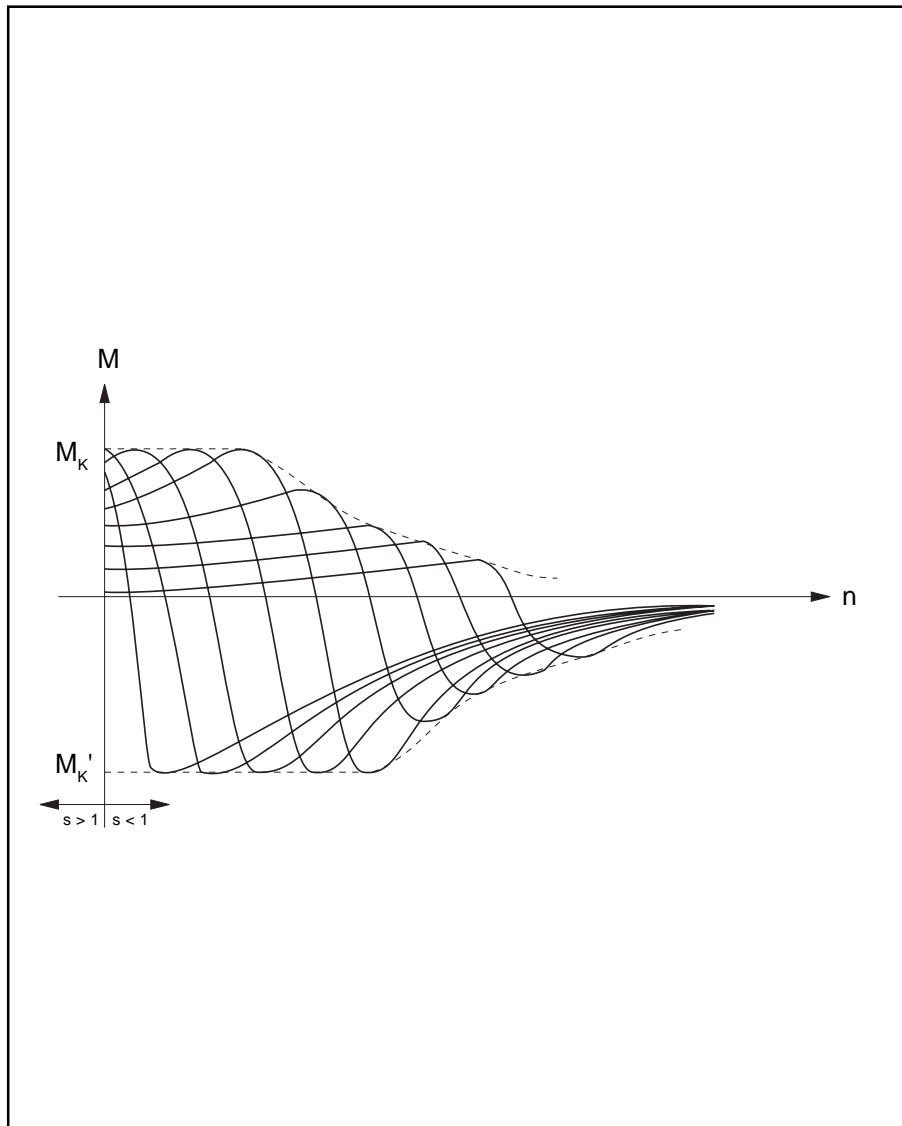


# DREHSTROMANTRIEBE

## GRUNDLAGEN





<b>1.</b>	<b>Bedeutung von Drehstromantrieben</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Der Drehstrom-Asynchronmotor (DASM)</b>	<b>5</b>
2.1	Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise	5
2.2	Bauformen	7
2.3	Erläuterungen zum Typenschild	8
<b>3.</b>	<b>Der DASM am Netz</b>	<b>10</b>
3.1	Einphasiges Ersatzschaltbild	10
3.2	Kennlinien des DASM	12
3.3	Motor- / Generatorbetrieb	14
3.4	Verhalten bei Spannungsabsenkung	15
3.5	Charakteristische Motordaten	16
<b>4.</b>	<b>Betriebsarten des Motors</b>	<b>17</b>
<b>5.</b>	<b>Weitere Motorentypen und ihre Eigenschaften</b>	<b>19</b>
5.1	Verschiebe-Anker-Bremsmotor	19
5.2	Bremsmotoren	20
5.3	Synchronmotor	21
5.4	Reluktanzmotor	21
5.5	Drehfeldmagnete	23

