EUROPA-FACHBUCHREIHE
für elektrotechnische Berufe

Frequenzumrichter für Praktiker
PROFINET

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

Europa-Nr.: 51288

Autor:
Tritschler, Michael StD a.D. – Engen

Lektorat:
Teil I: Schwarz, Jürgen Dipl.-Ing. – Tettnang
Teil II: Tapken, Herbert OStR – Wardenburg

Projektleitung:
Nies, Andreas Dipl.-Ing. – Aachen

Bildbearbeitung:
Zeichenbüro des Verlages Europa-Lehrmittel GmbH & Co. KG, Ostfildern

1. Auflage 2026
Druck 5 4 3 2 1

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

ISBN 978-3-8085-5128-8

Bei Fragen zur Produktsicherheit wenden Sie sich bitte an produktsicherheit@europa-lehrmittel.de.

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

© 2026 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
www.europa-lehrmittel.de

Satz: Daniela Schreuer, 78224 Singen (Hohentwiel)
Umschlag: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald
Druck: CPI books GmbH, 25917 Leck

Vorwort

Frequenzumrichter nehmen eine strategisch zentrale Rolle bei der Energieeinsparung und der Verbesserung der Produktionsqualität ein. Gut ausgebildete Fachkräfte mit Fähigkeiten auf dem Gebiet der Frequenzumrichter sind gesucht und werden gut bezahlt. Der Bedarf wird hier noch weiter zunehmen.

Das vorliegende Buch richtet sich an Elektroniker und Elektronikerinnen, die von Grund auf lernen möchten, wie Frequenzumrichter in der Praxis eingesetzt werden. Nach einer umfassenden Einführung in die theoretischen Grundlagen wird erläutert, wie Frequenzumrichter mit speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) angesteuert werden. Die Inhalte werden abgerundet durch zahlreiche Übungsaufgaben.



Die Lösungen der Übungsaufgaben sind im Preis dieses Buches enthalten und stehen digital zur Verfügung (siehe vordere Umschlaginnenseite).

Inhalt

Teil I – Theorie

Ausführliches Inhaltsverzeichnis 6

1. Einführung 9
2. Grundlagen der Antriebstechnik 16
3. Leistungshalbleiter für den Frequenzumrichter 61
4. Frequenzumrichter 84
5. Elektronische Erzeugung einer Dreiphasenwechselspannung 110
6. *U*/*f*-Steuerung 157
7. Raumzeigermodulation 176
8. Regelungsverfahren 191
9. Energieeffizienz durch Energierückgewinnung 213

Teil II – Praxis PROFINET

Ausführliches Inhaltsverzeichnis 226

1. Einführung 228
2. Antriebsfamilie – SINAMICS G 230
3. SINAMICS Standard-Frequenzumrichter G120 231
4. Parametrierung des Frequenzumrichters SINAMICS G120 244
5. PROFINET 249
6. Kommunikation im PROFINET-IO 259
7. Projektierung eines PROFINET-IO-Netzwerks 277
8. Engineering-Tool SINAMICS Startdrive 307
9. Inbetriebnahme des Motors 328
10. Antriebs- und Kommunikationsdiagnose 330
11. Parametrierung in der Funktions- und in der Parametersicht 334
12. Lernaufgaben 342

Indizes 399
Formelzeichen 400
Abkürzungen 403
Sachwortverzeichnis 406
Literatur 410
Bilderquellen 412

Teil I

Theorie

Inhalt

1. Einführung ... 9

1.1 Heutige Antriebstechnik – Energieeffiziente Produktion ... 9

1.2 Energieeffiziente elektrische Antriebstechnik ... 9

2. Grundlagen der Antriebstechnik ... 16

2.1 Belastungskennlinien verschiedener Antriebssysteme ... 16
2.1.1 Konstantes Belastungsmoment ... 17
2.1.2 Linear ansteigendes Belastungsmoment ... 17
2.1.3 Quadratisch ansteigendes Belastungsmoment ... 18
2.1.4 Abfallendes Belastungsmoment ... 18

2.2 Grundlagen des Drehstrom-Asynchronmotors (DASM) ... 19
2.2.1 Aufbau und Wirkungsweise ... 19
2.2.2 Entstehung des Drehmomentes ... 26
2.2.3 Schlupf ... 31
2.2.4 Betriebskennlinie ... 33
2.2.5 Motorleistungsschild ... 35

2.2.6 Betriebsquadranten ... 36
2.2.7 Elektrisches Bremsen ... 39
2.2.8 Ersatzschaltbild ... 43

2.3 Drehzahlsteuerung ... 45
2.3.1 Drehzahlstellen mit der Polpaarzahl ... 47
2.3.2 Drehzahlstellen mit dem Schlupf ... 48
2.3.3 Drehzahlstellen mit der Frequenz ... 50
2.3.4 Zusammenfassung ... 60

3. Leistungshalbleiter für den Frequenzumrichter ... 61

3.1 Leistungsdioden ... 63
3.1.1 PIN-Diode ... 63
3.1.2 SiC-Schottky-Diode ... 67

3.2 Abschaltbare Leistungshalbleiter ... 69
3.2.1 Leistungs-MOSFET ... 70
3.2.2 IGBT ... 72
3.2.3 Wide-Bandgap-Leistungstransistoren ... 77

4. Frequenzumrichter ... 84

4.1 Prinzipieller Aufbau ... 86

4.2 Netzgleichrichter ... 87
4.2.1 Einphasen-Brückengleichrichter – B2U ... 87
4.2.2 Dreiphasen-Brückengleichrichter – B6U ... 89

4.3 Zwischenkreis ... 91
4.3.1 Spannungszwischenkreis ... 91
4.3.2 Stromzwischenkreis ... 96
4.3.3 Brems-Chopper ... 97

4.4 Wechselrichter ... 102
4.4.1 Wechselrichter mit IGBT-Leistungstransistoren ... 103
4.4.2 Wechselrichter mit SiC-MOSFET-Leistungstransistoren ... 104

4.5 Intelligente Umrichtermodule ... 105

4.6 Steuerkreis – Control Unit (CU) ... 107

5. Elektronische Erzeugung einer Dreiphasenwechselspannung 110

5.1 Blockmodulation 110
5.1.1 Ermittlung der Statorgröße 115
5.1.2 Leiterspannungen des Wechselrichters 119
5.1.3 Statorspannungen 122
5.1.4 Spannungs-Raumzeiger 126
5.1.5 Drehfelderzeugung 129

