufig viel generatorische Energie produziert, kann es sinnvoll sein, eine rückspeisefähige Bremseinheit einzusetzen.

Steigt dabei die Spannung im Zwischenkreis auf einen bestimmten Wert, speist ein Wechselrichter die Gleichspannung im Zwischenkreis ins Netz zurück – synchron in Amplitude und Phase.

Dieses Zurückspeisen der Energie lässt sich wie folgt erreichen:

- *Frequenzumrichter mit aktivem Gleichrichter.* Bei diesem Frequenzumrichtertyp kann der Gleichrichter Energie vom Gleichspannungszwischenkreis zur Spannungsversorgung übertragen.
- *Externe rückspeisefähige Bremseinheiten,* die vollständig an den Zwischenkreis eines oder mehrerer Frequenzumrichter angeschlossen sind, überwachen die Spannung im Zwischenkreis.

Abb. 3.12 „Rückspeisefähige Bremsseinheit“ zeigt vereinfachte Versionen des Funktionsprinzips.

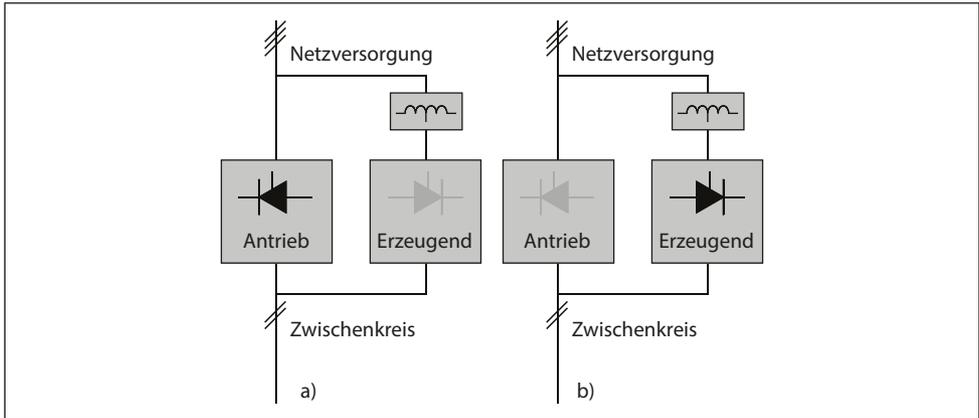


Abb. 3.12 Rückspeisefähige Bremsseinheit: Motorphasensteuerung an (a), Motorphasensteuerung aus (b)

Eine Einschätzung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes dieser Lösungen finden Sie in Kapitel 4 „Energieeinsparung mit Frequenzumrichtern“.

## 3.6 Statischer Bremsbetrieb

Der Frequenzumrichter hat verschiedene Funktionen für das Blockieren und das Auslaufen der Motorwelle:

- Motorfreilaufstopp
- DC-Bremse
- DC-Halten
- Elektromechanische Bremse

Die letzten drei dieser Funktionen lassen sich normalerweise nur nach einem Stoppbefehl ausführen. Dies ist in der Praxis ein häufiges Missverständnis. Es ist wichtig zu beachten, dass ein Sollwert von 0 Hz nicht als Stoppbefehl funktioniert. Verwenden Sie diese Funktionen grundsätzlich nicht bei reversierter Drehrichtung.

### 3.6.1 Motorfreilaufstopp

Motorfreilauf unterbricht Spannung und Frequenz sofort (0 V/0 Hz) und der Motor läuft frei. Wenn der Motor nicht mehr mit Energie versorgt wird, dreht er normalerweise weiter, bis die Nullgeschwindigkeit erreicht ist. Abhängig von der Drehzahl und dem Trägheitsmoment der Last kann dies Sekunden oder sogar Stunden dauern (beispielsweise bei riesigen Separatoren).

### 3.6.2 DC-Bremmung

Eine Gleichspannung über zwei beliebige der drei Motorphasen erzeugt ein stationäres Magnetfeld im Stator. Dieses Feld kann kein hohes Bremsmoment bei Nennfrequenz erzeugen. Die Bremsleistung bleibt im Motor und kann zu Überhitzung führen.

Drei Parameter sind für die DC-Bremmung erforderlich:

- Die Frequenz, bei der die Bremse aktiviert werden soll. Ein Frequenzwert unter 10 Hz wird empfohlen. Nutzen Sie die Motorschlupffrequenz als Referenz. Eine Frequenz von 0 Hz bedeutet, dass die Funktion deaktiviert ist.
- Der Bremsstrom zum Halten der Motorwelle. Es wird empfohlen, den Nennstrom des Motors nicht zu überschreiten, um eine thermische Überlast zu verhindern.
- Die Dauer der DC-Bremmung. Diese Einstellung hängt von der Anwendung ab.

### 3.6.3 DC-Halten

Im Gegensatz zur DC-Bremse gibt es beim DC-Halten keine zeitliche Beschränkung. Ansonsten gelten die gleichen Empfehlungen wie für die DC-Bremse. Diese Funktion lässt sich auch einsetzen, wenn Motoren in sehr kalten Umgebungen eine „zusätzliche Heizung“ benötigen. Überschreiten Sie den Motornennstrom nicht, da der Dauerstrom durch den Motor fließt. Dies minimiert die thermische Belastung des Motors.

### 3.6.4 Elektromechanische Bremse

Die elektromechanische Bremse ist ein Hilfsmittel, um die Motorwelle zum Stillstand zu bringen. Dies kann der Frequenzumrichter über ein Relais steuern. Es stehen zudem verschiedene Steueroptionen bereit.

Es ist wichtig festzulegen, wann die Bremse zu lösen und wann die Motorwelle zu halten ist. Folgende Punkte sind dabei u. a. zu berücksichtigen:

- Motorvormagnetisierung, d. h. ein Mindeststrom ist erforderlich
- Frequenz für Aktivierung oder Deaktivierung
- Reaktionszeiten (Verzögerungszeiten) der Relaisspulen

Bei kritischen Anwendungen, wie Hubanwendungen oder Aufzügen, darf die Bremse nach Abgeben des Startbefehls nur gelöst werden, wenn eine optimale Vormagnetisierung des Motors gewährleistet ist; andernfalls könnte die Last herunterfallen. Ein Mindeststrom, üblicherweise der Magnetisierungsstrom, sollte zunächst fließen, um sicherzustellen, dass der Motor die Last nicht fallen lässt.

## 3.7 Motorkühlung und thermische Überwachung

Energie, die während des Betriebs in Motoren verloren geht, heizt den Motor auf. Bei starker Belastung des Motors ist daher eine Kühlung erforderlich. Abhängig vom System lassen sich Motoren auf verschiedene Weisen kühlen:

- Selbstbelüftung
- Zwangskühlung
- Flüssigkeitskühlung

Um die Lebensdauer des Motors nicht zu verkürzen, sollten Sie den Motor im spezifizierten Temperaturbereich betreiben. Die häufigste Kühlmethode ist Selbstbelüftung, wobei die Kühlung des Motors durch einen auf der Welle montierten Lüfter erfolgt.

Die Temperaturbedingungen des Motors hängen von zwei Einflüssen ab:

- Sinkt die Drehzahl, sinkt auch das Kühlvolumen.
- Ein nicht sinusförmiger Motorstrom erzeugt mehr Wärme im Motor.

Bei niedrigen Drehzahlen kann der Motorlüfter nicht ausreichend Luft zum Kühlen liefern. Dieses Problem tritt auf, wenn das Last-Drehmoment im gesamten Steuerbereich konstant ist. Diese verringerte Kühlluftmenge bestimmt das zulässige Drehmoment im Dauerbetrieb.

Wenn der Motor kontinuierlich bei 100 % Nenndrehmoment und einer Drehzahl läuft, die unter der halben Nenndrehzahl liegt, benötigt der Motor zusätzliche Luft zum Kühlen. Abb. 3.13 „M/n-Kennlinien mit und ohne externe Kühlung“ zeigt diese zusätzliche Luft zur Kühlung in Form von schattierten Bereichen.

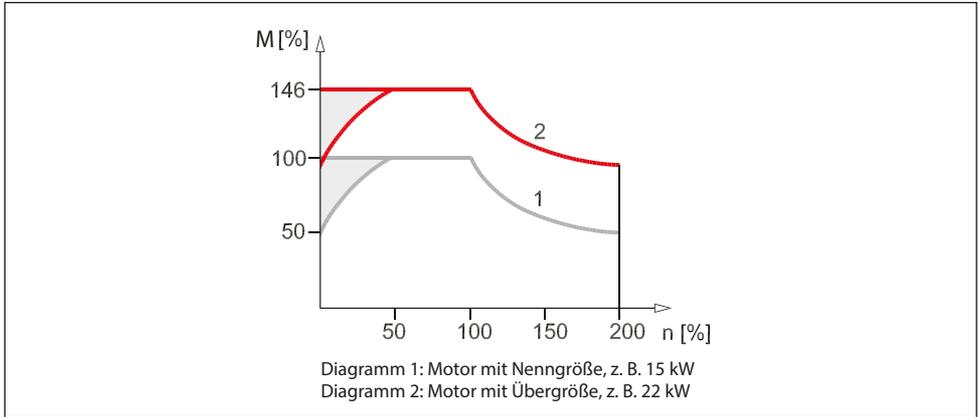


Abb. 3.13 M/n-Kennlinien mit und ohne externe Kühlung

Anstelle einer Zusatzkühlung kann auch die Motorbelastung reduziert werden. Dies kann durch die Verwendung eines größeren Motors erfolgen. Die Frequenzumrichtererauslegung bringt jedoch eine Begrenzung der Größe der anschließbaren Motoren mit sich.

Wenn der Motorstrom nicht sinusförmig ist, erhält der Motor Oberschwingungsströme, die die Motortemperatur erhöhen (siehe Abb. 3.14 „Beziehung zwischen max. Dauerdrehmoment und Stromform“). Je größer die Oberschwingungsströme, desto stärker der Wärmeanstieg. Aus diesem Grund sollten Sie den Motor nicht dauerhaft bei 100 % Last betreiben, wenn der Strom nicht sinusförmig ist.

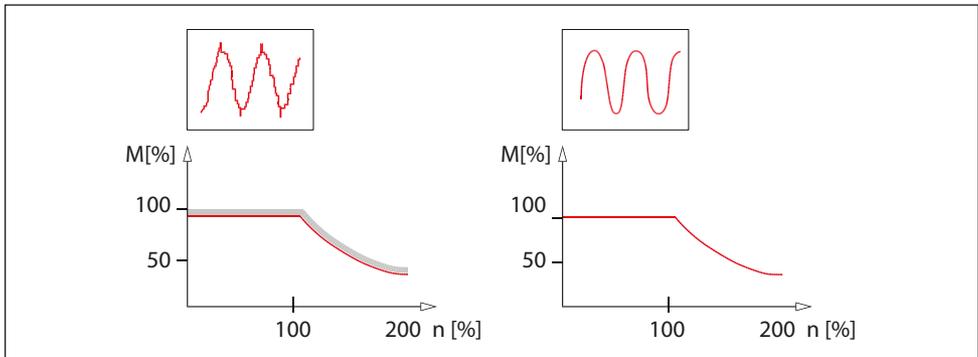


Abb. 3.14 Beziehung zwischen max. Dauerdrehmoment und Stromform

Wenn die Anwendung vorzugsweise niedrige Drehzahlen erfordert, empfiehlt sich ein zusätzlicher Lüfter zum Kühlen des Motors, damit das volle Drehmoment garantiert ist. Der Lüfter sollte jedoch über eine eigene Stromversorgung verfügen und nicht an den Ausgang des Frequenzumrichters angeschlossen sein.

Alternativ kann auch eine Flüssigkühlung beim Motor zum Einsatz kommen. Flüssigkeitskühlung ist normalerweise bei Sondermotoren eingebaut. Zum Schutz des Motors verfügt der Frequenzumrichter über zwei Temperaturüberwachungsmethoden:

**Berechnung:**

Die Motortemperatur wird anhand eines mathematischen Motormodells berechnet

**Messung:**

Thermistoren oder PTC im Motor können zur Überwachung der Temperatur mit dem Frequenzumrichter verbunden sein

Die entsprechende Reaktion auf eine Überhitzung des Motors lässt sich passend für die Anwendung programmieren.

### 3.8 Funktionale Sicherheit

Funktionale Sicherheit definiert den Schutz gegen Gefahren durch falsche Funktionsweise von Systemkomponenten. In Europa definiert die Maschinenrichtlinie 2006/42/EG die funktionale Sicherheit. Sie beschreibt den Zweck der funktionalen Sicherheit folgendermaßen:

*„Die Maschine ist so zu konstruieren und zu bauen, dass sie ihrer Funktion gerecht wird und unter den vorgesehenen Bedingungen – aber auch unter Berücksichtigung einer vernünftigerweise vorhersehbaren Fehlanwendung der Maschine – Betrieb, Einrichten und Wartung erfolgen kann, ohne dass Personen einer Gefährdung ausgesetzt sind.“*

Abhängig vom zu erfüllenden Anwendungsstandard muss das System eine definierte Sicherheitsstufe („safety level“) erreichen. Die erforderliche Sicherheitsstufe wird durch die Risikobeurteilung definiert. Die Maschinenrichtlinie nennt verschiedene Standards gemäß erforderlicher Sicherheitsstufe.

Safety Level	Abkürzung	Standard
Kategorie	Kat	EN 954-1
Performance Level	PL	EN ISO 13849-1
Safety Integrity Level	SIL	IEC 61508 / IEC 62061

Die europäischen Vorschriften zur funktionalen Sicherheit sind mit anderen weltweit vergleichbar. In den USA gilt beispielsweise OSHA (Occupational Safety and Health Act), in Kanada gibt das CCOHS (Canadian Centre for Occupational Health and Safety) den Rahmen für die Sicherheitsmaßnahmen vor. Auch wenn die geltenden Normen sich in den einzelnen Regionen unterscheiden, sind die Sicherheitsprinzipien sehr ähnlich.

Normalerweise werden in den verschiedenen Gesetzstexten und Normen Abkürzungen zur Beschreibung der Sicherheitsfunktion und Sicherheitsstufe verwendet.

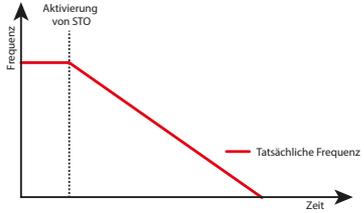
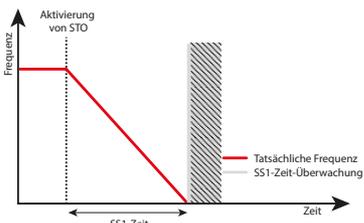
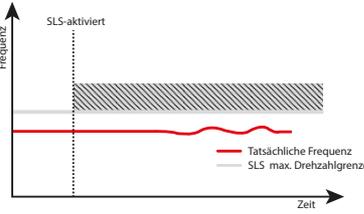
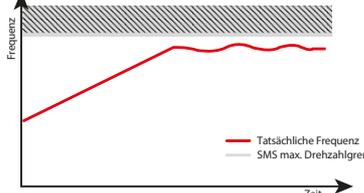
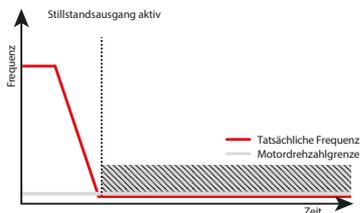
Funktion	Beschreibung	Abbildung
Safe Torque Off STO	Der Motor erhält keine Energie, um Drehmoment/Rotation zu erzeugen. Diese Funktion entspricht Stoppkategorie 0 gemäß IEC 60204-1.	
Sicherer Stopp 1 SS1	Ein kontrollierter Stopp, bei dem die Antriebselemente der Maschine weiterhin mit Energie versorgt werden, um den Stopp auszuführen. Der Strom wird nur im Stillstand abgeschaltet. Diese Funktion entspricht Stoppkategorie 1 gemäß IEC 60204-1.	
Safe Limited Speed SLS	Die Bezeichnung für einen sicheren Zustand der Geschwindigkeit ist „Safe Limited Speed“ (sicher begrenzte Geschwindigkeit). Dies garantiert, dass die Maschine mit konstanter sicherer Drehzahl läuft. Eine steigende Geschwindigkeit aktiviert eine Stoppfunktion.	
Safe Maximum Speed SMS	Dies garantiert, dass die Maschine nicht schneller als mit einer definierten Maximaldrehzahl läuft. Dies vermeidet Maschinenschäden und verringert Gefahren. Die Funktionsweise ist dieselbe wie bei SLS.	
Überwachung der sicheren Drehzahl (Safe Speed Monitor) SSM	SSM überwacht die Nullgeschwindigkeit und setzt ein Ausgangssignal „hoch“, wenn diese erreicht wird. Diese Funktion kann dazu dienen, um Türen zu entriegeln oder um anzuzeigen, dass sich die Maschine im Stillstand befindet.	

Tabelle 3.15 Allgemeine Sicherheitsfunktionen des Frequenzumrichters und ihre Funktionsweise

Der Frequenzumrichter verfügt über einige zusätzliche Funktionen für funktionale Sicherheit:

- SOS Sicherer Betriebsstopp
- SS2 Sicherer Stopp 2
- SDI Sichere Richtung
- SBC Sichere Bremsansteuerung
- SAM Überwachung der sicheren Beschleunigung
- SLP Sichere Grenzposition
- SCA Sichere Nocke
- SLI Sicherer Stufenanstieg
- SSR Sicherer Drehzahlbereich
- SBT Sicherer Bremstest

## SISTEMA

Unabhängige Softwaretools wie SISTEMA (Safety Integrity Software Tool for the Evaluation of Machine Applications) unterstützen Maschinenhersteller bei sämtlichen Berechnungen für die Sicherheitsanwendung.

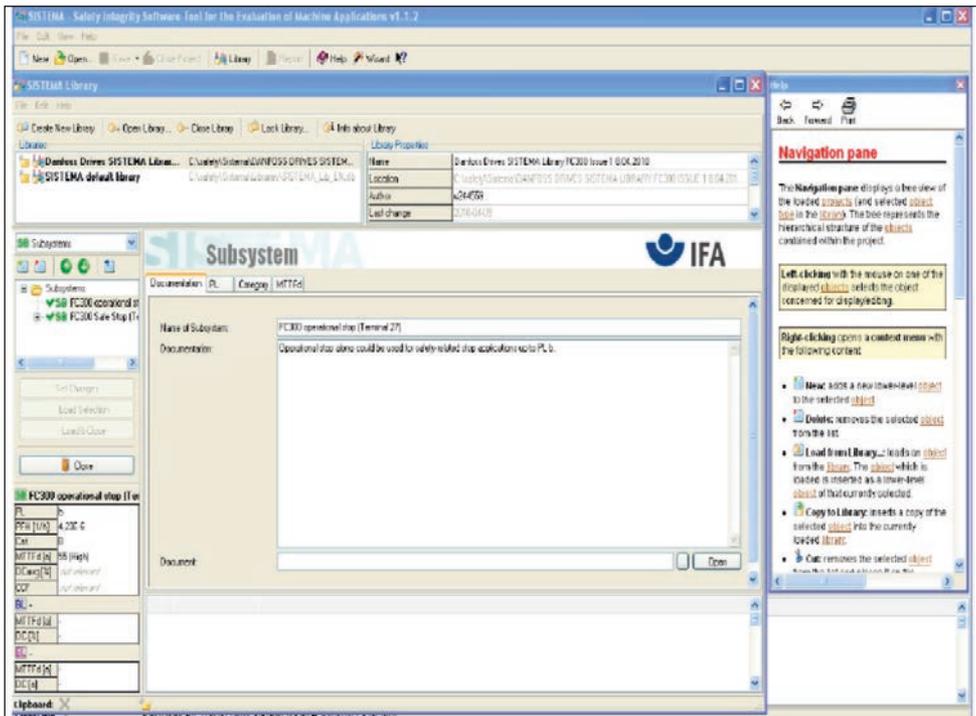


Abb. 3.16 Screenshot der SISTEMA-Startseite

Die SISTEMA-Software unterstützt Entwickler und Prüfer von sicherheitsrelevanten Maschinensteuerungen bei der Evaluierung der Sicherheit gemäß ISO 13849-1. Mit diesem Tool lässt sich die Struktur der sicherheitsrelevanten Steuerkomponenten basierend auf den vorgesehenen Architekturen modellieren. Diese Modellierung ermöglicht eine automatische Berechnung der Zuverlässigkeitswerte mit verschiedenen Detailgraden, einschließlich des erreichten PL (Performance Level).

Die Erfassung relevanter Parameter erfolgt Schritt für Schritt in Eingabedialogen, z. B.:

- Risikoparameter zur Bestimmung des erforderlichen PL
- SRP-/CS-Kategorie
- Maßnahmen gegen Ausfälle aufgrund gemeinsamer Ursache (Common-Cause Failures, CCF) bei Multi-Kanal-Systemen
- Durchschnittliche Bauteilqualität (MTTFd)
- Durchschnittliche Testqualität (DVavg) von Bauteilen und Blöcken

Die Auswirkung jeder Parameteränderung auf das Gesamtsystem wird sofort auf der Benutzeroberfläche angezeigt. Die Endergebnisse können in einer Zusammenfassung ausgedruckt werden.

## 4 Energieeinsparung mit Frequenzumrichtern

### 4.1 Potential

Elektromotoren sind für ca. 48 % des weltweiten Verbrauchs an elektrischer Energie verantwortlich (1). Bei Industrieanwendungen liegt diese Zahl sogar noch höher. Je nach Region oder Industriebereich verbrauchen Elektromotoren 65 bis 75 % der elektrischen Energie. Aus diesem Grund steckt in der elektrischen Antriebstechnik ein hohes Potenzial für die Reduzierung des weltweiten Energieverbrauchs.

Frequenzumrichter ermöglichen die Entwicklung und Verbesserung von energieeffizienteren Motortechnologien. Und noch größere Vorteile bietet der Hauptgrund für die Entwicklung von Frequenzumrichtern: die anpassbare Drehzahlregelung. Sie trägt zur Optimierung von Prozessen bei und erlaubt einen Motorbetrieb bei optimaler Drehzahl und optimalem Drehmoment.

Bei einem Gesamt-Einsparpotenzial in einem System von 100 % können effizientere Komponenten, wie z. B. Motoren, rund 10 % davon erreichen. Ein Betrieb bei anpassbarer Drehzahlregelung ermöglicht Energieeinsparungen von ca. 30 %. Die größten Einsparungen (ca. 60 %) erzielt man jedoch durch die Optimierung des Gesamtsystems.

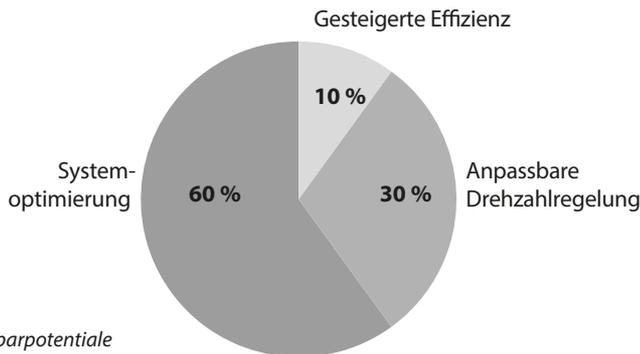


Abb. 4.1 Energieeinsparpotentiale

Allein durch Berücksichtigung weniger wesentlicher Faktoren können Frequenzumrichter zu hohen Energieeinsparungen beitragen. Diese lassen sich schnell und einfach realisieren, da sich die meisten Anwendungen (ca. 60-70 %) für Drehzahlregelung eignen. Insbesondere Lüfter und Pumpen – etwa 50 % aller Anwendungen – spielen aufgrund ihres hohen Einsparpotenzials in diesem Zusammenhang eine große Rolle.

(1) Quelle: 2008 – International Energy Agency

## 4.2 Effizienz von Motor und Frequenzumrichter

Die Effizienz eines aus einem mit einem Frequenzumrichter betriebenen Motor bestehenden Systems lässt sich durch einfaches Multiplizieren der einzelnen Effizienzwerte berechnen.

$$\eta_{\text{System}} = \eta_{\text{Motor}} * \eta_{\text{Frequenzumrichter}}$$

Abb. 4.2 „Effizienzbeispiel von Frequenzumrichtern (A = 100 % Last/B = 25 % Last)“ zeigt typische Effizienzkurven von Frequenzumrichtern bei zwei verschiedenen Lasten. Die Effizienz eines Frequenzumrichters ist im gesamten Regelbereich hoch – sowohl bei hohen als auch bei niedrigen Lastwerten.

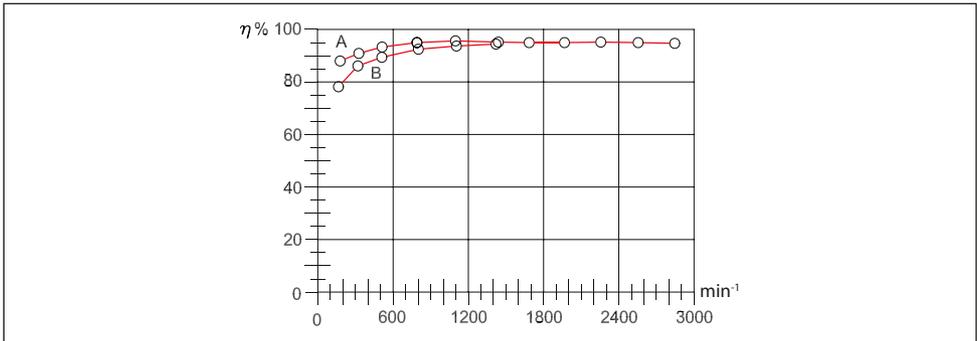


Abb. 4.2 Effizienzbeispiel von Frequenzumrichtern

Zusätzlich zum wirtschaftlichen Aspekt, der in einer Senkung des Energieverbrauchs aufgrund der höheren Effizienz von Frequenzumrichtern besteht, ist außerdem auch die aus der Anlage abzuführende Verlustleistung geringer. Das ist insbesondere beim Einbau des Frequenzumrichters in einen Schaltschrank wichtig. Wenn die Verluste zu hoch sind, sind separate Kühlaggregate erforderlich, die wiederum Energie verbrauchen.

Abb. 4.3 „Effizienzbeispiel eines 2-poligen Motors (A = 100 % Last/B = 25 % Last)“ zeigt einen Vergleich von normalen und Teillast-Wirkungsgraden von Motoren mit dem Frequenzumrichter.

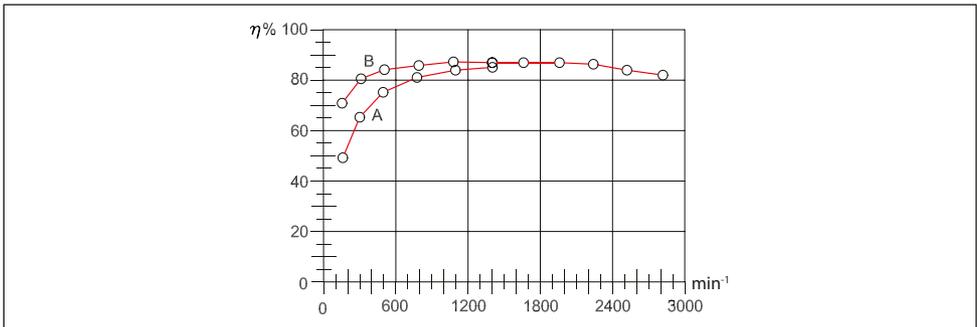


Abb. 4.3 Effizienzbeispiel eines 2-poligen Motors

Infolgedessen hat der Motor einen großen Einfluss auf die Effizienz des Systems (Abb. 4.4 „Effizienzbeispiel einer Motor-Frequenzumrichter-Kombination (A = 100 % Last/B = 25 % Last“).

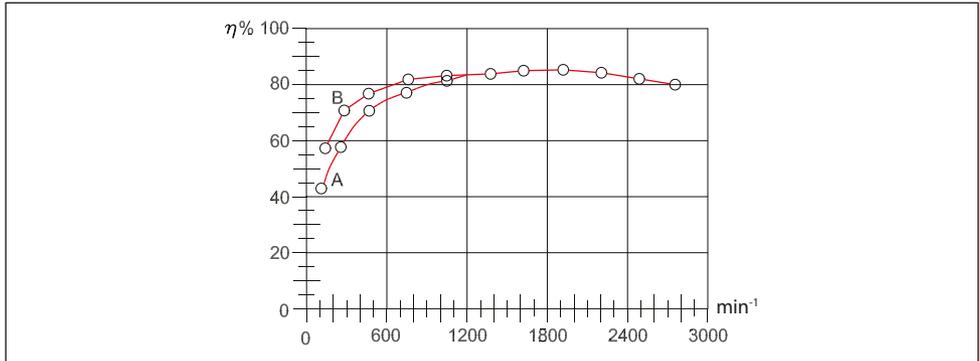


Abb. 4.4 Effizienzbeispiel einer Motor-Frequenzumrichter-Kombination

Auch wenn es die gängige Praxis ist, die Effizienz der einzelnen Komponenten zu bestimmen und zu bewerten, hängt die Genauigkeit dieses Werts stark von der Anzahl der verwendeten Dezimalstellen ab. Deshalb werden häufig zusätzlich die Verluste der verschiedenen Komponenten angegeben. Ein Verlust von 143 W ist beispielsweise einfacher zu handhaben, als ein Wirkungsgrad von 90,467 % (bezogen auf 1,5 kW).

### 4.3 Klassifizierung energieeffizienter Komponenten

Das Abstimmen der einzelnen Komponenten für ein bestimmtes Antriebssystem hat verschiedene Vorteile im Vergleich zu vorgefertigten Systemen, da der Konstrukteur oder Entwickler das System für seine Anforderungen optimieren kann. Vorgefertigte Systeme sind immer für allgemeine Anwendungen optimiert und können nie alle spezifischen Anwendungen optimal bedienen. Falls vorhanden, ist die Effizienzklasse ein Indikator für die Effizienz der Komponenten.