<b>6.</b>	<b>Der Frequenzumrichter (FU)</b>	<b>24</b>
6.1	Prinzipieller Aufbau	24
6.2	Drehspannungserzeugung mit Pulsweitenmodulation (PWM)	25
6.3	Eingangs- und Ausgangsgrößen	28
6.3.1	Eingangsspannung, Eingangsstrom	28
6.3.2	Zwischenkreisspannung	29
6.3.3	Ausgangsspannung, Ausgangsstrom	29
6.4	Messung von Strömen und Spannungen	31
6.5	Interne Schutzfunktionen / KEB-COMBIVERT	33
<b>7.</b>	<b>Zusammenspiel von Frequenzumrichter (FU) und Drehstromasynchronmotor (DASM)</b>	<b>36</b>
7.1	Prinzip der Drehzahlstellung	36
7.2	Motorkennlinien bei Umrichterbetrieb	37
7.3	Boost-Einstellung	44
7.4	Betrieb eines 230 V-Motors am 400 V-Umrichter / 87 Hz-Kennlinie	45
7.5	Verhalten im generatorischen Betrieb	50
7.5.1	Berechnung eines Bremswiderstandes	52
7.6	Lastkennlinien / "Abkippen" des Antriebes	57
7.7	Dynamische Vorgänge ( Beschleunigen / Verzögern)	61
7.8	Bedeutung der Schutzfunktionen ("Keep on running")	63

	SEITE
7.9 Gleichstrom - (DC-) Bremsung	69
7.10 Schalten am Ausgang / lange Motorzuleitung	71
7.11 Umrichterrückwirkungen	73
7.12 Spezielle Probleme	74
7.13 Gegenüberstellung Netzbetrieb / Umrichterbetrieb	78
<b>8. Betrieb von Reluktanzmotoren an Frequenzumrichtern</b>	<b>79</b>
<b>9. Typische Fehler beim Anschluß und bei der Parametrierung von Frequenzumrichtern</b>	<b>81</b>
<b>10. Die Umgebung des Frequenzumrichters</b>	<b>84</b>
10.1 Vernetzung von Frequenzumrichtern, serielle Schnittstellen	84

**KEB übernimmt keine Verantwortung für Fehler und  
"Mißverständnisse" im Zusammenhang mit Angaben in Katalogen,  
Handbüchern oder anderem gedruckten Material.**

## 1. Bedeutung von Drehstromantrieben

Seit jeher besteht in weiten Bereichen der Antriebstechnik die Forderung, Antriebe in ihrer Drehzahl zu verstellen, um damit Prozeßabläufe optimal steuern zu können. Wurde dieses früher praktisch ausschließlich auf mechanischem Wege, z.B. mit Hilfe von Verstellgetrieben, bewerkstelligt, so sind heute dank der großen Fortschritte in der Elektronik weit elegantere, universell einsetzbare Antriebskonzepte möglich geworden.

Nachdem zu Beginn dieser Entwicklung vornehmlich drehzahlverstellbare Gleichstromantriebe den Markt beherrschten, gewinnen heute mehr und mehr die Drehstromantriebe, bestehend aus Frequenzumrichter und Asynchronmotor, an Bedeutung. Die Gründe für diese Entwicklung sind folgende:

- Wartungsarmut und Robustheit der Asynchronmaschine,
- Betrieb auch in explosionsgefährdeter Umgebung möglich,
- hohes Leistungsgewicht des Asynchronmotors,
- Möglichkeit, höchste Drehzahlen zu fahren,
- günstiger Anschaffungspreis des Asynchronmotors,
- ständige Verbesserung der Umrichtertechnologie bei gleichzeitiger Senkung der Kosten.

Die Hauptanwendungsgebiete für Frequenzumrichter finden sich bei:

- Pumpen- und Lüfterantrieben, Verdichtern,
- Förder- und Transportanlagen,
- Textilmaschinen,
- Werkzeugmaschinen und Holzbearbeitungsmaschinen,
- Verpackungsmaschinen,
- Robotern und Handlingsystemen,
- Anlagen zur Bleich- oder Papierherstellung.

Der größte Anteil der Antriebe ist dabei im Leistungsbereich bis ca. 4 kW zu finden.