5.2 Pulsweitenmodulation 132
5.2.1 Verriegelungszeit 135
5.2.2 Einphasige sinusbewertete Pulsweitenmodulation 136
5.2.3 Dreiphasige sinusbewertete Pulsweitenmodulation 142
5.2.4 Leiterspannungen des Wechselrichters 145
5.2.5 Oberschwingungen der Leiterspannungen 150
5.2.6 Strangströme durch die Motorwicklung 150
5.2.7 Stromwelligkeit 155
5.2.8 Digitale Pulsweitenmodulation mittels Mikrocontroller 156

6. *U*/*f*-Steuerung 157

6.1 *U*/*f*-Steuerung mit linearer Charakteristik 158

6.2 *U*/*f*-Steuerung mit parabolischer Charakteristik 161

6.3 Umsetzung der *U*/*f*-Steuerung 162
6.3.1 Spannungsanhebung – Boost 162
6.3.2 IxR-Kompensation 163
6.3.3 Schlupfkompensation 164
6.3.4 87-Hz-*U*/*f*-Steuerung mit linearer Kennlinie 166
6.3.5 Hochlaufgeber 172
6.3.6 50-Hz-*U*/*f*-Steuerung mit dem Betriebspunkt auf 70 Hz 173

7. Raumzeigermodulation 176

7.1 Raumzeiger 176

7.2 Statorfestes α,β-Koordinatensystem 177

7.3 Erzeugung eines rotierenden Raumzeigers 183

7.4 Raumzeigermodulation des Soll-Spannungs-Raumzeigers 187

8. Regelungsverfahren 191

8.1 Übersicht – Regelungsverfahren für Frequenzumrichter 191

8.2 *U*/*f*-Regelung 192
8.2.1 *U*/*f*-Regelung ohne Drehzahlrückführung 192
8.2.2 *U*/*f*-Regelung mit Drehzahlrückführung 194
8.2.3 Vor- und Nachteile der *U*/*f*-Regelung 195

8.3 Feldorientierte Regelung (Vektorregelung) 196

8.4 Motorregelungen 200
8.4.1 Stromgeführte feldorientierte Regelung ohne Geber 201
8.4.2 Feldorientierte Regelung mit Lageregelung 206

8.5 Feldorientierte Regelung mit Vorsteuerung 207
8.5.1 Drehzahlvorsteuerung 208
8.5.2 Drehmomentvorsteuerung 209
8.5.3 Beispiel: Lageregelung mit Vorsteuerungen 210

8.6 Zusammenfassung – Feldorientierte Regelung 212

9. Energieeffizienz durch Energierückgewinnung 213

9.1 Energierückspeisung in den Standard-Frequenzumrichter 214

9.2 Frequenzumrichter mit externem Netzrückspeisemodul. 216

9.3 Rückspeisefähiger Frequenzumrichter 221

1. Einführung

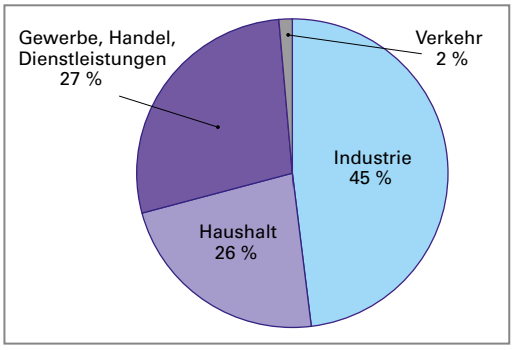
1.1 Heutige Antriebstechnik – Energieeffiziente Produktion

In der heutigen automatisierten Produktionswelt spielt die ständige Produktionssteigerung und somit die Produktivität einer Anlage eine immer gewichtigere Rolle. Um die Produktivität und die Qualität zu gewährleisten, muss in den heutigen Produktionsanlagen der Automatisierungsgrad stetig gesteigert werden. Dabei bilden die elektrischen Antriebe immer häufiger eine wichtige und somit eine unverzichtbare Säule in der Produktion.

Durch die Erhöhung des Automatisierungsgrades benötigt die Industrie immer mehr Energie. Die rasant ansteigenden Energiekosten fallen wegen knapper werdenden Ressourcen, der Energiewende und verschiedener Krisenherde immer mehr ins Gewicht. Somit wird der Energievorrat, auch in der Produktion, mehr und mehr zu einem strategisch wichtigen Thema. Aus diesen Gründen müssen unter anderem die elektromotorischen Antriebe, neben der Erfüllung der eigentlichen Antriebsaufgaben, immer energieeffizienter arbeiten. Mit einer stetigen Erhöhung der Energieeffizienz der Produktionsanlagen kann die benötigte Energie verringert und damit Betriebskosten gesenkt werden.

Nach dem Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft betrug im Jahr 2024 der Stromverbrauch in Deutschland insgesamt 483,9 Terawattstunden (TWh). Von diesem Gesamtstromverbrauch benötigte die Industrie 218 TWh, das entspricht 45 % des gesamten Stromverbrauchs in Deutschland. In **Bild 1** wird der Stromverbrauch in Deutschland im Jahr 2024 nach Verbrauchergruppen grafisch dargestellt.

Vom Gesamtverbrauch der Industrie entfielen dabei rund 70 % oder 153 TWh auf den Energieverbrauch von elektrischen Antrieben.



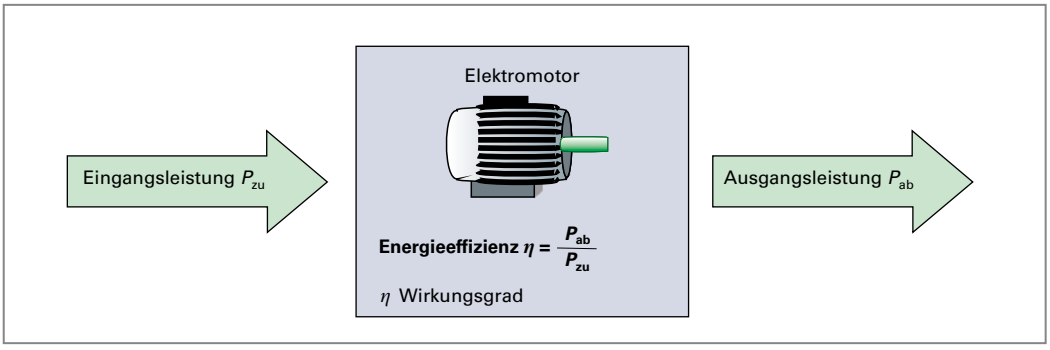
1 Stromverbrauch in Deutschland im Jahr 2024

1.2 Energieeffiziente elektrische Antriebstechnik

Die elektrische Antriebstechnik, ein elektromotorisches System, besteht aus elektrischen und mechanischen Teilsystemen (Elementen) und ist für die industriellen Fertigungen von großer Bedeutung. In Zeiten der stetig steigenden Energiekosten ist ein energiesparender Betrieb durch die optimale Anpassung der einzelnen Teilsysteme von besonderer Bedeutung und erhöht somit auch die Wettbewerbsfähigkeit.