#### Frequenzumrichter

Die Norm EN 50598-2 definiert Effizienzklassen für Frequenzumrichter. Da verschiedene Konfigurationen im Bereich Leistungselektronik möglich sind, gibt es Definitionen für die Klassen IE0 bis IE2 für vollständige Antriebsmodule (CDM - Complete Drive Module), die aus Gleichrichter, Zwischenkreis und Wechselrichter bestehen (siehe Abb. 4.5 „Definition von CDM und PDS“). CDM mit der Möglichkeit einer Rückführung, z. B. Bremsleistung in das Netz, werden angesprochen, aber nicht behandelt, da ihre Verluste in der Regel doppelt so hoch sind.

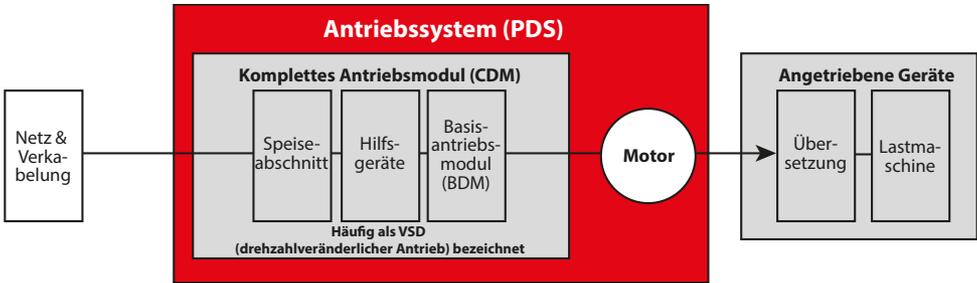


Abb. 4.5 Definition von CDM und PDS (Power Drive System)

Die Definition der IE-Klassen erfolgt in Bezug auf ein Referenz-CDM (RCDM). Aufgrund der gleichen Skalierung für alle Leistungsgrößen erfolgt die Definition der Klassen anhand der relativen Verluste. CDM mit relativen Verlusten im Bereich von  $\pm 25\%$  zu den relativen Verlusten des Referenzsystems gehören zur Klasse IE1. CDM mit höheren Verlusten gehören in Gruppe IE0, während CDM mit niedrigeren Verlusten zu IE2 gehören (siehe Abb. 4.7 „Definition der Effizienzklassen von CDM und PDS“).

Diese Einordnung spiegelt die Effizienz des CDM bei niedrigeren Drehzahlen/Drehmomenten nicht wider, da die Klasse bei 100 % relativer Drehzahl und 90 % relativem Drehmoment erzeugenden Strom bestimmt wird. Zur Verifizierung erfolgt die Prüfung des CDM mit allen eingebauten Komponenten bei einer definierten Testlast. Eine Feinabstimmung oder ein spezieller Testmodus sind nicht zulässig.

## Übersetzung

Auch wenn die Art der Übersetzung große Auswirkungen auf die Systemeffizienz haben kann, gibt es keine definierten Effizienzklassen. In der folgenden Tabelle finden Sie einen Überblick der typischen Wirkungsgrade:

Direkt angetrieben	100 %	Flachriemen	96...98 %
Stirnradgetriebe	98 %	Keilriemen	92...94 %
Kegelrad	98 %	Zahnriemen	96...98 %
Schneckengetriebe	95 %	Kette	96...98 %

Tabelle 4.1 Typische Effizienzwerte bei der Übersetzung.



Abb. 4.6 Der VLT® One Gear Drive ist ein PM-Motor mit hohem Drehmoment und höchster Effizienz

## Motoren

Für den Leistungsbereich 0,12-1000 kW definiert die Norm IEC/EN 60034-30-1 die Effizienzklassen IE1 bis IE4 für Elektromotoren. Auch wenn die Norm für alle Motortypen gilt, sind einige Motortypen (z. B. Bremsmotoren) ausgeschlossen. Verschiedene Länder und Regionen nutzen die Grenzwerte der IE-Klasse, um Mindesteffizienzwerte (MEPS) zu definieren, um so den Einsatz von Motoren mit geringer Effizienz zu beschränken. Die Effizienzklasse bezieht sich auf den Nennbetriebspunkt des Motors. Wirkungsgrade bei voller Drehzahl, aber reduziertem Drehmoment, sind auf dem Typenschild oder in der Dokumentation anzugeben. Die Grenzwerte unterscheiden sich für unterschiedliche Netzfrequenzen (50/60 Hz) und die Anzahl der Motorpole (2, 4 oder 6 Pole).

Klassen für Motoren, die mit Frequenzumrichtern betrieben werden, werden gegenwärtig erörtert und dann in IEC/EN 60034-30-2 definiert.

## Motor-Frequenzumrichter-Kombination

Die Definition der Effizienzklassen für Frequenzumrichter-Motor-Kombinationen erfolgt über eine IES-Einordnung in der Norm EN 50598-2. Ähnlich wie bei CDM beziehen sich die Klassen des sogenannten PDS (Antriebssystems), also eine Kombination aus Motor und Frequenzumrichter (siehe Abb. 4.5 „Definition von CDM und PDS“), auf ein Referenzsystem (siehe Abb. 4.7 „Definition der Effizienzklassen von CDM und PDS“). PDS mit 20 % höheren Verlusten als das Referenzsystem gehören zur Klasse IE0, während Klasse IES2 Systeme mit 20 % niedrigeren Verlusten enthält.

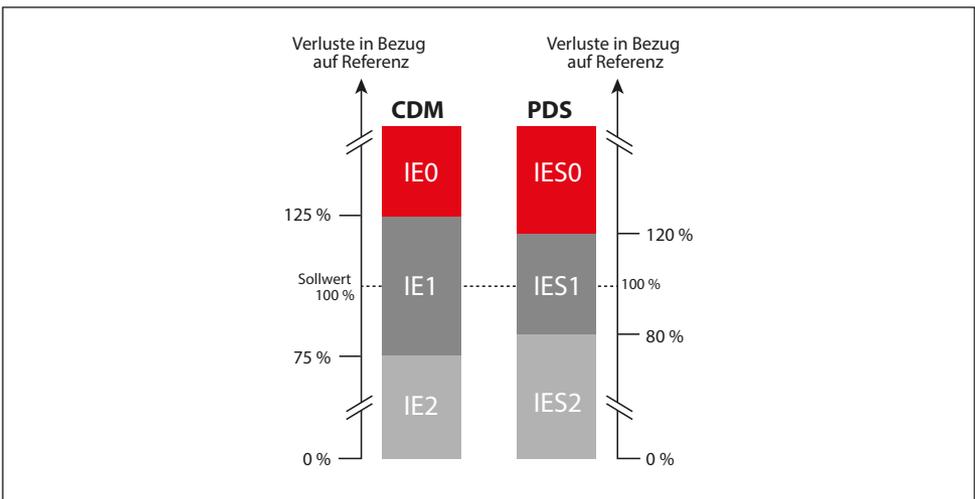


Abb. 4.7 Definition der Effizienzklassen von CDM und PDS

Die Klassifizierung erfolgt bei 100 % relativer Drehzahl und 100 % relativem Drehmoment. Wenn der Frequenzumrichter für ein kürzeres Kabel ausgelegt oder direkt an den Motor angebaut ist, sodass kürzere Kabel verwendet werden können, muss die Dokumentation dies angeben.

Allgemein sind alle Optimierungen möglich, solange die Dokumentation diese angibt. Infolgedessen ist es schwierig, zwei PDS-Werte zu vergleichen, da sie sehr wahrscheinlich auf unterschiedlichen Rahmenbedingungen basieren.

Die IES-Klasse für Kombinationen aus Motor und Frequenzumrichter zeigt die Komplexität einer Systemoptimierung und verdeutlicht, dass die Auswahl aller Komponenten sehr sorgfältig erfolgen muss, um die Anwendung zu optimieren. Der Unterschied zwischen vorgefertigten und nicht optimierten, frei kombinierten Systemen ist oft gering. Frei kombinierte Systeme mit optimaler Abstimmung der verschiedenen Komponenten aufeinander ermöglichen dagegen in der Regel eine bessere Anpassung an die Maschine, was wiederum einen Wettbewerbsvorteil für den Maschinenbauer bedeutet.

## 4.4 Energieeffizienter Motorstart

Die für das Starten eines Motors benötigte Energie lässt sich in drei Hauptbereiche unterteilen:

- Energie für den Lastbetrieb
- Energie für das Beschleunigen von Last und Motor
- Verluste in Motoren und Steuerung

Die einfachste Methode zum Starten eines Motors ist der Direktstart (DOL), aber diese Lösung ist auch ineffizient. Der Motor produziert aufgrund des sehr großen Schlupfes beim Anlegen der Spannung hohe Verluste beim Starten. Beim Beschleunigen des Motors reduzieren sich Schlupf und somit Verluste.

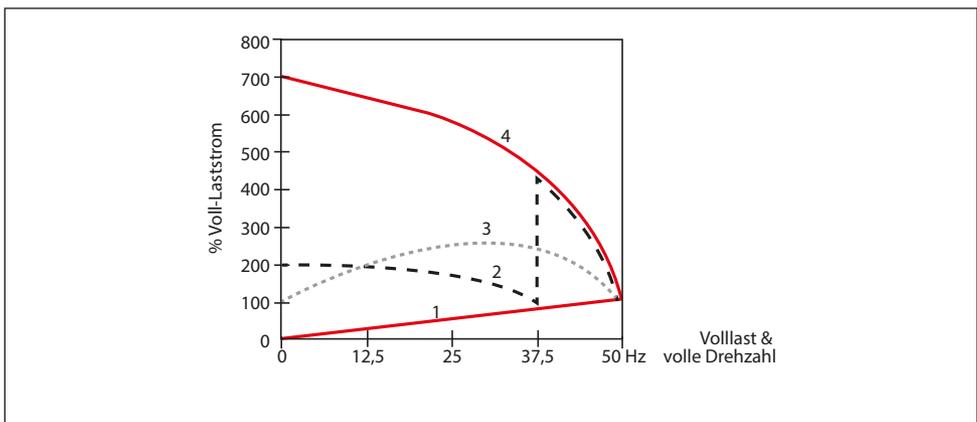


Abb. 4.8 Typische Motorstromkurven bei Start durch (1): Frequenzumrichter bei VT-Last, (2): Stern-Dreieck-Starter, (3): Softstarter, (4): Direktstart (DOL)

Es besteht die Möglichkeit, Softstarter einzusetzen. Diese passen die Motorspannung wie Stern/Dreieck-Starter an, jedoch linear. Das Gerät erhöht die Spannung bis zum Erreichen der programmierten Stromgrenze. Der Grenzwert hängt von der Anwendung ab, normalerweise liegt der Wert zwischen 300 und 500 % des Volllaststroms. Beim Beschleunigen des Motors sinkt der Strom und das Gerät erhöht die Spannung noch weiter. Diese Sequenz setzt sich fort, bis das Netzspannungsniveau am Motor anliegt.

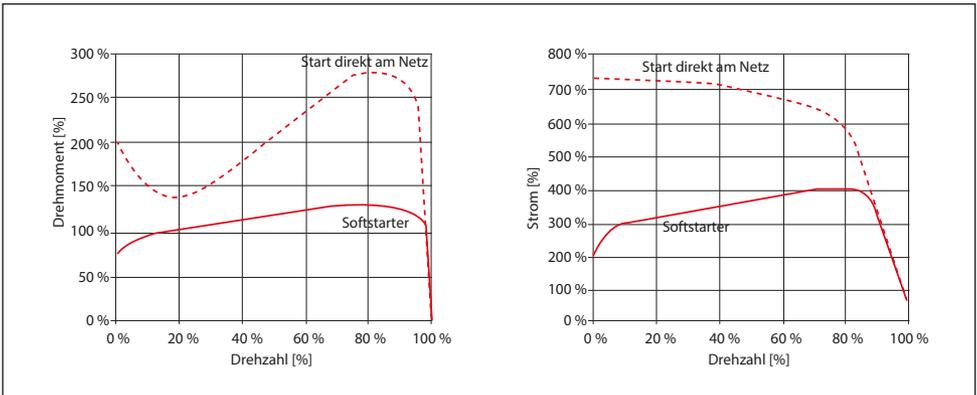


Abb. 4.9 Vergleich des Motorstarts direkt am Netz mit Start durch Softstarter (400 % Stromgrenze)

Um die Verluste zu minimieren, laufen Softstarter normalerweise nach dem Starten des Motors im Bypass-Betrieb. Während der Startphase liegen die Verluste bei ca. 4,5 W je A.

Die effizienteste Methode zum Starten eines Motors ist der Einsatz eines Frequenzumrichters. Die Regelung von Spannung und Frequenz reduziert Schlupf und somit die Verluste. Ein Bypass wie beim Softstarter ist möglich, kommt aber nur selten zum Einsatz.

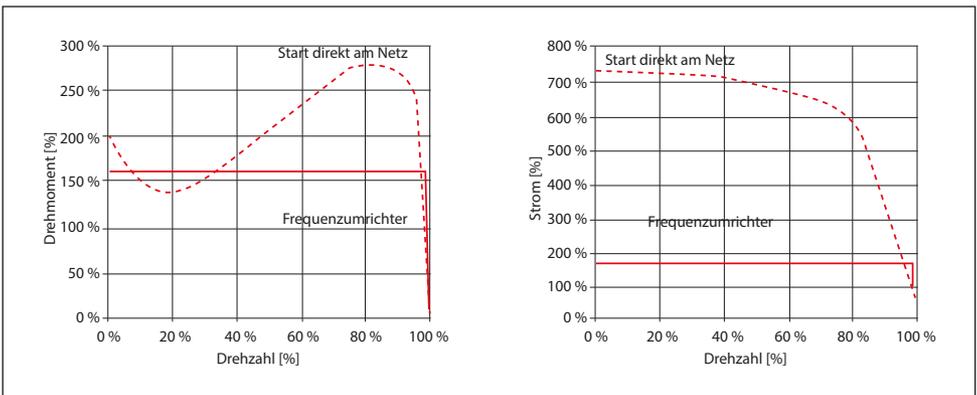


Abb. 4.10 Vergleich des Motorstarts direkt am Netz mit Start durch Frequenzumrichter bei 160 % Überlast

Abb. 4.9, „Vergleich des Motorstarts direkt am Netz mit Start durch Softstarter“ und Abb. 4.10 „Vergleich des Motorstarts direkt am Netz mit Start durch Frequenzumrichter bei 160 % Überlast“ zeigen die Drehmoment- und Stromkurven zum Starten eines Motors mit konstanter Last direkt am Netz, durch einen Softstarter und durch einen Frequenzumrichter. Mit unterschiedlichen Lasten sehen diese Kurven unterschiedlich aus.

## 4.5 Energieeffiziente Motorsteuerung

Alle Motoren funktionieren bei Anlegen der korrekten Spannung bei einer gegebenen Frequenz. Eine sich drehende Welle bedeutet jedoch nicht, dass der Motor auch effizient läuft. Zum Steuern eines Motors sind ein Steueralgorithmus (U/f, Spannungsvektor, Flux-Vektor usw.) und eine Steuerstrategie erforderlich. Dass beide Komponenten zu einem Motortyp passen müssen, kann man leicht am Beispiel von Permanentmagnetmotoren erkennen. Für einen energieoptimierten Betrieb muss der Regler den Spannungsverlauf der Versorgungsspannung so gut wie möglich an die Kurvenform der Gegen-EMK anpassen. Blockkommutierung kommt bei trapezförmiger Gegen-EMK und Sinuskommütierung für sinusförmige zum Einsatz.

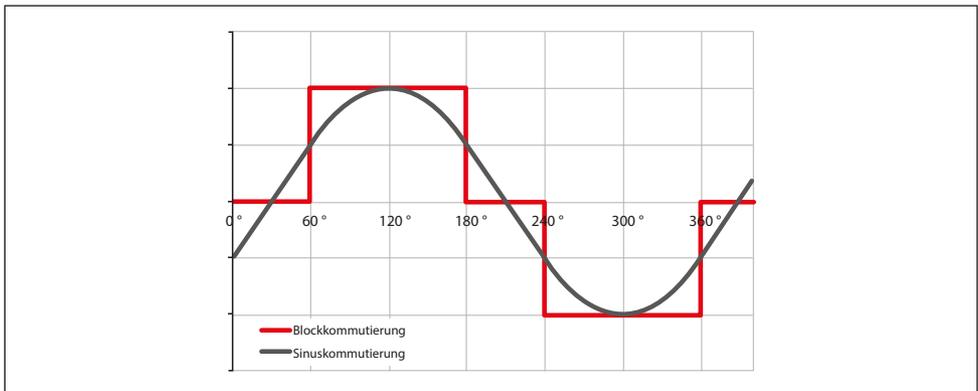


Abb. 4.11 Blockkommutierung verglichen mit Sinuskommütierung

Von der Blockkommutierung ist bekannt, dass sie einige Nachteile hat, wie Drehmoment-Rippel und übermäßige Geräuschentwicklung. Beide Technologien sind jedoch in Bezug auf die Effizienz vergleichbar.

Die folgenden Steuerstrategien kommen häufig in verschiedenen Steueralgorithmen zum Einsatz:

### Konstanter Drehmomentwinkel (CTA)

Das maximale Drehmoment entsteht, wenn der Drehmomentwinkel konstant bei 90° bleibt. Die Strategie hält den Winkel konstant, indem der Strom der D-Achse des Rotors auf Null geregelt wird, während der Stromvektor auf der Y-Achse bleibt.

### Max. Drehmoment je Ampere

Diese Strategie minimiert den Statorstrom für ein erforderliches Drehmoment unter Berücksichtigung der Reluktanz-Drehmomente. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, sind Schwankungen der Induktivitäten während des Betriebs zu berücksichtigen.

### Konstante Leistungsfaktor-Steuerung

Diese Strategie erlaubt es, den Winkel zwischen Strom- und Spannungsvektor konstant zu halten, sodass eine Reduzierung der Scheinleistung des Wechselrichters möglich ist.

Außerdem bieten Frequenzumrichter zusätzliche Funktionen zum Reduzieren der Magnetfeldstärke bei reduzierter Last. Dies lässt sich durch spezielle U/f-Kennlinien oder durch AEO (Automatische Energie-Optimierung) erreichen.

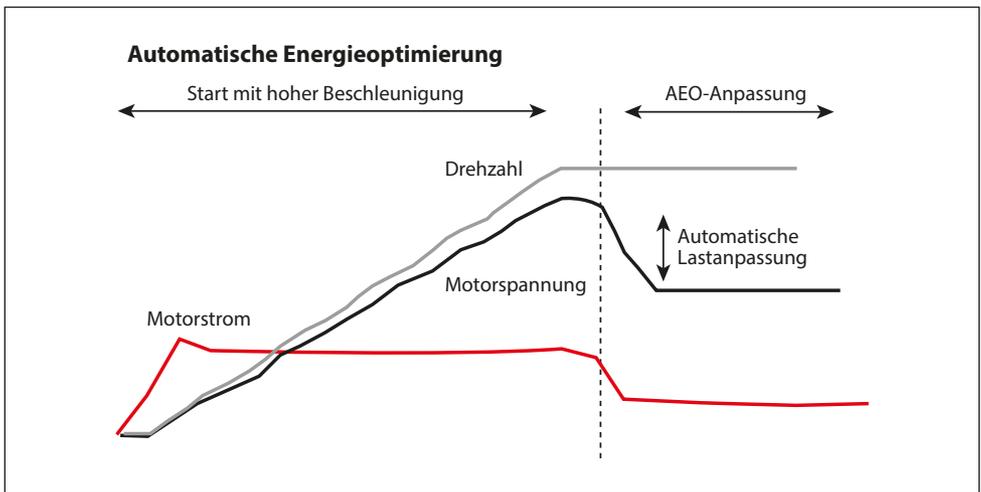


Abb. 4.12 Automatische Energie-Optimierung

Automatische Anpassungen erfolgen, nachdem die Anwendung den stationären Zustand erreicht hat. Diese Steuerstrategie reduziert das Magnetisierungs-niveau und somit den Energieverbrauch. Ein optimales Gleichgewicht zwischen Energieeinsparung und einer ausreichenden Magnetisierung für plötzliche Lastspitzen muss für einen verlässlichen Betrieb gegeben sein. Siehe Abb. 4.12 „Automatische Energie-Optimierung“.

Das durchschnittliche Energieeinsparpotenzial für Frequenzumrichter mit kleiner bis mittlerer Baugröße beträgt 3 bis 5 % der Nennleistung während des Betriebs unter geringen Lasten. Ein sehr wichtiger Nebeneffekt besteht darin, dass der Motor unter geringen Lasten beinahe geräuschlos läuft – selbst bei kleinen bis mittleren Schaltfrequenzen.

## 4.6 Last im Zeitverlauf

Bei jedem Teil des Systems gibt es Verluste. Deshalb sollte das Ziel sein, so wenig Komponenten wie möglich zum System hinzuzufügen. Gleiches gilt auch für Frequenzumrichter. Das Hinzufügen eines Umrichters zu einem Motor, der den ganzen Tag bei Volllast und voller Drehzahl laufen muss, führt nur zu zusätzlichen Verlusten. Aber sobald die Reduzierung von Drehzahl und Drehmoment für die Anwendung sinnvoll ist, senkt der Einsatz eines Frequenzumrichters den Energieverbrauch. Die erreichbaren Einsparungen hängen dabei vom Lastprofil im Zeitverlauf, von den Drehmomentkennlinien sowie dem Motorwirkungsgrad und Antriebssystem bei gegebenen Teillastpunkten ab.

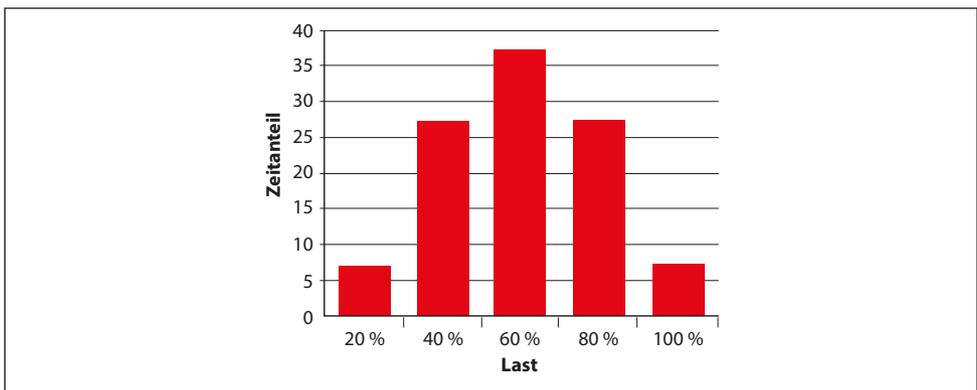


Abb. 4.13 Das Diagramm der Last im Zeitverlauf zeigt, wie lang die Last im Teillastbetrieb läuft

Teillast gibt es auf zwei verschiedene Weisen. Bei direktem Netzbetrieb des Motors ist die Speisefrequenz des Motors fest, und die Drehzahl variiert nur mit der Last. Beim Betrieb des Motors durch einen Frequenzumrichter beschreibt die Teillast das Drehmoment bei einer bestimmten Drehzahl, wobei die Anwendung die Drehmomentkennlinie bestimmt. Tatsächlich laufen die meisten Anwendungen bei Teillast. Dies gilt auch für netzbetriebene Motoren, weil diese normalerweise überdimensioniert sind.

### 4.6.1 Anwendungen mit variablem Drehmoment

Anwendungen mit variablem Drehmoment enthalten häufig Pumpen und Lüfter. Bei Pumpen muss man jedoch unterscheiden. Während die am häufigsten eingesetzten Zentrifugalpumpen eine quadratische Drehmomentkennlinie haben, haben Exzenter-, Vakuum- oder Verdrängerpumpen eine konstante Drehmomentkennlinie.

Das Energieeinsparpotential von Pumpen und Lüftern ist sehr hoch, da diese Geräte den Affinitätsgesetzen gehorchen.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right) \text{ Durchfluss ist proportional zur Drehzahl}$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^2 \text{ Druck oder Förderhöhe ist proportional zur Drehzahl im Quadrat}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)^3 \text{ Leistung ist in dritter Potenz proportional zur Drehzahl}$$

Der Durchfluss  $Q$  steigt mit steigender Drehzahl (UPM) linear, während der Druck (Förderhöhe)  $H$  quadratisch und die Leistungsaufnahme  $P$  mit der dritten Potenz steigen. Theoretisch führt eine Drehzahlverringerung von 20 % zu einer Energieeinsparung von 50 %.

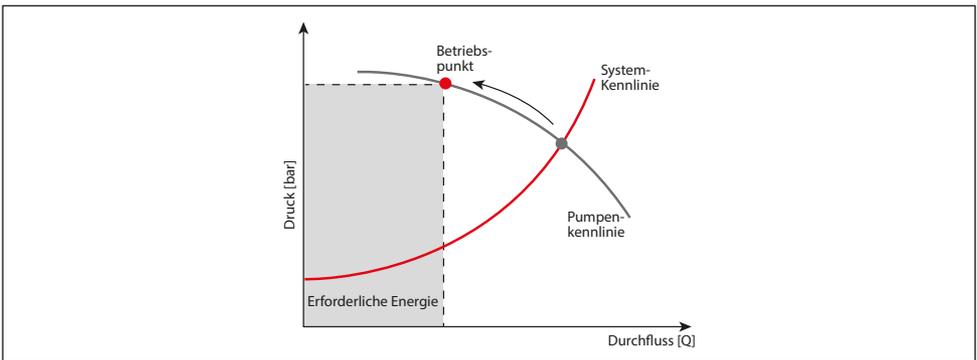


Abb. 4.14 Erforderliche Energie für die Drosselregelung in einer Pumpenanwendung mit variablem Drehmoment

Viele Lüfter- und Pumpensysteme nutzen Drallklappen, Luftklappen oder Drosseln zur Durchflussregelung im System. Wenn ein Drosselventil eine Zentrifugalpumpe regelt, bewegt das Drosseln den Arbeitspunkt der Maschine entlang der Pumpenkennlinie. Die erreichte Verringerung des Energiebedarfs ist minimal im Vergleich zum Nennbetriebspunkt der Pumpe.

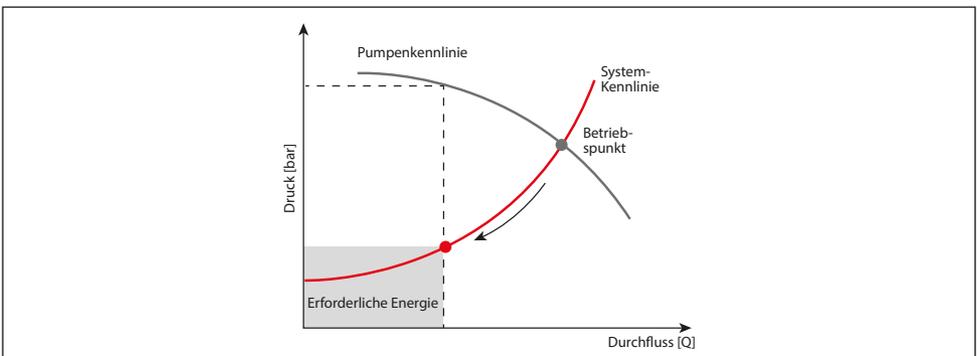


Abb. 4.15 Erforderliche Energie für die Drehzahlregelung in einer Pumpenanwendung mit variablem Drehmoment

Bei Drehzahlregelung eines Lüfters oder einer Pumpe bewegt sich der Betriebspunkt entlang der Systemkennlinie. Dies bewegt das System weg von seiner höchsten Effizienz, die damit normalerweise leicht abnimmt. Doch Energieeinsparungen durch die reduzierte Drehzahl sind immer noch viel höher, als beim Drosseln oder mit anderen mechanischen Regelungen. In tatsächlichen Anwendungen unterscheiden sich die erreichten von den theoretischen Energieeinsparungen, da Verluste in Rohrleitungen zu einer Grundlast und somit zusätzlichen Verlusten führen.

Pumpenanwendungen erfordern häufig eine Mindestdrehzahl (abhängig von Anwendung und Pumpenart/-hersteller), um die Ablagerung von Feststoffen zu vermeiden und eine ausreichende Schmierung der Pumpe sicherzustellen. Wenn die Spanne zwischen Mindestdrehzahl und der Drehzahl für die maximal geforderte Leistung zu hoch ist, bietet sich ein kaskadierter Systemaufbau an. Bei kaskadierten Pumpen übernimmt eine drehzahlgeregelte Pumpe die Grundlast. Wenn der Verbrauch steigt, schaltet der Kaskadenregler im Frequenzumrichter weitere Pumpen nacheinander hinzu. Die Pumpen arbeiten dann entsprechend bei maximaler Effizienz, wann immer möglich. Die Pumpenregelung stellt sicher, dass das System immer so energieeffizient wie möglich ist. Einige Anwendungen verfügen über mehrere drehzahlgeregelte Pumpen. Kaskaden lassen sich auf ähnliche Weise auch für andere Anwendungen wie Lüfter oder Kompressoren verwenden.

#### 4.6.2 Anwendungen mit konstantem Drehmoment

Anwendungen mit konstantem Drehmoment sind Anwendungen, bei denen sich die Last normalerweise durch die Geschwindigkeit nicht wesentlich ändert. Dazu gehören Förderbänder, Hebezeuge und Mischer.

Wenn beispielsweise ein Motorblock auf einem horizontalen Förderband positioniert ist, ändert sich das Gewicht des Motors nicht, unabhängig von der Geschwindigkeit des Förderbands. Das erforderliche Drehmoment zum Bewegen des Motorblocks ist immer gleich. Reibung und Beschleunigungsmoment ändern sich natürlich je nach Betriebsbedingung, aber das zum Bewegen der Last benötigte Drehmoment bleibt konstant.

