

Startvarianten für den Drehstrom-Asynchronmotor

Der Drehstrom-Asynchronmotor wird in Bezug auf Konstruktion und Schaltart seines passiven Läufers auch Käfigläufer oder Kurzschlussläufer (-motor) genannt. Vergleichbar einem rotierenden Transformator und gemäß seiner Wirkweise ist aber auch die Bezeichnung Induktionsmotor üblich. Ausführungen mit getrennten Statorwicklungen werden als Dahlander motor bezeichnet. Eine weitere Ausprägung ist der Schleifringläufer (-motor). Hier sind die Wicklungen des Läufers über drei Schleifringe her ausgeführt und werden erst außerhalb des Motors über Widerstände kurzgeschlossen.

So vielfältig die Ausprägungen und Benennungen beim Asynchronmotor sind, so vielfältig sind auch die jeweiligen Motorabgänge zum Starten und Steuern. Zur vereinfachten Übersicht werden hier nachfolgend vier der bekanntesten und wichtigsten Motorabgänge betrachtet. Bei der Einspeisung ein dreiphasiges, mittelpunktleitergeerdetes Wechselstromnetz (3 / N / PE / AC 50/60 Hz) zugrunde gelegt.

Für die hier nachfolgend aufgeführten Startvarianten bietet Eaton Moeller das komplette Programm im Motorabgang zum Schalten, Schützen und Steuerung von Drehstrom-Asynchronmotoren.

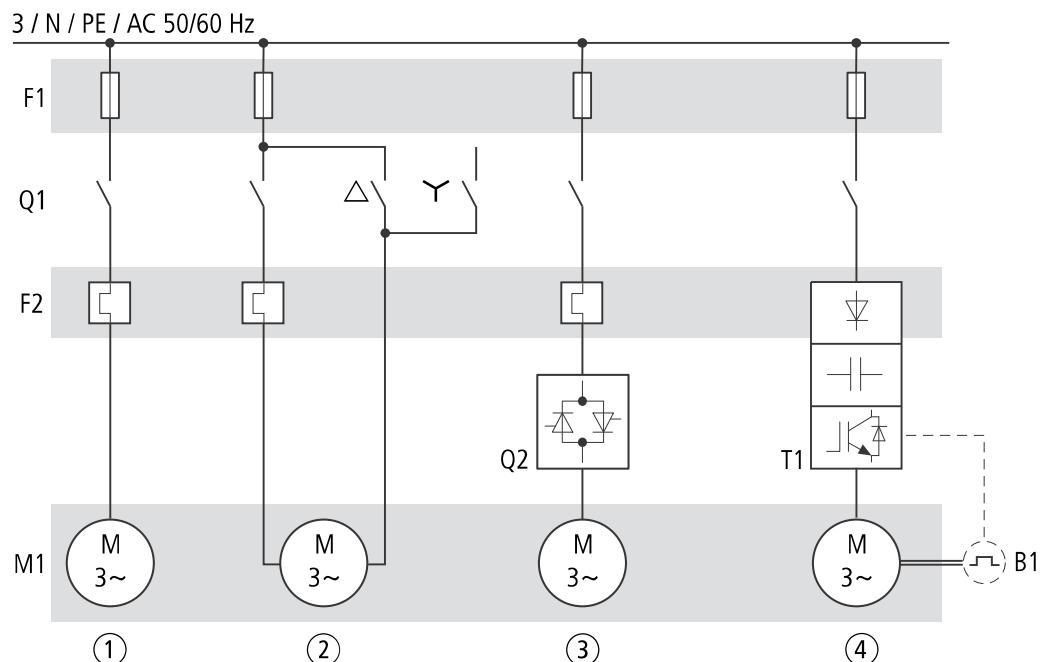


Abbildung 1: Motorstartvarianten

F1 = Absicherung (Kurzschluss- und Leitungsschutz)

Q1 = Schalten (Leistungsschütz, Motorschütz)

F2 = Motorschutz (Schutz vor thermischer Überlast, Motorschutzrelais)

M1 = Drehstrom-Asynchronmotor

① Direkter Motorstart.

② Stern-Dreieck-Starter, die bekannteste und am meisten angewandte Startvariante.

③ Softstarter (Q2), der kontinuierliche und stufenlose Motorstart. Eine moderne, elektronische Alternative zum Stern-Dreieck-Starter.

④ Frequenzumrichter (T1), geführter, stufenloser Motorstart mit Nennmoment. Frequenzumrichter ermöglichen zudem eine stufenlose Drehzahlsteuerung und haben einen elektronischen Motorschutz (I^2t) integriert. Je nach Ausprägung ermöglichen sie auch die genaue Drehzahlregelung (Option, Impulsgeber B1) beim sonst schlupfabhängigen Asynchronmotor.

Anschlusssschaltung des Drehstrommotors

Beim Anschluss des Drehstrommotors am elektrischen Netz müssen die Daten auf dem Leistungsschild mit der Netzsspannung und der Netzfrequenz übereinstimmen. Der Anschluss erfolgt dabei über sechs Schraubenverbindungen (Standardaus-

führung) im Klemmkasten des Motors und unterscheidet zwei Grundschatungen, die Stern- und die Dreieckschaltung. Beispiel für eine Netzanschlussspannung 3 AC 400 V, 50 Hz (siehe Abbildung 2)