1

Das zentrale Element der elektrischen Antriebstechnik ist der Elektromotor. Der Elektromotor nimmt in den Maschinen und Anlagen der Fertigungs- und Logistikprozesse eine Schlüsselrolle ein. Er wandelt elektrische Energie aus dem öffentlichen Versorgungsnetz in mechanische Energie um. Infolgedessen kann der Elektromotor die elektrische Energie in eine lineare oder in eine rotierende Bewegung umsetzen. Somit steht der Elektromotor als treibende Kraft am Anfang der elektrischen Antriebstechnik. Wegen seines hohen Verwendungsgrades in der Industrie kommt dem Elektromotor beim Thema Energie- und Ressourcenschonung eine wichtige Rolle zu. Fast jede Maschine bzw. Anlage in der Industrie wird mit Elektromotoren angetrieben. Infolgedessen verursachen diese Maschinen bzw. Anlagen ca. zwei Drittel des industriellen Energieverbrauchs. Aus diesen Gründen steigt die weltweite Nachfrage nach energieeffizienten und wirkungsgradoptimierten Elektromotoren an. Dabei wird die Energieeffizienz eines Elektromotors als das Verhältnis der mechanischen Ausgangsleistung P_{ab} zur elektrischen Eingangsleistung P_{zu} berechnet.



1 Energieeffizienz eines Elektromotors

Je größer der Wirkungsgrad eines Elektromotors ist, desto höher ist seine Energieeffizienz.

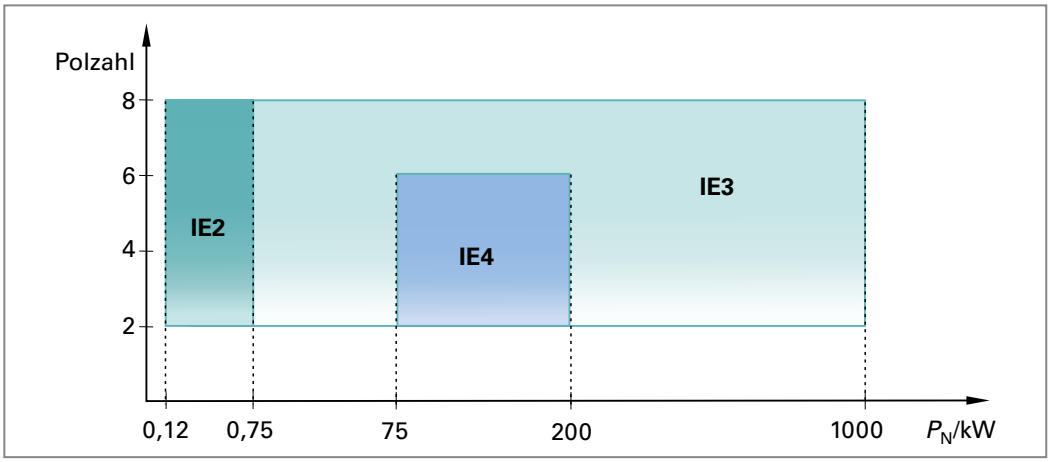
Die Energieeffizienz von Elektromotoren wird seit 2009 in internationalen Wirkungsgradklassen IE (Energieeffizienzklassen, *engl. international efficiency*) angegeben. Ein Elektromotor mit der Energieeffizienzklasse IE1 besitzt das niedrigste und mit IE5 das höchste Energieeffizienzniveau. Die Wirkungsgradklassen von Elektromotoren sind in der internationalen Norm DIN EN 60034-30-1 festgelegt.

Für die Niederspannungs-Drehstrom-Asynchronmotoren im Leistungsbereich von 0,12 kW bis 1000 kW gelten folgende Wirkungsgradklassen:

IE-Code	Energieeffizienz – Wirkungsgradklasse
IE1	Standard-Wirkungsgrad (Vertrieb seit Juni 2011 nur noch eingeschränkt gestattet)
IE2	Hoher Wirkungsgrad
IE3	Premium Wirkungsgrad
IE4	Super Premium (97 % realisiert)
IE5	Ultra Premium (vorgesehen für neue Norm)

Tabelle 1: Wirkungsgradklassen von Elektromotoren

Seit dem 01.07.2023 müssen nach der Ökodesign-Richtlinie in Europa (EU) Verordnung 2019/1781 verpflichtend Asynchronmotoren, die in Kombination mit einem Frequenzumrichter betrieben werden, folgende Wirkungsgradklasse erfüllen (**Bild 1**).



1 Ökodesign-Richtlinie die seit 01.07.2023 für Asynchronmotoren gelten

Die einphasigen Asynchronmotoren ab 0,12 kW müssen der Wirkungsgradklasse IE2 und die Drehstrom-Asynchronmotoren von 75 kW bis 200 kW, mit 2, 4 oder 6 Polen, der IE4-Wirkungsgradklasse entsprechen.