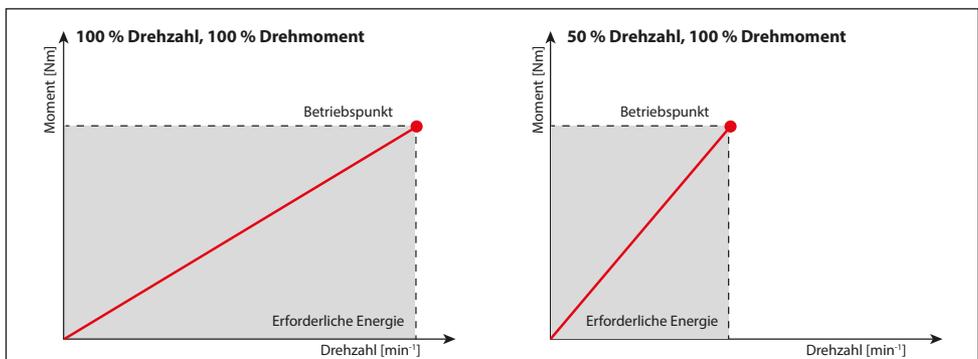


Abb. 4.16 Erforderliche Energie bei unterschiedlichen Drehzahlen und Lasten

Die von solch einem System benötigte Energie ist proportional zum erforderlichen Drehmoment und der Drehzahl des Motors.

$$P \sim M \times n$$

Wenn sich die Drehzahl bei einer konstanten Last verringern lässt, wie beispielsweise bei Kühlzyklen, führt dies direkt zu Energieeinsparungen. In anderen Anwendungen mit konstanter Last hat eine reduzierte Drehzahl keine großen Auswirkungen. Beispielsweise bleibt bei der Verringerung der Geschwindigkeit eines Förderbands die zum Transport der Waren von A nach B benötigte Energie dieselbe, weil die Distanz unverändert bleibt. Kleinere Einsparungen werden durch reduzierten Reibungsverlust und optimierte Beschleunigung erzielt. Nichtsdestotrotz setzt sich die Drehzahlregelung bei Anwendungen mit konstantem Drehmoment aufgrund von Vorteilen für die Optimierung eines Prozesses selbst immer weiter durch.

## 4.7 Lebenszykluskosten

Potenziale zur Energieeinsparung gibt es in fast allen Bereichen, wie in der Gebäudetechnik, bei Fördereinrichtungen oder in Chemieprozessen.

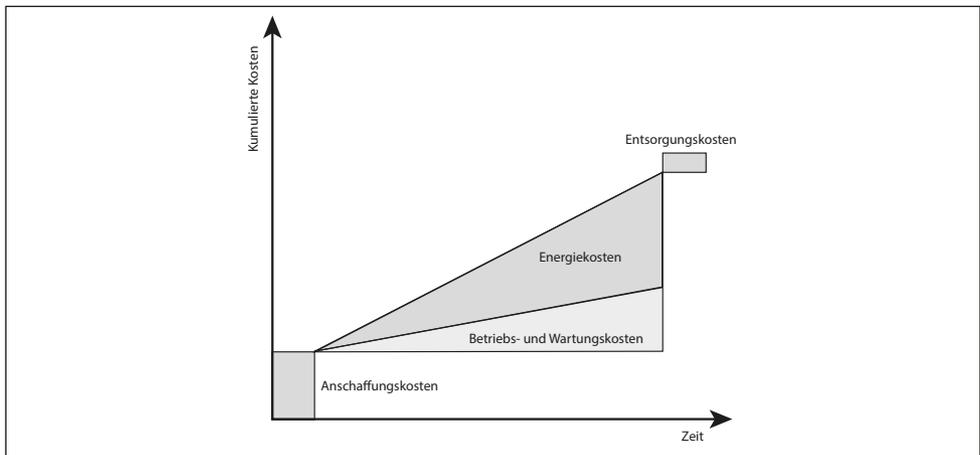


Abb. 4.17 Anschaffungskosten machen meist nur ca. 10 % der gesamten Lebenszykluskosten aus. Die höheren Anschaffungskosten von energiesparenden Geräten amortisieren sich meist sehr schnell.

## 4.8 Systemeinsparungen

Beim Versuch, die Energieeffizienz eines neuen oder bestehenden Prozesses bzw einer Maschine zu verbessern, muss immer das Gesamtsystem im Mittelpunkt der Betrachtung stehen. Vorhandene Anlagen haben den Vorteil, dass Messungen zur Bestimmung der Verluste möglich sind. Außerdem lässt sich anhand von Vergleichswerten ermitteln, ob sich die Verbesserungen des Systems wie gewünscht auswirken.

Abb. 4.18 „Übersicht des Motorantriebssystems mit verschiedenen Komponenten“ zeigt den Antrieb einer Fördereinrichtung mit den meisten Komponenten, die in einem Antriebssystem zu finden sind.

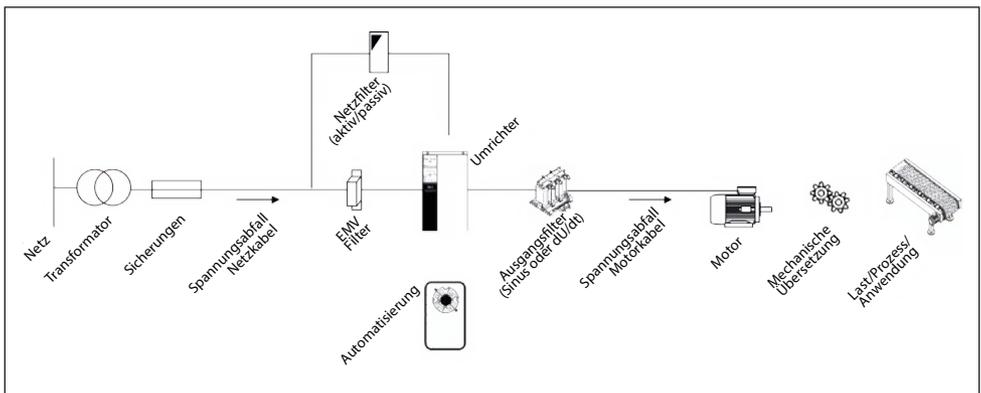


Abb. 4.18 Übersicht des Motorantriebssystems mit verschiedenen Komponenten

Aufbau und Dimensionierung des Systems hängen von der Anwendung (Übersetzung, Motor, Ausgangsfilter und Motorkabel) und ihrer Umgebung (EMV-Filter, Netzfilter, Kabel, Netz, Klimabedingungen usw.) ab. Deshalb sollten Planung und Beurteilung für Energieeinsparungen immer mit der Bewertung der Anwendung starten. Es ist sinnlos, ein oder zwei sehr effiziente Komponenten auszuwählen, wenn diese negative Auswirkungen auf die Systemeffizienz haben. Dies verdeutlicht das nachfolgende Beispiel.

Bevor man sich für eine Investition entscheidet, muss man nicht nur die technischen, sondern auch die wirtschaftlichen und logistischen Aspekte prüfen, um kostenintensive oder kontraproduktive Maßnahmen zu vermeiden oder zu minimieren. TCO (Gesamtbetriebskosten, d. h. Gesamtkosten innerhalb eines bestimmten Zeitrahmens) und LCC (Lebenszykluskosten, d. h. Kosten, die im gesamten Lebenszyklus auflaufen) sind mögliche Bewertungsmethoden.

Eine Analyse der Lebenszykluskosten umfasst nicht nur Anschaffungs- und Installationskosten, sondern auch die Kosten für Energie, Betrieb, Wartung, Ausfallzeiten, Umwelt und Entsorgung. Zwei dieser Faktoren – Energie- und Wartungskosten – haben einen entscheidenden Einfluss auf die Lebenszykluskosten.

$$LCC = K_{An} + K_{In} + K_{En} + K_{Betr} + K_{Wart} + K_{Aus} + K_{Um} + K_{Ent}$$

$K_{An}$  = anfängliche Kapitalkosten (Anschaffungskosten)

$K_{In}$  = Installations- und Inbetriebnahmekosten

$K_{En}$  = Energiekosten

$K_{Aus}$  = Kosten für Ausfallzeiten und Produktionsverluste

$K_{Betr}$  = Betriebskosten

$K_{Um}$  = Umweltkosten

$K_{Wart}$  = Wartungskosten

$K_{Ent}$  = Kosten für Außerbetriebnahme und Entsorgung

Einer der größten Faktoren bei den Lebenszykluskosten sind die Energiekosten. Höhere Investitionen dagegen, die den Energieverbrauch senken, haben bei vielen Anwendungen nur äußerst geringe Auswirkungen.

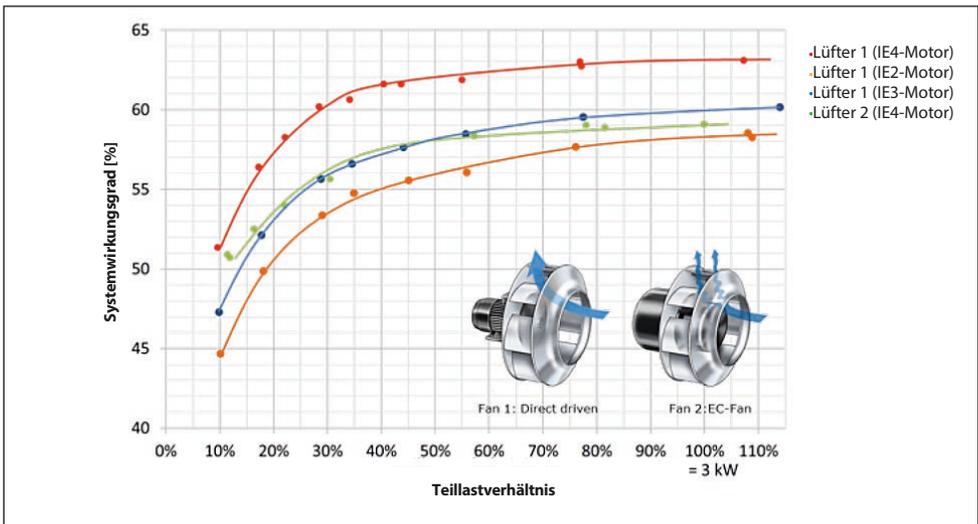


Abb. 4.19 Messung verschiedener Lüftersysteme mit 3 kW gemäß DIN EN ISO 5801 in derselben Lüftungsanlage

Lüfter 1 ist direkt angetrieben. Die Systemeffizienz steigt, wenn effizientere Motoren (bessere IE-Klasse) zum Einsatz kommen. Lüfter 2 ist ein EC-Ventilator mit einem hocheffizienten Antrieb. Die niedrigere Systemeffizienz ist eine Folge der Lüfterkonstruktion. Die Verwendung des Motors als Nabe im EC-Ventilator stört die Luftströmung, und die Systemeffizienz sinkt.

Die meisten Anwendungen eignen sich für Drehzahlregelung, dennoch ist dies von Fall zu Fall zu überprüfen. Beispielsweise sind nicht alle Kompressoren für Drehzahlregelung ausgelegt, und ihre Mindest- und Maximaldrehzahlgrenzen sind einzuhalten. Zu kurze und zu lange Rampenzeiten können kritisch sein.

## 4.9 Nutzung zurückgespeister Leistung

Der generatorische Betrieb von Elektromotoren ist möglich, wenn z. B. ein Asynchronmotor schneller läuft als seine Synchrondrehzahl. Dies tritt beispielsweise dann auf, wenn der Motor abbremst. In den meisten Fällen leitet der Anwender die erzeugte Energie in Bremswiderstände um, die diese in Wärme umwandeln. In der Praxis gibt es alternativ zwei gängige technische Lösungen, diese Energie zurück ins Netz zu speisen oder anderen Maschinen zuzuführen:

### Zwischenkreiskopplung

Einige Frequenzumrichter können ihren Gleichstrom-Zwischenkreis mit dem Zwischenkreis anderer Geräte verbinden. So ist eine Versorgung anderer Geräte direkt mit der rückgespeisten Energie möglich. Es gibt dabei jedoch einige Einschränkungen zu beachten. Beispielsweise sollten die Anwender sicherstellen, dass ein Kurzschluss in einem Gerät keine anderen Geräte beschädigen kann. Außerdem ist zu berücksichtigen, welche Konsequenzen es hat, wenn alle gekoppelten Geräte gleichzeitig generatorisch erzeugte Energie abgeben.

### Leistungsrückführung (Rückspeisung)

Active Front-End oder Active Infeed Converter können generatorisch erzeugte Leistung zurück ins Netz speisen. Ob solche Geräte zur Rückspeisung ins Netz wirtschaftlich sind, hängt von drei Faktoren ab:

### Verfügbare Energie

Die meisten Anwendungen erzeugen Energie bei Verzögerungsprozessen. Diese Energie nimmt während der Drehzahländerung kontinuierlich ab. Theoretisch entspricht die generatorische Energie 50 % der Differenz zwischen der Energie, die bei Beginn der Verzögerung im System ist, und der Energie, die am Ende der Verzögerung im System vorhanden ist. In der Realität liegt dieser Wert aber irgendwo zwischen 10 und 20 %. Ausnahmen gibt es bei Aufzügen, Kränen und Hubanwendungen. Außerdem ist die Motornennleistung nicht gleich der rückgespeisten Energie, da Motoren häufig überdimensioniert sind. Die Motornennleistung entspricht nur sehr selten genau der erforderlichen Leistung für die Anwendung.

### Verluste

Motor, Kabel, Getriebe und sogar das rückspeisende Gerät selbst erzeugen Verluste, die die in das Netz zurückzuführende Energie reduzieren.

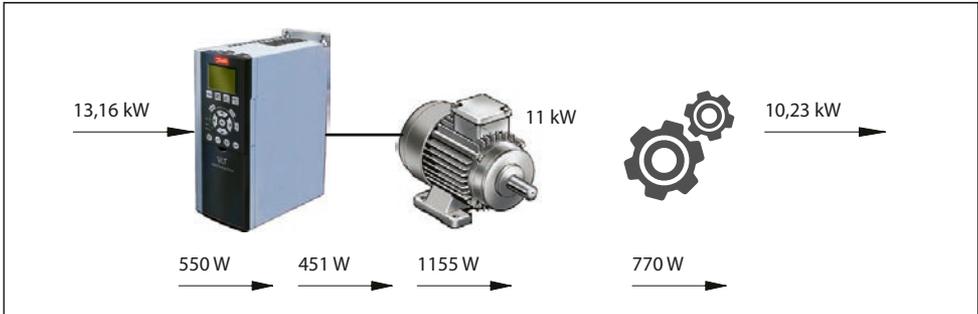


Abb. 4.20 Systemverluste während des Motorbetriebs

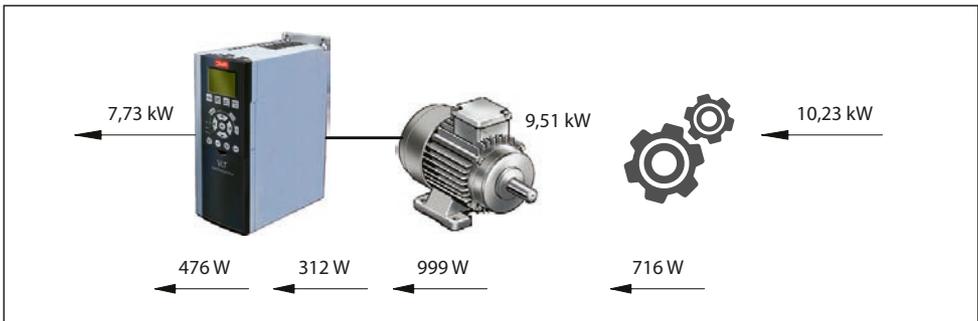


Abb. 4.21 Systemverluste während des generatorischen Betriebs

Die durch AFE oder AIC erzeugten Verluste sind dabei viel höher als bei einem Standard-Frequenzumrichter. Denn sie nutzen einen aktiven Gleichrichter, dessen Verluste sowohl im Betrieb wie auch im Standby doppelt so hoch sein können wie bei einem normalen Gleichrichter. Abhängig von der Konstruktion erzeugen rückspeisefähige Frequenzumrichter ohne notwendige Filter mehr Oberschwingungsströme, die auch zu höheren Verlusten im Netz führen können.

### Anteil generatorischer Betrieb

Je häufiger ein Motor im generatorischen Modus läuft, desto mehr Energie kann er ins Netz zurückspeisen. Deshalb sind die Zustände im Lastzyklus zu ermitteln, die Energie erzeugen. Ebenso wie der Lastzyklus selbst definiert die Anzahl der Lastzyklen den entsprechenden Energiebetrag für eine gegebene Zeit.

Bei den meisten Anwendungen lohnt sich die Investition in ein rückspeisefähiges System nicht, weil dieses normalerweise teurer ist als ein Standard-Wechselrichter. Das nachfolgende Beispiel eines Aufzugs zeigt, dass ein Active In-feed Converter auch negative Auswirkungen haben kann, obwohl Aufzüge normalerweise als optimale Anwendung für AIC gelten.

Anwendung: Aufzug in Wohngebäude

Belastung: 1100 kg

Betrieb: 1 h pro Tag

$\eta_{\text{Getriebe}}=90\%$   $\eta_{\text{Hubweg}}=80\%$   $\eta_{\text{Motor}}=88\%$  (IE2)  $\eta_{\text{AIC}}=95\%$   $\eta_{\text{VSD}}=97\%$

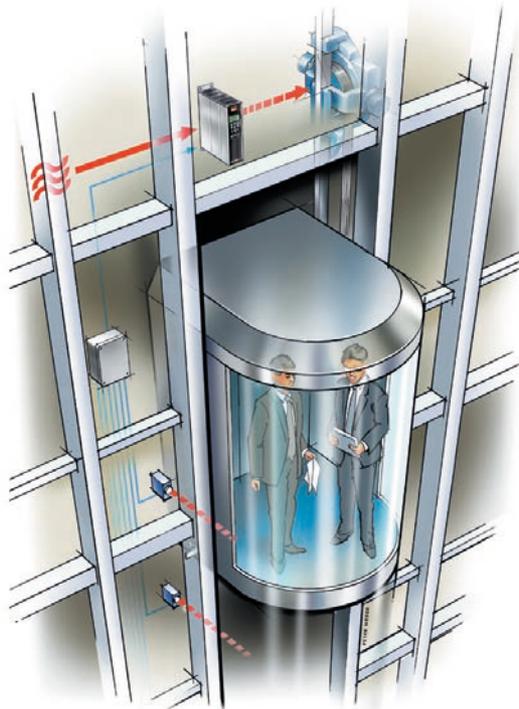
Standby-Verluste: AIC = 40 W, VSD = 40 W

Ergebnis:

	AFE/AIC	Standardfrequenzumrichter
Verluste des Motors pro Jahr	47 kWh	34 kWh
Verluste im Standby pro Jahr	336 kWh	168 kWh
Erzeugte Energie pro Jahr	170 kWh	–
Verbrauchte Energie	213 kWh	202 kWh

Table 4.2 Energieverbrauch für Aufzugsbeispiel

Die im Beispiel verwendeten Werte sind sehr konservativ. Es mag überraschen, aber ein Ein-Stunden-Betrieb für einen Aufzug in einem typischen Wohngebäude ist sehr lang. Trotzdem ist die Energiebilanz negativ. Das zeigt, dass Anwendungen, in denen AIC zum Einsatz kommen können, besondere Überlegungen erfordern.



## 5 Elektromagnetische Verträglichkeit

### 5.1 EMI und EMV

Der Begriff der elektromagnetischen Interferenzen (EMI) bezeichnet die Verschlechterung der Leistung eines Geräts durch elektromagnetische Störungen.

EMI ist beispielsweise die Ursache für zufällige Punkte und Linien auf einem Fernsehbildschirm (häufig „Schnee“ genannt), die auftauchen, während im gleichen Raum ein Staubsauger läuft. In diesem Beispiel ist der Staubsauger die Störungsquelle, während der Fernseher die Störungen empfängt und somit die Störungssenke ist.

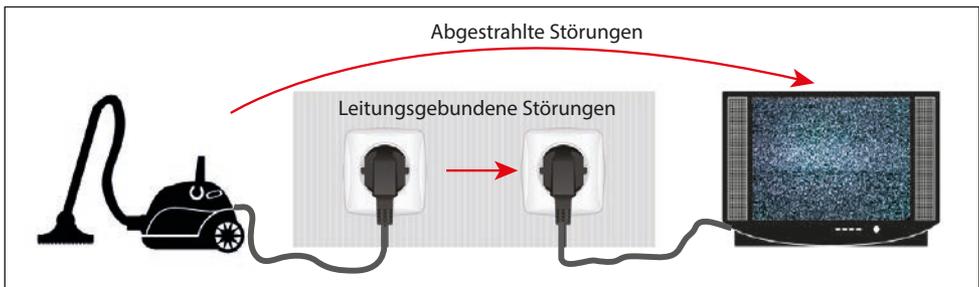


Abb. 5.1 Unterschied zwischen abgestrahlten und leitungsgebundenen Störungen

Die Verbreitung von elektromagnetischen Störungen kann über Leiter (leitungsgebundene Störungen) oder über elektromagnetische Wellen (abgestrahlte Störungen) erfolgen. Es gibt vier Kopplungsmechanismen für Störungen:

- Eine galvanische Kopplung tritt auf, wenn zwei Stromkreise (Störungsquelle und -senke) über eine gemeinsame elektrische Leitung miteinander verbunden sind.
- Eine kapazitive Kopplung (auch bekannt als elektrische Kopplung) tritt auf, wenn zwei Stromkreise eine gemeinsame Bezugserde haben und die Schwingungen über Fremdkapazitäten eine Kopplung zwischen zwei Leitungen herstellen.
- Eine induktive Kopplung (auch bekannt als magnetische Kopplung) tritt auf, wenn das Magnetfeld um einen stromdurchflossenen Leiter in einem anderen Leiter Ströme induziert.
- Eine elektromagnetische Kopplung tritt auf, wenn die Störungsquelle elektromagnetische Energie über einen Leiter ausstrahlt, der als Sendeantenne fungiert. Der gestörte Stromkreis empfängt die Störungen über einen Leiter, der als Empfangsantenne dient.

Es kann unterschiedliche Quellen von elektromagnetischen Störungen geben, wie z. B.:

- natürliche Quellen wie Blitzschlag;
- elektrische Geräte, die nicht dafür vorgesehen sind, elektromagnetische Strahlung zu erzeugen: z. B. ein Frequenzumrichter oder eine Stromversorgung;

- elektrische Geräte, die dafür vorgesehen sind, elektromagnetische Strahlung zu erzeugen:  
z. B. ein tragbarer Radiosender oder ein Mobiltelefon.

Die Kunst bei der EMI-Fehlersuche besteht darin, die Störungsquelle und den Kopplungsmechanismus zu ermitteln und dann mit geeigneten Maßnahmen die Störungskopplung auf ein akzeptables Niveau zu reduzieren.

Wenn ein Gerät oder System in seiner elektromagnetischen Umgebung zufriedenstellend funktioniert, ohne unzumutbare Störungen zu erzeugen, spricht man von elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV). Die Definition von EMV beinhaltet zwei Aspekte:

- Störfestigkeit: die Fähigkeit von Geräten, auch bei einem gewissen Niveau von elektromagnetischen Störungen zu funktionieren;
- Störaussendung: die ungewollten Störaussendungen von Geräten müssen auf ein tolerierbares Niveau beschränkt werden.

Die Differenz zwischen Störaussendungsspanne und Störfestigkeitsspanne wird Verträglichkeitslücke genannt.

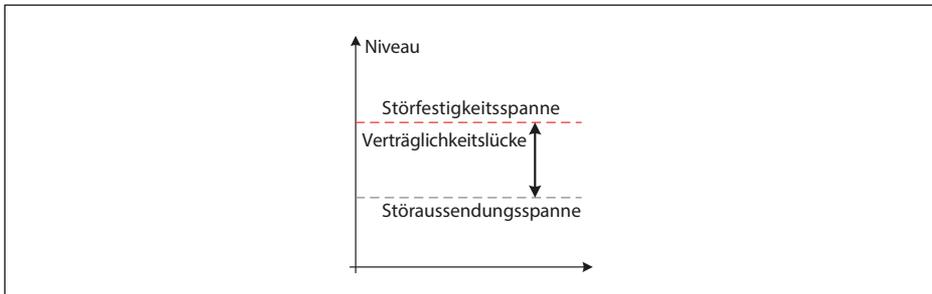


Abb. 5.2 Erklärung der Verträglichkeitslücke

### RFI oder EMI?

Der Begriff Funkfrequenzstörungen (RFI) wird häufig als Synonym für EMI verwendet. RFI ist ein älterer Begriff und bezieht sich auf Störungen beim Empfang von Funksignalen (Radio, Fernsehen, drahtlose Kommunikation). EMI ist ein neuerer Begriff, der ganz allgemein Störungen aller elektrischen Geräte bezeichnet, einschließlich Frequenzumrichter.

### Gleichtakt und Gegentakt

In Bezug auf leitungsgebundene Störungen fallen häufig die Begriffe Gleichtakt (CM - Common Mode) und Gegentakt (DM - Differential Mode).

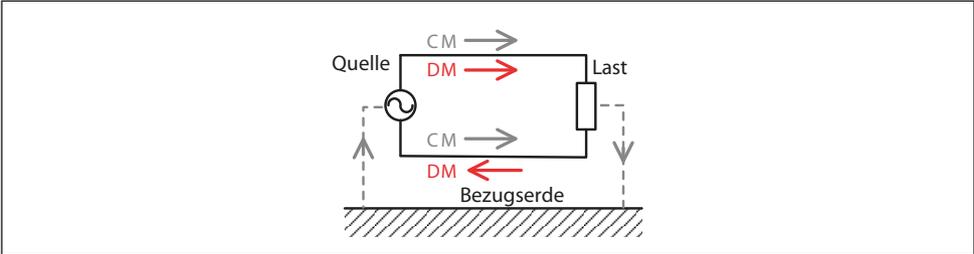


Abb. 5.3 Gleichtakt und Gegentakt

Im Gegentaktbetrieb (DM) laufen die Störungen zusammen mit dem gewünschten Signal über beide Leitungen der Stromschleife in entgegengesetzter Richtung. Im Gleichtaktbetrieb (CM) werden Störungen auf beiden Leitungen in derselben Richtung geleitet, ihr Rückweg erfolgt über eine gemeinsame Bezugserde.

## 5.2 EMV und Frequenzumrichter

### Störaussendungen

Frequenzumrichter beinhalten das schnelle Schalten von Spannungen (hohe  $du/dt$ -Raten) im einige Tausend  $V/\mu s$ -Bereich mit Amplituden im Bereich von 500-1000 V (abhängig von der Versorgungsspannung) sowie hohen Stromstärken. Dadurch sind Frequenzumrichter eine potenzielle Quelle von EMI, und ihre EMV-gerechte Installation sollte mit Sorgfalt erfolgen.

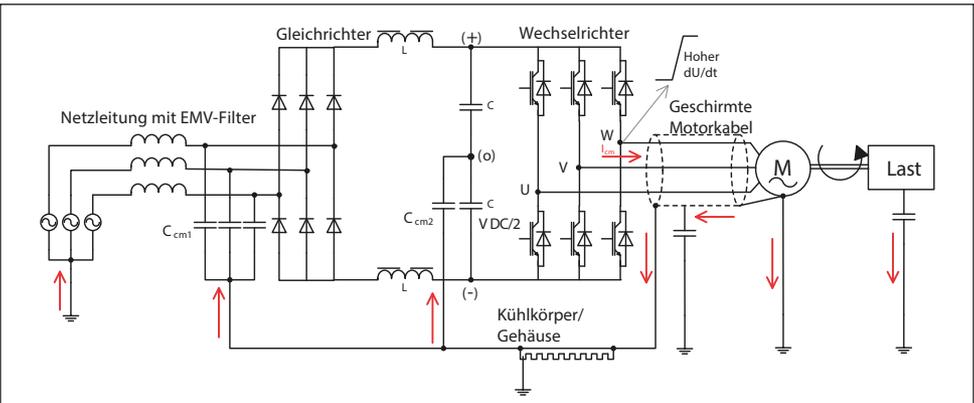


Abb. 5.4 Ausbreitung von Störungen in einem Frequenzumrichter

Die Störquelle ist der Wechselrichter mit Gleichspannungszwischenkreis, der eine impulsförmige Ausgangsspannung mit sehr kurzen Anstiegs- und Abfallzeiten erzeugt (auch ausgedrückt als hohe  $du/dt$ -Werte). Diese Spannung wird über Streukapazitäten im Motorkabel und im Motor an Erde angelegt und führt zu einem Gleichtaktstrom:

$$I_{cm} = C_{cm} \times \frac{du}{dt}$$

wobei  $C_{cm}$  die Streukapazität zur Erde ist.

Der Gleichtaktstrom muss den Stromkreis schließen und zu seiner Quelle, dem Zwischenkreis, zurückfließen. Die Kontrolle der Rückleitung des Gleichtaktstroms ist entscheidend, um elektromagnetische Störungen zu begrenzen. Im Frequenzumrichter gibt es Gleichtaktkondensatoren, also Kondensatoren zwischen Frequenzumrichterkreis und Masse/Erde. Die Gleichtaktkondensatoren befinden sich im RFI-Kreis ( $C_{cm1}$ ) oder als Entkopplungskondensatoren im Zwischenkreis ( $C_{cm2}$ ). Kommt ein abgeschirmtes Motorkabel zum Einsatz und ist das motorseitige Ende des Kabels an das Motorgehäuse sowie das Frequenzumrichter-Ende an das Gehäuse des Frequenzumrichters angeschlossen, fließt der Gleichtaktstrom im Idealfall über die Gleichtaktkondensatoren zurück in den Zwischenkreis. Dabei soll der Gleichtaktstrom nicht über die Netzversorgung zurückfließen, da er dort Störungen in anderen Geräten erzeugen könnte, die ebenfalls an die Netzversorgung angeschlossen sind. Aus diesem Grund ist dieser Strom zu minimieren, etwa durch den Einsatz von EMV-Filtern. Sind ungeschirmte Motorkabel installiert, fließt nur ein Teil des Gleichtaktstroms über das Gehäuse des Frequenzumrichters und Gleichtaktkondensatoren zurück, was mehr Störungen in der Netzversorgung zur Folge hat.

### **Störfestigkeit**

Beim Einsatz von Frequenzumrichtern sind sowohl Störfestigkeit als auch Störaussendung zu berücksichtigen. Die an einen Frequenzumrichter angeschlossenen Steuersignale können relativ störanfällig sein. Im Allgemeinen sind analoge Signale anfälliger als digitale Signale. Daher ist es besser, eine digitale Buskommunikation anstelle analoger Sollwertsignalen zu verwenden. Wenn sich analoge Signale nicht vermeiden lassen, bietet ein Stromsollwertsignal von 4-20 mA gegenüber einem Spannungssollwertsignal von 0-10 V Vorteile, da es weniger störanfällig ist.