## 2. Der Drehstrom-Asynchronmotor (DASM)

Elektromotoren lassen sich prinzipiell in zwei Kategorien einteilen:

- in Gleichstrommotoren und
- in Wechselstrom- bzw. Drehstrommotoren.

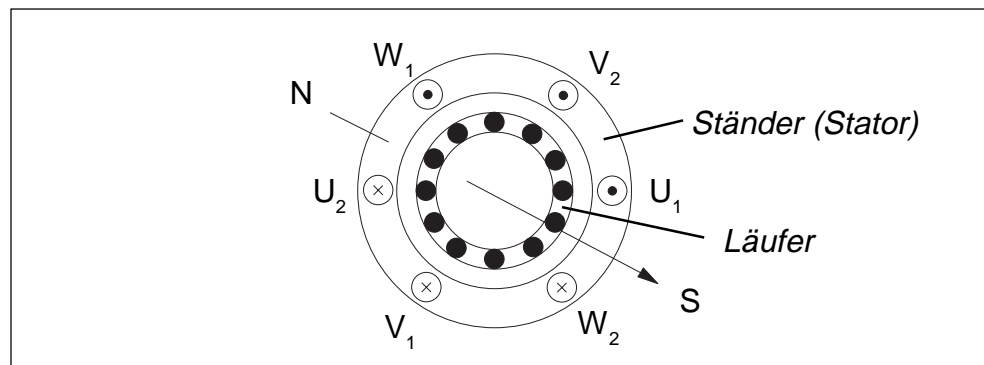
Unter letzteren hat besonders der Drehstromasynchronmotor mit Käfigläufer aufgrund seines robusten Aufbaus und günstigen Preises große Bedeutung erlangt und soll daher im folgenden ausführlicher beschrieben werden.

### 2.1 Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise

Der Ständer des DASM besteht aus einem Blechpaket, in das die Drehstromwicklung, bestehend aus den 3 Wicklungssträngen U, V und W, eingelegt ist. Die Wicklungsenden sind auf das Klemmbrett herausgeführt und können dort in Stern oder Dreieck verdrahtet werden.

Der Läufer besteht aus einem Blechpaket, in das über den Umfang mehrere Stäbe eingebettet sind, deren Enden über sogenannte Kurzschlußringe verbunden sind. (--> Abb. 1) (Käfigläufer)

Abb. 1  
Prinzipieller Aufbau des Käfigläufers



Durch die geometrische Anordnung der Ständerwicklungen entsteht bei Speisung des DASM mit einer Drehspannung ein Kreisdrehfeld, d.h. ein magnetisches Feld, das im Luftspalt umläuft und dabei im Läuferkäfig eine Spannung induziert. Diese Spannung ruft in den Läuferstäben wiederum einen Strom  $I_2$  hervor, der zusammen mit dem Ständerfluß  $\phi$  ein Drehmoment  $M_i$  erzeugt.

Gleichung 1

$$M_i \sim \phi \cdot I_2$$

Da der Ständerfluß  $\phi$  mit der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  umläuft, muß der Läufer versuchen, dieser Geschwindigkeit zu folgen. Dieses gelingt jedoch nur, wenn der Motor im Leerlauf, d.h. ohne Lastmoment läuft. Es stellt sich dann die folgende synchrone Drehzahl ein:

Gleichung 2

$$n_1 = \frac{f_1 [\text{Hz}]}{p} = \frac{60 \cdot f_1}{p} \cdot \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]$$

$n_1$ : synchrone (Leerlauf-) Drehzahl

$f_1$ : Frequenz der Speisespannung

$p$ : Polpaarzahl des Motors

Wird der Motor belastet, so kann der Läufer dem Ständerdrehfeld nicht mehr folgen; die induzierte Läuferspannung steigt an. Damit steigt auch der Läuferstrom so weit an, bis das Motormoment  $M_i$  dem Lastmoment das Gleichgewicht hält.

Die Differenz aus Läuferdrehzahl  $n$  und synchroner Drehzahl  $n_1$  wird als **Schlupfdrehzahl**  $n_s$  bezeichnet.

*Gleichung 3*  $n_s = n_1 - n$

Der Schlupf  $s$  ist das prozentuale Verhältnis der Schlupfdrehzahl zur synchronen Drehzahl.