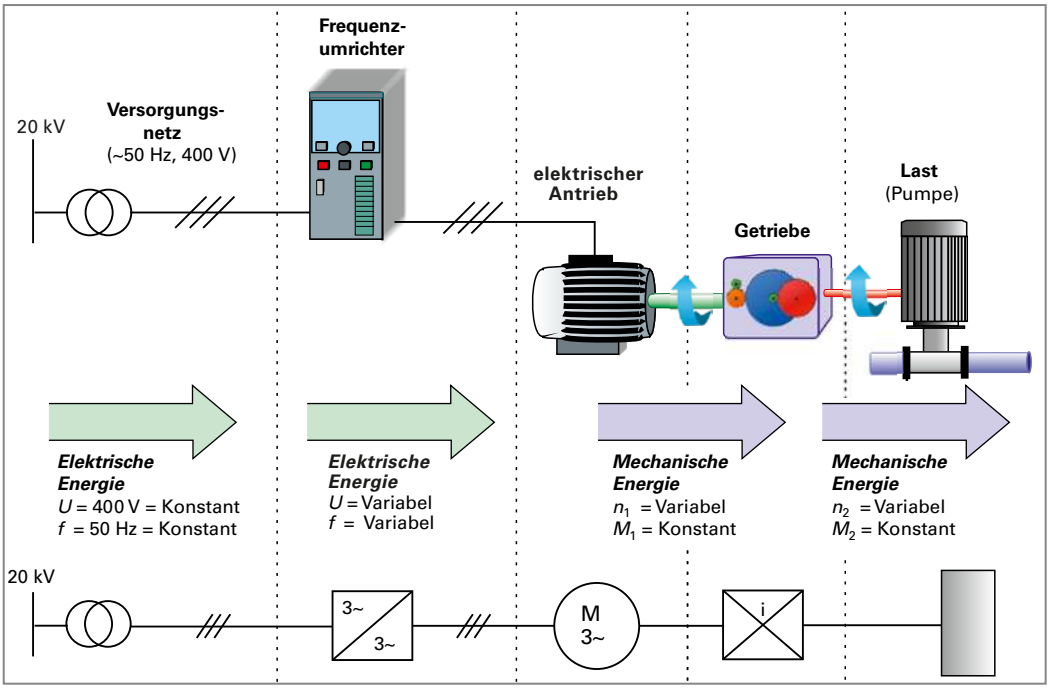
Für die Frequenzumrichter gelten neben der Produktnorm DIN EN IEC 61800-5-1, in zunehmendem Maße auch Normen, Vorschriften sowie länderspezifische Bestimmungen, die berücksichtigt werden müssen, beispielsweise Anforderungen an die Netzqualität. So werden die Frequenzumrichter nach der Ökodesgin-Richtlinie der EU in Effizienzklassen von IE0 bis IE2 (niedrig bis hoch) eingeteilt. Seit 01.07.2023 müssen Frequenzumrichter mit einer Bemessungsleistung von 0,12 kW bis 1000 kW die Effizienzklasse IE2 einhalten.

In den heutigen Produktionsanlagen steigt die Komplexität der Anlagetechnik stetig an und somit steigen auch die Anforderungen an die elektrische Antriebstechnik. So fordern viele Prozesse eine dynamische, auch regelbare Motordrehzahl bzw. Drehmomente. Um diese Anforderung zu erfüllen, wird vor dem Elektromotor ein Frequenzumrichter *(engl. frequency converter)* installiert. Der Frequenzumrichter erzeugt aus einer konstanten Netzfrequenz und einer konstanten Netzspannung eine veränderbare Drehzahl mit konstantem Drehmoment.

Durch die Weiterentwicklung des Frequenzumrichters können statt Drehstrom-Asynchronmotoren auch Drehstrommotoren wie Permanentmagnet-Synchronmotoren und Synchron-Reluktanzmotoren vom Frequenzumrichter angesteuert werden.

In diesem Fachbuch wird der Drehstrom-Asynchronmotor in Verbindung mit einem Frequenzumrichter behandelt, da der Asynchronmotor in den Produktionsanlagen am häufigsten verwendet wird.

Mit einem Drehstrommotor, dessen Drehzahl und Drehmoment mit einem Frequenzumrichter optimal an die Arbeitsmaschine, z. B. einer Pumpe, angepasst wird, ist ein energiesparender Betrieb möglich (**Bild 1**, Seite 12).



1 Elektrisches Antriebstechnik-System

Eine weitere wichtige Komponente der elektrischen Antriebstechnik ist je nach Anwendung das Getriebe. Das Getriebe ist ein mechanischer Wandler und kann die konstante Drehzahl des Elektromotors in eine benötigte Drehzahl oder in ein benötigtes Drehmoment ändern.

Bei Verwendung von Frequenzumrichtern wird nicht nur Energie gespart, sondern sie führt auch zur Senkung der Lebensdauerkosten (*engl. life cycle cost* – LCC) der Drehstrommotoren. Wird ein herkömmlicher Drehstrommotor durch einen Hochwirkungsgrad-Drehstrommotor, einen Energiesparmotor, ersetzt, lässt sich das Energiesparpotenzial weiter erhöhen.

Mittels dieser Maßnahmen wird der jährliche Energiebedarf signifikant gesenkt. Außerdem werden die erhöhten Anschaffungskosten schnell amortisiert.

Eine energieeffiziente, elektrische Antriebstechnik-Anlage kann aus den folgenden Komponenten bestehen:

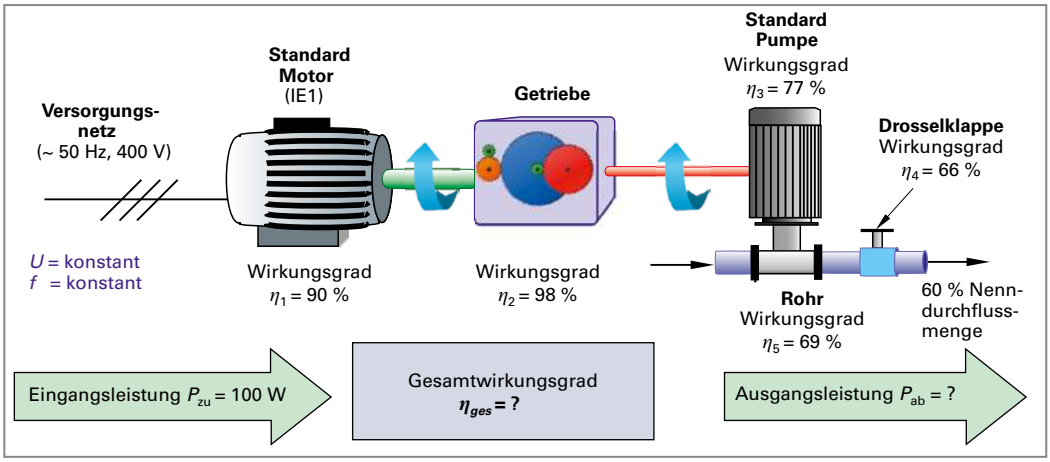
- **Frequenzumrichter**, steuert den elektrischen Energiefluss zum elektrischen Antrieb
- **Elektromotor**, dieser wandelt die elektrische in mechanische Bewegungsenergie um
- **Getriebe**, passt die mechanische Motorleistung an die Arbeitsmaschine (Last) an

Mit einem Frequenzumrichter kann der Energiefluss zu einem energieeffizienten Drehstrommotor optimal gesteuert werden. Dadurch verringert sich der Energiebedarf und senkt die Lebensdauerkosten.