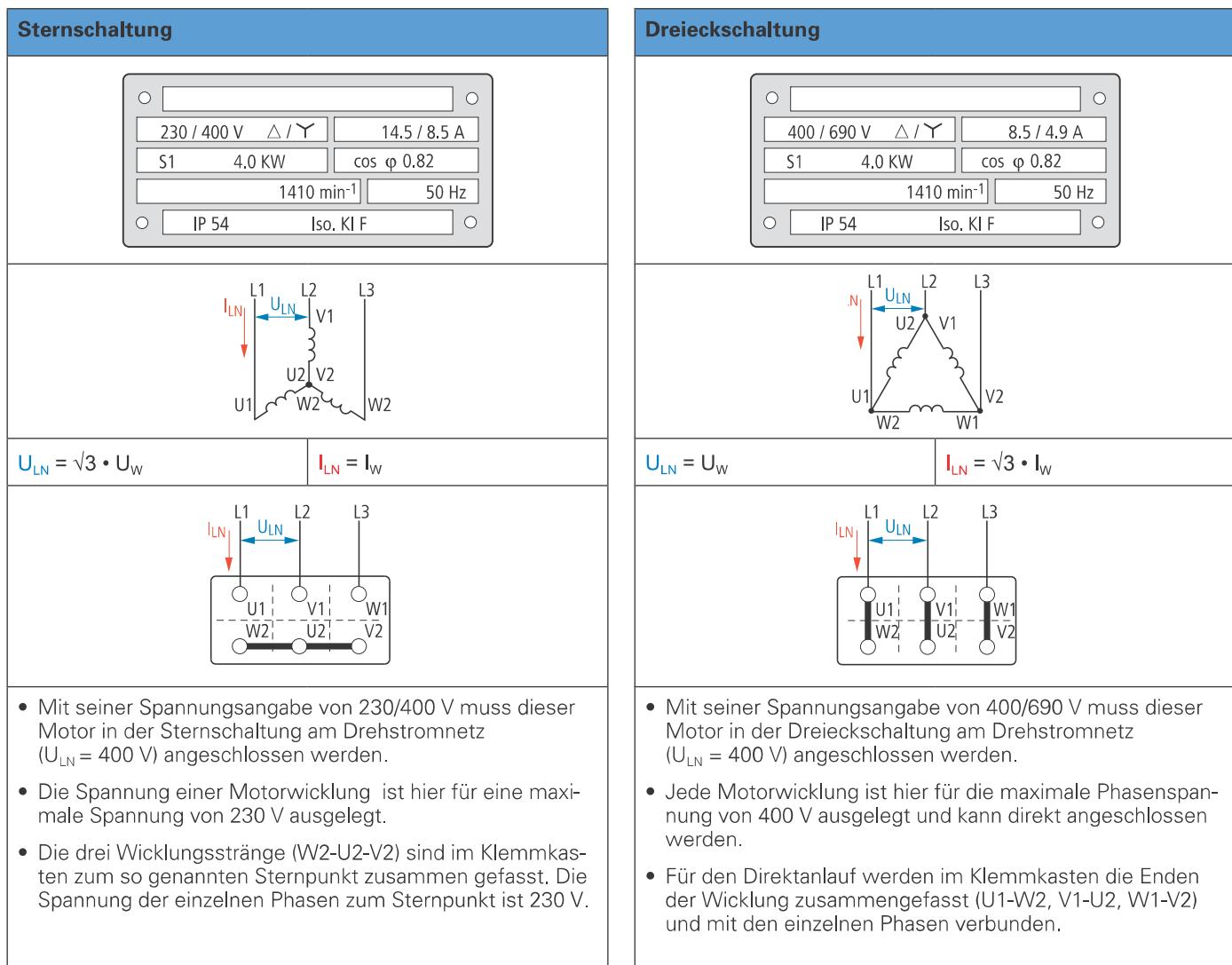


Abbildung 2: Motor-Anschlusssschaltungen, Rechtslauf

Generell sind die Eigenschaften eines Drehstrommotors in Normen festgelegt (DIN/VDE 0530, IEC/EN 60034). Konstruktive Möglichkeiten zur Ausführung bleiben den Herstellern dennoch. So findet man beispielsweise im preissensiblen Markt kleinere Motorleistungen (<4 kW) – und hier besonders bei Pumpen und Lüftern – immer wieder Motoren ohne Klemmkasten. Hier sind die Wicklungen dann bereits im Motor zum Sternpunkt verbunden und nur drei Anschlussleitungen für die zugeordnete Bemessungsspannung werden herausgeführt.

Unabhängig von der Ausführung (mit/ohne Klemmkasten) müssen die Anschlüsse des Drehstrommotors so gekennzeichnet sein, dass deren alphabetische Reihenfolge (z.B. U1, V1, W1), der zeitlichen Phasenfolge der Netzsspannung (L1, L2, L3) entsprechen und beim Motor einen Rechtslauf bewirken. Der Drehsinn wird dabei mit Blick auf die Antriebsseite (Welle des Motors) angegeben. Bei Motoren mit zwei Wellenenden ist die Antriebsseite mit D, die Nichtantriebsseite mit N gekennzeichnet (D = Drive, N = No drive). Der Linkslauf des Drehstrom-

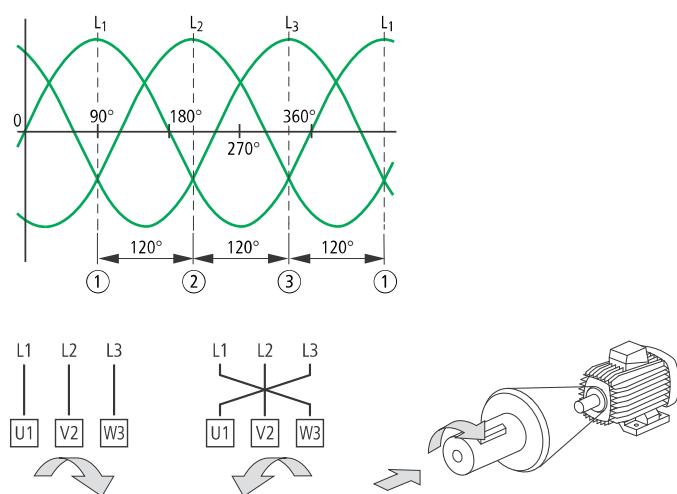


Abbildung 3: Rechtsdrehung: Phasenfolge – Anschlussklemmen – Antriebsseite

motoren wird durch Vertauschen zweier Anschlussleitungen (Netzphasen) erreicht.

Der Arbeitspunkt (M_M) des Drehstrom-Asynchronmotors ist durch den Bereich der Bemessungsspannung und der zugehörigen Frequenz beschrieben (z.B. 400V/50Hz). Die Drehzahl wird dabei durch die Frequenz des speisenden Netzes bestimmt ($n \sim f$). Sie ist lastabhängig und wird nur so lange beibehalten, wie Motormoment (M_M) und Lastmoment (M_L) gleich groß sind.

Die elektrischen und mechanischen Bemessungsdaten des Arbeitspunktes müssen im Leistungsschild des Motors dokumentiert sein. Während des Anlassvorgangs (Beschleunigungsvorgang) sind die Betriebsdaten instabil. Ein stationärer Betrieb des Antriebes ist nur im Bereich des Arbeitspunkts (M_M) zulässig.