*Gleichung 4*  $s = \frac{n_s}{n_1} = \frac{n_1 - n}{n_1}$

*Gleichung 5* Damit gilt gleichzeitig:  $n = n_1 \cdot (1-s)$

*Gleichung 6* Der Läuferstrom besitzt die Schlupffrequenz  $f_2 = s \cdot f_1$



## 2.2 Bauformen

Beim DASM unterscheidet man zwei Gattungen:

- Motoren mit Käfigläufer
- Motoren mit Schleifringläufer

Während die ersteren einen von außen nicht zugänglichen Läuferkäfig aus Kupfer- oder Aluminiumstäben besitzen, haben Schleifringläufermotoren auch im Läufer eine Drehstromwicklung, deren Enden auf Schleifringe an der Welle herausgeführt sind (daher der Name!). Werden diese Enden kurzgeschlossen, entspricht das Verhalten des Motors dem eines Käfigläufers. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, die Schleifringe über Widerstände miteinander zu verbinden und damit den Läuferwiderstand und somit die Motorkennlinien zu beeinflussen oder die im Läufer umgesetzte Energie ins Netz zurückzuspeisen (untersynchrone Stromrichterbrücke) und damit gleichzeitig die Drehzahl in gewissen Grenzen zu variieren. Trotz dieser Vorteile werden heute fast ausschließlich Käfigläufermotoren eingesetzt, da sie preisgünstiger und weniger verschleißbehaftet sind (keine Schleifringe). Die Drehzahlverstellung wird bei ihnen mit Frequenzumrichtern vorgenommen.

Eine besondere Untergruppe der Käfigläufermotoren sind die Trommelmotoren (Außenläufermotoren). Bei ihnen sind die Statorwicklungen starr auf der fest montierten Welle untergebracht, während der Läufer (das Gehäuse) außen sitzt und die Arbeitsmaschine direkt antreibt (z.B. ein Förderband).

Abb. 2  
Vergleich  
Schleifringläufer /  
Käfigläufer

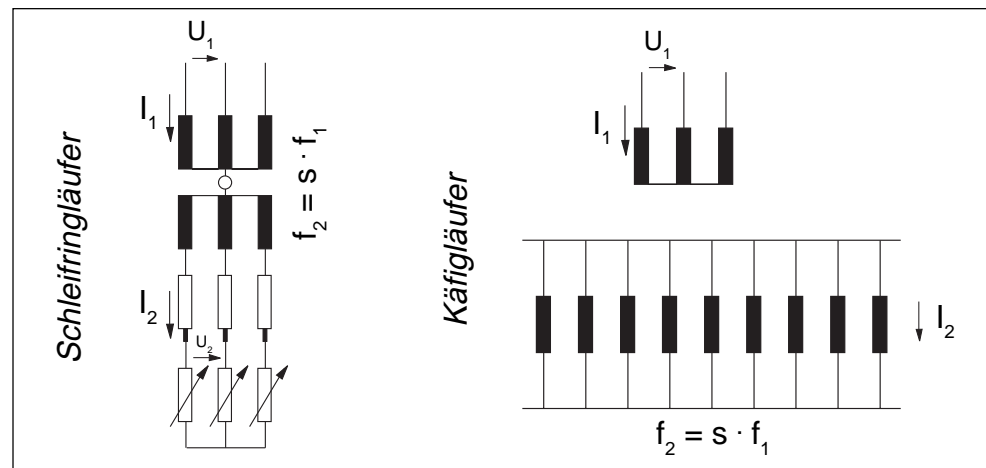
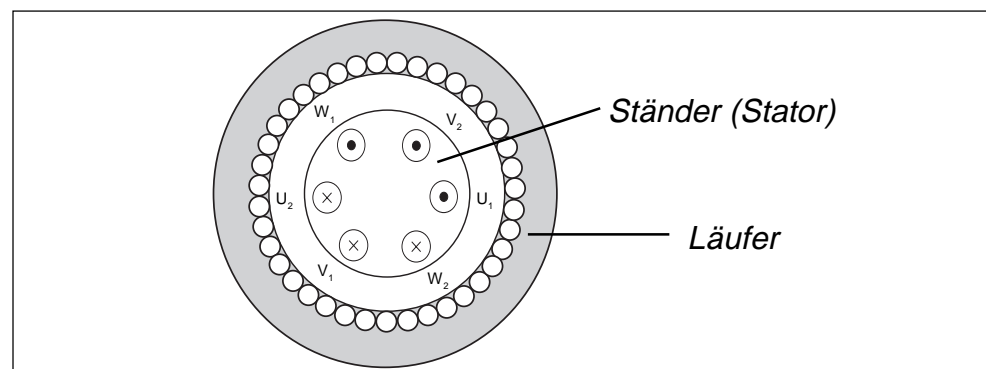


Abb. 3  
Trommelmotor



### 2.3 Erläuterungen zum Typenschild

Auf dem Typenschild des Motors finden sich nach VDE 0530 eine Reihe wichtiger Kenngrößen des Motors. Anhand eines Beispiels sollen diese Angaben nun erläutert werden.