Nachfolgend wird anhand eines Beispiels der Vergleich der Wirkungsgrade einer konventionellen und einer energieeffizienten Pumpenanlage durchgeführt.

Pumpenanlage – konventionell

Die Pumpenanlage (**Bild 1**) fördert eine Flüssigkeit. Die konventionelle Anlage besteht aus einem Drehstrom-Asynchronmotor IE1 mit Getriebe, der eine Pumpe antreibt und aus einer Drosselklappe, mit der der Flüssigkeitsdurchfluss reguliert wird.



1 Konventionelle Pumpenanlage

Aus den einzelnen Wirkungsgraden der Anlagekomponenten der Pumpenanlage lässt sich der Gesamtwirkungsgrad η_{ges}, die Energieeffizienz, berechnen:

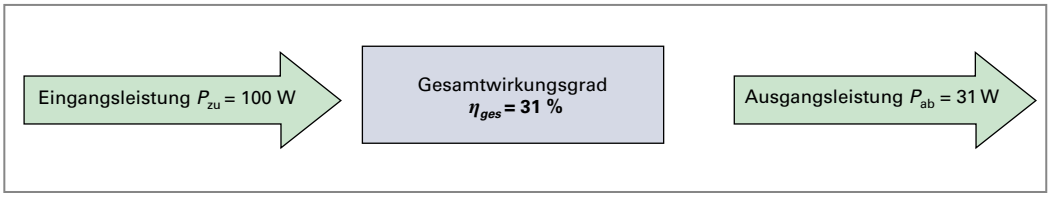
$$\eta_{ges} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \qquad \text{Gl. 1.2-1}$$

$$\boldsymbol{\eta_{ges}} = 0{,}9 \cdot 0{,}98 \cdot 0{,}77 \cdot 0{,}66 \cdot 0{,}69 = 0{,}309 \approx 0{,}31 \Rightarrow \boldsymbol{\eta_{ges} = 31\ \%}$$

Mit dem Gesamtwirkungsgrad und einer angenommenen Eingangsleistung P_{zu} von 100 W wird die Ausgangsleistung P_{ab} berechnet.

$$\eta_{ges} = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} \qquad \text{Gl. 1.2-2}$$

$$\boldsymbol{P_{ab}} = \eta_{ges} \cdot P_{zu} = 0{,}31 \cdot 100\ \text{W} = \boldsymbol{31\ W}$$



2 Konventionelle Pumpenanlage – Leistungen und Wirkungsgrad

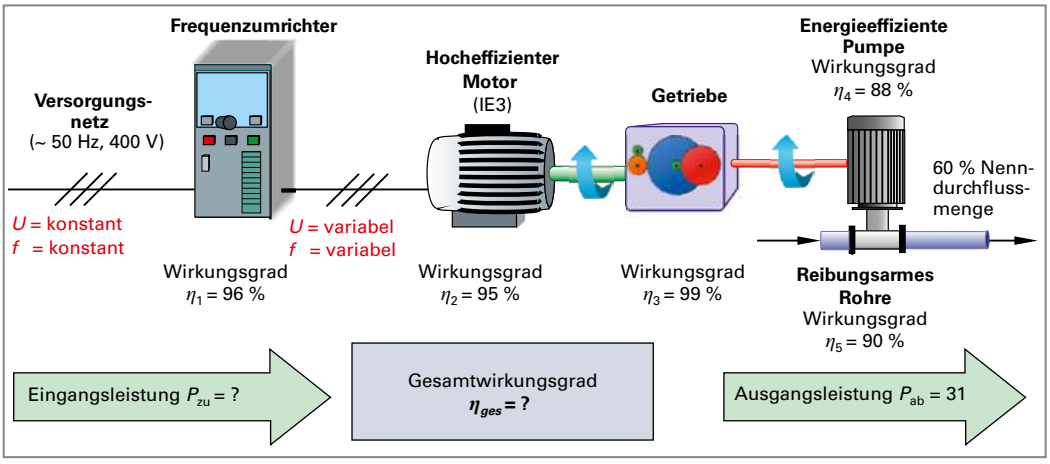
Unter der Voraussetzung, dass die Eingangsleistung 100 W beträgt, steht somit am Ausgang noch eine Ausgangsleistung von 31 W zur Verfügung. Der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} beträgt für die konventionelle Pumpenanlage 31 %.

1

Pumpenanlage – energieeffizient

Der Standard-Getriebemotor (IE1) wird durch einen energieeffizienten Drehstrom-Asynchronmotor (DASM) der Energieeffizienzklasse IE3 ersetzt. Ein Frequenzumrichter soll die Drehzahl des Drehstrom-Asynchronmotors steuern und wird deshalb vor dem Motor installiert. Über ein Getriebe ist die Pumpe mit dem DASM gekoppelt. Somit steuert die Drehzahl des Drehstrom-Asynchronmotors die Durchflussmenge in der Rohrleitung. Die Drosselklappe kann eingespart werden. Die Standard-Pumpe wird durch eine energieeffiziente Pumpe und die alte Rohrleitung durch eine reibungsarme Rohrleitung ersetzt.

Damit die Energieeinsparung mit den energieeffizienten Anlagekomponenten mit denen der konventionellen Anlagekomponenten vergleichbar wird, soll die Flüssigkeitsdurchflussmenge von 60 % in beiden Anlagen beibehalten werden. Im **Bild 1** ist die energieeffiziente Pumpenanlage mit den entsprechenden Wirkungsgraden dargestellt.