## **5.3 Erdung und Abschirmung**

### **Erdung**

Erdung bedeutet, elektrische Geräte an eine gemeinsame Bezugserde anzuschließen. Für diese Vorgehensweise gibt zwei Gründe:

- Elektrische Sicherheit: Schutzerdung stellt sicher, dass im Falle einer Verschlechterung der elektrischen Isolierung an leitfähigen Teilen, die Personen berühren könnten, keine Spannung anliegt. Sie beugt so der Gefahr eines Stromschlags vor.
- Reduzierung von Störungen: Ein Potenzialausgleich reduziert Spannungsunterschiede, die zu Störaussendungen oder -anfälligkeit führen könnten.

Hierbei ist zu beachten, dass elektrische Sicherheit immer höchste Priorität hat – höher als EMV.

Es gibt verschiedene gängige Arten von Erdung.

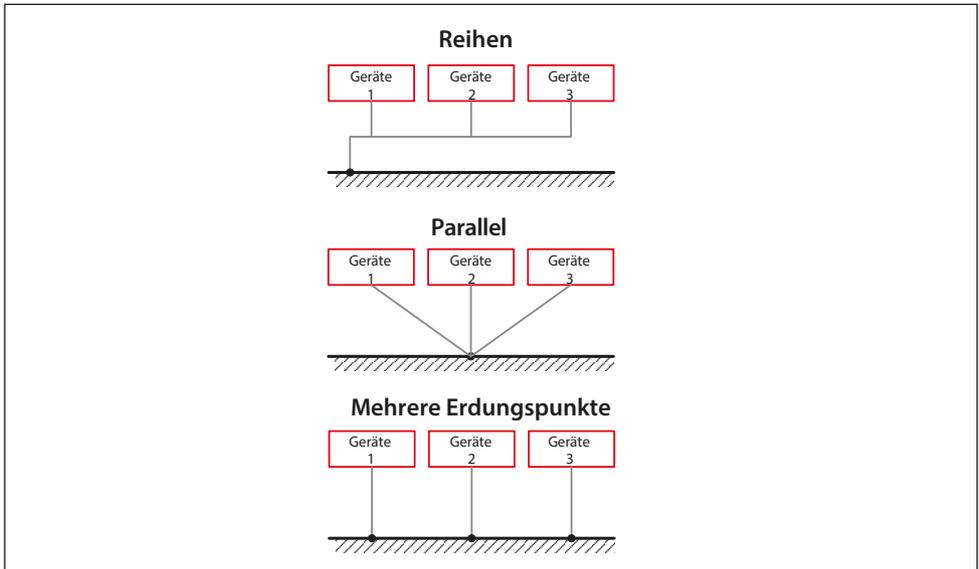


Abb. 5.5 Erdung: Einzelne Erdungspunkte in einer Reihen- oder Parallelkonfiguration sowie Erdung mit mehreren Erdungspunkten

Die unterschiedlichen Erdungsarten haben Vor- und Nachteile, aber letztendlich ist das Wichtigste, dass die Impedanz der Erdverbindung so niedrig wie möglich ist, um einen Potenzialausgleich der angeschlossenen Geräte sicherzustellen.

### Abschirmung

Eine Abschirmung dient sowohl zur Erhöhung der Störfestigkeit (Schutz vor externen Störungen) als auch der Reduzierung von Störaussendungen (Verhinderung der Abstrahlung von Störungen). Frequenzumrichteranwendungen nutzen abgeschirmte Kabel sowohl für Leistung (Motorkabel und Bremswiderstandskabel) als auch für Signale (analoge Sollwertsignale, Buskommunikation).

Die Abschirmleistung eines Kabels wird in Form seiner Übertragungsimpedanz  $Z_T$  angegeben. Die Übertragungsimpedanz setzt einen Strom an der Oberfläche der Abschirmung mit den durch diesen Strom auf der gegenüberliegenden Oberfläche der Abschirmung erzeugten Spannungsabfall in Verbindung:

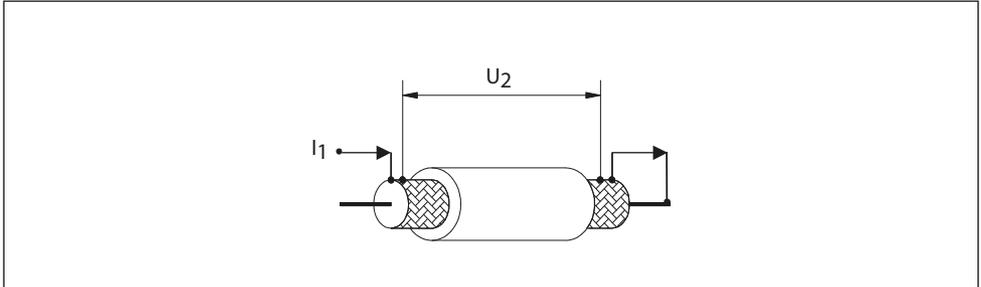


Abb. 5.6 Darstellung der Übertragungsimpedanz

$$Z_T = \frac{U_2}{I_1 \cdot L}$$

wobei L die Kabellänge ist

Je geringer der Wert der Übertragungsimpedanz, desto besser die Abschirmleistung. Die nachstehende Tabelle zeigt typische Werte von Übertragungsimpedanzen für unterschiedliche Arten von geschirmten Motorkabeln. Die gängigste Ausführung ist das einlagige Kupferdrahtgeflecht, da es eine gute Abschirmleistung zu einem günstigen Preis bietet.

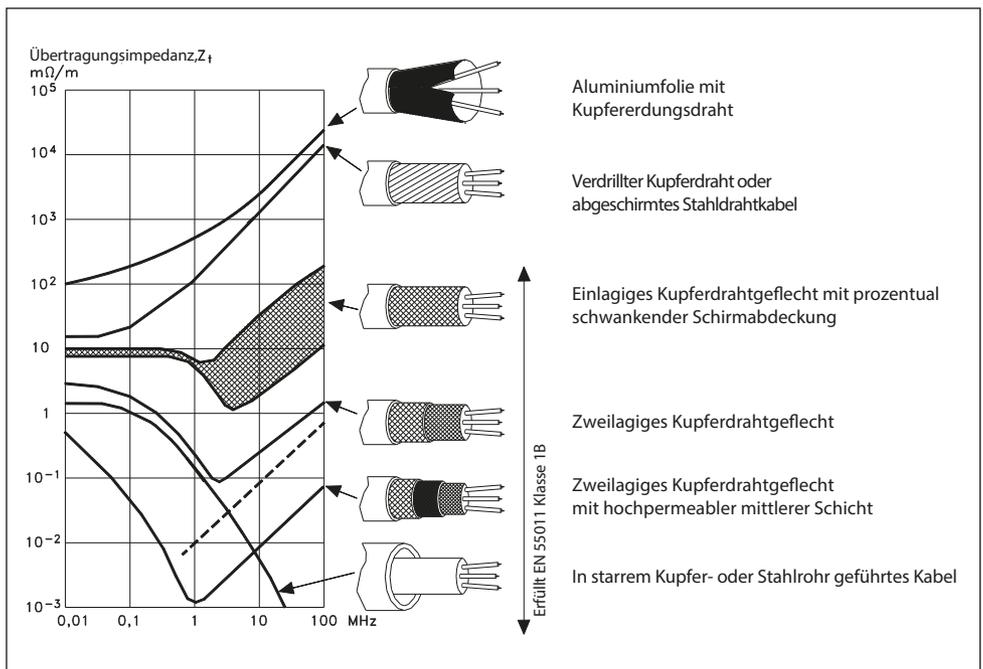


Abb. 5.7 Abschirmleistung verschiedener Kabeltypen

Die Übertragungsimpedanz kann sich durch einen falschen Schirmanschluss drastisch erhöhen. Die Abschirmung eines Kabels muss über eine großflächige Auflage an das Gehäuse des jeweiligen Geräts angeschlossen sein. Die Verwendung von verdrillten Abschirmungsenden zum Anschluss der Abschirmung führt zu einer erhöhten Übertragungsimpedanz und macht die Abschirmwirkung des Kabels zunichte.

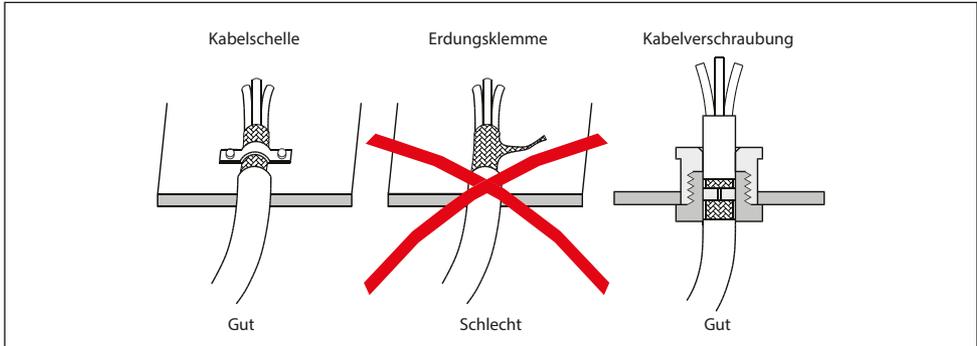
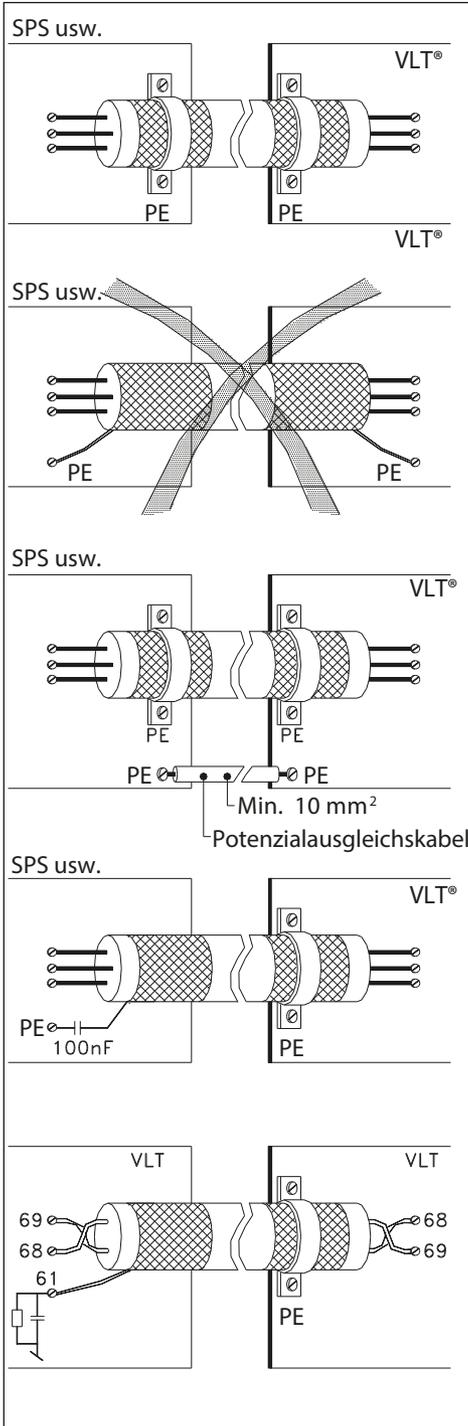


Abb. 5.8 Installation eines Kabelschirms

Häufig wird die Frage gestellt, ob beide Enden eines abgeschirmten Kabels aufzulegen sind oder nur ein Ende. Hierbei ist zu bedenken, dass die Wirkung eines abgeschirmten Kabels reduziert wird, wenn nur ein Ende aufgelegt wird. Es ist sehr wichtig, beide Enden des Motorkabels korrekt abzuschließen, da andernfalls Störungen auftreten könnten.

Der Grund für die Tatsache, in einigen Fällen nur ein Ende anzuschließen, hängt mit Brummschleifen in Signalleitungen zusammen. Das bedeutet, dass es eine Spannungspotenzialdifferenz zwischen den Gehäusen der beiden angeschlossenen Geräte gibt (z. B. Frequenzumrichter und SPS) und dass im Falle einer Verbindung der beiden Gehäuse über die Abschirmung ein Erdstrom erzeugt wird (mit einer Frequenz von 50 Hz/60 Hz). Dieser Strom koppelt sich dann an das Signal und stört es – bei Audio-Anwendungen ist dies allgemein als „Brummen“ bekannt. Die beste Lösung ist in diesem Fall die Verwendung einer Ausgleichsverbindung parallel zum abgeschirmten Kabel. Falls dies nicht möglich ist, kann ein Ende des abgeschirmten Kabels über einen 100-nF-Kondensator abgeschlossen werden. Dies unterbricht die Brummschleife bei niedriger Frequenz (50 Hz), während gleichzeitig die Abschirmung im hohen Frequenzbereich aufrechterhalten wird. In einigen Geräten ist dieser Kondensator bereits eingebaut. So ist etwa bei Danfoss VLT®-Frequenzumrichtern die Abschirmverbindung für Signalkabel an Anschluss 61 vorhanden.



Steuerleitungen und Kabel für serielle Kommunikation sind normalerweise an beiden Enden zu erden.

Schließen Sie niemals eine Abschirmung über verdrehte Kabelenden (Pigtails) an.

Potenzialausgleich zwischen SPS und Frequenzumrichter:  
Trennen Sie die Kabelverbindung auf und prüfen Sie die Spannung mit einem Voltmeter. Verwenden Sie ein Potentialausgleichskabel oder stellen Sie sicher, dass die Gerät miteinander verschraubt sind.

50-/60-Hz-Brummschleifen: Verwenden Sie eine Stromzange zur Prüfung.  
=> Erden Sie ein Ende der Schirmauflage mithilfe eines 100-nF-Kondensators mit kurzen Leitungen.

Potenzialausgleichsströme im Kabelschirm des seriellen Kommunikationskabels zwischen zwei Frequenzumrichtern:  
=> Schließen Sie ein Ende des Schirmgeflechts an den speziellen Abschirmanschluss mit RC-Glied an. Denken Sie an eine korrekte Installation des Schirmgeflechts!

Abb. 5.9 Erdung eines Kabelschirms

## 5.4 Anlagen mit Frequenzumrichtern

Beim Anschluss von Frequenzumrichtern ist es wichtig, die anerkannten Regeln der Technik zu beachten, um die elektromagnetische Verträglichkeit sicherzustellen. Beim Entwurf einer Installation kann unter Beachtung der folgenden Schritte ein EMV-Plan erstellt werden:

- Auflisten der Komponenten, Geräte und Bereiche
- Unterteilung in potenzielle Störquellen und potenziell empfindliche Geräte
- Klassifizierung der Kabel, die die Geräte verbinden (potenziell störend oder potenziell empfindlich)
- Festlegung der Anforderungen und Auswahl der Geräte
- Trennung von potenziellen Störquellen und potenziell empfindlichen Geräten
- Prüfung der Schnittstellen zwischen Störquellen und empfindlichen Geräten
- Verlegen von Kabeln gemäß der Klassifizierung

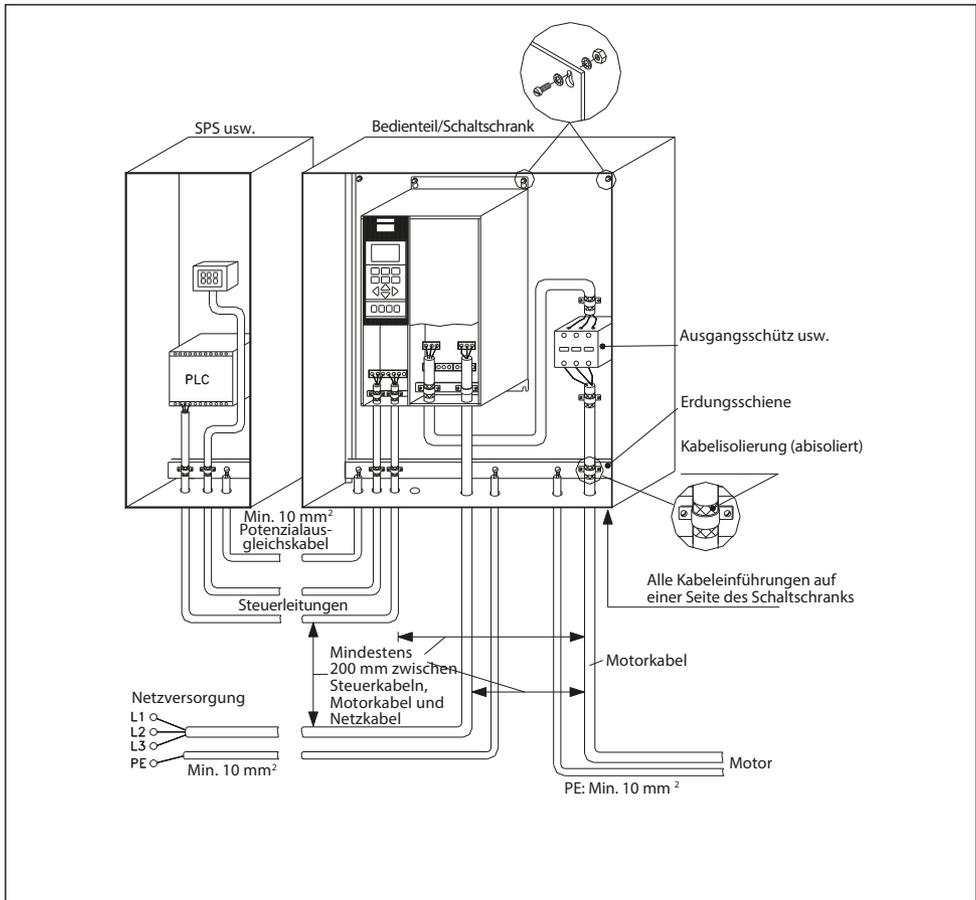


Abb. 5.10 Typische Maßnahmen in der Praxis bei der Installation eines einfachen Frequenzumrichters

## 5.5 Gesetzgebung und Normen

### Unterschied zwischen Gesetzgebung und Normen

Gesetze erlässt die Legislative einer nationalen oder lokalen Regierung. Sie sind verpflichtend und müssen eingehalten werden. Es handelt sich dabei um politische Dokumente ohne spezifische technische Details – diese Details sind in Normen zu finden. Normen erstellen die Experten in den maßgeblichen Normungsgremien (wie etwa der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) oder dem Europäischen Komitee für elektrotechnische Normung (CENELEC)). Sie geben den neusten Stand der Technik wieder. Ihre Aufgabe ist die Schaffung einer gemeinsamen technischen Grundlage, um eine Kooperation auf dem Markt zu ermöglichen.

### Europäische EMV-Richtlinie

Die neueste EMV-Richtlinie 2014/30/EU tritt am 20. April 2016 in Kraft und ersetzt die vorherige Richtlinie 2004/108/EG. Diese Richtlinie stellt eine gesetzliche Vorgabe der Europäischen Union dar. Im Grunde sind die darin enthaltenen Anforderungen ganz einfach:

- Produkte dürfen keine unerwünschten elektromagnetischen Störungen aussenden (Beschränkung von Störaussendungen);
- Produkte müssen gegenüber einer angemessenen Menge an Störungen immun sein (Festlegung von Immunitätsanforderungen).

Bei der Richtlinie selbst handelt es sich um ein politisches Dokument, das keine spezifischen technischen Anforderungen enthält. Hersteller haben die Möglichkeit, harmonisierte Normen anzuwenden, um die Einhaltung der Richtlinie nachzuweisen. Die Einhaltung der EMV-Richtlinie (und auch anderer maßgeblicher Richtlinien wie der Niederspannungsrichtlinie) geht aus der Konformitätserklärung des Produkts und dem am Produkt angebrachten „CE-Zeichen“ hervor.

Der Anwendungsbereich der EMV-Richtlinie umfasst zwei Kategorien:

- Geräte: ein fertiges Gerät, das als Einzelfunktionseinheit, die für Endnutzer bestimmt ist, im Handel erhältlich ist. Geräte, die den Anforderungen der Richtlinie genügen, werden mit dem CE-Zeichen gekennzeichnet;
- Ortsfeste Anlagen: eine Kombination von Geräten oder weiteren Einrichtungen, die dazu bestimmt sind, auf Dauer an einem vorbestimmten Ort betrieben zu werden. Ortsfeste Anlagen werden nach den „anerkannten Regeln der Technik“ und unter Berücksichtigung der Angaben zur vorgesehenen Verwendung der Komponenten installiert. Ortsfeste Anlagen werden nicht mit dem CE-Zeichen gekennzeichnet.

### EMV-Normen

Es gibt verschiedene Kategorien von Standards:

- Grundlegende Normen beziehen sich auf allgemeine Aspekte wie Versuchsaufbau, Messverfahren und Emissionslinien. Für Antriebe mit Drehzahlregelung kommen im Allgemeinen die in EN55011 festgelegten Emissionsgrenzen zur Anwendung;

- Fachgrundnormen beziehen sich auf spezielle Umgebungen und wurden hauptsächlich entwickelt, um das Fehlen von spezifischen Produktnormen auszugleichen. Für Wohnbereiche, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe kommen die Fachgrundnorm Störfestigkeit EN 61000-6-1 sowie die Fachgrundnorm Störaussendung EN 61000-6-3 zur Anwendung. Für den Industriebereich kommen dagegen die Fachgrundnorm Störfestigkeit EN 61000-6-2 sowie die Fachgrundnorm Störaussendung EN 61000-6-4 zur Anwendung;
- Produktnormen gelten für eine bestimmte Produktfamilie. Für Frequenzumrichter gilt die Norm EN/IEC 61800-3.

In der Produktnorm für Frequenzumrichter sind sowohl die Grenzwerte für Störfestigkeit, als auch Störaussendung abhängig von der Umgebung, in der ein Frequenzumrichter zum Einsatz kommt, festgelegt: Wohnbereich (strengere Störaussendungsgrenzen, nicht so hohe Störfestigkeitswerte) oder Industriebereich (weniger strenge Störaussendungsgrenzen, höhere Störfestigkeitswerte).

EN/IEC 61800-3 Kategorie	EN55011 Klasse	Fachgrundnorm
C1	Klasse B	Wohnbereich EN 61000-6-3
C2	Klasse A, Gruppe 1	Wohnbereich
C3	Klasse A, Gruppe 2	Industriebereich EN 61000-6-4
C3 (I > 100A)	Klasse A, Gruppe 2, I > 100A	Industriebereich
C4	Keine Beschränkungen. Erstellen Sie einen EMV-Plan	Industriebereich

Tabelle 5.1 Übersicht über unterschiedliche EMV-Normen

# 6 Schutz gegen elektrischen Schlag und andere elektrische Gefährdung

## 6.1 Allgemeines

Elektrische Produkte arbeiten oft mit Spannungen und Strömen, die für Menschen, Tiere und Systeme potenziell gefährlich sind. Diese Gefahren können aufgrund von Körperkontakt, Überlast, Kurzschluss, der Beschädigung von Komponenten oder des Einflusses von Wärme oder Feuchtigkeit bestehen.

Die daraus resultierenden, potenziellen Gefahren müssen durch vorsorgende Planung und Entwicklung, kombiniert mit einer Fehleranalyse und einer Einschätzung des Restrisikos, ausgeräumt oder zumindest auf ein akzeptables Minimum gesenkt werden.

Bei der Planung und dem Bau von Frequenzumrichtern muss die Sicherheit vor Gefahren während Installation, bei normalen Betriebsbedingungen und der Wartung gewährleistet sein. Auch die Senkung von Gefahren aufgrund einer vernünftigerweise vorhersehbaren missbräuchlichen Nutzung von Frequenzumrichtern, die während ihrer Lebensdauer vorkommen kann, darf nicht außer Acht gelassen werden.

Der Schutz gegen elektrischen Schlag wird im Grunde durch zwei Schutzarten sichergestellt.

- Grundlegender Schutz, durch den der Benutzer unter normalen Betriebsbedingungen gegen elektrischen Schlag geschützt ist. Der grundlegende Schutz wird normalerweise durch ein Gehäuse, Absperrungen oder Kriech-/Luftstrecken gewährleistet.
- Fehlerschutz, durch den der Benutzer beim erstmaligen Auftreten eines Defekts geschützt ist. Den Fehlerschutz beim Frequenzumrichter stellen gewöhnlich die Verwendung von Kunststoffgehäusen oder Erdung sicher.

Außerdem besitzen die Frequenzumrichter eine schützende galvanische Trennung zwischen den zugänglichen Steuerungskomponenten/-kreisen und ihrer Leistungselektronik. Dies soll sicherstellen, dass die Steuerleitungen nicht mit gefährlicher Spannung (z. B. Netzspannung, Gleichspannung und Motorspannung) in Berührung kommen kann. Denn so könnte ein Kontakt mit den Steuerleitungen potenziell lebensgefährlich sein, sowie die Gefahr der Beschädigung der Geräte bestehen.

In der internationalen/europäischen Norm IEC/EN 61800-5-1 sind die Anforderungen für den Schutz gegen elektrischen Schlag sowie für den Schutz gegen andere Gefahren, die bei Frequenzumrichteranwendungen bestehen, genau beschrieben.

Die Schutzart der Frequenzumrichter bietet Schutz gegen kontaktbedingte Verletzungen oder Beschädigungen. Eine Schutzart über IP21 verhindert eine kontaktbedingte Körperverletzung. Außerdem ist die Einhaltung nationaler Unfallverhütungsvorschriften erforderlich (wie etwa die BGV-A3, die für elektrische Geräte in Deutschland verbindlich ist), um einen Schutz gegen kontaktbedingte Gefahren sicherzustellen.

### **Gefahr durch hohe Temperaturen und Brandgefahr**

Frequenzumrichter können als Folge von Überhitzung eine Brandgefahr darstellen. Aus diesem Grund sind sie mit einem eingebauten Temperaturfühler auszurüsten, der den Betrieb des Frequenzumrichters einstellt, wenn die Kühlung ausfällt.

Unter bestimmten Bedingungen kann ein an einen Frequenzumrichter angeschlossener Motor unerwartet wieder anlaufen, beispielsweise, wenn im Frequenzumrichter Timer aktiviert sind oder Temperaturgrenzen überwacht werden.

### **Not-Aus**

Abhängig von systemspezifischen Vorschriften ist es möglicherweise notwendig, in der Nähe des Motors einen Not-Aus-Schalter anzubringen. Dieser Schalter lässt sich in der Netzversorgungsleitung oder im Motorkabel integrieren, ohne dass der Frequenzumrichter oder der Motor beschädigt wird.

## **6.2 Netzversorgungssysteme**

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, die Netzversorgung zu erden, wobei jede Möglichkeit bestimmte Vor- und Nachteile hat. Laut der Definition in der IEC 60364 gibt es drei Hauptsysteme zur Erdung:

### **TN, TT und IT. Die Buchstaben stehen für**

- T – Terra (Lat.) = Verbindung zur Erde
- N – Neutral = direkte Verbindung zum Neutralleiter
- I – Isoliert = keine Verbindung/potenzialfrei

### **TN-S-System**

Die Stromversorgung in einem Gebäude muss die Anforderungen eines TN-S-Systems erfüllen, was kombinierte PEN-Leiter ausschließt.

Das TN-S-System verfügt über die beste EMV-Leistung, da die Neutral- und PE-Leiter hier getrennt sind. Daher hat ein Strom durch den N-Leiter keine Auswirkungen auf das Spannungspotenzial des PE-Leiters. Dies ist das bevorzugte System für Frequenzumrichteranwendungen.

Der Nachteil des TN-S-Systems, den alle TN- und TT-Systeme gemeinsam haben, besteht darin, dass die Schutzsicherungen im Falle eines Erdschlusses an der Leitung den Betrieb einstellen.

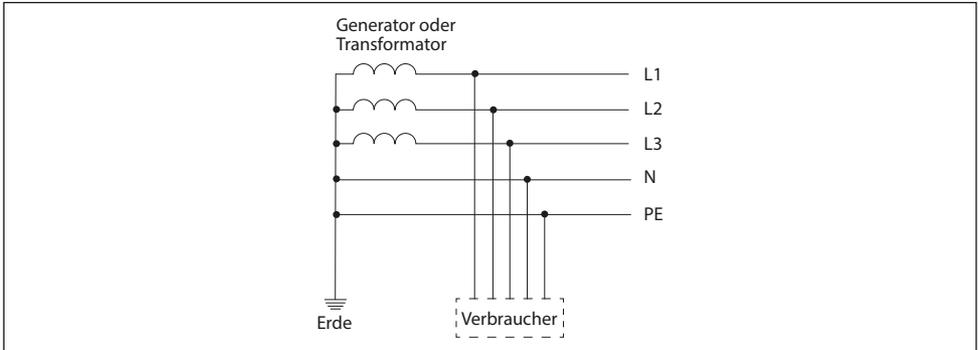


Abb. 6.1 TN-S-System: Separater Neutral- und PE-Leiter.

### TN-C-System

Im TN-C-System sind der PE- und der N-Leiter in einem PEN-Leiter vereint. Der Nachteil bei diesem System ist, dass ein Strom durch den N-Leiter gleichzeitig auch ein Strom durch den PE-Leiter ist, weshalb ein Spannungspotenzial zwischen Erde und Gehäuse des angeschlossenen Geräts entsteht. In einer 50-Hz-/60-Hz-Umgebung mit linearen Lasten bestehen mit diesem System keine besonderen Probleme. Sind jedoch elektronische Lasten vorhanden, einschließlich Frequenzumrichter, können die auftretenden hochfrequenten Ströme Störungen verursachen. Auch wenn dieses System mit Frequenzumrichtern kompatibel ist, ist es aufgrund der damit verbundenen Risiken zu vermeiden. Aus EMV-Sicht ist das TN-C-System nicht optimal.

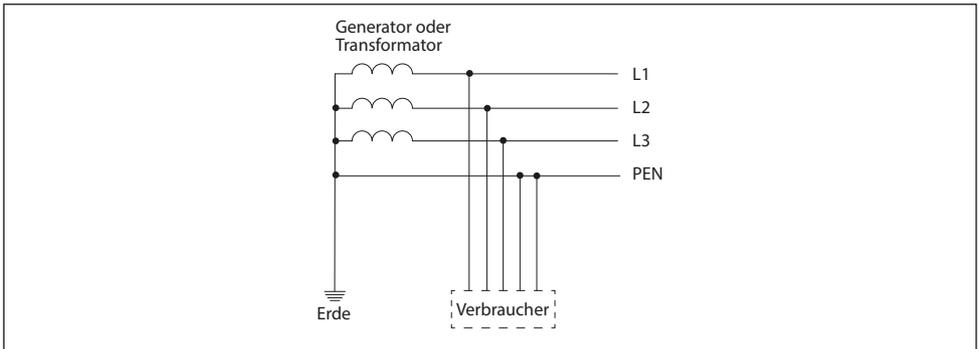


Abb. 6.2 TN-C-System: Im gesamten System sind der N-Leiter und der PE-Leiter im PEN-Leiter vereint.