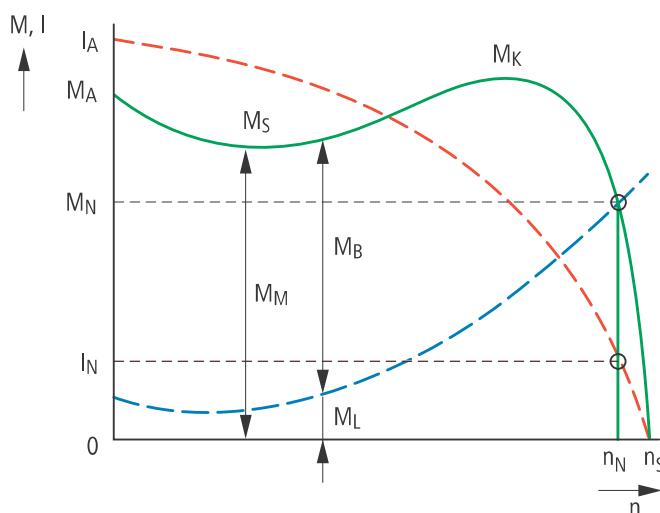


Abbildung 4: Charakteristische Anlaufkennlinie des Drehstrom-Asynchronmotors

I_A = Anlaufstrom

I_N = Nennstrom im Arbeitspunkt

M_A = Anlaufmoment

M_B = Beschleunigungsmoment ($M_B > M_L$)

M_K = Kippmoment

M_L = Lastmoment

M_M = Motormoment (Arbeitspunkt)

M_N = Nennmoment, stabiler Schnittpunkt der Drehmomentkennlinie mit der Lastkennlinie

n = Drehzahl (aktueller Wert)

n_N = Nenndrehzahl im Arbeitspunkt

n_s = synchrone Drehzahl

($n_s - n_N$ = Schlupfdrehzahl)

$$P = \frac{M_N \cdot n}{9550} \quad P = [\text{kW}] \quad f = [\text{Hz}] = 1/\text{sec}$$

$$M_N = [\text{Nm}] \quad n = [\text{min}^{-1}] \quad 1 \text{ min} = 60 \text{ sec}$$

$$n = \frac{f}{p} \cdot (1 - s) \quad s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \%$$

Direkter Motorstart

Der direkte Motorstart ist die einfachste Art für das Anlassen von Drehstrom-Asynchronmotoren. Die Statorwicklungen werden dabei in einem einzigen Schaltvorgang direkt mit dem elektrischen Netz verbunden.

Durch das Anlegen der vollen Netzspannung entstehen große Anlaufströme (Stoßströme), die wiederum störende Spannungsänderungen im Netz verursachen. Die elektrischen Energieversorgungsunternehmen (EVU) begrenzen daher die zulässigen Bemessungsleistungen der Motoren am Netz. Diese Grenzwerte können von Netz zu Netz variieren. Im öffentlichen Netz gilt die Begrenzung im Allgemeinen als erfüllt, wenn der gelegentlich anlaufende Drehstrommotor eine Scheinleistung von weniger als 5,2 kVA hat oder bei höheren Scheinleistungen, der Anlaufstrom 60 A nicht überschreit. Bei einer Netzspannung von 400 V und einem 8-fachem Anlaufstrom, entspricht dies einem Bemessungsstrom von 7,5 A bzw. einer abgegebenen Motorleistung von 4 kW (Wellenleistung).

Bei Motoren mit gelegentlich höheren Anlaufströmen als 60 A und Motoren mit Anlaufströmen von mehr als 30 A, die im öffentlichen Netz störende Rückwirkungen verursachen, z.B. durch schweren Anlauf, häufiges Schalten oder schwankende Stromaufnahme (Aufzüge, Sägegatter), müssen weitere Maßnahmen zur Vermeidung der störenden Spannungsänderungen getroffen werden. Motoren mit Leistungen über 4 kW und der Spannungsangabe 400/690 V können hier zum Beispiel über einen Stern-Dreieck-Anlauf hochgefahren werden.

Das direkte Einschalten belastet die Wicklungen des Motors thermisch und durch große, wenn auch nur kurzzeitige, elektrodynamische Kräfte. Zu häufiges, direktes Einschalten vermindert beim Standardmotor die Lebensdauer der Wicklung (z.B. periodischer Aussetzbetrieb).

Die Blockade des Läufers (festgebremster Läufer) ist im Betrieb ein ernsthafter Störfall, der zu einer thermischen Zerstörung des Drehstrom-Asynchronmotors führen kann. Zum Schutz vor einer solchen thermischen Überlastung muss jeder Motorabgang mit einer stromabhängigen Schutzeinrichtung versehen sein. Einen preiswerten Schutz gewährleisten hier Überlastrelais; besser auch bekannt als Motorschutzrelais oder Bimetall.

In Kombination mit einem Schaltantrieb werden diese Überlastrelais als Motorschutzschalter bezeichnet. Synonym hierfür ist der PKZM. Er schützt im Motorabgang die Schaltgeräte (Schütz DILM), Zuleitungen und Motorwicklungen gegen die Zerstörung durch thermische Überlast (Blockierschutz) und Kurzschluss, auch bei Ausfall eines Außenleiters (L1, L2, L3). Dazu müssen der Bemessungsstrom des Motors auf dem Motorschutzschalter eingestellt und die Anschlussleitungen im Motorabgang nach diesem Einstellwert dimensioniert werden.

Die Auslegung der Komponenten im Hauptstromkreis des Motorabgangs erfolgt gemäß dem Bemessungsbetriebsstrom (I_e) des Motors und der Gebrauchskategorie AC-3 (Norm IEC/EN60947-4-1); AC-3 = Käfigläufermotoren: Anlassen, Ausschalten während des Laufes.

Die Auswahl des geeigneten Motorschutzschalters ist von zentraler Bedeutung für die Funktionssicherheit und die Lebensdauer eines Motors. Die Motorstarterkombination (MSC) bietet hier für den Direktstart eine ideale Komplettlösung im Motorabgang. MSC bestehend in der Standardausprägung aus einem Motorschutzschalter PKZM0 mit Steckverbinder und einem

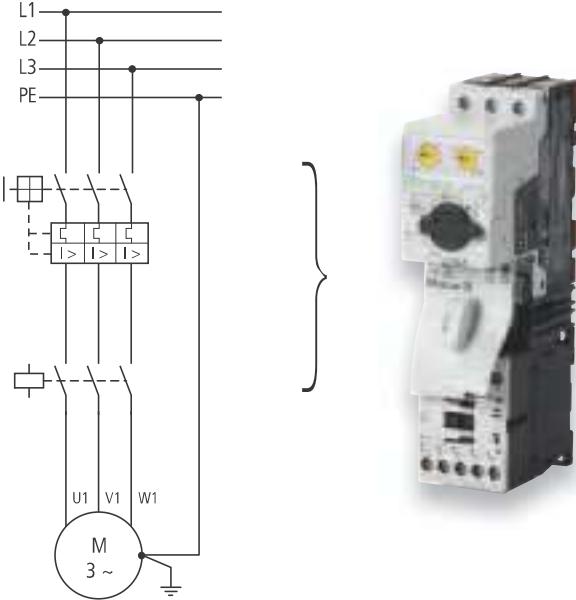


Abbildung 5: Motorabgang, Direktstarter, Rechtslauf, Beispiel MSC

Schütz DILM. In der Version MSC-DE bietet der elektronische Motorschutzschalter PKE für Motorströme bis 65 A eine innovative Alternative zur Bimetall Lösung (PKZM0). Mit hoher Flexibilität und gleichen Zubehörteilen erfüllen MSC-DE die Kundenanforderungen nach austauschbaren "Norm"-Geräten.