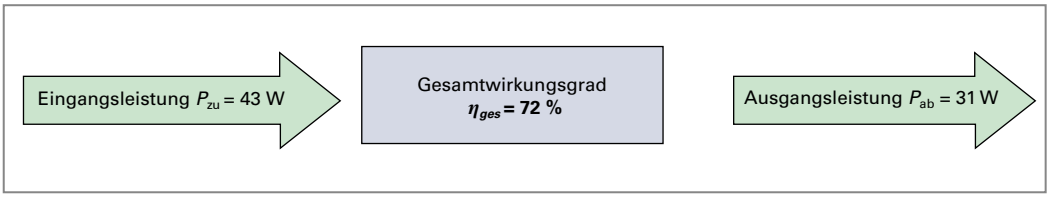
1 Energieeffiziente und optimierte Pumpenanlage

Aus den einzelnen Wirkungsgraden der Komponenten des Pumpenantrieb-Systems lässt sich wieder der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} berechnen:

$$\boldsymbol{\eta_{ges}} = 0{,}96 \cdot 0{,}95 \cdot 0{,}99 \cdot 0{,}88 \cdot 0{,}90 = 0{,}715 \approx 0{,}72 \Rightarrow \boldsymbol{\eta_{ges} = 72\ \%}$$

Der Gesamtwirkungsgrad η_{ges} des energieeffizienten Systems hat sich gegenüber dem konventionellen Pumpenantriebs-System wesentlich verbessert.

$$\boldsymbol{P_{zu}} = \frac{P_{ab}}{\eta_{ges}} = \frac{31\ \text{W}}{0{,}72} = \boldsymbol{43\ \text{W}}$$



2 Gesamtwirkungsgrad des energieeffizienten Systems

Bezogen auf die Ausgangsleistung von 31 W des konventionellen Pumpenantriebs-Systems benötigt das energieeffizientere Pumpenantriebs-System nur noch 43 W anstatt 100 W Eingangsleistung. Somit wird durch die Optimierung der Pumpenanlage eine Leistung von 57 W eingespart. Durch den Einbau von energieeffizienten Komponenten wird ein Einsparpotenzial von 57 % erzielt.

Das Fazit aus dieser energieeffizienten Modernisierung der Pumpenanlage ist, dass sich mit einer Modernisierung mit aktuellen Energiesparprodukten Einsparpotenziale von mindestens 50 % erzielen lassen. Dabei stellen die Elektromotoren und die Antriebssysteme ein beachtliches Potenzial für die Einsparung von Energie und Kosten dar.

Nachfolgend wird eine Übersicht des Einsparpotenzials von einzelnen energieeffizienten Systemkomponenten in der **Tabelle 1** aufgelistet:

Energieeffiziente Komponente	Einsparpotenzial
Energiesparmotoren	10 %
Frequenzumrichter	30 %
Mechanische Systemoptimierung	60 %

Tabelle 1: Einsparpotenzial mit energieeffizienten Komponenten

In einer typischen konventionellen industriellen Altanlage steckt mehr als 50 % Energieeinsparpotenzial.

Neben der Kosteneinsparung beim Energieverbrauch können durch Umrüstung bzw. Modernisierung einer Anlage die Funktionalität, die Produktivität und die Verfügbarkeit verbessert und die Qualität gesteigert werden.

2. Grundlagen der Antriebstechnik

In der heutigen Antriebstechnik werden in den meisten Produktionsstätten für die Drehzahlsteuerung bzw. für die Drehzahlregelung Drehstrom-Asynchronmotoren und Servomotoren verwendet.

Die Drehstrom-Asynchronmotoren, in Verbindung mit einem Frequenzumrichter, haben hinsichtlich der Dynamik und Regelqualität fast das Leistungsniveau von Gleichstrom- oder Servomotoren erreicht.

Wichtige Gründe für die Verwendung von Frequenzumrichtern in der Antriebstechnik:

- **Einsparung von Energie, daraus resultierend die Einsparung von Kosten**
- **Verbesserung der Effizienz von Anlagen**
- **Anpassung der Drehzahl und des Drehmoments an den Prozess**
- **Reduzierung der zugeführten Leistung einer Maschine**
- **Reduzierung der mechanischen Belastung an Systemen**
- **Reduzierung des Geräuschniveaus**
- **Verlängerung der Lebensdauer einer Anlage**
- **Verringerung von Wartungsarbeiten und Stillstandzeiten**
- **Hohe Dynamik**

Aus diesen vorgenannten Gründen und aufgrund der günstigen Herstellung in genormte Baugrößen, Leistungsstufen und Energieeffizienzklassen findet der Drehstrom-Asynchronmotor als Standard-Motor in der Industrie große Verwendung. Eine Ausnahme bilden die Synchron-Servomotoren und elektronisch kommutierte Gleichstrommotoren (EC-Motoren: *engl.* ***E****lectronically* ***C****ommutated motors*) für hochdynamische Positionierungsaufgaben.

2.1 Belastungskennlinien verschiedener Antriebssysteme

Um den Frequenzumrichter optimal an den Drehstrom-Asynchronmotor anpassen zu können, benötigt man gute Kenntnisse über den Drehmomentbedarf in Abhängigkeit der Drehzahl von der Arbeitsmaschine. Der physikalische Zusammenhang zwischen Drehzahl und Drehmoment wird in der Belastungskennlinie (Lastkennlinie) grafisch dargestellt.

Beim Elektromotor gilt zwischen den physikalischen Größen Leistung P, Drehmoment M und Drehzahl n folgender mathematische Zusammenhang:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot M \cdot n = C_1 \cdot M \cdot n \qquad \text{mit } C_1 = \text{Konstante} \qquad \text{Gl. 2.1-1}$$

$$P \sim M \cdot n \qquad \text{Gl. 2.1-2}$$

Die Leistung ist direkt proportional zum Drehmoment und zur Drehzahl. Folglich können für die Darstellung der einzelnen Belastungskennlinien die Leistung, das benötigte Drehmoment und die Drehzahl herangezogen werden.

Die Belastungskennlinien einer Arbeitsmaschine stellt den Antriebsdrehmomentbedarf in Abhängigkeit von der Drehzahl dar.

Grundsätzlich lassen sich die Lastkennlinien einer Arbeitsmaschine in vier typische idealisierte Lastkennlinien unterteilen. Jedoch ist die Wahrscheinlichkeit in der Praxis relativ groß, dass die realistischen Belastungskennlinien von den idealisierten Belastungskennlinien abweichen.