Abb. 4  
Typenschild

**3 ~ Mot. 71**  
**1,10 / 1,95 A**      **1410 min<sup>-1</sup>**  
**Y/Δ 380/220 V**      **cosφ 0,75**  
**0,37 kW**  
**Is.Kl. B**    **IP 54**      **50 Hz**      **VDE 0530/84**

3 ~ Mot.71: Drehstrommotor, dessen Wellenmitte sich 71 mm über der Befestigungsplatte befindet.

1,10/1,95 A: Nennstrom bei Sternschaltung      1,1 A  
Nennstrom bei Dreieckschaltung      1,95 A

1410 min<sup>-1</sup>: Nenndrehzahl des Motors 1410 min<sup>-1</sup>

Y/Δ 380/220 V: Wicklung ist für eine Anschlußspannung von 380 V bei Sternschaltung bzw. 220 V bei Dreieckschaltung ausgelegt.

cosφ 0,75: Der Leistungsfaktor des Motors beträgt 0,75

$$\cos\varphi = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}} = \frac{P}{S}$$

0,37 kW: Der Motor ist für eine Nennleistung von 0,37 kW (Leistung an der Welle) ausgelegt.

Is.Kl. B: Der Kennbuchstabe gibt die zulässige Wicklungstemperatur im Dauerbetrieb an. Folgende Isolierstoffklassen sind definiert:

E	=	120 ° C	
B	=	130 ° C	(Standard)
F	=	155 ° C	
H	=	180 ° C	

IP 54: Mechanische Schutzart  
IP 54 = staub- u. spritzwassergeschütztes Gehäuse

50 Hz: Nennfrequenz des Motors (bei Betrieb am Netz)

VDE 0530/84: gibt an, daß der Motor den genannten VDE-Bestimmungen entspricht

Das Nennmoment des Motors läßt sich aus den Typenschildangaben leicht berechnen:

Gleichung 7

$$M_n \text{ [Nm]} = \frac{P_n \text{ [kW]} \cdot 9550}{n_n \text{ [min}^{-1}\text{]}} = \frac{0,37 \text{ kW} \cdot 9550}{1410 \text{ min}^{-1}} = 2,5 \text{ Nm}$$

Für die aufgenommene Scheinleistung gilt:

Gleichung 8

$$S = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 = \sqrt{3} \cdot 380 \text{ V} \cdot 1,1 \text{ A} = 724 \text{ W}$$

Die aufgenommene Wirkleistung beträgt dann:

Gleichung 9

$$P = S \cdot \cos\varphi = 724 \text{ W} \cdot 0,75 = 543 \text{ W}$$

und damit der Wirkungsgrad des Motors:

Gleichung 10

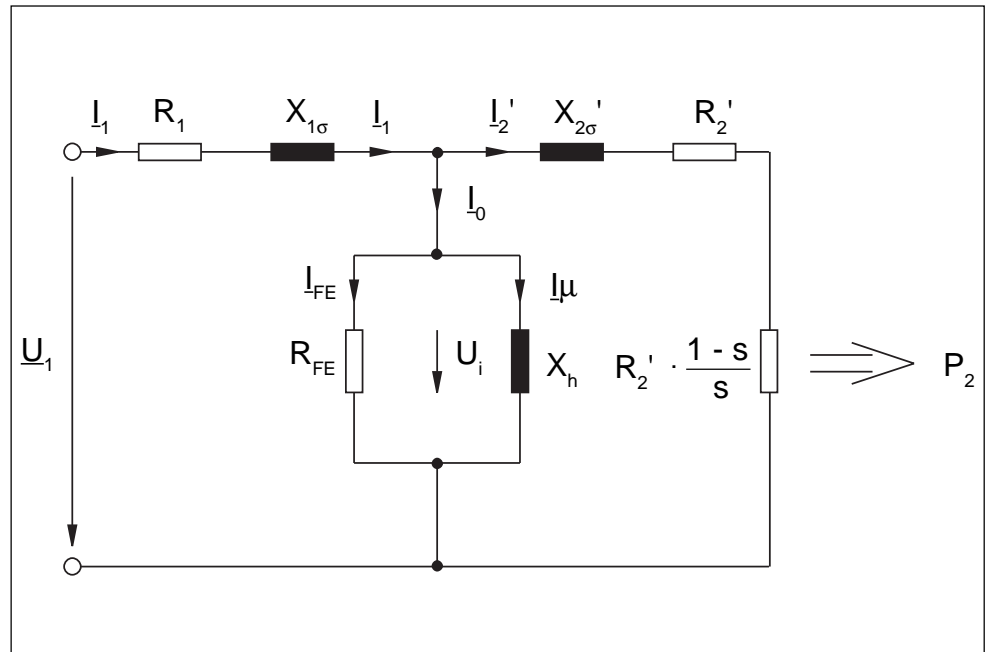
$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{370 \text{ W}}{543 \text{ W}} = 0,68 = 68 \%$$

### 3. Der DASM am Netz

#### 3.1 Einphasiges Ersatzschaltbild

Das elektrische Verhalten der DASM lässt sich aus dem einphasigen Ersatzschaltbild ableiten (--> Abb. 5).

Abb. 5



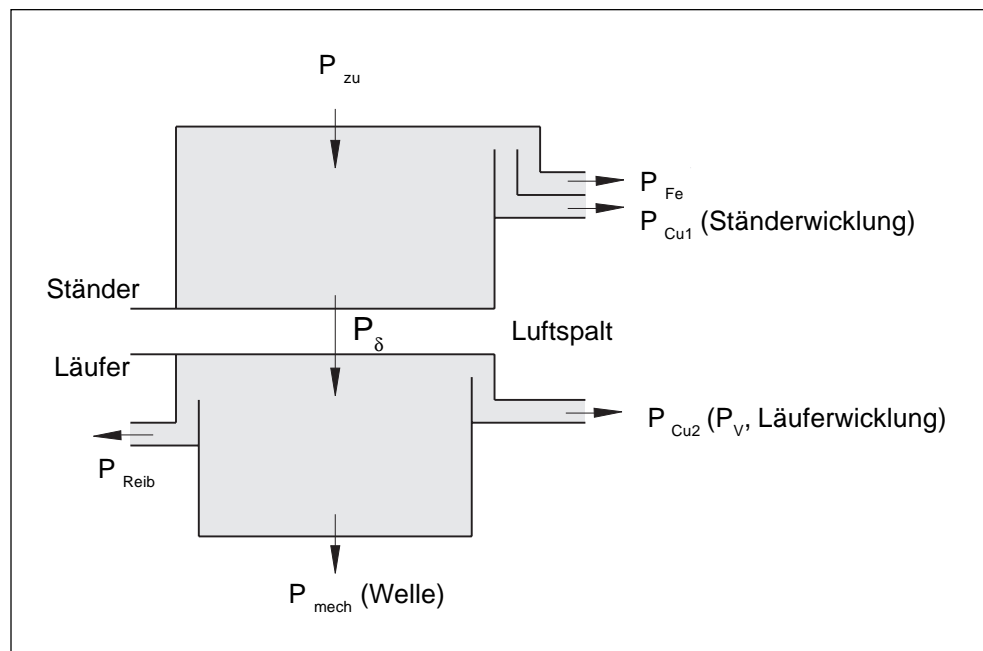
Dabei bedeuten:

- $R_1$  = Ohmscher Widerstand des Ständers
- $X_{\sigma 1}$  = Streublindwiderstand des Ständers
- $R_{Fe}$  = Eisenverluste
- $X_h$  = Blindwiderstand der Hauptinduktivität
- $X_{\sigma 2}'$  = Streublindwiderstand des Läufers
- $R_2'$  = Gedachter ohmscher Ersatzwiderstand für die Leistungsverluste des Rotors (Kupferverluste)
- $R_2' \cdot \frac{1-s}{s}$  = Gedachter ohmscher Ersatzwiderstand für die an der Welle abverlangte Leistung  $P_2$

Aus dem Ersatzschaltbild läßt sich auch das Leistungsflußdiagramm der Asynchronmaschine ableiten.