Stern-Dreieck-Anlauf

Beim Stern-Dreieck-Anlauf erfolgt das Anlassen des Drehstrom-Asynchronmotors durch Umschaltung der Wicklungen. Die Brücken im Klemmkasten des Motors entfallen und alle 6 Wicklungsanschlüsse werden mit der so genannten Stern-Dreieck-Schaltung (manuell betätigter Schalter oder automatische Schützschaltung) an Netzspannung gelegt.

In der Betriebsschaltung sind die Wicklungen des Motors im Dreieck geschaltet. Die Wicklungsspannung (U_W) muss daher gleich der Phasenspannung (U_{LN}) des Drehstromnetzes sein. Beispielsweise bei einer Netzzuschlussspannung von 3 AC

400 V muss die Spannungsangabe im Leistungsschild des Motors 400/690 V sein.

In der Sternschaltung reduziert sich die Netzspannung (U_{LN}) an der einzelnen Motorwicklung um den Faktor $1/\sqrt{3}$ (~ 0,58). Zum Beispiel: $400 \text{ V} \cdot 1/\sqrt{3} = 230 \text{ V}$. Anzugsdrehmoment und Einschaltstrom werden dabei (in der Sternschaltung) auf etwa ein Drittel der Werte bei der Dreieckschaltung reduziert. Typischer Anlaufstrom: $2...2,5 \text{ I}_e$.

Wegen des reduzierten Anzugsmoments eignet sich die Stern-Dreieck-Schaltung für Antriebe mit kleinem oder erst mit der Drehzahl steigendem Lastmoment (M_L) wie zum Beispiel bei Pumpen und Lüftern (Ventilatoren). Sie wird auch dort eingesetzt, wo der Antrieb erst nach dem Hochlauf belastet wird, beispielsweise bei Pressen und Zentrifugen.

Bei der Umschaltung der Schaltungsart von Stern auf Dreieck fällt der Strom auf Null und die Drehzahl des Motors nimmt je nach Belastung ab. Das Umschalten auf Dreieck bewirkt danach einen sprunghaften Anstieg des Stroms, da hier die volle Netzspannung an den Motorwicklungen anliegt. Bei schwachen Netzen entstehen dadurch Spannungseinbrüche. Das Motormoment springt beim Umschalten auf Dreieck ebenfalls auf einen hohen Wert, was den gesamten Antrieb mechanisch belastet. Werden zum Beispiel Pumpen mit Stern-Dreieck-Startern betrieben, so wird dort zur Dämpfung meistens ein mechanischer Schieber eingesetzt, um den für das System kritischen Fall „Wasserschlag“ zu verhindern.

Die automatische Umschaltung von Stern auf Dreieck steuert bei der Schützschaltung meist ein Zeitrelais. Die zeitliche Dauer des Anlaufs in der Sternschaltung ist dabei abhängig von der Belastung des Motors und sollte solange dauern, bis der Motor etwa 75 bis 80 % seiner Betriebsdrehzahl (n_N) erreicht hat, um nach dem Umschalten auf Dreieck, möglichst wenig Nachbeschleunigung leisten zu müssen. Diese Nachbeschleunigung ist in der Dreieckschaltung mit hohen Strömen wie beim Direktanlauf verbunden.

Ein zu schnelles Umschalten zwischen Stern und Dreieck kann über den Ausschaltlichtbogen (an den Schaltkontakte) einen Kurzschluss hervorrufen. Die Pausenzeit der Umschaltung

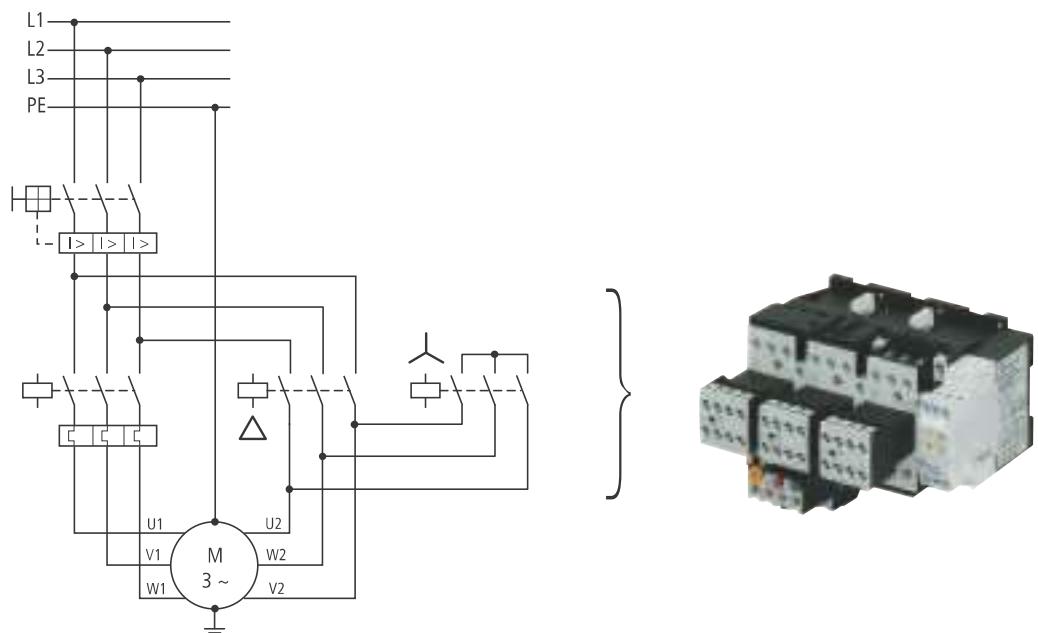


Abbildung 6: Motorabgang, Stern-Dreieck-Starter, Rechtslauf, Beispiel SDAINL

sollte daher immer so lang gewählt sein, wie für die Lichtblögenlöschung nötig ist. Die Antriebsdrehzahl sollte dabei möglichst wenig abfallen. Spezielle Zeitrelais für die Stern-Dreieck-Umschaltung erfüllen diese Anforderungen.