### TN-C-S-System

Das TN-C-S-System ist eine Mischform zwischen dem TN-C- und dem TN-S-System. Vom Transformator bis zur Verteilerstelle im Gebäude sind PE-Leiter und N-Leiter vereint (PEN) – genauso wie im TN-C-System. Im Gebäude sind PE- und N-Leiter getrennt, genauso wie im TN-S-System. Da die Impedanz des PEN-Leiters zwischen Transformator und Verteilerstelle im Gebäude gewöhnlich niedrig ist, reduziert dies die negative Auswirkung auf das TN-C-Netz.

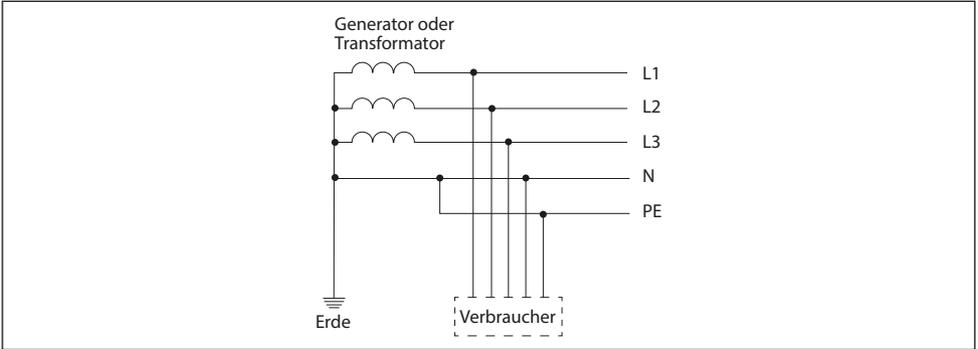


Abb. 6.3 TN-C-System: Im gesamten System sind der N-Leiter und der PE-Leiter im PEN-Leiter vereint

**TT-System**

Im TT-System ist der PE-Leiter beim Verbraucher in Form einer lokalen Erdung vorhanden. Der Hauptvorteil des TT-Systems liegt darin, dass die hochfrequenten Ströme im PE-Stromkreis des Verbrauchers von den niederfrequenten Strömen im N-Leiter getrennt sind. Aus EMV-Sicht ist dies das ideale System. Aufgrund der unbekanntenen Impedanz der Erdverbindung zwischen der Erdung des Transformators und der Erdung des Verbrauchers kann jedoch nicht garantiert werden, dass im Falle eines Kurzschlusses zwischen L und PE beim Verbraucher die Sicherungen schnell genug abschalten und so einen Schutz vor elektrischem Schlag darstellen. Dieser Nachteil lässt sich durch die Verwendung von Fehlerstromschutzschaltern (RCD) abschwächen.

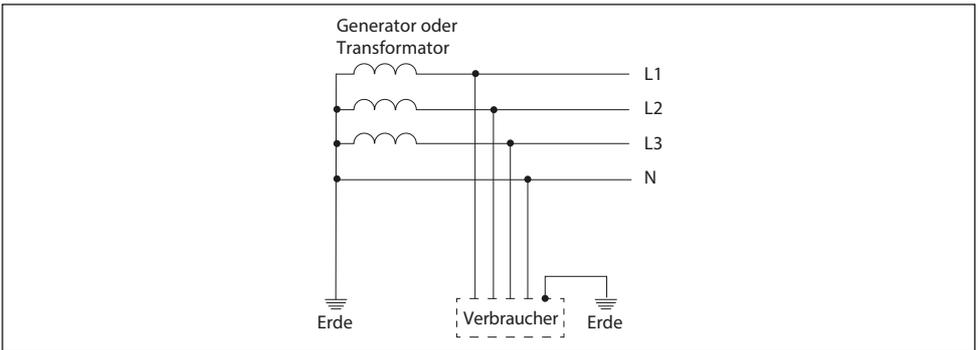


Abb. 6.4 TT-System: Geerdeter N-Leiter und Erdung der einzelnen Geräte/Installationen

**IT-System**

Im IT-Netz ist der Transformator nicht geerdet, und die drei Phasen sind potenzialfrei. Der Grund für die Nutzung dieses Systems ist die Möglichkeit, den Betrieb sogar nach dem Auftreten eines Leiter-Erdschlusses fortsetzen zu können. Geräte zur Überwachung der Isolierung stellen die Integrität der Isolierung zwischen den Phasen und der Erdung sicher. Sollte die Isolierung beschädigt sein, kann eine Instandsetzung erfolgen.

Der Nachteil dieses Systems sind seine schlechte EMV-Eigenschaften. Tatsächlich stört jeder Erdstörungsstrom das gesamte System und verursacht möglicherweise Fehlfunktionen von elektronischen Geräten. Kommen Frequenzumrichter an IT-Netzen zum Einsatz, müssen spezielle Vorkehrungen getroffen werden, etwa die Trennung aller Kondensatoren zur Erde (wie etwa die Gleichtaktkondensatoren im EMV-Filter). Als Folge davon werden die leitungsgeführten Emissionen nicht gefiltert und es kommt zu vielen hochfrequenten Störungen im IT-Netz.

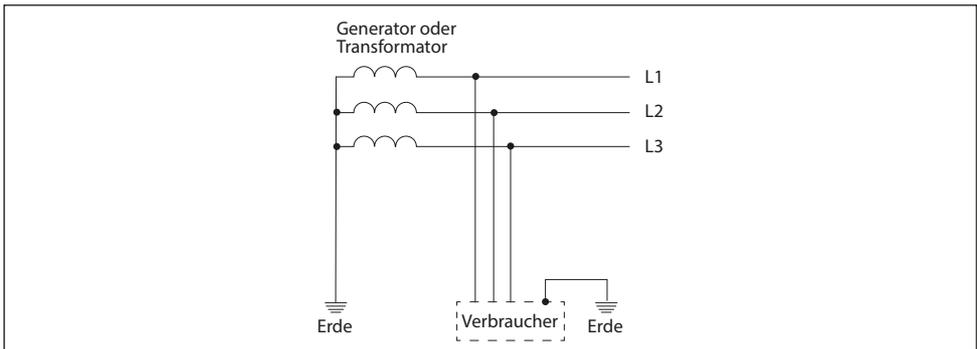


Abb. 6.5 IT-System: Isoliertes Netz: Der N-Leiter kann über eine Impedanz geerdet oder ungeerdet sein

## 6.3 Zusätzlicher Schutz

Die Verschlechterung der Isolierung zwischen spannungsführenden Teilen und dem Gehäuse führt zu Erdableitströmen und kann sowohl die Personensicherheit (Gefahr des elektrischen Schlags), als auch die Gerätesicherheit (Gefahr der Überhitzung von Komponenten, die schließlich zu einem Brand führen kann) beeinträchtigen. Der Einsatz von zusätzlichen Schutzeinrichtungen hängt von lokalen, branchenspezifischen oder gesetzlichen Vorschriften ab.

Es gibt zwei Arten von Schutzrelais zur Sicherstellung eines zusätzlichen Schutzes. Eine Möglichkeit setzt auf ein Fehlerspannungsrelais und die zweite Möglichkeit nutzt ein Fehlerstromrelais. Ein zusätzlicher Schutz durch ein Fehlerspannungsrelais (FU-Relais) ist in den meisten Installationen möglich. Der Schutz wird durch Schalten der Relaisspule zwischen der Erdungsklemme des Frequenzumrichters und dem Erdungspunkt des Systems erreicht. Eine Fehlerspannung löst das Relais aus und trennt den Frequenzumrichter vom Netz.

In der Praxis sind FU-Relais in Situationen von Vorteil, in denen eine Erdung nicht zulässig ist. Ob sie verwendet werden können, hängt von den Vorschriften des jeweiligen Stromversorgungsunternehmens ab. Diese Form des Schutzes kommt nur sehr selten zum Einsatz.

Ein Erdableitstromschutz mit einem Differenzstrom-Schutzschalter (Residual Current-operated Circuit Breaker, RCCB) ist unter bestimmten Bedingungen zulässig. Differenzstrom-Schutzschalter umfassen einen Summenstromwandler. Sämtliche Netzversorgungsleiter für den Frequenzumrichter führen durch diesen Transformator. Der Summenstromwandler nimmt die Summe der Ströme auf, die durch diese Leiter fließen.

Die Summe ist Null, wenn kein Ableitstrom in der Installation vorliegt. Liegt ein Ableitstrom vor, ist die Summe ungleich null, und es wird ein Strom in die Sekundärwicklung des Transformators induziert. Dieser Strom schaltet das Relais ab und trennt den Frequenzumrichter vom Netz. Herkömmliche RCCB verwenden eine induktive Abtastung und sind daher nur für das Abtasten von Wechselströmen geeignet.

Frequenzumrichter mit B6-Eingangsbrückengleichrichtern können im Fehlerfall einen reinen Gleichstrom durch die Versorgungsleitung hervorrufen. Es wird empfohlen zu prüfen, ob am Eingang zum Frequenzumrichter Gleichstrom vorkommen kann. Wenn dies der Fall ist, sind Fehlerstromschutzschalter des Typs B (sowohl auf Gleich-, als auch auf Wechselstrom reagierend) zu verwenden, um einen zuverlässigen Schutz zu gewährleisten. Dieser Fehlerstromschutzschalter verfügt über zusätzliche integrierte Schaltungen, durch die er sowohl Wechsel-, als auch Gleichstrom-Fehlerströme erkennen kann.

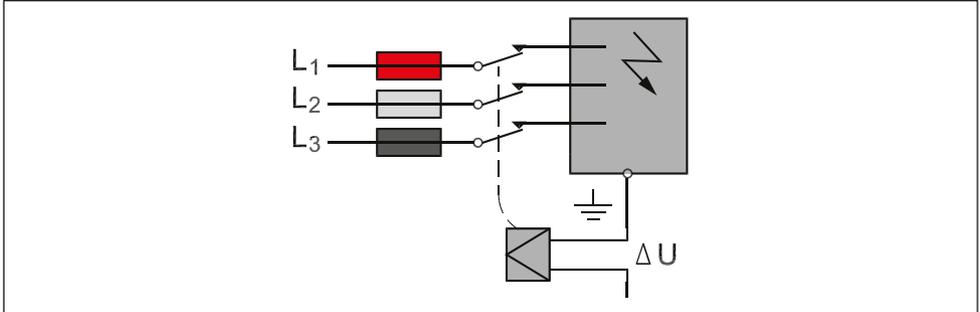


Abb. 6.6 Fehlerspannungsrelais

Diese Geräte sind allgemein als Differenzstrom-Schutzschalter (RCCB) bekannt. Der in der Fachsprache verwendete Begriff gemäß EN 61008-1 ist „Fehlerstromschutzschalter“ (Residual Current-operated Device, RCD).

Filter und Komponenten zur EMV-Entstörung (Gleichtaktkondensatoren) verursachen immer eine gewisse Menge an Ableitstrom. Der von einem einzigen Funkentstörfilter verursachte Ableitstrom beträgt gewöhnlich nur einige wenige Milliampere. Kommen jedoch mehrere oder große Filter zum Einsatz, kann der so erzeugte Ableitstrom den Abschaltwert des Fehlerstromschutzschalters erreichen.

Die im Zusammenhang mit Frequenzumrichtern verwendeten Komponenten zur Funkentstörung erzeugen Ableitströme. Aus diesem Grund ist die Erdverbindung folgendermaßen durchzuführen:

- Wenn der Ableitstrom höher ist als 3,5 mA, muss der Querschnitt des PE-Leiters mindestens 10 mm<sup>2</sup> betragen;
- Andernfalls müssen die jeweiligen Geräte mithilfe von zwei separaten PE-Leitern geerdet werden. Eine gängige Bezeichnung hierfür ist „verstärkte Erdung“.

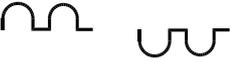
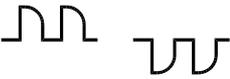
	Wechsel-Fehlerströme
	Pulsierende Gleichströme (pos. und neg. Halbwelle)
	Abfallende Halbwellenströme Winkel des Abfalls $90^\circ$ el. $135^\circ$ el.
	Halbwellenstrom mit Überlagerung von glattem Gleichfehlerstrom von 6 mA
	Glatter Gleichfehlerstrom

Abb. 6.7 Kurvenformen und Bezeichnungen von Fehlerströmen

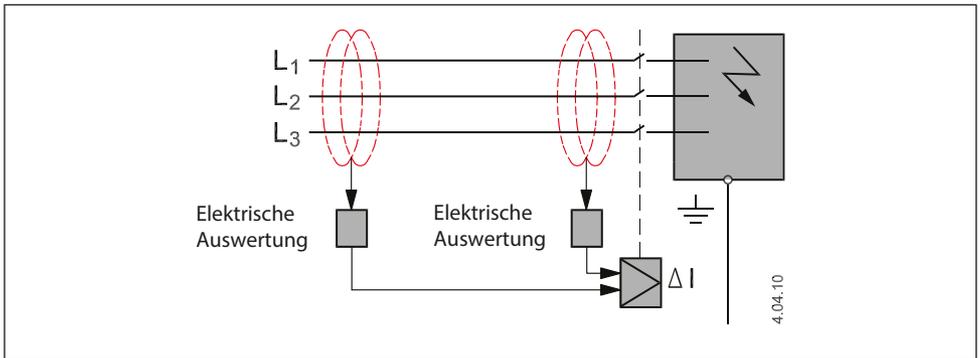


Abb. 6.8 Universeller RCCB

## 6.4 Sicherungen und Trennschalter

Zum Schutz der Frequenzumrichter und der Anlage vor elektrischen Gefahren und Bränden sind sie mithilfe eines Überstromschutzgeräts (z. B. einer Sicherung oder eines Trennschalters) vor Kurzschluss und Überstrom zu sichern. Der Schutz muss den geltenden lokalen, nationalen und internationalen Vorschriften entsprechen.

Eine Sicherung unterbricht die Energiezufuhr bei zu hohem Strom, um das geschützte Gerät vor weiterem Schaden zu bewahren. Sie zeichnet sich durch einen bestimmten Nennstrom (den Strom, den eine Sicherung kontinuierlich leiten kann) und eine Geschwindigkeit aus (wie lange es dauert, damit die Sicherung bei einem bestimmten Überstrom abschaltet). Je höher der Strom, desto schneller schaltet die Sicherung. Dieses Verhalten zeigen Zeit-Strom-Kennlinien, wie Abb. 6.9 „Zeit-Strom-Kennlinien von Sicherungen“ zeigt:

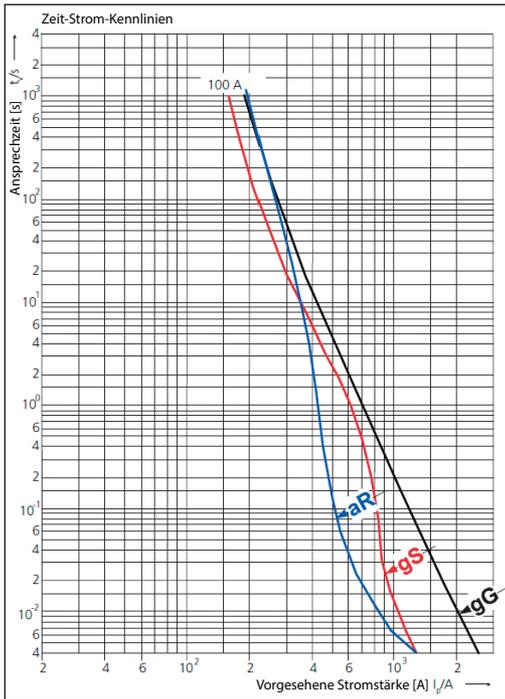


Abb. 6.9 Zeit-Strom-Kennlinien von Sicherungen

Abhängig vom Verwendungszweck gibt es unterschiedliche standardisierte Zeit-Strom-Kennlinien. Zum Schutz von Frequenzumrichtern werden gewöhnlich aR-Sicherungen für den Halbleiterschutz verwendet, um den Schaden im Falle von Kurzschlüssen oder des Ausfalls von internen Komponenten zu begrenzen. In einigen Fällen können auch Mehrzwecksicherungen des Typs gG zum Einsatz kommen. Für die Auswahl der jeweiligen Sicherung ist es wichtig, die Dokumentation zum Frequenzumrichter zu lesen und die dort gegebenen Empfehlungen genau zu befolgen, da die empfohlenen Sicherungen zusammen mit dem Frequenzumrichter getestet worden sind.

### **Trennschalter**

Anders als Sicherungen, die nach dem Durchbrennen ausgetauscht werden müssen, sind Trennschalter elektromechanische Geräte, die sich nach ihrer Aktivierung einfach zurücksetzen lassen. Da die Auslösegeschwindigkeit von Trennschaltern langsamer sein kann, als die von Sicherungen, muss ihr Einsatz sorgfältig abgewogen werden. Die langsame Auslösegeschwindigkeit kann zu umfangreichen Schäden im zu schützenden Gerät, zu anschließender Überhitzung und sogar zu Brandgefahr führen. Nicht alle Frequenzumrichter sind so konstruiert, dass ein Schutz durch Trennschalter möglich ist.

Entwickler von Frequenzumrichtern befassen sich intensiv mit Maßnahmen zur Begrenzung von Schäden bei einem Ausfall von internen Komponenten im Frequenzumrichter. Zu solchen Maßnahmen gehören z. B. spezielle interne mechanische Funktionen im Gehäuse, der Einsatz von Schirmgeflecht, die Verwendung von Reflexionsfolie, um die Folgen des Ausfalls von internen Komponenten zu begrenzen.

Im Zusammenhang mit der Verwendung von Trennschaltern ist es äußerst wichtig, die Dokumentation zum Frequenzumrichter zu lesen und die dort gegebenen Empfehlungen genau zu befolgen, einschließlich zum Typ und Hersteller des zu verwendenden Trennschalters, da die empfohlenen Geräte zusammen mit dem jeweiligen Frequenzumrichter getestet worden sind.

## 7 Netzurückwirkungen

### 7.1 Was sind Oberschwingungen?

#### 7.1.1 Lineare Lasten

An einer sinusförmigen Wechselstromversorgung wird eine rein ohmsche Last (etwa eine weißglühende Glühbirne) einen sinusförmigen Strom in Phase mit der Versorgungsspannung aufnehmen.

Die von der Last abgeführte Leistung ist:  $P = U \times I$

Bei Blindlasten (wie beim Asynchronmotor) wird der Strom nicht mehr in Phase mit der Spannung sein, sondern eilt der Spannung nach und erzeugt dadurch einen induktiven Wirkleistungsfaktor mit einem Wert von unter 1. Bei kapazitiven Lasten ist der Strom vor der Spannung und erzeugt einen kapazitiven Wirkleistungsfaktor mit einem Wert von unter 1.

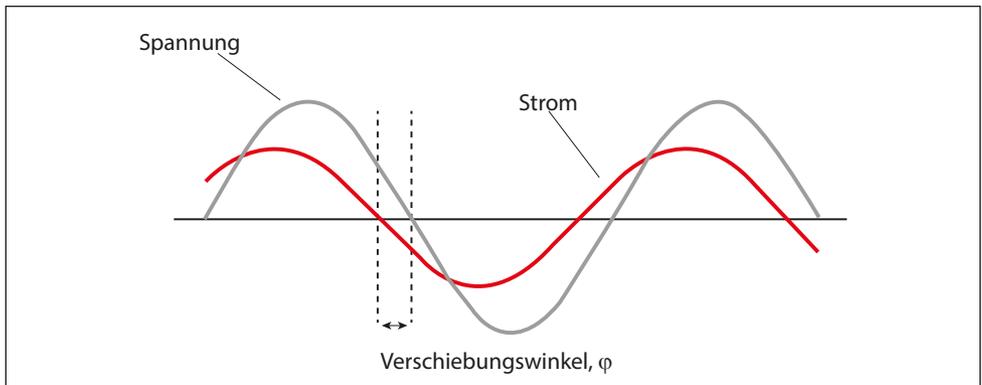


Abb. 7.1 Lineare Last

In diesem Fall besteht der Wechselstrom aus drei Komponenten: Wirkleistung (P), Blindleistung (Q) und Scheinleistung (S).

Die Scheinleistung ist:  $S = U \times I$

Bei einer optimal sinusförmigen Wellenform können P, Q und S als Vektoren ausgedrückt werden, die ein Dreieck bilden:

$$S^2 = P^2 + Q^2$$

Einheiten: S in [kVA], P in [kW] und Q in [kVAR].

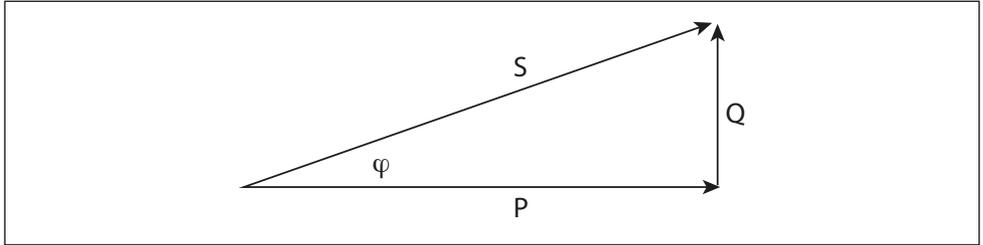


Abb. 7.2 Komponenten des Wechselstroms: Wirkleistung (P), Blindleistung (Q) und Scheinleistung (S)

Der Verschiebungswinkel zwischen Strom und Spannung ist  $\varphi$ .

Der Verschiebungsleistungsfaktor (DPF - Displacement Power Factor) ist das Verhältnis zwischen der Wirkleistung (P) und der Scheinleistung (S):

$$DPF = \frac{P}{S} = \cos(\varphi)$$

### 7.1.2 Nicht-lineare Lasten

Nicht-lineare Lasten (wie etwa Diodengleichrichter) nehmen einen nicht sinusförmigen Strom auf. Abb. 7.3 zeigt den von einem 6-Puls-Gleichrichter an einer dreiphasigen Versorgung aufgenommenen Strom.

Eine nicht sinusförmige Signalkurve lässt sich in eine Summe sinusförmiger Kurven zerlegen, mit Perioden, die ein ganzzahliges Vielfaches h der Grundfrequenz  $\omega_1$  sind.

$$f(t) = \sum a_n \times \sin(h \omega_1 t)$$

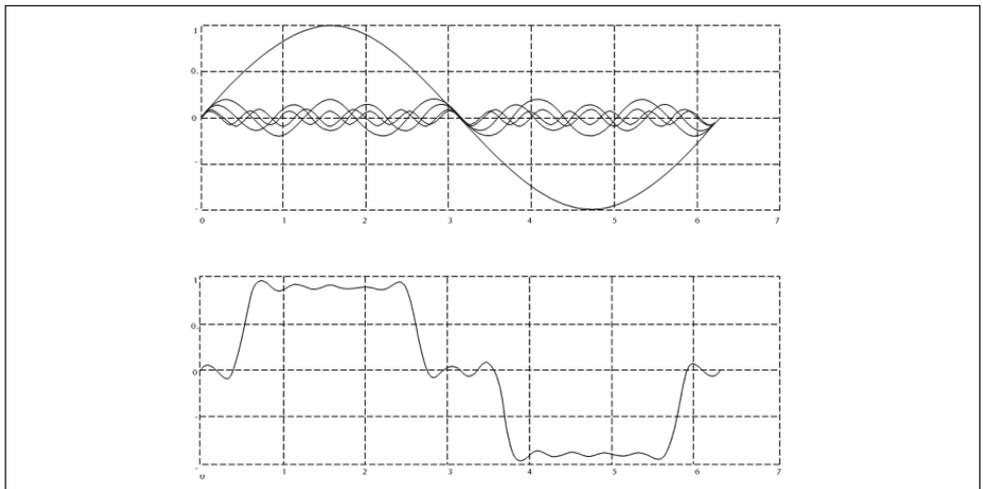


Abb. 7.3 Nicht-lineare Last: Von einem 6-Puls-Gleichrichter an einer dreiphasigen Versorgung aufgenommener Strom

Die ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz  $\omega_1$  bezeichnet man als Oberschwingungen. Der Effektivwert einer nicht sinusförmigen Signalkurve (Strom oder Spannung) berechnet sich zu:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{h_{\text{max}}}{h_1} \sum_{h_1} I^2(h)}$$

Die Anzahl der Oberschwingungen in einer Signalkurve ergibt den Verzerrungsfaktor oder Gesamtüberschwingungsgehalt (THD - Total Harmonic Distortion), dargestellt durch das Verhältnis des Effektivwerts des Oberschwingungsanteils zum Effektivwert der Grundmenge, ausgedrückt als Prozentsatz des Grundwerts:

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{h_{\text{max}}}{h_2} \left( \frac{I_h}{I_1} \right)^2} \times 100 \%$$

Mithilfe des THD ergibt sich das Verhältnis zwischen dem Effektivstrom  $I_{\text{eff}}$  und dem Grundstrom  $I_1$  zu:

$$I_{\text{RMS}} = I_1 \times \sqrt{1 + \text{THD}^2}$$

Dasselbe gilt für die Spannung.  
Der Wirkleistungsfaktor PF ( $\lambda$ ) ist:

$$\text{PF} = \frac{P}{S}$$

In einem linearen System entspricht der Wirkleistungsfaktor dem Verschiebungsleistungsfaktor:

$$\text{PF} = \text{DPF} = \cos(\varphi)$$

In nicht-linearen Systemen ist das Verhältnis zwischen Wirkleistungsfaktor und Verschiebungsleistungsfaktor folgendermaßen:

$$\text{PF} = \frac{\text{DPF}}{\sqrt{1 + \text{THD}^2}}$$

Blindleistung und Oberschwingungsbelastungen verringern den Leistungsfaktor. Ein niedriger Leistungsfaktor führt zu einem hohen Effektivstrom, der höhere Verluste in den Versorgungskabeln und Transformatoren verursacht.

Im Zusammenhang mit der Netzqualität trifft man häufig auf den Begriff Gesamtoberschwingungsanteil (TDD - Total Demand Distortion). Der TDD charakterisiert nicht die Last, sondern stellt einen Systemparameter dar. Der TDD drückt die Oberschwingungsverzerrung als Prozentsatz des maximalen Strombedarfs  $I_L$  aus.

$$TDD = \sqrt{\sum_{h_2}^{h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_L}\right)^2} \times 100 \%$$

Ein weiterer Begriff, der sich häufig in der Fachliteratur findet, ist der partiell gewichtete Verzerrungsfaktor (PWH - Partial Weighted Harmonic Distortion). Der PWH stellt eine gewichtete Oberschwingungsverzerrung dar, die nur die Oberschwingungen zwischen der 14. und der 40. Oberschwingung umfasst, wie aus der nachstehenden Definition hervorgeht.

$$PWH = \sum_{h=14}^{40} h \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2 \times 100 \%$$

### 7.1.3 Einfluss von Oberschwingungen in einer Energieverteilungsanlage

Die nachstehende Abbildung zeigt ein Beispiel für eine kleine Verteilungsanlage. Ein Transformator ist auf der Primärseite mit einem Verknüpfungspunkt PCC1 (Point of Common Coupling, PCC) an der Mittelspannungsversorgung verbunden. Der Transformator hat eine Impedanz  $Z_{xfr}$  und speist eine Reihe von Lasten. Der Verknüpfungspunkt, an dem alle Lasten angeschlossen sind, ist PCC2. Jede Last wird durch Kabel mit einer Impedanz  $Z_1, Z_2, Z_3$  angeschlossen.

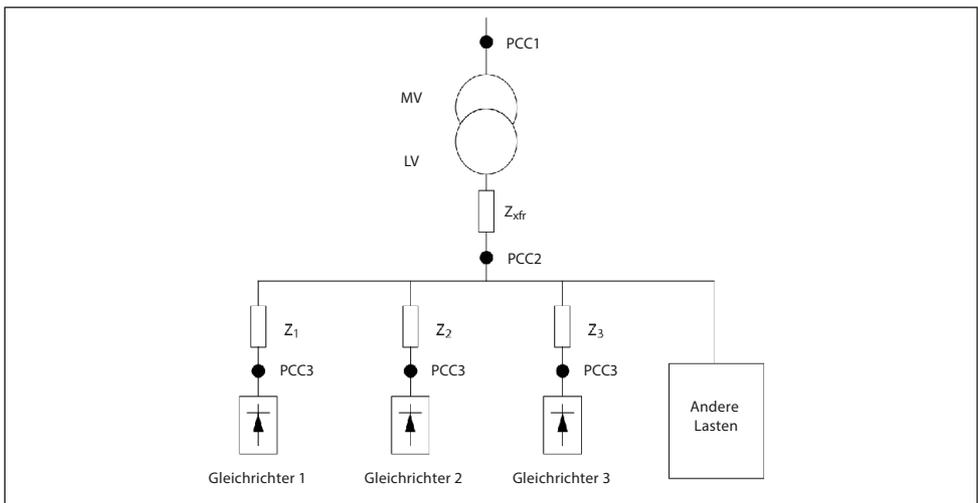


Abb. 7.4 Beispiel einer Verteilungsanlage

Von nicht-linearen Lasten aufgenommene Oberschwingungsströme führen durch den Spannungsabfall an den Impedanzen des Stromverteilungssystems zu einer Spannungsverzerrung. Höhere Impedanzen ergeben höhere Grade an Spannungsverzerrung.

Die Stromverzerrung steht mit der Geräteleistung und der individuellen Last in Verbindung, während die Spannungsverzerrung mit der Systemleistung zusammenhängt. Ist nur die Oberschwingungsleistung der Last bekannt, lässt sich die Spannungsverzerrung im PCC nicht ermitteln. Um die Verzerrung an diesem Punkt vorhersagen zu können, müssen die Konfiguration des Verteilungssystems und die entsprechenden Impedanzen bekannt sein.