2.1.1 Konstantes Belastungsmoment

Bleibt das Belastungsmoment konstant, dann gilt zwischen der Leistung und der Drehzahl folgender physikalische Zusammenhang:

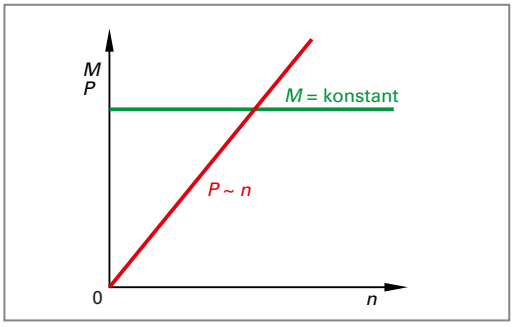
$$P \sim M \cdot n \qquad \text{mit } M = \text{konstant} \qquad \text{Gl. 2.1-3}$$

$$P \sim n \qquad \text{Gl. 2.1-4}$$

Bei einem konstanten Lastmoment verhält sich die Leistung proportional zur Drehzahl (**Bild 1**).

Die erforderliche Antriebsleistung des Motors steigt linear mit der Drehzahl, dabei bleibt das Belastungsmoment konstant.

Typische Anwendungen: Kräne, Förderer, Aufzüge, Hebezeuge, Dosierpumpen, Walzwerke, Hobelmaschinen, Verarbeitungsmaschinen.



1 Belastungskennlinie für ein konstantes Lastmoment

2.1.2 Linear ansteigendes Belastungsmoment

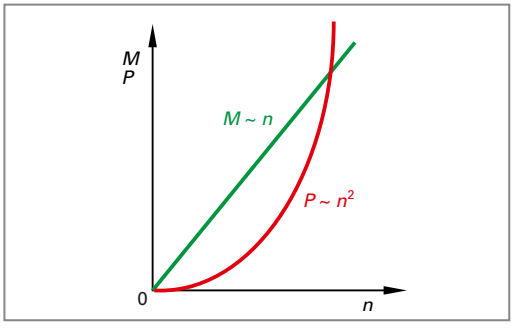
Steigt das Belastungsmoment proportional mit der Drehzahl an, dann gilt zwischen der Leistung und der Drehzahl folgender physikalische Zusammenhang:

$$P \sim M \cdot n \qquad \text{mit } M \sim n \qquad \text{Gl. 2.1-5}$$

$$P \sim n^2 \qquad \text{Gl. 2.1-6}$$

Das Belastungsmoment einer Arbeitsmaschine steigt proportional und die Antriebsleistung quadratisch mit der Drehzahl.

Typische Anwendungen: Papier- und Textil-Maschinen, Kalandern, Kunststoff- und Gummifolien-Maschinen, Wirbelstrombremse.



2 Linear ansteigendes Belastungsmoment

2.1.3 Quadratisch ansteigendes Belastungsmoment

Das Belastungsmoment steigt quadratisch mit der Drehzahl an, dann gilt zwischen der Leistung und der Drehzahl folgender physikalische Zusammenhang:

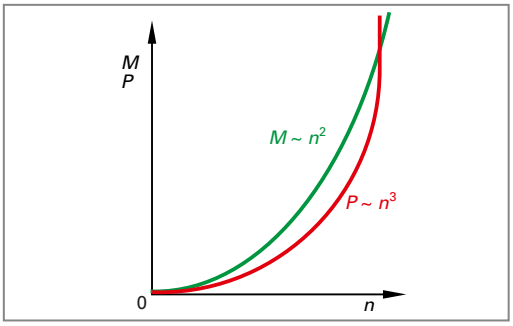
$$P \sim M \cdot n \qquad \text{mit } M \sim n^2 \qquad \text{Gl. 2.1-7}$$

$$P \sim n^2 \cdot n \sim n^3 \qquad \text{Gl. 2.1-8}$$

Die Leistung steigt kubisch mit der Drehzahl an.

Das Belastungsmoment steigt quadratisch und die Leistung kubisch mit der Drehzahl.

Typische Anwendungen: Lüfter, Ventilator, Kreiselpumpen, Verdichter, Zentrifugen, Rührwerke. Die meisten Antriebssysteme bzw. Arbeitsmaschinen in der Praxis besitzen ein quadratisch zur Drehzahl ansteigendes Moment.



1 Quadratische Belastungsmoment-Kennlinie

Bei den genannten Anwendungen kann durch den Einsatz eines Frequenzumrichters eine enorme Energieeinsparung erfolgen. So weisen Pumpen für den Transport von Gas oder Flüssigkeiten, aufgrund entstehender Gas- oder Flüssigkeitsreibungen, ein quadratisch mit der Drehzahl steigendes Drehmoment auf.

Aus diesem Zusammenhang wird nochmals auf die Pumpenlage in **Kapitel 1.2** hingewiesen. In dieser Anlage wird die Fördermenge statt über die Drosselklappe über die Drehzahl des Motors geregelt. Die Energieeinsparung erfolgt nicht nur durch die Verwendung von energieeffizienten Systemkomponenten, sondern auch durch die Drehzahlsteuerung und Drehzahlregelung von Antrieben mittels Frequenzumrichter. So führt die kubische Abhängigkeit von Leistung und Drehzahl dazu, dass eine Halbierung der Drehzahl nur noch ein Achtel an Leistung erfordert.

2.1.4 Abfallendes Belastungsmoment

Das Belastungsmoment fällt umgekehrt proportional mit der Drehzahl, es gilt zwischen der Leistung und der Drehzahl folgender physikalischer Zusammenhang:

$$P \sim M \cdot n \qquad \text{Gl. 2.1-9}$$

Für das Belastungsmoment gilt:

$$M \sim \frac{P}{n} \qquad \text{mit } P = \text{konstant} \qquad \text{Gl. 2.1-10}$$

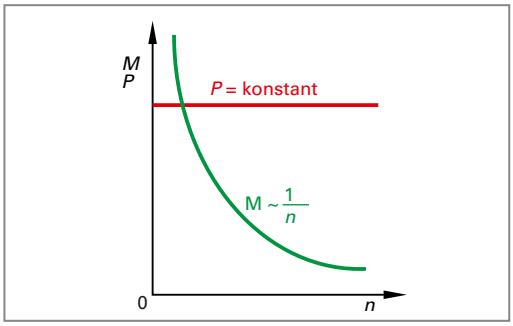
$$M \sim \frac{1}{n} \qquad \text{Gl. 2.1-11}$$

Belastungsmoment fällt umgekehrt proportional mit der Drehzahl.