Beim Anschluss der Leiter an Motor und Starter muss für die Umschaltung von Stern auf Dreieck die richtige Phasenfolge beachtet werden (siehe Abbildung 6). Dabei ist auch auf die Drehrichtung des Motors zu achten. Ein falscher Anschluss der Phasen kann, bedingt durch den leichten Drehzahlabfall während der stromlosen Umschaltpause, beim Wiedereinschalten sehr hohe Stromspitzen hervorrufen. Diese Stromspitzen gefährden die Motorwicklungen und beanspruchen die Kontakte der Schaltgeräte unnötig.

Für den Anlauf in Sternschaltung verbindet erst das Sternschütz die Wicklungsenden U2, V2, W2. Anschließend schaltet das Hauptschütz die Netzspannung (U_{LN}) an die Wicklungsenden U1, V1, W1. Nach Ablauf der eingestellten Anlaufzeit schaltet das Zeitrelais das Sternschütz ab und das Dreieckschütz verbindet die Klemmen U2, V2 und W2 mit der Netzspannung.

Die Auslegung der Komponenten im Hauptstromkreis des Motorabgangs erfolgt gemäß dem Bemessungsbetriebsstrom (I_e) des Motors und der Gebrauchskategorie AC-3 (Norm IEC/EN60947-4-1); AC-3 = Käfigläufermotoren: Anlassen, Ausschalten während des Laufs. Das Motorschutzrelais wird dabei in den Wicklungsstrang des Hauptschützes geschaltet. Der einzustellende Strom ist deshalb um den Faktor $1/\sqrt{3}$ ($\sim 0.58 \cdot I_e$) kleiner als der Nennstrom des Motors. Auch Haupt- und Dreieckschütz werden um diesen Faktor ($\sim 0.58 \cdot I_e$) kleiner ausgewählt. Das Sternschütz wird für Anlaufzeiten bis zu 15 Sekunden auf ein Drittel ($\sim 0.33 \cdot I_e$) des Motornennstroms ausgelegt. Bei Anlaufzeiten (> 15 s) bis etwa 60 Sekunden muss das Sternschütz gleich groß gewählt werden wie das Hauptschütz.

Softstarter

In vielen Fällen sind der direkte Anlauf und der stufige Stern-Dreieck-Anlauf des Drehstrom-Asynchronmotors nicht die beste Lösung, denn hohe Stromspitzen beeinflussen das elektrische Netz und Momentstöße beanspruchen stark die mechanischen Teile von Maschine oder Anlage.

Der Softstarter schafft hier Abhilfe. Er ermöglicht einen kontinuierlichen und stoßfreien Drehmomentanstieg und bietet auch die Möglichkeit einer gezielten Anlaufstromreduzierung. Die Motorspannung wird dazu innerhalb einer einstellbaren Anlaufzeit von einer gewählten Startspannung auf die Motornennspannung erhöht. Durch Spannungsverringerung kann mit dem Softstarter auch der Auslauf des Antriebes gesteuert werden.

Die charakteristischen Kennlinien des Drehstrom-Asynchronmotors gelten nur dann, wenn die volle Netzspannung (U_{LN}) zur Verfügung steht. Wenn eine kleinere Spannung anliegt, verringert sich das Drehmoment quadratisch ($M \sim U^2$). Wird beispielsweise im Vergleich zum Stern-Dreieck-Anlauf die Motorspannung auf 58 % ($\sim 1/\sqrt{3}$) reduziert, verringert sich das Drehmoment auf etwa 33 % (ein Drittel).

Die Differenz zwischen Lastkennlinie (M_L) und Momentkennlinie des Motors (M_M) und damit die Beschleunigungskraft, lässt sich so durch Anpassen der Motorspannung beeinflussen. Der Softstarter ist daher vor allem bei Anwendungen mit belasteten Anläufen (Last kann nicht nach dem Hochlaufen zugeschaltet werden) der Stern-Dreieck-Schaltung vorzuziehen. Aus wirtschaftlichen Gründen und unter Berücksichtigung von Energie-

sparmaßnahmen ist er, besonders bei Antrieben mit größerer Leistung, ein Ersatz für die Stern-Dreieck-Schaltungen.

Die Motorspannung wird im Softstarter mit einer Phasenanschnittsteuerung der Sinushalbwellen verändert. Dazu sind in den Phasen zwei Thyristoren antiparallel geschaltet; einer für die positive und einer für die negative Halbwelle.

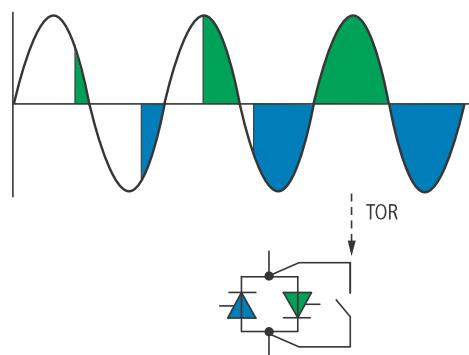


Abbildung 7: Phasenanschnittsteuerung und Bypass-Kontakt

Nach Ablauf der eingestellten Startzeit (t_{Start}) sind die Thyristoren voll ausgesteuert (volle Sinushalbwellen => Top Of Ramp: TOR).

Da die Thyristoren nur während der Hochlaufphase bzw. während der Auslaufphase aktiv sind, können sie für den statischen Dauerbetrieb durch so genannte Bypass-Kontakte überbrückt werden. Durch den deutlich geringeren Übergangswiderstand der mechanischen Schaltkontakte kann die Verlustleistung am Softstarter reduziert werden.

Beim Softstarter werden heute im Aufbau der Leistungsteile zwei grundsätzliche Varianten unterschieden (Abbildung 8).

<ul style="list-style-type: none"> • zweiphasengesteuert, • einfache Handhabung, mit drei Einstellwerten (t_{Start}, U_{Start}, t_{Stop}), • zeitlich geführte, lineare Spannungsrampe, • in der Regel mit internen Bypass-Kontakten, • preiswerte Alternative zum Stern-Dreieck-Starter, • nur In-Line-Schaltung möglich, • für kleine bis mittlere Motorleistungen (< 250 kW). 	<ul style="list-style-type: none"> • dreiphasengesteuert, • für anspruchsvolle Aufgaben, • voreingestellte Applikationen (Kennlinien), • parametrierbar, • Steuerung- und Regelkreise, • mit Strombegrenzung (I^2t) und Motorschutzfunktionen, • kommunikationsfähig (Feldbusanschaltung), • In-Linie- und In-Delta-Schaltung möglich, • für Motorleistung ab etwa 7,5 kW
---	---

Abbildung 8: Merkmale der Softstartervarianten

Die Hochlaufzeit eines Antriebes mit einem Softstarter ergibt sich aus den Einstellungen der Startspannung (U_{Start}) und der Rampenzeiten (t_{Start}) für die lineare Erhöhung bis zur vollen Netzspannung (U_{LN}). Die Startspannung bestimmt dabei das Losbrechmoment des Motors. Hohe Startspannungen und kurze Rampenzeiten entsprechen in etwa dem Direktstart. In der Praxis wird man zuerst das erforderliche Losbrechmoment (U_{Start}) und dann eine möglichst kurze Rampenzeiten (t_{Start}) für den gewünschten Sanftanlauf einstellen.