Ein häufig verwendeter Begriff, um die Impedanz eines Stromnetzes zu beschreiben, ist das Kurzschlussverhältnis  $R_{SCE}$ , definiert als das Verhältnis zwischen Kurzschluss-Scheinleistung der Versorgung am PCC ( $S_{SC}$ ) und der Nennscheinleistung der Last ( $S_{equ}$ ).

$$R_{SCE} = \frac{S_{SC}}{S_{equ}}$$

$$\text{wobei } S_{SC} = \frac{U_2^2}{Z_{\text{Stromversorgung}}} \quad \text{und } S_{equ} = U \times I_{equ}$$

Die negativen Auswirkungen der Oberschwingungen hat zwei Faktoren

- Oberschwingungsströme tragen zu Systemverlusten bei (in Verkabelung, Transformator)
- Spannungsverzerrungen durch Oberschwingungen führen zu Störungen anderer Lasten und erhöhen Verluste in anderen Lasten

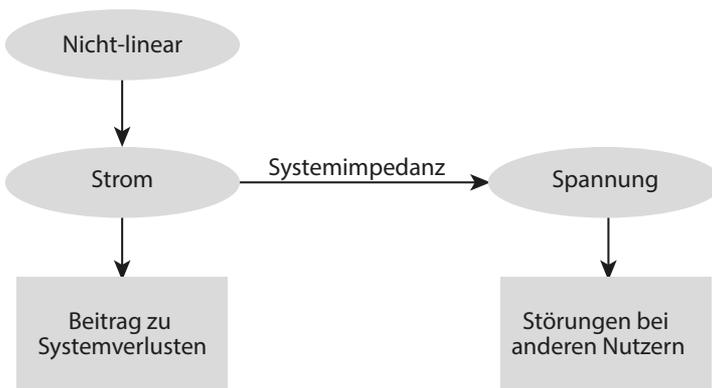


Abb. 7.5 Störende Wirkungen von Oberschwingungen: Systemverluste und Störungen

## 7.2 Normen und Anforderungen zur Oberschwingungsbegrenzung

Die Vorgaben zur Begrenzung der Oberschwingungsbelastung können u. a. aus folgenden Anforderungen resultieren:

- Anwendungsspezifischen Anforderungen
- Anforderungen zur Erfüllung von Normen

Die anwendungsspezifischen Anforderungen beziehen sich auf eine konkrete Anlage, in der technische Gründe für die Begrenzung der Oberschwingungen vorliegen.

Beispiel: 250-kVA-Transformator mit zwei angeschlossenen 110-kW-Motoren.

Der Motor A ist direkt an die Netzversorgung angeschlossen, bei Motor B erfolgt die Versorgung über den Frequenzumrichter B. Für die Anlage ist es notwendig, den Frequenzumrichter A nachzurüsten, damit auch Motor A über seinen eigenen Frequenzumrichter versorgt wird. Allerdings ist der Transformator für diesen Fall unterdimensioniert. Lösung: Um eine Nachrüstung ohne einen größeren Transformator zu ermöglichen, ist die Oberschwingungsverzerrung der Frequenzumrichter A und B mit Oberschwingungsfiltren zu reduzieren.

Es gibt verschiedene Normen, Vorschriften und Empfehlungen zur Reduzierung von Oberschwingungen. Normen unterscheiden sich je nach Land und Industrie. Zu den gängigsten Normen gehören:

- IEC/EN 61000-3-2, Grenzwerte für Oberschwingungsströme ( $\leq 16$  A je Phase)
- IEC/EN 61000-3-12, Grenzwerte für Oberschwingungsströme ( $> 16$  A und  $\leq 75$  A)
- IEC/EN 61000-3-4, Begrenzung der Aussendung von Oberschwingungsströmen ( $> 16$  A)
- IEC/EN 61000-2-2 und IEC/EN 61000-2-4, Verträglichkeitspegel für niederfrequente, leitungsgeführte Störgrößen
- IEEE519, IEEE empfohlene Verfahren und Anforderungen zur Oberschwingungssteuerung in elektrischen Anlagen
- G5/4, technische Empfehlung, Planungsstufen für Oberschwingungsspannungsverzerrungen und den Anschluss von nicht-linearen Geräten an Übertragungssysteme und Verteilernetze in Großbritannien, die auch in weiteren Ländern herangezogen wird.

## 7.3 Verfahren zur Reduzierung von Oberschwingungen in Frequenzumrichtern

Der Netzstrom eines reinen Diodengleichrichters hat einen Gesamtoberschwingungsgehalt (THD) von mindestens 80 %. Dieser hohe Verzerrungswert ist in den meisten Anwendungen mit Frequenzumrichtern inakzeptabel. Daher ist es notwendig, Oberschwingungen zu reduzieren. Wie stark die Oberschwingungen zu minimieren sind, hängt, wie bereits gesagt, von der jeweiligen Anlage und den Normen ab, denen die Anlage entsprechen muss.

Tabelle 7.1 „Methoden zur Reduzierung von Oberschwingungen“ enthält eine Übersicht über die verschiedenen Methoden zur Reduzierung von Oberschwingungen. Oberschwingungen lassen sich entweder mithilfe von passiven oder aktiven Schaltungen reduzieren.

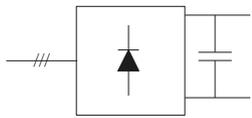
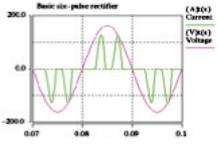
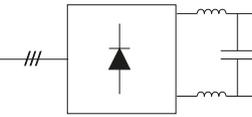
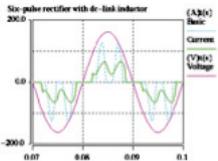
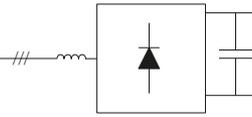
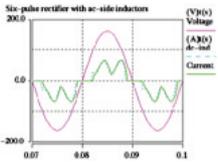
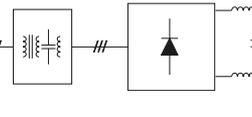
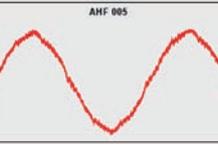
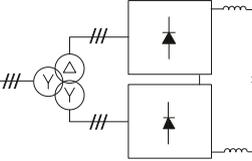
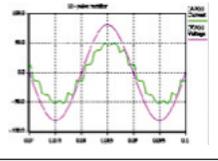
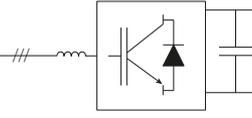
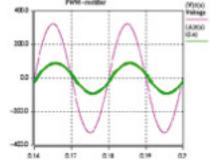
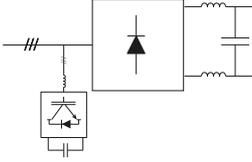
Reduzierungsmethode	Schaltendiagramm	Typischer Stromverlauf
Keine Reduzierung THD > 80 %		
Zwischenkreisdrosseln THD < 40 %		
Netzdrosseln THD < 40 %		
Passive Oberschwingungsfilter THD < 10 %		
Mehrpuls-Gleichrichter (12/18) THD < 10 %		
Active Front End THD < 5 %		
Aktive Filter THD < 5 %		Kurvenform ähnlich wie bei AFE

Tabelle 7.1 Methoden zur Reduzierung von Oberschwingungen

## 7.3.1 Passive Lösungen zur Reduzierung von Oberschwingungen

### Zwischenkreisdrosseln

Zwischenkreisdrosseln sind im Zwischenkreis zwischen dem Gleichrichter und dem Hauptgleichspannungskondensator montiert. Es ist möglich, eine einzige Drossel, entweder auf der Plus- oder Minus-Seite, oder zwei Drosseln zu verwenden. Diese Lösung reduziert den THDi auf Werte zwischen 35 und 45 % reduziert.

### Netzdrosseln

Netzdrosseln kommen netzseitig am Gleichrichter zum Einsatz. Ihre Oberschwingungsreduzierung entspricht der von Zwischenkreisdrosseln. Sie senken den TDH<sub>i</sub> auf typische Werte zwischen 35 und 45 %, abhängig von der Größe der Spule.

### Zwischenkreis- im Vergleich zu Netzdrosseln

Da Zwischenkreis- und Netzdrosseln über dieselbe Oberschwingungsleistung verfügen, stellt sich die Frage, worin sich diese beiden Lösungen unterscheiden. Zunächst ist anzumerken, dass, auch wenn der THD-Wert ähnlich ist, die Wirkung der beiden Lösungen auf die Komponenten des Oberschwingungsspektrums unterschiedlich ist. Zwischenkreisdrosseln dämpfen eher die niedrigen Frequenzkomponenten (5., 7. und 11. Oberschwingung), während die Netzdrosseln eine bessere Leistung bei den höheren Oberschwingungen erzielen.

Bei allen Spulen tritt ein Abfall der Wechsellspannung auf. Im Fall von Netzdrosseln liegt gewöhnlich der Spannungsabfall bei ungefähr 4 %. Bei Zwischenkreisdrosseln verursacht der Gleichstrom jedoch keinen Spannungsabfall. Der einzige Spannungsabfall bei diesen Drosseln ist auf die Stromwelligkeit des Gleichrichters zurückzuführen. Daher führt die Verwendung von Zwischenkreisdrosseln zu einer höheren DC-Zwischenkreisspannung, wodurch ein höheres Drehmoment an der Motorwelle erzielt werden kann. Das ist der wichtigste Vorteil von Zwischenkreisdrosseln. Der wichtigste Vorteil von Netzdrosseln besteht darin, dass sie den Gleichrichter vor Transienten aus dem Netz schützen.

### Passive Oberschwingungsfilter

Passive Oberschwingungsfilter sind in Reihe an die Netzversorgung angeschlossen. Sie lassen sich mit unterschiedlichen Schaltungstopologien realisieren, die in der Regel aus Kombinationen von Spulen (L) und Kondensatoren (C), manchmal auch aus Widerständen (R), bestehen. Die Filterschaltung kann eine Tiefpassschaltung sein, die auf bestimmte Oberschwingungen (5., 7. usw.) abgestimmt oder leicht verdrosselt ist, um die Gefahr von Resonanzen zu vermindern. Die Leistung von passiven Filtern hängt von der Konfiguration des Zwischenkreises des spezifischen Frequenzumrichters ab (mit/ohne DC-Drosseln, Wert der Kapazität) und ein Leistungsniveau kann für eine spezifische Konfiguration sichergestellt werden. Danfoss Advanced Harmonic Filter (AHF) sind speziell für Danfoss VLT®-Frequenzumrichter konstruiert und können den THD auf 10 % (AHF-10-Reihe) oder sogar auf 5 % (AHF-5-Reihe) senken. Diese Filter nutzen eine Danfoss-eigene Topologie mit einer zweistufigen verdrosselten LC-Schaltung, die Oberschwingungen absorbiert.

Passive Filter haben den Nachteil, dass sie relativ sperrig sind (sie haben etwa die Größe eines Frequenzumrichters). Zudem haben sie einen kapazitiven Leistungsfaktor, der bei der Auslegung des Systems zu berücksichtigen ist, um Resonanzen zu vermeiden.

### **Mehrpuls-Gleichrichter**

Mehrpuls-Gleichrichter werden durch Phasenverschiebungstransformatoren gespeist. Die gängigsten Lösungen sind 12-pulsige (2 x 3 Phasen) oder 18-pulsige Gleichrichter (3 x 3 Phasen). Die Phasenverschiebung dreht niedrige Oberschwingungen um  $180^\circ$  und so heben sich diese gegenseitig auf. Die Phasen der Sekundärwicklung haben im Falle einer 12-pulsigen Gleichrichtung einen Phasenversatz von  $30^\circ$  (den Versatz zwischen der D- und der Y-Wicklung). In dieser Konfiguration werden die 5. und 7. Oberschwingung aufgehoben, und die größten Oberschwingungen werden die 11. und 13. sein. Eine Mehrpuls-Oberschwingungsreduzierung erfordert große Transformatoren – größer als der Frequenzumrichter. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die Leistung unter nicht idealen Bedingungen wie einer Spannungsasymmetrie reduziert ist.

## **7.3.2 Aktive Lösungen zur Reduzierung von Oberschwingungen**

### **Active Front End (AFE)**

Den Diodengleichrichter kann ein Wechselrichter mit aktiven Schaltern ersetzen (gewöhnlich IGBT-Transistoren), der dem motorseitigen Wechselrichter ähnelt. Der netzseitige Wechselrichter ist pulsweitenmoduliert, und der Eingangsstrom ist fast sinusförmig. Die Oberschwingungen der Netzfrequenz sind nicht vorhanden. Allerdings speist er die Taktfrequenzkomponenten in die Netzversorgung ein. Um Taktfrequenzgeräusche zu reduzieren, kommt ein passiver Filter zum Einsatz, in der Regel eine Tiefpass-L-C-L-Topologie (zwei Spulen und Kondensatoren zwischen den Spulen).

Der Hauptvorteil des AFE besteht darin, dass er einen Vier-Quadranten-Betrieb ermöglicht: Das bedeutet, dass der Energiefluss in beide Richtungen gehen kann und er Energie im Falle einer generatorischen Bremsung wieder zurück in das Netz einspeisen kann. Das ist in Anwendungen vorteilhaft, bei denen es zu häufigen oder langwierigen Bremsungen kommt, wie etwa bei Kränen oder Zentrifugen.

Der Nachteil der AFE-Lösung ist ihre relativ geringe Effizienz und ihre hohe Komplexität. Wenn die jeweilige Anwendung keine rückspeisefähige Lösung erfordert, ist die Energieeffizienz der AFE-Lösung geringer, als bei einer aktiven Filterlösung.

### **Aktive Filter**

Aktive Filter (AF) bestehen aus einem Wechselrichter, der einen Oberschwingungsstrom in Gegenphase zu den Oberschwingungsverzerrungen des Versorgungsnetzes erzeugt und auf diese Weise diese eliminiert. Die nachstehende Abbildung zeigt das Funktionsprinzip, bei dem der Aktive Filter den Oberschwingungsstrom eines Diodengleichrichters aufhebt.

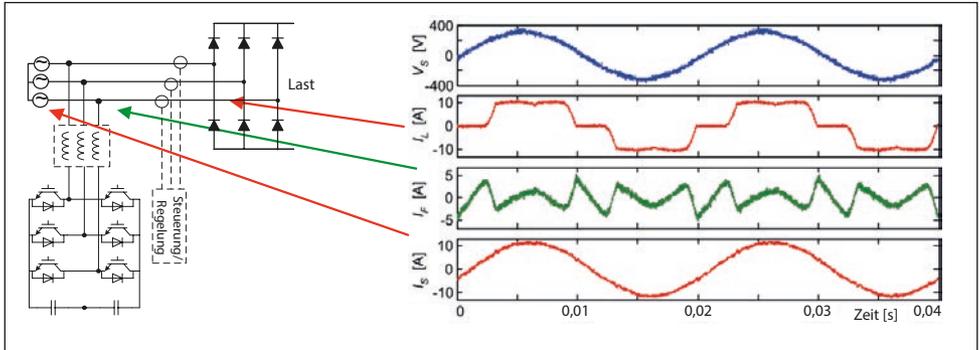


Abb. 7.6 Funktionsprinzip eines aktiven Filters

Wie bei der AFE-Lösung benötigt auch der aktive Filter ein LCL-Filter, um die Störungen der Taktfrequenz zu beseitigen.

Aktive Filter sind parallel zur nicht-linearen (Oberschwingungen erzeugenden) Last geschaltet. Dadurch sind mehrere Methoden zur Oberschwingungsreduzierung möglich:

- Einzelne Kompensation von nicht-linearen Lasten: Ein aktiver Filter kompensiert Oberschwingungen aus einer einzelnen Last. Danfoss bietet ein optimiertes Filter-Frequenzrichter-Paket namens „Low Harmonic Drive (LHD)“.
- Gruppenkompensation: Ein einzelnes Filter kompensiert Oberschwingungen aus einer Gruppe von mehreren Lasten (zum Beispiel von Frequenzrichtern).
- Zentrale Kompensation: Die Kompensation der Oberschwingungen erfolgt direkt am Einspeisepunkt PCC des Haupttransformators.

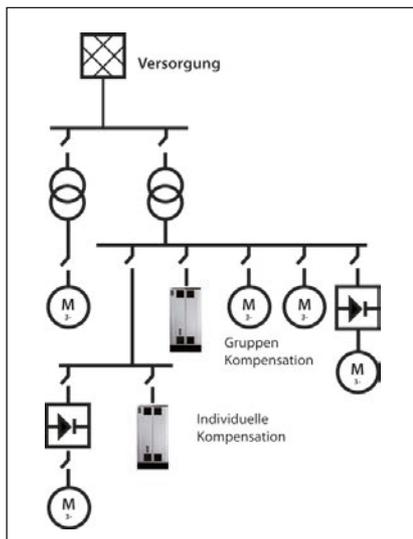


Abb. 7.7 Eine Oberschwingungskompensation kann in unterschiedlichen Bereichen des Netzes erfolgen

## 7.4 Instrumente zur Analyse von Oberschwingungen

Instrumente zur Analyse von Oberschwingungen können bei der Berechnung von Oberschwingungen in einem System sowie bei der Entwicklung der optimalen Lösung zur Oberschwingungsreduzierung helfen, um spezifische Anforderungen zu erfüllen. Der Vorteil von Softwaretools besteht darin, dass sie einen Vergleich verschiedener Lösungen ermöglichen, um so die beste Lösung auswählen zu können.

Im Handel ist eine Vielzahl an Softwaretools erhältlich, von einfachen Berechnungstools für nicht-lineare Lasten bis hin zu komplexen Softwarepaketen, die eine Planung eines gesamten Stromnetzes ermöglichen.

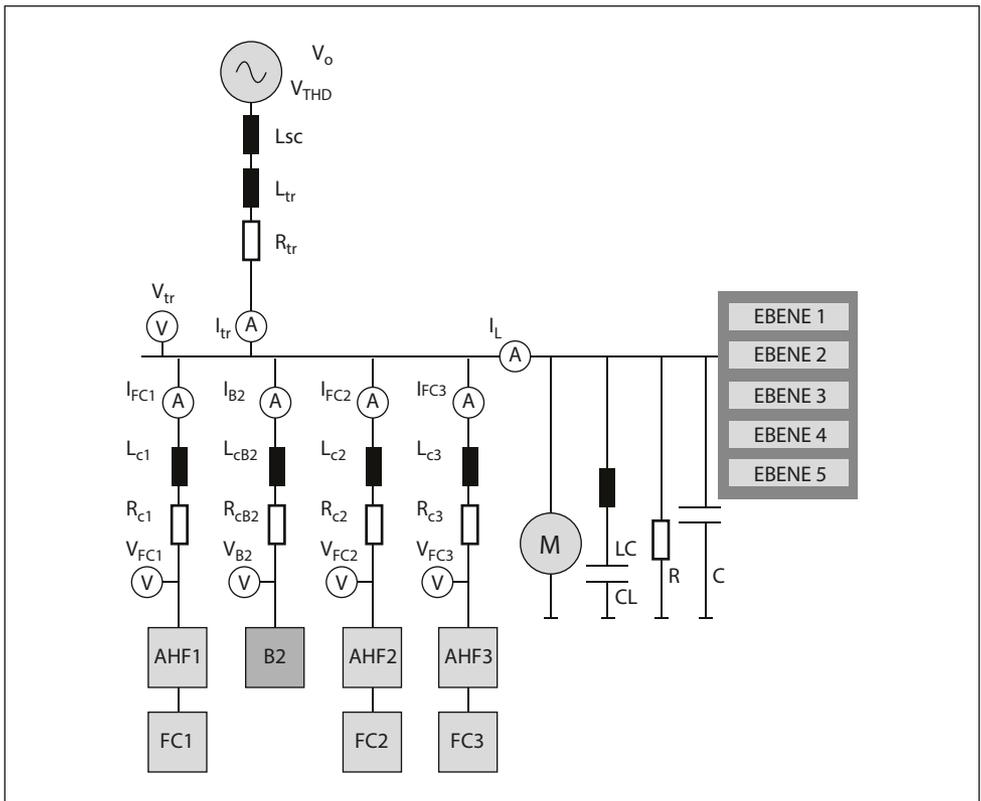


Abb. 7.8 Berechnungsmodell mit Punkten zur Strom- und Spannungsmessung

Danfoss bietet zwei Softwaretools:

- das Offline-Tool VLT® Motion Control Tool MCT 31 sowie
- das Online-Tool HCS (Harmonic Calculation Software)

### 7.4.1 VLT® Motion Control Tool MCT 31

Die MCT 31 ist ein Offline-Softwarepaket zur Berechnung von Oberschwingungen auf der Basis der Polynominterpolation zwischen vordefinierten Simulationsergebnissen. Der Vorteil dieser Methode ist ihre Schnelligkeit, und ihr Nachteil besteht darin, dass sie im Vergleich zu einer Simulation weniger genau ist.

Die MCT 31 ermöglicht Simulationen mit allen Danfoss-Produkten, einschließlich Lösungen zur Oberschwingungsreduzierung wie passiven Filtern AHF und aktiven Filtern AAF. Die Software kann auch andere, nicht von Danfoss hergestellte Frequenzumrichter mit in die Berechnungen einbeziehen. Zudem kann die MCT 31 auch Protokolle zur Oberschwingungsbelastung erstellen.

### 7.4.2 Harmonic Calculation Software (HCS)

Die HCS-Software ist online unter [www.danfoss-hcs.com](http://www.danfoss-hcs.com) verfügbar. Sie steht in zwei Versionen zur Verfügung: Die Basisversion ermöglicht einfache Berechnungen; die Expertenversion eignet sich dagegen auch für komplexere Berechnungen auf Systemebene.

Hinter der Web-Schnittstelle des HCS-Tools steht ein leistungsstarker Stromkreissimulator, der eine Simulation des spezifischen Systems durchführt, das der Benutzer zuvor erstellt und eingegeben hat. Daher ist dieses Tool genauer, als die auf Interpolation basierende MCT 31.

Die HCS kann auf eine umfangreiche Datenbank mit Frequenzumrichtern, passiven Filtern AHF und aktiven Filtern AAF von Danfoss zurückgreifen. Es umfasst außerdem die zeit- und frequenzbezogene grafische Darstellung der Spannungen und Ströme in einem System und den Vergleich der Oberschwingungen mit den unterschiedlichen Grenzwerten verschiedener Normen. Die HCS kann außerdem Protokolle im HTML- oder PDF-Format erzeugen.

## 8 Schnittstellen

### 8.1 HMI (Mensch-Maschine-Schnittstelle)

Das HMI (Human Machine Interface – Mensch-Maschine-Schnittstelle) ist ein wichtiger und entscheidender Teil eines Frequenzumrichters. Es kann von einer grundlegenden LED-Statusanzeige bis hin zu ausgeklügelten Feldbus-Systemen mit detaillierten Frequenzumrichter-Informationen reichen. Das HMI ist eine Schnittstelle zwischen Mensch und Anwendung, über die der Anwender die Anwendung steuern, überwachen und diagnostizieren kann.

Moderne Frequenzumrichter verfügen heute häufig über folgende HMI:

#### LED



Abb. 8.1 LED-Anzeige

Eine LED, die zeigt, dass Spannung am Frequenzumrichter anliegt

Eine LED, die eine vorliegende Warnung anzeigt

Eine LED, die einen Alarm beim Frequenzumrichter anzeigt

#### Numerische oder alphanumerische Bedienteile



Abb. 8.2 Numerische oder alphanumerische Bedienteile

Diese Bedieneinheiten stellen eine einfache Möglichkeit dar, um den Frequenzumrichter zu steuern, seinen Status zu überwachen und die Anwendung schnell und einfach in Betrieb zu nehmen sowie zu konfigurieren.

### Ein- und Ausgangsteuerklemmen



Abb. 8.3 Ein- und Ausgangsteuerklemmen

Mit dafür vorgesehenen Ein- und Ausgangsteuerklemmen lässt sich eine Schnittstelle zwischen SPS und Frequenzumrichter herstellen.

Eingangssteuersignale, wie Start/Stop, Motorfreilauf oder Reversierung, sorgen dafür, dass der Anwender die erforderlichen Funktionen zur Steuerung des Frequenzumrichters in der jeweiligen Anwendung nutzen kann. Zum Regeln der Drehzahl und als Istwertsignale von der Anwendung sind analoge Eingangssignale wie 0-10 V oder 0/4-20 mA möglich.

Istwertsignale vom Frequenzumrichter an die SPS sind Signale vom Digitalausgang oder Relaisausgang. Diese können einen Status wie „Motor läuft“ oder „Alarm“ angeben. Außerdem ist es möglich, analoge Ausgangssignale vom Frequenzumrichter so zu konfigurieren, dass sich mit ihnen beispielsweise die aktuellen Lastbedingungen überwachen lassen.

### Softwaretools

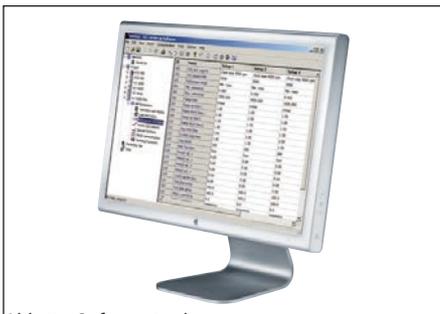


Abb. 8.4 Softwaretools

Durch die Integration eines Frequenzumrichters in eine PC-basierte Software kann der Anwender das System noch leichter vollständig konfigurieren und uneingeschränkt steuern. Die PC-Software erlaubt es, das gesamte System noch effektiver zu überwachen und somit Systemdiagnosen zu beschleunigen und die vorbeugende Wartung zu verbessern.

Ein modernes PC-Softwaretool lässt sich wie folgt einsetzen:

- Offline-Planung neuer Kommunikationsnetze. PC-Softwaretools enthalten eine komplette Datenbank mit unterstützten Frequenzumrichter-Produkten
- Online-Inbetriebnahme des Frequenzumrichters
- Einfacher Austausch des Frequenzumrichters bei Ausfall
- Zur einfachen Erweiterung des Netzwerks um weitere Frequenzumrichter
- Zur Datensicherung der Parametereinstellungen des Frequenzumrichters in einem Kommunikationsnetzwerk
- Die Software unterstützt das Feldbusprotokoll. Auf diese Weise ist kein zusätzliches Kommunikationsnetzwerk erforderlich.

## Feldbus

Die Verwendung einer standardisierten Feldbusschnittstelle zwischen SPS und Frequenzumrichter sorgt für eine leichte Inbetriebnahme, optimierte Steuerung und Überwachung der Anwendung und die einfache Einbindung in übergeordnete Leitsysteme.



Abb. 8.5 Feldbusschnittstelle

## 8.2 Funktionsweise serieller Schnittstellen

Bei der seriellen Datenübertragung erfolgt die Übertragung der Bits (mit Zustand 0 oder 1) einzeln und nacheinander. Vorgegebene Spannungsniveaus definieren eine logische 0 oder 1. Verschiedene Methoden und Standards stellen eine schnelle und fehlerfreie Datenübertragung sicher. Die jeweils angewandte Methode hängt von den Vorgaben der Schnittstelle ab. Auf der untersten Stufe der Datenübertragung lässt sich unterscheiden, wie die Bits elektrisch übertragen werden (Strom- oder Spannungssignal) und welches System zum Einsatz kommt (Zeilenkodierung). Erfolgt die Bit-Übertragung über ein Spannungssignal, liegt der Fokus weniger auf dem Spannungsniveau als auf dem Referenzpotential der Stufe.

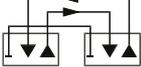
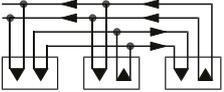
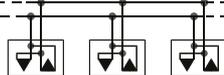
Funktionsweise	Standard (Anwendung)	Über Hauptleitung angeschlossene Geräte	Max. Abstand in m	Anzahl der Leitungen	Signalpegel
	RS232 (Punkt-zu-Punkt)	1 Sender 1 Empfänger	15	Duplex min. 3+ verschiedene Statussignale	$\pm 5 \text{ V min.}$ $\pm 15 \text{ V max.}$
	RS422 (Punkt-zu-Punkt)	1 Sender 10 Empfänger	1200	Duplex: 4	$\pm 2 \text{ V min.}$
	RS485 (Bus)	32 Sender 32 Empfänger	1200	Semi-Duplex: 2	$\pm 1,5 \text{ V min.}$

Tabelle 5.1 3 Feldbusprinzipien und typische Spezifikationen

### RS232-/EIA232-Schnittstelle

Die RS232-Schnittstelle, die bereits seit dem Jahr 1962 auf dem Markt ist, war lange Zeit eine perfekte serielle Schnittstelle. Wenn in Verbindung mit einem PC eine serielle Schnittstelle erwähnt wurde, war dies die RS232. Sie wurde für die Kommunikation zwischen zwei Geräten (Punkt-zu-Punkt-Verbindung) bei niedrigen Übertragungsgeschwindigkeiten entwickelt.

### RS422-/EIA422-Schnittstelle

Die RS422-Schnittstelle ermöglicht sowohl die Einrichtung von Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, als auch von Multidrop-Netzwerken, die den Anschluss mehrerer Empfänger an einen Sender zulassen.

Die Datenübertragung erfolgt differentiell über Twisted-Pair-Datenleitungen. Für einen vollständigen Duplex-Betrieb ist für jede Übertragungsrichtung ein Leitungspaar erforderlich.

### RS485-/EIA485-Schnittstelle

Die RS485 gilt als die Weiterentwicklung des RS422-Standards und hat dementsprechend ähnliche elektrische Eigenschaften.

Im Gegensatz zur RS422- ist die RS485-Schnittstelle als (busfähige) Schnittstelle ausgelegt, über die bis zu 32 Geräte kommunizieren können. Mithilfe von Transceiver-Modulen (Kombination aus Sender- und Empfängermodul) lassen sich Netzwerke aus bis zu 256 Geräten aufbauen. Die tatsächliche maximal mögliche Netzwerkgröße hängt von der Übertragungsrate (Leitungslänge) und der Netzwerkstruktur (Netzwerktopologie) ab.