Erfordert eine Arbeitsmaschine eine konstante Antriebsleistung, so fällt das Antriebsmoment umgekehrt proportional zur Drehzahl ab.

Typische Anwendungen: Maschinen zum Auf- und Abwickeln von Papier, von Blech, von Folie.

Bei der Inbetriebnahme eines Frequenzumrichters ist es wichtig, den Lastkennlinien-Verlauf der Arbeitsmaschine zu kennen, damit der Frequenzumrichter an die Last angepasst werden kann.



1 Fallende Belastungsmoment-Kennlinie

2.2 Grundlagen des Drehstrom-Asynchronmotors (DASM)

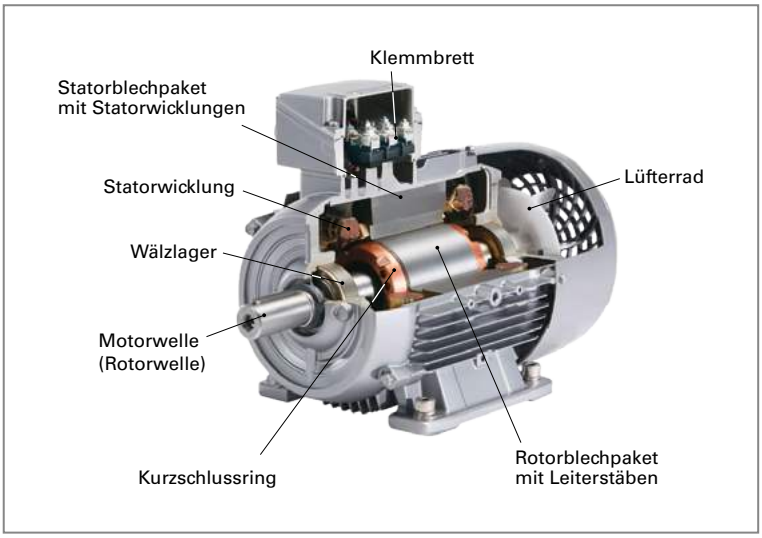
Der Drehstrom-Asynchronmotor *(engl. three phase asynchronous motor)* zählt in Verbindung mit einem Frequenzumrichter zu den am meisten verwendeten Industriemotoren, etwa 90 % der industriellen Antriebe. Aufgrund ihres einfachen Aufbaus sind sie robuster, betriebssicherer, kostengünstiger und wartungsfreundlicher als Drehstrom-Synchronmotoren oder Gleichstrommotoren. Anderseits gestaltet sich die Drehzahl- bzw. Drehmomentregelung eines Drehstrom-Asynchronmotors als schwierig. In Verbindung mit einem Frequenzumrichter ist der DASM in der Lage, die Drehzahl- bzw. das Drehmoment bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen exakt konstant zu halten.

In den nachfolgenden Kapiteln wird der Motoraufbau, die Wirkungsweise und die für den Frequenzumrichterbetrieb wichtigen Motorgrößen des Drehstrom-Asynchronmotors erläutert.

2.2.1 Aufbau und Wirkungsweise

Ein Drehstrom-Asynchronmotor besitzt einen stillstehenden Teil, den Stator (Ständer), und ein rotierendes Teil, den Rotor (Läufer). Der Stator besteht aus einem Blechpaket mit Nuten, in denen sich die drei Statorwicklungen U, V, W befinden, die jeweils um 120° räumlich zueinander versetzt angeordnet sind. Im Klemmbrett sind die Wicklungsanfänge (U1, V1, W1) und die Wicklungsenden (U2, V2, W2) herausgeführt. Die Wicklungsenden können im Klemmbrett in Stern oder Dreieck verdrahtet werden. Im Blechpaket des Rotors befinden sich Nuten, in denen leitende Stäbe eingebettet sind (**Bild 1**, Seite 20).

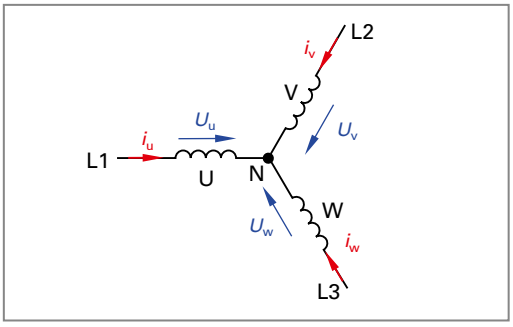
Die leitenden Rotorstäbe bestehen aus Aluminium oder Kupfer. Diese sind jeweils an den Stirnseiten des Rotors mit einem Kurzschlussring miteinander verbunden. Aufgrund des Aufbaus des Rotors nennt man den Rotor auch Kurzschlussläufer oder Käfigläufer, den Motor auch Kurzschluss- oder Käfigläufermotor. In **Bild 1**, Seite 20 ist ein Schnittmodell eines Drehstrom-Asynchronmotors mit Kurzschlussläufer dargestellt.



1 Aufbau eines Drehstrom-Asynchronmotors (Käfigläufermotor)

Entstehung des Statordrehfeldes

Die Wicklungen eines Drehstrom-Asynchronmotors sind in Sternschaltung an das Drehstromnetz (~50 Hz, 400 V) angeschlossen. Das Anlegen einer dreiphasigen Wechselspannung an die Motorwicklungen U, V, W (Stator- oder als Ständerwicklungen oder Stränge benannt) bewirkt, dass in den Statorwicklungen die Wechselströme i_U, i_V und i_W fließen und an den Statorwicklungen die Wechselspannungen u_U, u_V und u_W entstehen (**Bild 2**).



2 Sternschaltung der Statorwicklungen (Rechtslauf)

Die sinusförmigen Statorströme sind bei einem Motor mit drei Statorwicklungen zeitlich um jeweils 120° gegeneinander phasenverschoben. Jede Wicklung wird von einem sinusförmigen Strom durchflossen und diese Ströme erzeugen in den Statorwicklungen einen magnetischen Fluss Φ_S.

Im **Bild 1**, Seite 21 ist der zeitliche Verlauf der drei Statorströme i_U, i_V und i_W und die jeweilige Richtung des magnetischen Flusses $\underline{\Phi}_S$ bei verschieden Zeitpunkten dargestellt.

Die vektoriellen Größen werden in diesem Fachbuch immer mit einem Unterstrich gekennzeichnet.