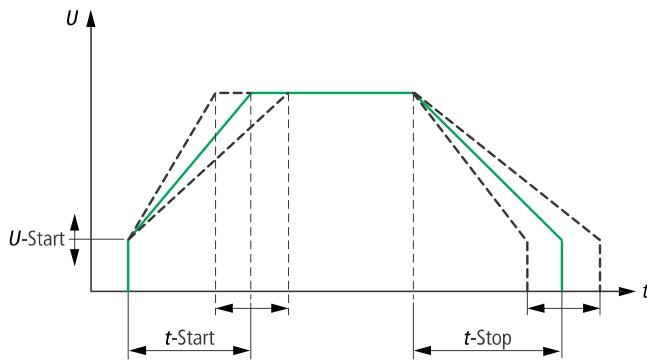


Abbildung 9: Spannungsverlauf in einem Softstarter

Die eingestellte Rampenzeiten (t_{Start}) ist hierbei nicht die tatsächliche Hochlaufzeit des Antriebes. Diese ist abhängig von der Last und vom Losbrechmoment. Die Rampenzeiten steuert nur die Spannungsänderung. Der Strom steigt dabei bis zu seinem Maximum an und fällt erst beim Erreichen der Bemessungsdrehzahl des Motors auf den Nennstrom zurück. Der maximale Strom stellt sich nun gemäß des Antriebes (Motor plus Last) ein und kann nicht im voraus bestimmt werden. So können stark belastete Antriebe und lange Rampenzeiten auch zu einer übermäßig starken thermischen Belastung der Thyristoren führen.

Soll ein gewisser Strom nicht überschritten werden, muss ein Softstarter mit Strombegrenzung gewählt werden. Diese Anlaufvariante wird oft von den Energieversorgungsunternehmen (EVU) gefordert, wenn große Antriebe am öffentlichen Netz angeschlossen werden (z.B. Hebe pumpen, Ventilatoren zur Tunnelbelüftung).

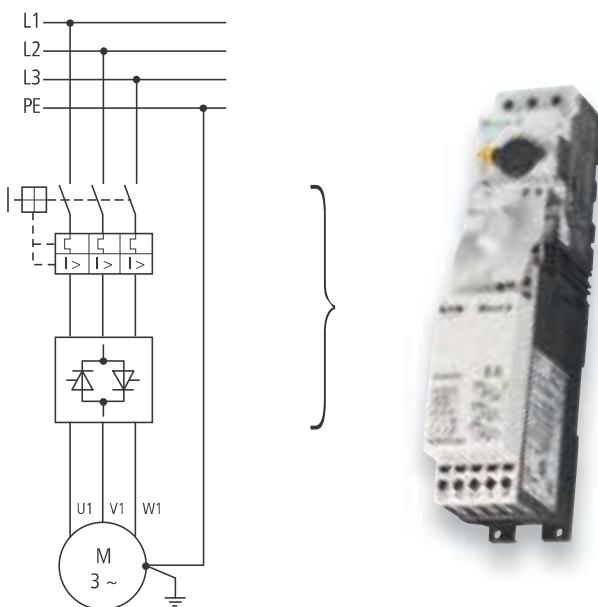


Abbildung 10: Motorabgang, Softstarter DS7, In-Linie-Schaltung, kombiniert mit PKZM0

Softstarter ermöglichen auch eine zeitlich geführte Verringerung der Motorspannungen und damit einen gesteuerten Auslauf der Motoren. Die eingestellte Auslaufzeit (t_{Stop}) muss dabei länger sein, als der lastabhängige, freie Auslauf der Maschine. Wie bei der Beschleunigung ist auch dieser Vorgang lastabhängig. Für die Thyristoren des Softstarters ist dies die gleiche thermische Belastung, wie beim Startvorgang. Wird beispielsweise bei einem Softstarter mit zulässigen 10 Starts pro Stunde auch die Verzögerung aktiviert, sind noch 5 Starts pro Stunde (plus 5 Stopps pro Stunde) zulässig. Die Stopp-Rampenzeiten (t_{Stop}) kann unabhängig von der Startzeit eingestellt werden und wird häufig bei Pumpen zur Verhinderung von Druckwellen (Wasserschlag) gefordert. Aber auch ruckartige Bewegungen beim ungeführten Auslauf, die z.B. einen höheren Verschleiß an Riemern, Ketten, Getrieben und Lagern zur Folge haben, können damit verhindert werden.

Die Auslegung der Schalt- und Schutzgeräte (elektromechanische Komponenten) im Hauptstromkreis des Motorabgangs erfolgt gemäß dem Bemessungsbetriebsstrom (I_e) des Motors und der Gebrauchskategorie AC-3 (Norm IEC60947-4-1). Die Auslegung des Softstarters erfolgt gemäß dem Bemessungsbetriebsstrom (I_e) des Motors und der Gebrauchskategorie AC-53a oder AC-53b (Norm IEC/EN60947-4-2):

- AC-3 = Käfigläufermotoren: Anlassen, Ausschalten während des Laufs.
- AC-53a = Steuern eines Käfigläufermotors: 8-Stunden-Betrieb mit Anlaufströmen für Startvorgänge, Maneuvering, Betrieb.
- AC-53b = Steuern eines Käfigläufermotors: Aussetzbetrieb (Aussetzbetrieb, das heißt, der Softstarter wird im statischen Dauerbetrieb extern überbrückt, z.B. durch ein Bypass-Schütz).

Die In-Line-Schaltung entspricht dem Motorabgang beim Direktstart. Es werden nur drei Leitungen zum Motor geführt und im Klemmkasten an U1, V1 und W1 angeschlossen. Die Wicklungsenden werden gemäß Motor- und Netzspannung in Stern- oder Dreieck geschaltet.