### **USB-Schnittstelle**

1995 entwickelte Intel in Zusammenarbeit mit Unternehmen der IT-Branche den USB-Standard (Universal Serial Bus). Die im Jahr 2000 eingeführte Weiterentwicklung USB 2.0 erhöhte die Übertragungsgeschwindigkeit von 12 MBit/s auf 480 MBit/s. 2008 kam dann USB 3.0 für Geschwindigkeiten bis 5 GBit/s auf den Markt. Die Datenübertragung erfolgt differentiell über ein verdrehtes Aderpaar. Die maximale Kabellänge zwischen zwei Geräten darf 5 m nicht überschreiten.

Trotz der Bezeichnung ist USB kein physischer Datenbus, sondern eher eine Punkt-zu-Punkt-Schnittstelle. Der Begriff „Bus“ im Namen USB bezieht sich nur auf die Struktur, mit der ein Netzwerk aufgebaut werden kann. Die USB-Spezifikation sieht einen zentralen Host (Master) vor, der den Anschluss von bis zu 127 verschiedenen Geräte ermöglicht. Ein Port ermöglicht jeweils nur den Anschluss eines Geräts. Um mehrere Geräte an einen Port anzuschließen, ist ein zusätzlicher Hub erforderlich.

### **Ethernet-Schnittstelle**

Die Entwicklung des Ethernet-Standards erfolgte bereits in den frühen 1970er-Jahren. Seit damals hat sich Ethernet in verschiedenen Produkten und Bereichen immer weiter durchgesetzt. Eingang in den Automationsbereich fand Ethernet in den 1990er-Jahren aufgrund von Protokollen wie: MAP, Modbus TCP und EtherNet/IP. Ethernet funktioniert üblicherweise mit 100 MBit/s über STP-Kabel (geschirmte verdrehte Aderpaare). Varianten dazu sind drahtlose Verbindungen, Glasfaserkabel oder andere Medien. Der Vorteil von Ethernet besteht nicht nur in der schnellen Geschwindigkeit und den standardisierten Kabeln und Steckverbindern, sondern auch in der Möglichkeit, auf die in den Automationsgeräten vorhandenen Daten aus dem Büronetzwerk zuzugreifen. Dadurch lässt sich der aktuelle Zustand von überall im Werk, sogar von einem anderen Kontinent aus, auslesen und gegebenenfalls beeinflussen.

Die Tatsache, dass alle Ethernet-Protokolle auf Ethernet basieren, bedeutet jedoch nicht, dass der Einsatz verschiedener Ethernet-Technologien in ein und demselben Netzwerk möglich ist. Aufgrund von Technologien, die die Arbitrierung ändern oder strenge Timing-Anforderungen haben, ist eine Kombination der Technologien unmöglich. Heutzutage sind die am weitesten verbreiteten Technologien PROFINET, EtherNet/IP, Modbus TCP, POWERLINK und EtherCAT. Diese Technologien haben heute einen Marktanteil von mehr als 90 % bei Neuinstallationen.

## **8.3 Standardisierte serielle Schnittstellen in Frequenzumrichtern**

Heutzutage haben Frequenzumrichter standardmäßig eine serielle Schnittstelle für den Anschluss an ein Netzwerk.

Sie unterstützen generell verschiedene standardisierte Protokolle zusätzlich zu unveröffentlichten, herstellereigenen (geschützten) Protokollen. Physisch basieren diese Schnittstellen oft auf der Spezifikation für die RS485-Schnittstelle.

Da Frequenzumrichter normalerweise nur über eine serielle RS485-Schnittstelle verfügen, sind für die Implementierung einer Kommunikation Schnittstellenkonverter erforderlich. Herstellerspezifische Lösungen, die einen bestimmten Frequenzumrichter erfordern, sind weit verbreitet. Wenn die Schnittstellenspezifikation veröffentlicht ist, sind einfache Standardkonverter (wie beispielsweise USB-auf-RS485) verwendbar.

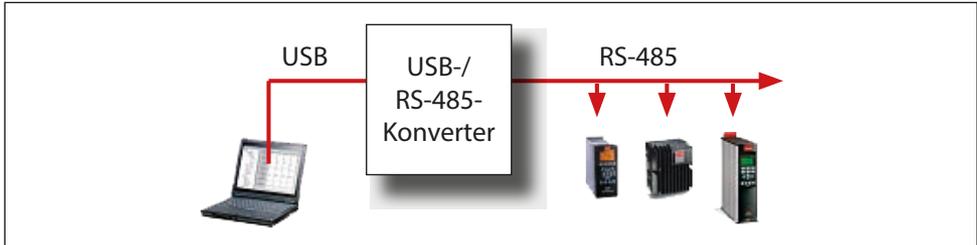


Abb. 8.6 USB-zu-RS485-Umsetzer für serielle Kommunikation

In zunehmendem Maße verfügen Frequenzumrichter über USB-Schnittstellen, was einen einfachen Datenaustausch mit einem PC ermöglicht. Da viele PC über USB-Schnittstellen verfügen, sind Schnittstellenkonverter nicht länger erforderlich.

## 8.4 Feldbusschnittstellen in Frequenzumrichtern

Die Verwendung von modernen Frequenzumrichtern ohne serielle Kommunikationsschnittstelle ist heute fast unvorstellbar. Im einfachsten Fall besteht die Schnittstelle aus zwei Datenleitungen, über die sich der Frequenzumrichter steuern, überwachen, konfigurieren lässt und Ereignisse dokumentiert. Fast alle Bussysteme ermöglichen den Anschluss mehrerer Geräte im selben Netzwerk.

Im Vergleich zur herkömmlichen Frequenzumrichtersteuerung über digitale und analoge Ein- und Ausgänge gibt es weniger Kabel in einem seriellen Bussystem und somit geringere Installationskosten. Andererseits entstehen Kosten für die Schnittstellen und die zusätzlichen Komponenten zum Steuern des Bussystems. Je nach verwendetem Bussystem sind nur wenige vernetzte Geräte notwendig, um deutliche Kostenvorteile im Vergleich zur herkömmlichen Steuerung zu generieren.

### **Traditionelle Verkabelung. Kein Feldbus.**

Bei diesem Netzwerktyp ist für die Kommunikation zwischen Frequenzumrichter und SPS ein Kabel für jeden zu steuernden Parameter erforderlich. Der Vorteil eines solchen Systems ist, dass einzelne Komponenten relativ kostengünstig sind und das System selbst relativ einfach strukturiert ist.

Diese Vorteile haben jedoch ihren Preis, da diese Systeme bei der Installation und Erweiterung relativ teuer sind. Dies liegt daran, dass für jeden zusätzlichen Parameter eine neue Verkabelung, SPS-Programmierung und I/O-Hardware erforderlich sind. Für den Betreiber hat dies höhere Investitionskosten und eine begrenzte Flexibilität zur Folge. Gleichzeitig ist das Risiko für Störungen aufgrund der zahlreichen Kabelverbindungen zur SPS hoch.

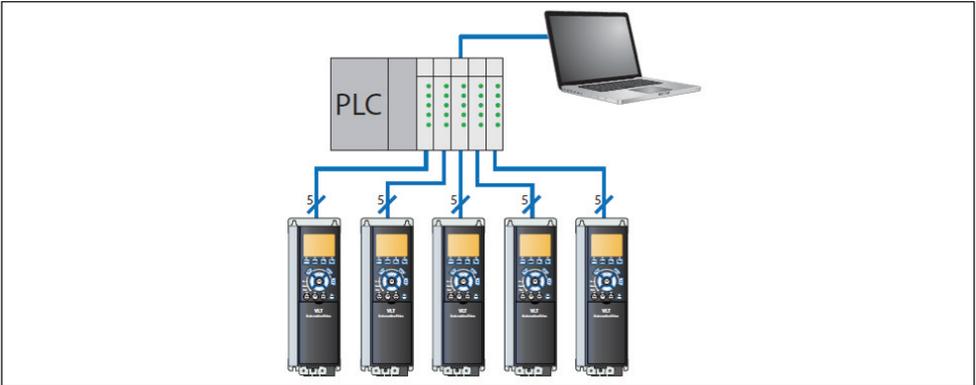


Abb. 8.7 Traditionelle Verkabelung Kein Feldbus

### Verdrahtung von Feldbussen

Ein typisches Feldbussystem verwendet zur Verbindung des Frequenzumrichters mit der SPS ausschließlich Twisted-Pair-Kabel (verdrillte Aderpaare). Trotz der höheren Kosten für die Komponenten bieten die Feldbussysteme zahlreiche Vorteile gegenüber älteren, festverdrahteten Systemen: weniger Kabel, eine schnellere Inbetriebnahme und ein geringeres Störungsrisiko.

Ein serielles, Ethernet-basiertes Netzwerk, das sich problemlos erweitern lässt, verbindet zusätzliche Frequenzumrichter. Neue Parameter erfordern lediglich eine Codierung in der SPS – dadurch ist diese Lösung schneller, sicherer und deutlich kostengünstiger als ein festverdrahtetes System.

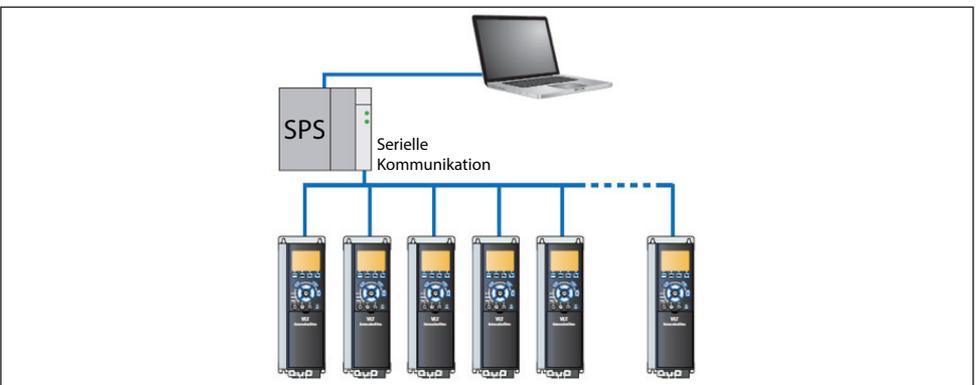


Abb. 8.8 Feldbusverkabelung

### Feldbus über Ethernet

Die Ethernet-Schnittstelle ermöglicht den Zugriff auf die Parameter des Frequenzumrichters sowie auf Informationen außerhalb der Produktionsanlage. Diese Methode umgeht die traditionelle Steuerungshierarchie, da die Kommunikation mit den mit Feldbus ausgestatteten Frequenzumrichtern und anderen Geräten nicht unbedingt über die SPS erfolgen muss. Jeder externe Zugriff erfolgt durch eine Firewall, wodurch die Kommunikation mit dem in die Feldbus-Option integrierten Webserver möglich ist.

Dies bietet nicht nur den Vorteil der hohen Flexibilität bei der Inbetriebnahme, sondern ermöglicht darüber hinaus auch eine externe Überwachung und einen Anwendungssupport.

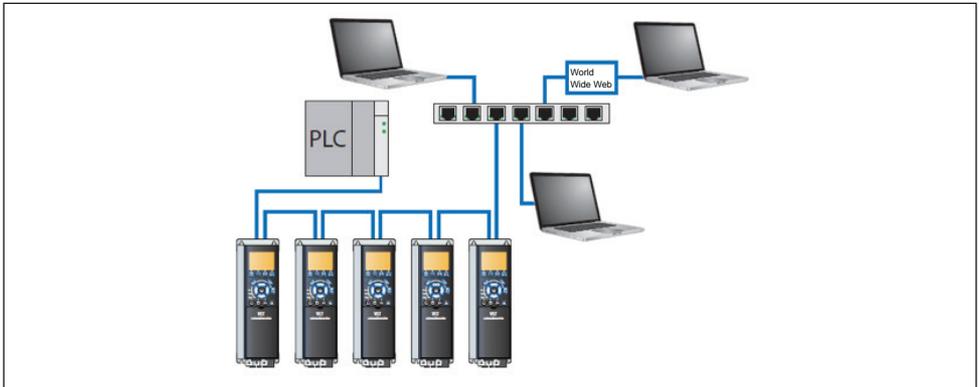


Abb. 8.9 Feldbus über Ethernet

## 8.5 Feldbusstandardisierung

Die Entwicklung von Feldbussen begann in den 1980er-Jahren und machte die Vorteile serieller Kommunikation bis in die Feldebene hinein verfügbar. Die treibende Kraft für die Entwicklung war nicht nur die Möglichkeit, Kosten und Zeit während der Planung und Installation zu sparen, sondern auch die einfache Erweiterungsmöglichkeit und die geringere Störanfälligkeit bei der Übertragung analoger Signale.

Die darauffolgenden Jahre zeigten schnell, dass der Erfolg eines Systems nicht nur von den industriellen Möglichkeiten in einer anspruchsvollen Umgebung, sondern auch von der „Offenheit“ des Systems abhängt. In offenen Bussystemen sind Installation und Steuerung gleich, unabhängig vom Hersteller der Buskomponenten. Deshalb kann der Endanwender ein (defektes) Gerät eines Herstellers problemlos gegen ein Gerät eines anderen Herstellers austauschen, ohne größere Änderungen am System vornehmen zu müssen.

Auf dem Markt erhältliche Schnittstellen und Bussysteme unterscheiden sich hauptsächlich in ihrem physischen Design und den verwendeten Protokollen. Welches System zum Einsatz kommt, hängt von den Anforderungen der jeweiligen Anwendung ab.

Schnelle Prozesse wie bei Verpackungsmaschinen benötigen Buszykluszeiten von wenigen Millisekunden, während für Klimaanlage Antwortzeiten im Sekundenbereich ausreichen mögen.

Zum Zwecke der besseren Klassifizierung lassen sich Kommunikationssysteme über ihr Datenvolumen, die Übertragungszeit und die Übertragungsfrequenz betrachten. Das Diagramm unten zeigt die grundlegende Aufteilung in drei verschiedene Stufen.

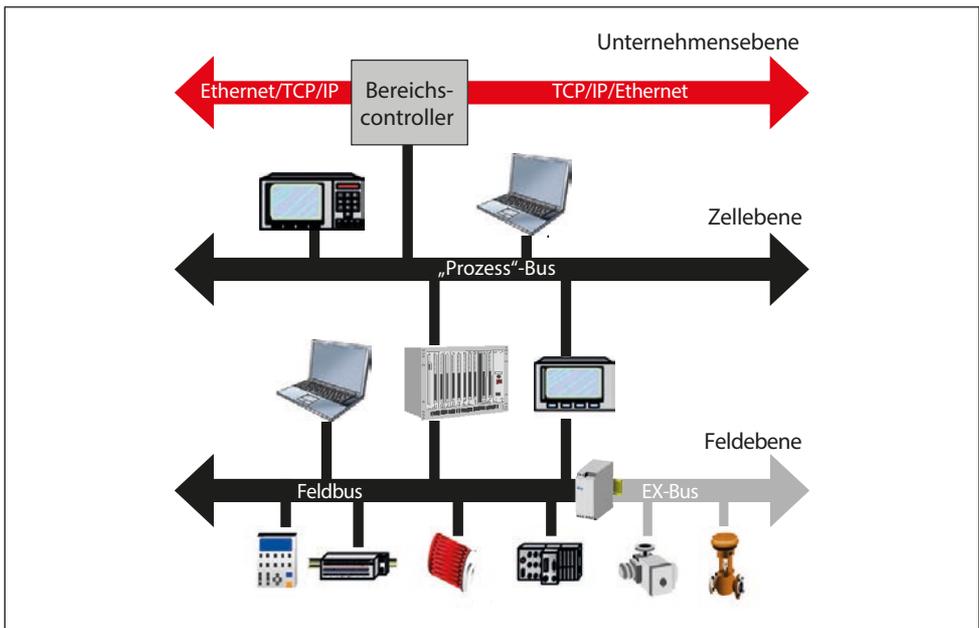


Abb. 8.10 Produktionspyramide

- Auf Unternehmensebene werden große Datenvolumen im Megabyte-Bereich ausgetauscht. Die Übertragung kann bis zu mehreren Stunden dauern.
- Auf Zellebene verringern sich die Datenvolumen auf den Kilobyte-Bereich. Gleichzeitig verkürzen sich die Übertragungszeiten (Sekunden), und die Frequenz des Datenaustauschs (Minuten/Stunden) steigt.
- Auf Feldebene sind die ausgetauschten Datenvolumen mit wenigen Byte oder sogar Bit sehr klein. Übertragungszeit und -frequenz sind eine Sache von Millisekunden.

Die weltweit wichtigsten Feldbusse wurden ab 1999 in der Norm IEC 61158 standardisiert.



Abb. 8.11 Typische Feldbusse

Die Bedeutung der verschiedenen Bussysteme variiert je nach Region und Anwendung. In der Antriebstechnik haben in Europa Profibus und sein Ethernet-basierter Nachfolger PROFINET den größten Marktanteil. Im Gegensatz dazu sind DeviceNet und EtherNet/IP in Nord- und Südamerika sowie in Asien weit verbreitet. Daraus ergibt sich die Voraussetzung für die hohe Marktakzeptanz der jeweiligen Ethernet-basierten Nachfolger PROFINET in Europa und EtherNet/IP in Nordamerika.

## 9 Dimensionierung und Auswahl von Frequenzumrichtern

### 9.1 Korrekte Bestimmung der benötigten Nennleistung

Die Auswahl des richtigen Frequenzumrichters ist ein entscheidender Aspekt bei der Planung eines Antriebssystems mit variabler Drehzahl. Ist das gewählte Gerät zu klein, wird es den angeschlossenen Motor nicht bei allen erforderlichen Betriebspunkten optimal regeln können. Ist es dagegen zu groß, besteht die Gefahr, dass die Regelung des Motors nicht immer angemessen erfolgt, und die Systemkosten sind ggf. unverhältnismäßig hoch.

Für die Auswahl der meisten Frequenzumrichter reicht die Kenntnis der folgenden grundlegenden Parameter aus:

- Benötigte Nennleistung des Frequenzumrichters aufgrund der Motorspezifikationen
- Stromverteilung im Frequenzumrichter ( $\cos \varphi$  des Motors)
- Überlastfähigkeit
- Regelbereich und Feldschwächung
- Leistungsreduzierung des Frequenzumrichters
- Generatorische Energie
- Motorkabellänge
- Umgebung
- Zentrale und dezentrale Installation im Vergleich

Nach Abklärung der grundlegenden Systemdaten und -Anforderungen für eine Anwendung erfolgt die Konzeption und Analyse der mechanischen Komponenten. Vor der Auswahl eines geeigneten Frequenzumrichters muss die Auswahl des verwendenden Motors erfolgen. In der Gebäudetechnik erfolgt die endgültige Auswahl beispielsweise häufig erst kurz vor der Fertigstellung des Gebäudes.

Die Definition der meisten zu verwendenden Komponenten erfolgt erst zu diesem Zeitpunkt, um eine optimierte Analyse der Durchflussbedingungen zuverlässig durchführen zu können.

Je dynamischer und anspruchsvoller die Anwendung, desto mehr Faktoren sind bei der Gestaltung zu berücksichtigen. Da eine breite Funktionsvielfalt in einem Gerät erhebliche Kosten verursacht, können Hersteller von Frequenzumrichtern durch Begrenzen der technischen Funktionalität Kosten sparen. Daher ist für jede einzelne Applikation sicherzustellen, dass die für sie benötigten Funktionen tatsächlich im gewählten Frequenzumrichter verfügbar sind

## 9.2 Nennleistung des Frequenzumrichters auf Basis der Motorspezifikationen

Eine häufig verwendete Methode zur Auswahl von Frequenzumrichtern basiert einfach auf der Nennleistung des zu verwendenden Motors. Hersteller geben die Nennleistungen ihrer Frequenzumrichter an, in der Regel aber bezogen auf vierpolige Standardmotoren. Da der Nennstrom von Motoren abhängig von ihrer Konstruktion (z. B. beim Standard- und beim Getriebemotor) und der Zahl ihrer Polpaare bei gleicher Leistung deutliche Unterschiede aufweist, eignet sich diese Methode lediglich für eine grobe Schätzung der korrekten Leistungsgröße des Frequenzumrichters. Abb. 9.1 „Nennstrom für 1,50-kW-Motoren mit unterschiedlicher Polzahl und von unterschiedlichen Herstellern“ enthält Beispiele des Nennstroms verschiedener 1,5-kW-Motoren.

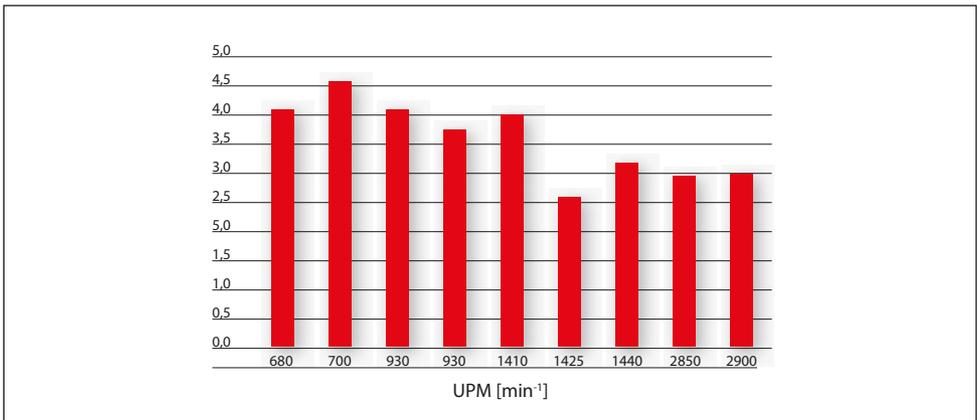


Abb. 9.1 Nennstrom für 1,5-kW-Motoren mit unterschiedlicher Polzahl und von unterschiedlichen Herstellern

Beachten Sie außerdem, dass die Stromaufnahme eines Motors davon abhängt, ob er in einer Stern- oder Dreieckschaltung angeschlossen ist. Aus diesem Grund sollte die Auswahl der Frequenzumrichter besser auf der Grundlage des Nennstroms für die jeweilige Konfiguration (Stern oder Dreieck) erfolgen.

Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor neben dem Motorstrom ist die Motorspannung. Viele Frequenzumrichter lassen sich über eine große Bandbreite an Netzversorgungsspannungen (z. B. 3 x 380 bis 500 V) einsetzen und bieten daher einen umfangreichen Ausgangsspannungsbereich. Die Scheinleistung, die der Umrichter liefern kann, ist jedoch über den gesamten Spannungsbereich hinweg konstant. Daher ist der maximale Ausgangsstrom bei einer niedrigeren Netzspannung höher und bei einer höheren Spannung dementsprechend niedriger



Abb. 9.2 Typenschild eines Danfoss-Frequenzumrichters

Das Typenschild in Abb. 9.2 „Typenschild eines Danfoss Frequenzumrichters“ stammt von einem 0,75-kW-Frequenzumrichter. Die angegebenen Stromwerte beziehen sich auf zwei unterschiedliche Spannungsbereiche. Der Frequenzumrichter kann bei einer Netzspannung von 380-440 V 2,4 A liefern, einer Netzspannungsversorgung von 441-500 V sind es 2,1 A. Die Scheinleistung beträgt jedoch bei beiden Spannungsbereichen immer 1,70 kVA.

## 9.3 Überlastfähigkeit

Berücksichtigen Sie bei der Auswahl eines Frequenzumrichters in erster Linie immer die Lastbedingungen der Anwendung. Es bedarf einer grundlegenden Unterscheidung zwischen quadratischen und konstanten Lastkennlinien, die in der Praxis am gängigsten sind.

Bei der Regelung eines Motors durch einen Frequenzumrichter lassen sich für diesen Motor Drehmomentgrenzen festlegen. Die Auswahl eines Frequenzumrichters mit einem Scheinleistungsnennwert, der mit dem Nennstrom oder der Nennleistung des Motors übereinstimmt, sorgt für einen zuverlässigen Antrieb der erforderlichen Last. Es ist jedoch eine zusätzliche Reserve notwendig, um eine gleichmäßige Beschleunigung der Last zu ermöglichen und für gelegentliche Spitzenlasten vorzusorgen.

Nachstehend finden Sie einige Beispiele für eine konstante Last-Drehmomentkennlinie. Beim Platzieren einer Last auf einem Förderband muss das für den Transport anzulegende Drehmoment über den gesamten Drehzahlbereich konstant sein.

Anwendung	Auslegung für Überlast
Hebezeuge	160 %
Förderband	160 %
Rührwerk/Mischer/Zentrifuge	160 %
Drehkolbenkompressor/Kolbenkompressor	150 %
Schneckenpumpe (Dickschlamm)	150 %
Schlamm-trocknungs- presse	150 %
Kolbenpumpe	150 %
Drehschieberventil	150 %
Drehkolbengebläse	110 %
Oberflächenbelüfter	110 %
Dosierpumpe	110 %
Druckerhöhungspumpe (2-stufig)	110 %
Umwälzpumpe	110 %
Seitenkanalgebläse für die Poolbelüftung	110 %

Table 9.1 Typische Überlasten in Anwendungen mit konstantem Drehmoment

Bei einer konstanten Last ist eine Überlastreserve von ungefähr 50-60 % für 60 Sekunden der Regelfall. Die Auswirkung bei Erreichen der maximalen Überlastgrenze hängt vom verwendeten Frequenzumrichter ab. Einige Typen schalten ihren Ausgang ab und verlieren die Kontrolle über die Last. Andere können den Motor bei maximaler Überlastgrenze bis zu einer Abschaltung aus thermischen Gründen kontrollieren.

Eine quadratische Lastkennlinie kommt gewöhnlich in Anwendungen vor, bei denen eine steigende Drehzahl zu einem steigenden quadratischen Lastmoment führt. Beispiele für derartige Geräte sind etwa Lüfter und Kreiselpumpen. Darüber hinaus erfordern die meisten Anwendungen mit einer quadratischen Drehmomentkennlinie, z. B. Kreiselpumpen oder Lüfter, keine schnellen Beschleunigungsphasen. Aus diesem Grund sind für Anwendungen mit quadratischen Drehmomentkennlinien Reserven für Überlast von 10 % die Regel.

Beispiele für eine quadratische Last-Drehmomentkennlinie finden Sie auf der nächsten Seite.

Anwendung	Auslegung für Überlast
Lüfter	110 %
Brunnenpumpe	110 %
Boosterpumpe/Kreiselpumpe	110 %
Filtereinspeisepumpe	110 %
Grundwasserpumpe	110 %
Warmwasserpumpe	110 %
Verstopfungssichere Pumpe (Feststoffe)	110 %
Kreiselpumpe/Lüfter	110 %
Primäre und sekundäre Heizpumpe	110 %
Primäre und sekundäre Kühlwasserpumpe	110 %
Regenrückhaltebeckenentlüftungspumpe	110 %
Klärschlammverwertungspumpe	110 %
Schneckenpumpe (Dünnschlamm)	110 %
Tauchmotorpumpe	110 %
Überschussschlammpumpe	110 %

Tabelle 9.2 Typische Überlasten in Anwendungen mit variablem Drehmoment

Moderne Frequenzumrichter lassen sich sogar bei einer quadratischen Last und einer Überlastkapazität von 10 % so einstellen, dass sie beim Start ein höheres Losbrechmoment haben, um einen korrekten Start der Anwendung sicherzustellen.

Überlegen Sie hierbei, ob die Anwendung immer ein quadratisches Drehmoment erfordern wird. So erfordert zum Beispiel ein Mischer ein quadratisches Drehmoment, wenn er ein sehr flüssiges Medium mischen soll; wird das Medium während der Verarbeitung jedoch sehr zähflüssig, benötigt die Anwendung dann einen Wechsel zu einem konstanten Drehmoment.

### 9.3.1 Überlegungen zur Energieeffizienz

Das Kapitel 4 „Energie sparen mit Frequenzumrichtern“ führt verschiedene wichtige Überlegungen zum Thema Energieeinsparungen auf. Bedenken Sie, dass die energieeffizienteste Lösung durch die richtige Auswahl von Maschine, Motor und Frequenzumrichter im Hinblick auf eine optimale Systemeffizienz entsteht. So weicht beispielsweise die Drehzahl von Lüftern gewöhnlich von der Nennzahl ab, ebenso wie die Drehzahl des Motors. Viele Motoren erreichen jedoch ihre maximale Effizienz bei einer Drehzahl von 75-100 % der Nennzahl.

Die Frequenzumrichter einiger Hersteller verfügen über eine eingebaute Softwarefunktion, die die beste Motorwellenleistung im Verhältnis zur Eingangsleistung des Frequenzumrichters sicherstellt.

## 9.4 Regelbereich

Der Vorteil eines Frequenzumrichters besteht in seiner Fähigkeit zur gleichmäßigen Regulierung der Drehzahl des Motors. Für den verfügbaren Regelbereich bestehen jedoch verschiedene Beschränkungen.

Einerseits hängt der mögliche Regelbereich (Drehzahlbereich) von den für den Umrichter verfügbaren Steueralgorithmen ab. Bei der einfachen U/f-Steuerung sind gewöhnlich Regelbereiche von etwa 1:15 realisierbar. Im Falle eines Steueralgorithmus mit einer Spannungsvektorsteuerung ist ein Bereich von 1:100 möglich. Und wenn ein Drehgeber die tatsächliche Motordrehzahl zum Frequenzumrichter zurückführt, sind Anpassungsbereiche von 1:1000 bis 1:10 000 realisierbar.

Zusätzlich zu den Grenzwerten der verwendeten Steueralgorithmen sind auch der Feldschwächungsbereich um die Nennfrequenz des Motors sowie der Betrieb mit niedriger Drehzahl zu berücksichtigen. Bei niedriger Drehzahl verfügt der Motor nur über eine geringe Selbstkühlung. Daher erfordert der Dauerbetrieb in diesem Drehzahlbereich entweder einen separat angetriebenen externen Lüfter zur Kühlung des Motors oder eine Verringerung der Wellenbelastung. Die Datenblätter der Hersteller geben an, unterhalb welcher Drehzahl das Drehmoment zu verringern ist.

Beim Betrieb des Motors im Feldschwächungsbereich ist zudem die Reduktion des verfügbaren Drehmoments mit  $1/f$  und des Kippmoments mit  $1/f^2$  zu berücksichtigen. Der Feldschwächungsbereich beginnt, wenn der Frequenzumrichter das U/f-Verhältnis nicht mehr aufrechterhalten kann. In Europa liegt dieser Punkt normalerweise bei 400 V/50 Hz und in Nordamerika bei 460 V/60 Hz.