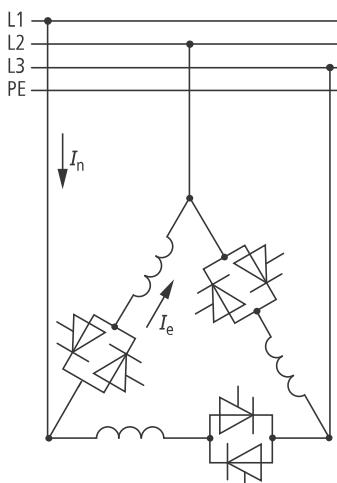


Abbildung 11: In-Delta-Schaltung

Die dementsprechend genannte In-Delta-Schaltung ist nur mit dreiphasengesteuerten Softstartern möglich. Die einzelnen Wicklungen des Motors werden hierbei in Reihe mit den Thyristoren im Dreieck angeschlossen. Der Softstarter kann in dieser Schaltungsart um den Faktor $1/\sqrt{3}$ ($\sim 0.58 \cdot I_e$) kleiner als der Nennstrom des Motors ausgelegt werden. Unter wirt-

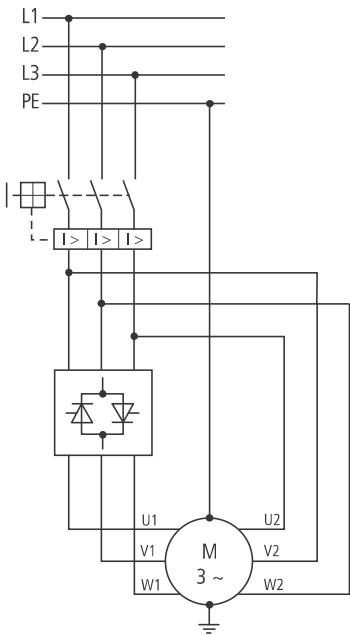


Abbildung 12: Motorabgang, Softstarter, In-Delta-Schaltung

schaftlicher Betrachtung eine interessante Anschlussvariante bei großen Motorleistungen.

Das Motorschutzrelais wird dabei auch in den Wicklungsstrang des Softstarters und auf den um Faktor $1/\sqrt{3}$ ($\sim 0.58 \cdot I_e$) kleineren Nennstrom des Motors ausgelegt. Wird das Motorschutzrelais in der netzseitigen Zuleitung angeordnet, muss es wie der Leistungsschutz oder netzseitige Schaltgeräte auf den Bemessungsbetriebsstrom (I_e) des Motors ausgelegt werden.

Frequenzumrichter

Der Frequenzumrichter ist letztendlich die beste Lösung für den kontinuierlichen und stufenlosen Anlauf des Drehstrom-Asynchronmotors. Durch die einstellbare Strombegrenzung werden hohe Stromspitzen im elektrischen Netz und stoßartige Belastungen in den mechanischen Teilen von Maschine und Anlage verhindert.

Neben dem kontinuierlichen Anlauf ermöglicht der Frequenzumrichter auch eine stufenlose Drehzahl- (Frequenz-) Steuerung des Drehstrom-Asynchronmotors. Während beim direkten Antrieb am Versorgungsnetz angeschlossenen Motor die idealen Betriebsverhältnisse nur im stationären Arbeitspunkt (= Leistungsschildangaben) bestehen, können sie frequenzgeregelt im gesamten Stellbereich genutzt werden, von beispielsweise 4 V bei 0,5 Hz bis 400 V bei 50 Hz. Das konstante Verhältnis von Spannung zu Frequenz (U/f) gewährleistet dabei unabhängige Arbeitspunkte mit Nennmoment (M_M).

Gegenüber den vorangestellten Startvarianten erscheint der Frequenzumrichter auf den ersten Blick als teuerste Lösung. Höhere Anschaffungskosten und zusätzlich erforderliche Installationsmaßnahmen (abgeschirmte Motorleitungen und Funkentstörfilter zur elektromagnetischen Verträglichkeit, EMV) sind Ursachen hierfür. Doch spätestens im Betrieb zeigt der sanfte Motorstart neben Energieeffizienz und Prozessoptimierung auch wirtschaftliche Vorteile auf. Dies gilt beispielsweise besonders für Pumpen und Ventilatoren. Durch die Anpassung von Drehzahl und Geschwindigkeit an den Produktionsprozess und die Kompensation äußerer Störgrößen gewährleistet die

frequenzgeregelte Antriebseinheit eine höhere Lebensdauer und Funktionssicherheit.

Weitere Vorteile des Frequenzumrichters sind die höhere Drehzahlkonstanz bei Lastschwankungen (Drehzahlabweichungen kleiner etwa ein Prozent) und die Möglichkeit des direkten Drehrichtungswechsels. Da das Drehfeld im Frequenzumrichter elektronisch gebildet wird, genügt hier ein Steuerbefehl, um die Phasenfolge und damit die Drehrichtung des Motors zu wechseln. Der in Frequenzumrichtern integrierte elektronische Motorschutz (I^2t -Regelung) ermöglicht zudem einen sicheren Betrieb ohne zusätzliche Schutzmaßnahmen (Motorschutzrelais). Je nach Ausprägung bieten parametrierbare Temperaturmodelle im Frequenzumrichter einen hohen Wärmeschutz des Motors. In Verbindung mit Thermistoren ist auch der so genannte Motor-Vollschutz möglich. Über- und Unterlasterkennung erhöhen dabei auch die Betriebssicherheit der Antriebsseinheit.

Im Hauptstromkreis eines Motorabgangs arbeitet der Frequenzumrichter als Leistungswandler. Getrennt durch die Leistung des Gleichspannungszwischenkreises nimmt er über den Gleichrichter aus dem speisenden Netz Wirkleistung auf und versorgt dann über den Wechselrichter den angeschlossenen Motor mit Wirk- und Blindleistung. Die, für den Motorbetrieb erforderliche Blindleistung liefern die Kondensatoren im Zwischenkreis. Zum elektrischen Netz hin verhält sich der frequenzgeregelte Antrieb dabei quasi wie ein ohmscher Verbraucher ($\cos \varphi \sim 1$).

Die Leistungsumwandlung und die damit verbundenen Stromarten müssen bei der Auslegung der Schalt- und Schutzgeräte im Motorabgang berücksichtigt werden. Dazu werden die elektromechanischen Komponenten (z.B. Sicherungen, Netzdrossel, Netzschütz) auf der netzseitigen Einspeiseseite des Frequenzumrichters gemäß dem Eingangsstrom (Wirkstrom) und der Gebrauchskategorie AC-1 (Norm IEC60947-4-1) ausgelegt. Die Komponenten im Ausgang des Frequenzumrichters (z.B. Motordrossel, Sinusfilter, Motorleitung) werden gemäß dem Bemessungsbetriebsstrom des angeschlossenen Motors und Gebrauchskategorie AC-3 dimensioniert.