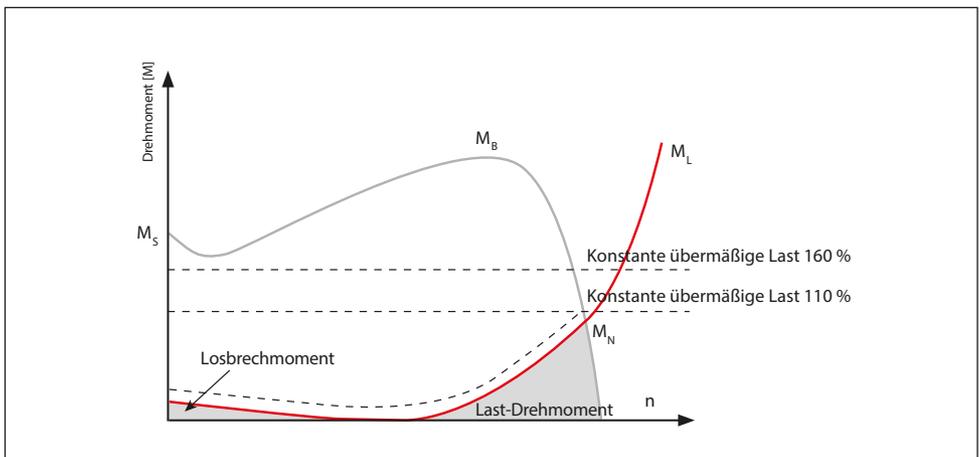


Abb. 9.3 Frequenzumrichter mit einer optimierten Kennlinie für quadratische Lasten und einer Überlastfähigkeit von 110 %. Um ein höheres Losbrechmoment zu erreichen, erfolgt der Start des Frequenzumrichters manchmal mit einem konstanten Drehmoment, bevor die quadratische Kennlinie zum Einsatz kommt.

Manchmal geben Motorhersteller höhere verfügbare Drehmomente bei einem niedrigeren Arbeitszyklus an. Eine für intermittierenden Betrieb optimierte Konstruktion kann sparsam sein, erfordert jedoch ein komplexeres Design, wie aus Abb. 9.4 „Sicherstellung einer guten Drehzahlwahl“ hervorgeht.

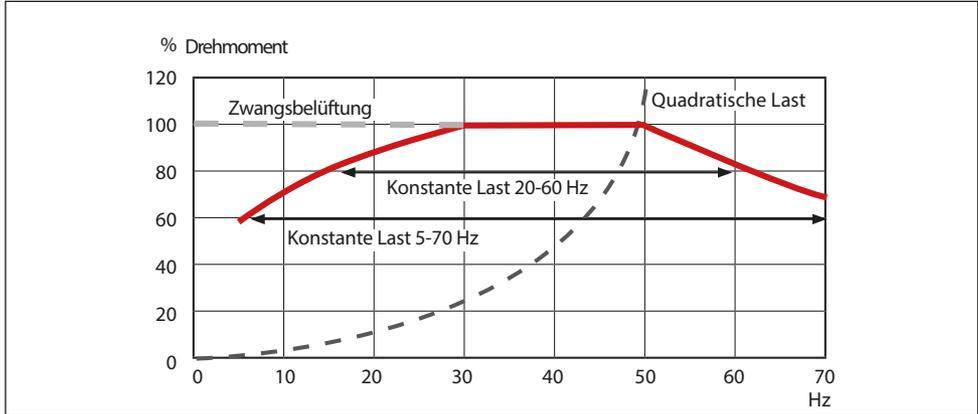


Abb. 9.4 Sicherstellung einer guten Drehzahlwahl

## 9.5 Leistungsreduzierung bei Frequenzumrichtern

Ebenso wie für alle anderen elektronischen Geräte, müssen auch Frequenzumrichter maximale Umgebungstemperaturen beachten. Eine Überschreitung der maximalen Umgebungstemperatur kann zu einem Ausfall des Frequenzumrichters führen und trägt außerdem zu einer Verkürzung der Lebensdauer der Elektronik bei. Gemäß der Arrhenius-Gleichung reduziert sich die Lebensdauer jedes elektronischen Bauteils bei 10 °C, die es über der festgelegten Temperatur betrieben wird, um 50 %. Wenn Frequenzumrichter kontinuierlich bei annähernd maximaler Nennbetriebstemperatur laufen müssen und die vorgegebene Lebensdauer des Frequenzumrichters dennoch einzuhalten ist, kann die Reduzierung der Leistung eine Option sein.

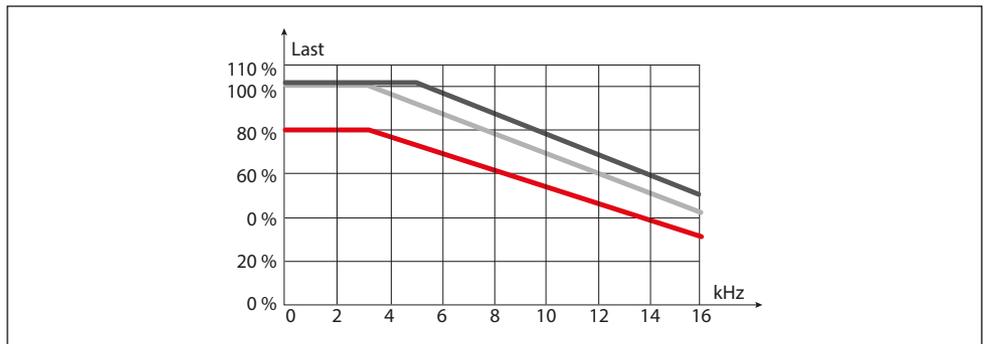


Abb. 9.5 Leistungsreduktion in Abhängigkeit von Taktfrequenz und Temperatur

Das Diagramm 9.5 „Leistungsreduktion in Abhängigkeit von Taktfrequenz und Temperatur“ zeigt die Taktfrequenz des Wechselrichters an der X-Achse. Die Y-Achse zeigt den Ausgangsstrom des Geräts (in %).

Höhere Taktfrequenzen verringern störende Motorgeräusche. Der Leistungsverlust im Wechselrichter erhöht sich jedoch mit der Taktfrequenz und führt zu einer zusätzlichen Erwärmung des Geräts. Eine Reduzierung der Taktfrequenz senkt damit auch die Schaltverluste. Wenn die Taktfrequenz zu niedrig ist, läuft der Motor allerdings weniger gleichmäßig. Die Taktfrequenz stellt daher immer einen Kompromiss zwischen der Geräuscentwicklung, einem reibungslosen Betrieb und anfallenden Verlusten dar.

Beim Betrieb eines Umrichters bei einer Umgebungstemperatur von 45 °C kann das Gerät kontinuierlich 100 % seines Ausgangsnennstroms bei einer Taktfrequenz von 4 kHz erzeugen. Wenn sich die Umgebungstemperatur auf 55 °C erhöht, ist im Dauerbetrieb ohne eine Reduzierung der Lebensdauer nur ein Strom von ungefähr 75 % möglich. Ist eine Reduzierung der Lebensdauer nicht akzeptabel, ist ein größerer Frequenzumrichter mit ausreichender Leistung erforderlich.

Leistungsreduzierungskurven sind nicht nur bei höheren Temperaturen zu beachten, sondern auch bei niedrigem Luftdruck, z. B. bei der Verwendung von Frequenzumrichtern in einer Höhe von 1000 Metern und darüber.

## 9.6 Generatorische Energie

Erfolgt der Betrieb eines Motors mithilfe eines Frequenzumrichters, läuft der Rotor während der Verzögerung schneller als das rotierende Magnetfeld, wodurch der Motor als Generator arbeitet. Abhängig von der Menge und der Häufigkeit der vom Motor zurückgespeisten Energie sind unterschiedliche Maßnahmen zu ergreifen. Überschreitet die Leistung die gesamte Verlustleistung des Motors und des Frequenzumrichters, steigt die Zwischenkreisspannung, bis der Frequenzumrichter bei einer festgelegten Spannung seinen Ausgang deaktiviert und als Folge davon die Kontrolle über den Motor verliert.

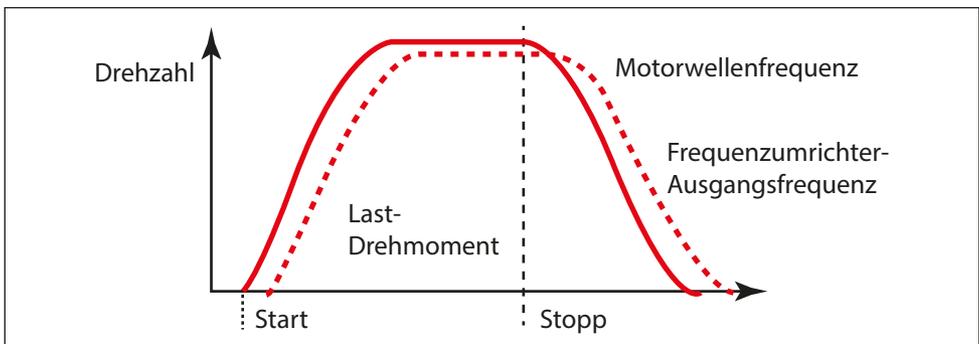


Abb. 9.6 Start-/Stopp-Darstellungen für generatorisches Prinzip

Eine einfache Methode zur Vermeidung derartiger Überspannungssituationen ist eine Überdimensionierung des Frequenzumrichters, der dann in der Lage wäre, mehr generatorische Energie aufzunehmen und so die Gefahr einer Überspannung senkt. Das ist jedoch häufig im Vergleich zu Methoden des dynamischen Bremsens, einschließlich der Möglichkeit der Rückführung der Energie in das Versorgungsnetz, eine kostenintensivere Lösung. Einzelheiten zu diesem Thema entnehmen Sie bitte den entsprechenden Unterabschnitten in Kapitel 3 „Frequenzumrichter und Motoren“.

## 9.7 Motorkabel

Die Leistungselektronik eines Frequenzumrichters ist für bestimmte Motorkabellängen ausgelegt. Bei einer Überschreitung der vorgegebenen Kabellängen können Störungen auftreten. Fehler-/Alarmmeldungen können dann zum Abschalten des Frequenzumrichters führen. Die Kapazität des verwendeten Kabels ist teilweise die Ursache für dieses Verhalten. Wenn die Kapazität am Frequenzumrichteranschluss den festgelegten Wert überschreitet, kann es an den Kabeln zu Transienten kommen, die zu einer Fehlfunktion des Frequenzumrichters führen können.

Die meisten Hersteller schreiben für ihre Frequenzumrichter abgeschirmte Kabel vor, um potenziellen EMV-Problemen vorzubeugen. Wenn der Nutzer sich für andere geeignete Maßnahmen entscheidet, um die EMV-Anforderungen zu erfüllen, lassen sich auch ungeschirmte Kabel verwenden. Da ungeschirmte Kabel eine geringere kapazitive Last auf den Frequenzumrichter ausüben, ist in diesem Fall eine längere Kabellänge möglich. Normalerweise sind Kabel mit einer Länge von 50 m/75 m (abgeschirmt) oder 150 m/300 m (ungeschirmt) verwendbar.

Die Verwendung von ungeschirmten Motorkabeln ist nur in Verbindung mit zusätzlichen Maßnahmen zu empfehlen. Auch wenn eine Anlage während ihrer Abnahmeprüfung ohne abgeschirmte Motorkabel ordnungsgemäß funktioniert, können zeitweilig EMV-Probleme auftreten, oder später auch aufgrund von Modifikationen oder Erweiterungen der Installation. Der dann zur Beseitigung dieser Probleme notwendige finanzielle Aufwand ist meist deutlich höher, als die Ersparnis aufgrund der Verwendung ungeschirmter Kabel.

Bei der Installation von Kabeln ist es wichtig, eine zusätzliche Induktivität aufgrund der Verlegung von Kabeln in Form einer Luftpule und eine zusätzliche Kapazität aufgrund von parallelen Leitern zu vermeiden.

Bei einer Parallelschaltung mehrerer Motoren am Ausgang eines Frequenzumrichters müssen die Längen der einzelnen Motorkabel zusammengerechnet werden, um die angeschlossene Kabellänge zu bestimmen. Beachten Sie in diesem Zusammenhang, dass einige Hersteller eine geometrische Addition der einzelnen Kabellängen vorgeben. In diesen Fällen ist ein traditioneller Linienaufbau für die Motorkabel empfehlenswert (Abb. 9.7 „Gesamte Motorkabellänge ist die Summe aller angeschlossenen Teile“). Eine Sternschaltung kann aufgrund der zusätzlichen Kapazität zwischen den einzelnen Leitern problematisch sein.

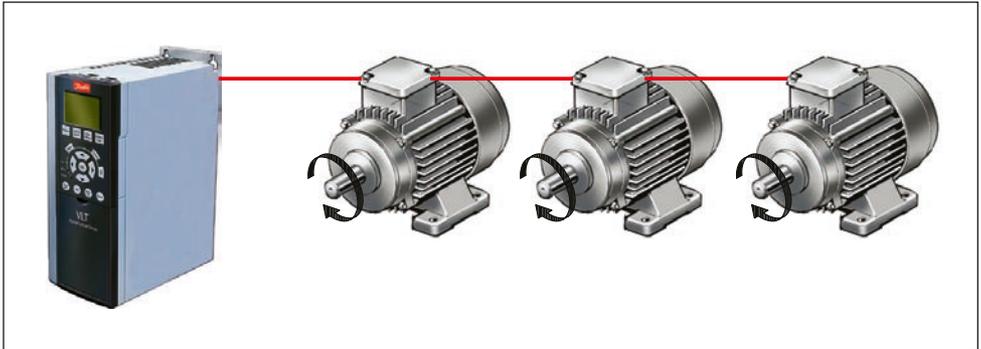


Abb. 9.7 Gesamte Motorkabellänge ist die Summe der Kabellänge aller angeschlossenen Motoren

## 9.8 Umgebung

Verschiedene Überlegungen zur Umgebung bilden die Voraussetzung für die Installation eines Frequenzumrichters. Dazu gehören folgende Faktoren:

- Umgebungstemperatur
- Höhe
- Umgebungsbedingungen (Feuchte, Luftqualität etc.)
- EMV
- Oberschwingungsbelastung

Für alle Frequenzumrichter gibt es Ober- und Untergrenzen für die Umgebungstemperatur. Das Vermeiden extremer Umgebungstemperaturen verlängert die Lebensdauer der Betriebsmittel und optimiert die allgemeine Anlagenzuverlässigkeit. Die Installation des Frequenzumrichters in einer Umgebung, in der die Umgebungstemperatur seine Obergrenze überschreitet, erfordert eine Leistungsreduzierung (siehe „Leistungsreduzierung von Frequenzumrichtern“).

Bei niedrigerem Luftdruck nimmt die Kühlfähigkeit der Luft ab. Bei einer Höhe von über 1000 m sollte ebenfalls eine Leistungsreduzierung des Frequenzumrichters erwogen werden.

Elektronische Anlagen reagieren empfindlich auf Umgebungsbedingungen. So können z. B. Feuchtigkeit, Staub und Temperatur die Zuverlässigkeit der Elektronik beeinflussen. Eine verminderte Zuverlässigkeit führt zu Ausfallzeiten bei der Anwendung, was die Produktivität herabsetzt. Daher ist es wichtig, die richtige Lösung für die jeweilige Anwendung zu finden. Es ist vor allem wichtig, die Elektronik vor rauen Umgebungsbedingungen zu schützen. Dies lässt sich am besten erreichen, indem die Elektronikteile außerhalb der rauen Umgebung platziert werden.

In den meisten Fällen kann man nicht direkt sehen, wie kritisch die Umgebungsbedingungen sind. Dies hängt hauptsächlich von vier Faktoren ab: der vorhandenen Schadstoffkonzentration,

Schmutz, der relativen Luftfeuchtigkeit und der Temperatur. Die meisten Hersteller von Frequenzumrichtern bieten die folgenden Lösungen, um die Auswirkungen der Umgebungsbedingungen zu minimieren:

- Montage des Frequenzumrichters in einem zentralen Schaltschrank mit langen Motorkabeln. Auf diese Weise befinden sich die Frequenzumrichter außerhalb der kritischen Umgebungsbedingungen.
- Installation einer Klimaanlage im Schaltschrank, die sicherstellt, dass die gefährdenden Bedingungen nicht in Kontakt mit dem Frequenzumrichter und anderer Elektronik kommen (Überdruck).
- Einige Frequenzumrichter sind mit einer Cold Plate ausgestattet. Mit dieser Lösung kann man den Frequenzumrichter in einem Schaltschrank platzieren und die Wärme über die Cold Plate nach außen abführen. Auf diese Weise ist die Elektronik der Frequenzumrichter isoliert von den kritischen Umgebungsbedingungen.
- Verwendung eines Frequenzumrichters mit einem abgedichteten Gehäuse. Hersteller von Frequenzumrichtern bieten heutzutage eine Gehäuse-Schutzart bis IP66/Nema 4X, die die Elektronik vor der äußeren Umgebung schützt und keine zusätzlichen Kosten für ein separates Gehäuse verursacht.
- Bestellung von Frequenzumrichtern mit einer Schutzbeschichtung, die den Schutz vor Chlor, Schwefelwasserstoff, Ammoniak und anderen korrosiven Gasen/Stoffen verbessert.

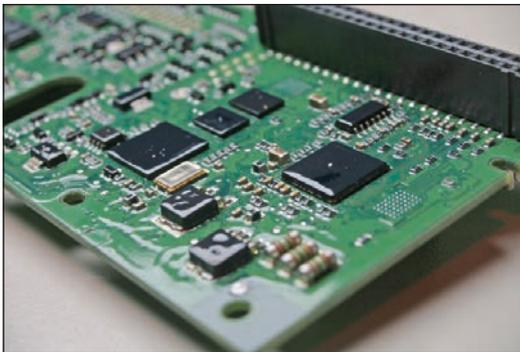


Abb. 9.8 Leiterplatte mit verstärkter Beschichtung

Meistens setzen Fachleute Frequenzumrichter als komplexes Bauteil ein, das Teil eines größeren Geräts, Systems oder einer Anlage ist. Beachten Sie daher, dass der Installateur für die endgültigen EMV-Eigenschaften des Geräts, Systems oder der Anlage verantwortlich ist und die Einhaltung der jeweils geltenden gesetzlichen Vorschriften sicherstellen muss.

Weitere Angaben zu EMV und Oberschwingungen entnehmen Sie bitte den Kapiteln 5 „Elektromagnetische Verträglichkeit“ und 7 „Netzstörungen“.

## 9.9 Zentrale und dezentrale Installation im Vergleich

Die gängigste Form der Installation ist eindeutig die zentrale Installation von Frequenzumrichtern in Schaltschränken. Die Vorteile liegen vor allem in der geschützten Installation der Geräte und dem zentralen Zugriff auf diese Geräte aus Gründen der Leistung, Steuerung, Wartung und Fehleranalyse.

Ein wichtiger Aspekt einer Installation im Schaltschrank ist das Wärmemanagement, und zwar nicht nur bezogen auf die einzelnen Geräte, sondern auch auf die Installation insgesamt. Aufgrund der Verlustwärme im Schaltschrank ist möglicherweise eine zusätzliche Kühlung des Schaltschranks notwendig.

Die Montagevorschriften des Herstellers des Frequenzumrichters geben einzuhaltende Mindestabstände oberhalb und unterhalb des Geräts und zwischen dem Gerät und den umliegenden Bauteilen vor. Für eine bessere Wärmeableitung empfiehlt sich eine direkte Montage an der Rückseite des Schaltschranks. Einige Hersteller legen auch Mindestabstände zwischen den einzelnen Geräten fest. Die Aufstellung der Geräte nebeneinander ist jedoch empfehlenswert, um die Montageoberfläche effizient nutzen zu können.

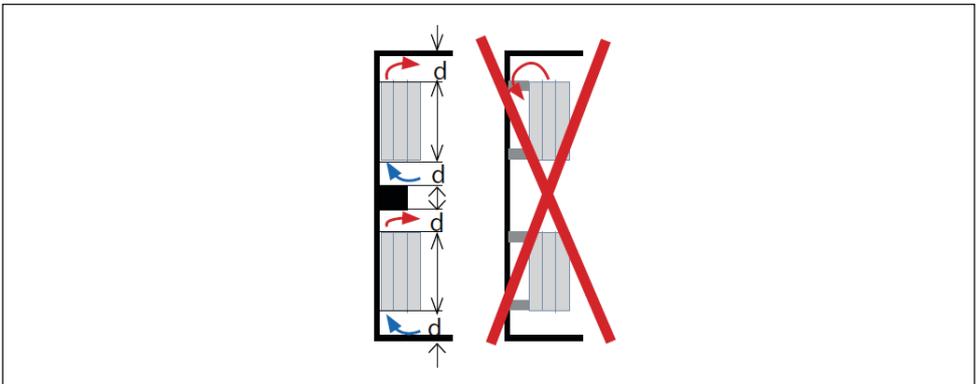


Abb. 9.9 Empfehlungen für die Montage von Umrichtern (zentrale Lösung)

Ein Nachteil der zentralen Installation sind in einigen Fällen jedoch die langen Motorkabel. Auch wenn die Verwendung von abgeschirmten Kabeln eindeutig EMV-Auswirkungen auf das Motorkabel reduziert, lassen sich diese Auswirkungen nicht vollständig beseitigen.

Eine dezentrale Lösung kann eine Alternative zu einer zentralen Installation für den Aufbau einer Anlage darstellen. Hierbei ist der Frequenzumrichter sehr nahe am oder direkt auf dem Motor montiert.

Dies reduziert die Motorkabellänge auf ein Minimum. Zudem bietet eine dezentrale Installation Vorteile auf dem Gebiet der Fehlererkennung, da das Verhältnis zwischen den Reglern und den

dazugehörigen Motoren einfach zu überblicken ist. Bei dezentralen Konzepten kommt in der Regel ein Feldbus zur Ansteuerung der Umrichter zum Einsatz.

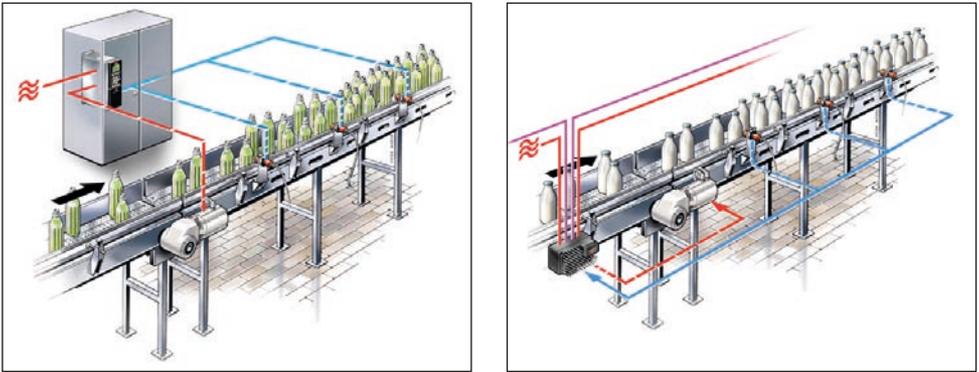


Abb. 9.10 Zwei Konzepte – unterschiedliche Vorteile

Zu berücksichtigende Faktoren bei der Planung einer dezentralen Installation sind z. B. Umgebungstemperaturen, Abfall der Netzspannung, begrenzte Motorkabellängen usw. Derart wichtige Faktoren werden bei der Planung von anspruchsvollen technischen Projekten oft übersehen.

So müssen nicht nur die dezentralen Geräte, sondern auch die Versorgungskabel für die Installationsumgebung geeignet sein. Das Feldbuskabel muss zum Beispiel für eine rauere Umgebung geeignet und manchmal auch flexibel sein. Darüber hinaus ist die Installation der Geräte an unzugänglichen Standorten zu vermeiden, um einen schnellen Zugang für Wartungsarbeiten zu ermöglichen.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Segmentierung des dezentralen Netzes. Aus wirtschaftlichen Gründen ist es vorteilhaft, Geräte in Gruppen oder Segmenten zu kombinieren. Es ist sorgfältig zu überlegen, welche Segmente andere Segmente für ihren Betrieb benötigen und welche Segmente weiterhin autonom funktionieren können, müssen oder sollten. Wenn etwa bestimmte chemische Prozesse nicht unterbrochen werden können, darf der Ausfall eines niedrigeren Segments nicht zu Störungen in wichtigen Segmenten führen.

Außerdem sollte das Fachwissen, das für die Installation eines dezentralen Netzes notwendig ist, nicht unterschätzt werden. Der verantwortliche Techniker muss nicht nur das verwendete Feldbusssystem genau kennen, sondern er muss auch die Struktur (Folgen des Ausfalls einzelner Einheiten auf das gesamte System) und die Umgebungsbedingungen des jeweiligen dezentralen Netzes kennen und diese Auswirkungen einschätzen können.

Obwohl dezentrale Einheiten immer teurer sind als zentrale Einheiten, können gut durchdachte dezentrale Konzepte im Vergleich zu zentralen Systemen Einsparungen von ungefähr 25 %

erzielen. Das Einsparpotenzial bei der Installation liegt in den reduzierten Kabellängen und der Verwendung von Modulen, die bereits der Maschinenhersteller oder -lieferant noch im Werk getestet hat.

## 9.10 Beispiele

Die nachstehenden Beispiele sollen das grundlegende Verfahren zur Auswahl eines Frequenzumrichters im Rahmen des Entwurfsprozesses veranschaulichen. Das nachstehend abgedruckte Datenblatt bildet in diesem Fall die Grundlage für das Auswahlverfahren. Die Wahl des Frequenzumrichters fällt auf den VLT® AutomationDrive FC 302, der mit einem 150 m langen abgeschirmten Kabel funktionieren kann.

		P11K		P15K		P18K		P22K	
		HO	NO	HO	NO	HO	NO	HO	NO
<b>Ausgangsstrom</b>									
Dauerbetrieb (380-440 V)	[A]	24	32	32	37,5	37,5	44	44	61
Überlast (380-440 V)	[A]	38,4	35,2	51,2	41,3	60	48,4	70,4	67,1
Dauerbetrieb (441-500 V)	[A]	21	27	27	34	34	40	40	52
Überlast (441-500 V)	[A]	33,6	29,7	43,2	37,4	54,4	44	64	57,2
<b>Ausgangsleistung</b>									
Dauerbetrieb (400 V)	[kVA]	16,6	22,2		26		30,5		42,3
Dauerbetrieb (460 V)	[kVA]	21,5		27,1		31,9		41,4	
Typische Wellenleistung	[kW]	11	15		18,5		22,0		30,0
<b>Max. Eingangsstrom</b>									
Dauerbetrieb (380-440 V)	[A]	22	29		34		40		55
Überlast (380-440 V)	[A]	35,2	31,9	46,4	37,4	54,4	44	64	60,5
Dauerbetrieb (441-500 V)	[A]	19	25		31		36		47
Überlast (441-500 V)	[A]	30,4	27,5	40	34,1	49,6	39,6	57,6	51,7
Geschätzte Verlustleistung bei max. Nennlast	[W]	291	392	379	465	444	525	547	739
<b>Wirkungsgrad</b> 0,98									
Max. Kabelquerschnitt (mm <sup>2</sup> )	[(AWG <sup>2</sup> )]	16 (6)				35 (2)			
Max. Versicherungen	[A]	63				80			

Tabelle 9.3 Daten zum VLT® AutomationDrive

**Beispiel 1**

Installation eines Motors mit 15,0 kW, 3 x 400 V (4-polig) zusammen mit einem Transportsystem (Schneckenförderer mit einem Losbrechmoment von ca. 160 %). Der Stromverbrauch des Motors beträgt bei Dauerbetrieb 30,0 A.

**Empfohlene Lösung 1**

Ein VLT® AutomationDrive P15K (typischerweise für einen 15-kW-Motor mit einem hohen konstanten Last-Drehmoment) kann im Dauerbetrieb 32 A erzeugen und verfügt über eine ausreichende Reserve für übermäßige Lasten (160 %/60 s), um in dieser Anwendung zum Einsatz kommen zu können.

**Beispiel 2**

Installation eines Motors mit 15,0 kW, 3 x 400 V (4-polig) zusammen mit einer Kreiselpumpe (Losbrechmoment von ca. 60 %).

Der Stromverbrauch des Motors beträgt bei seiner Nenndrehzahl 30,0 A.

**Empfohlene Lösung 2**

Ein VLT® AutomationDrive P11K (typischerweise für einen 11-kW-Motor mit einem hohen konstanten Last-Drehmoment) kann dennoch mit einem Last-Drehmoment für übermäßige Lasten (maximal 110 %/60 s) 32 A erzeugen und eignet sich daher für diese Anwendung. Das Gerät verfügt außerdem über maßgeschneiderte Funktionen für zusätzliche Energieeinsparungen.



**Mitarbeit:**

*John Bargmeyer, Michael Burghardt, Norbert Hanigovszki, Marie Louise Hansen, Anna Hildebrand Jensen, Johnny Wahl Jensen, Hans Seekjar, Ana-Mari Tataru-Kjar, Firuz Zare, Thomas Jansen und Martin Černý.*



ISBN 978-3-946437-01-7

Die in Katalogen, Prospekten und anderen schriftlichen Unterlagen, wie z.B. Zeichnungen und Vorschlägen enthaltenen Angaben und technischen Daten sind vom Käufer vor Übernahme und Anwendung zu prüfen. Der Käufer kann aus diesen Unterlagen und zusätzlichen Diensten keinerlei Ansprüche gegenüber Danfoss oder Danfoss Mitarbeitern ableiten, es sei denn, dass diese vorsätzlich oder grob fahrlässig gehandelt haben. Danfoss behält sich das Recht vor, ohne vorherige Bekanntmachung im Rahmen des Angemessenen und Zumutbaren Änderungen an ihren Produkten – auch an bereits in Auftrag genommenen – vorzunehmen. Alle in dieser Publikation enthaltenen Warenzeichen sind Eigentum der jeweiligen Firmen. Danfoss und das Danfoss Logo sind Warenzeichen der Danfoss A/S. Alle Rechte vorbehalten.