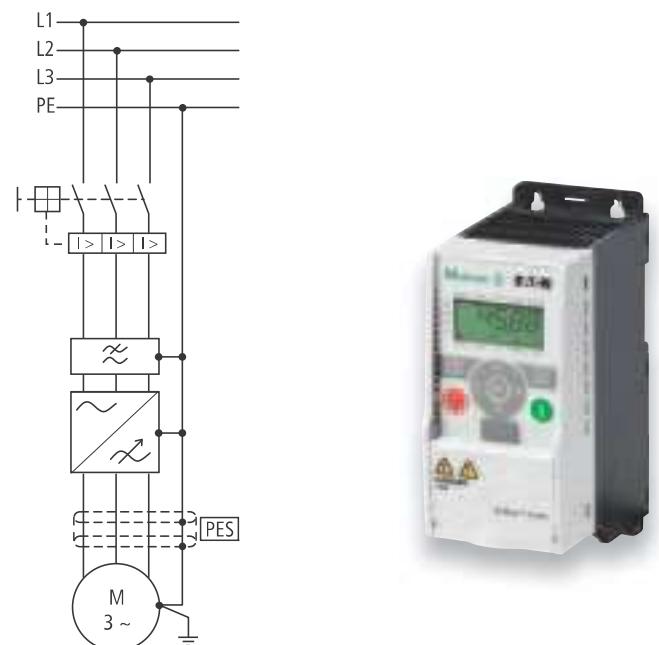


Abbildung 13: Motorabgang, Frequenzumrichter, Beispiel M-Max

Im Motorbetrieb unterscheiden sich die Frequenzumrichter durch die, vom Anwender einstellbare, Arbeitsweise des Wechselrichters. Neben der standardmäßigen U/f-Steuerung mit linearem oder quadratischem Kennlinienverlauf, sind die sensorlose Drehzahlsteuerung mit Schlupfkompenstation und die Drehmoment erhöhende Vektorsteuerung heute bekannte Verfahren. Während die U/f-Steuerung den Parallelbetrieb mehrerer Motoren, auch mit unterschiedlichen Leistungen, im Ausgang des Frequenzumrichters ermöglicht, sind Drehzahl- und Vektorsteuerung nur für den Einzelantrieb vorgesehen. Hierbei

wird mit dem Frequenzumrichter automatisch, durch ein elektronisches Motormodell, das lastabhängige Betriebsverhalten des (einzelnen) Drehstrom-Asynchronmotors optimiert.

Die detaillierte Beschreibung dieser spezifischen Betriebsverfahren mit Frequenzumrichtern würde hier jedoch die gewollt vereinfachte Übersicht der bekanntesten Anlaufmethoden zum Starten und Steuern der Drehstrom-Asynchronmotoren überschreiten.

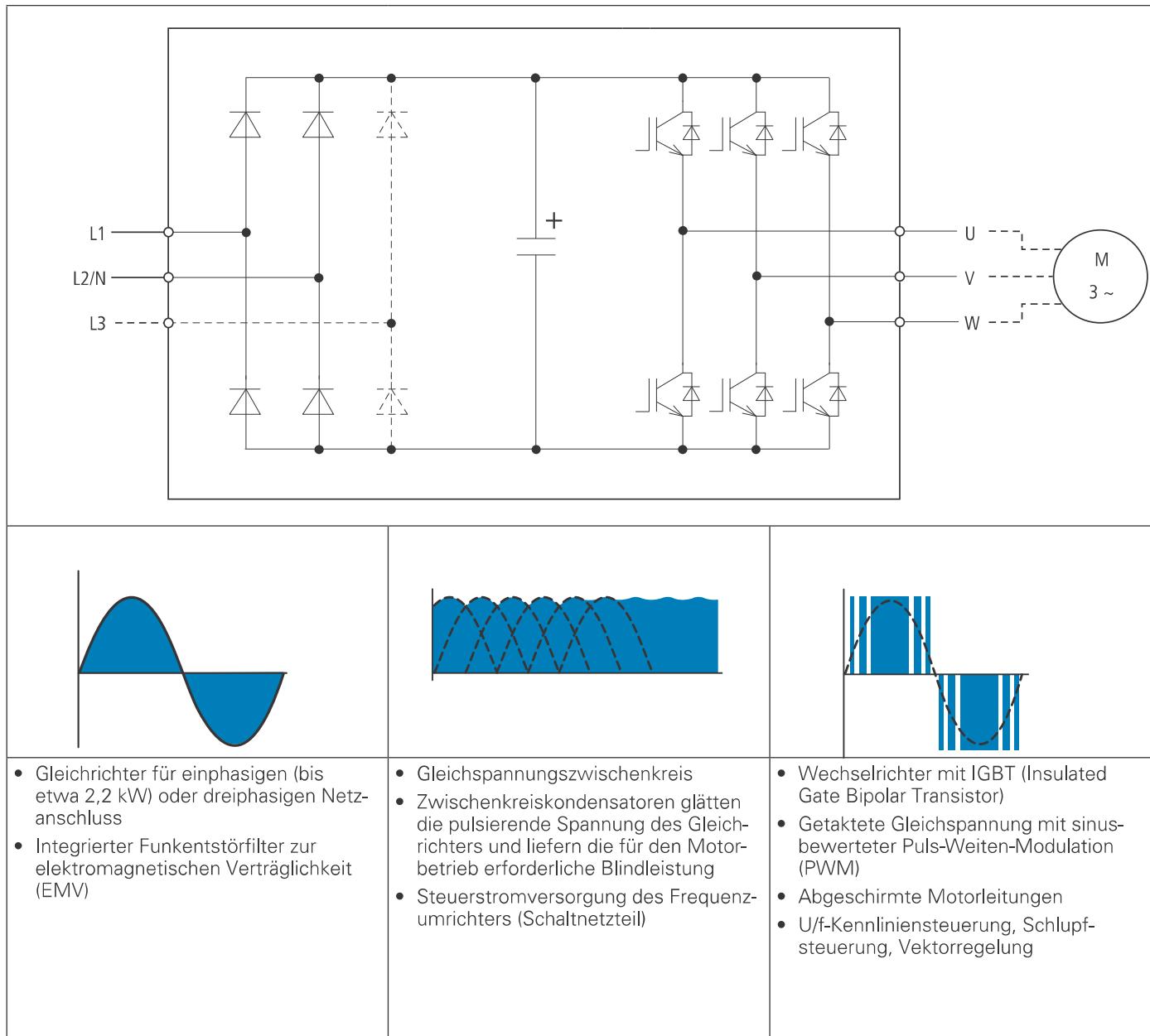


Abbildung 14: Hauptbestandteile des Frequenzumrichters