Ein Teil der zugeführten elektrischen Leistung wird im Ständerwiderstand  $R_1$  in Wärme umgewandelt ( $P_{Cu1}$ ), ein weiterer (geringerer) Teil geht in Form von Eisenverlusten ( $P_{Fe}$ ) an  $R_{Fe}$  verloren. Der verbleibende Teil der Leistung ( $P_\delta$ ) wird über den Luftspalt auf den Läufer übertragen. Dort fällt am Läuferwiderstand  $R_2'$  wieder eine Verlustleistung ( $P_{Cu2}$ ) ab. Die verbleibende Leistung steht nach Abzug der Reibungsverluste  $P_{Reib}$  (Lager, Lüfterverluste) als mechanische Leistung an der Welle zur Verfügung (--> Abb. 6).

Abb. 6  
Leistungsfluß-  
diagramm des  
Asynchronmotors



### 3.2 Kennlinien des DASM

Das innere Drehmoment  $M_i$  des DASM lässt sich mit folgender Formel berechnen:

Gleichung 11 
$$M_i = \frac{3}{2 \pi n_1} \cdot U_i^2 \cdot \frac{1}{X_{2\sigma}' \left( \frac{R_2'}{s \cdot X_{2\sigma}'} + s \cdot \frac{X_{2\sigma_1}'}{R_2'} \right)}$$

Gleichung 12 Es gilt somit der Zusammenhang:  $M_i \sim U_i^2$

Das maximal mögliche Moment des DASM wird als Kippmoment  $M_k$  bezeichnet. Auch hier gilt wieder:  $M_k \sim U_i^2$

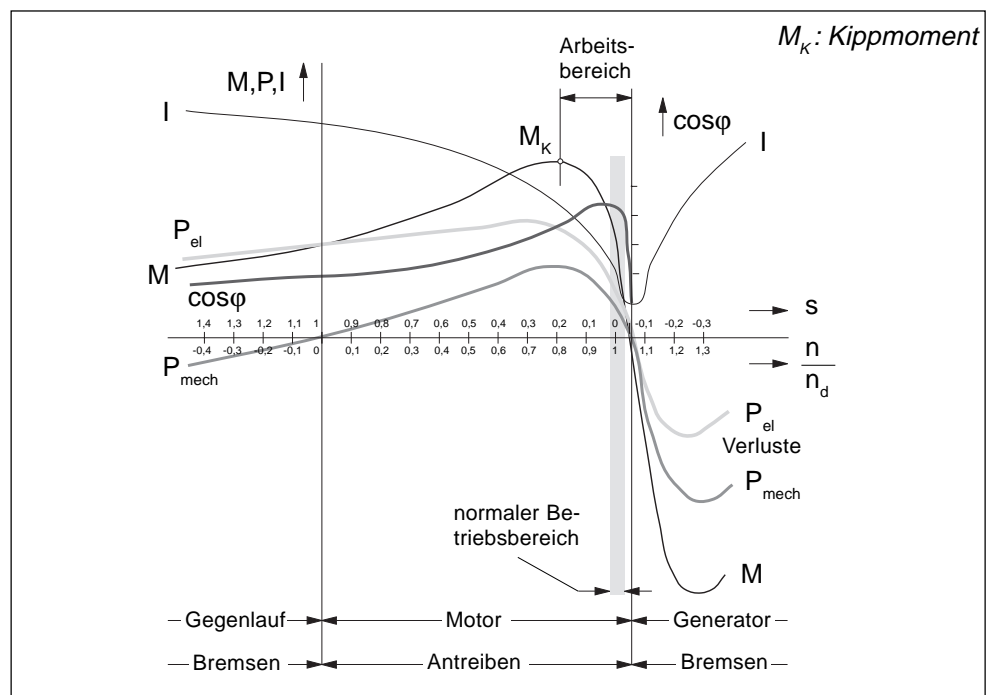
Durch die sog. Kloss'sche Formel wird der Zusammenhang zwischen Drehmoment und Kippmoment dargestellt:

Gleichung 14 
$$M = M_k \cdot \frac{2}{\frac{s_k}{s} + \frac{s}{s_k}} \quad (s_k : \text{Kippschlupf})$$

Aus dieser Formel resultiert die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie des Asynchronmotors (--> Abb. 7).

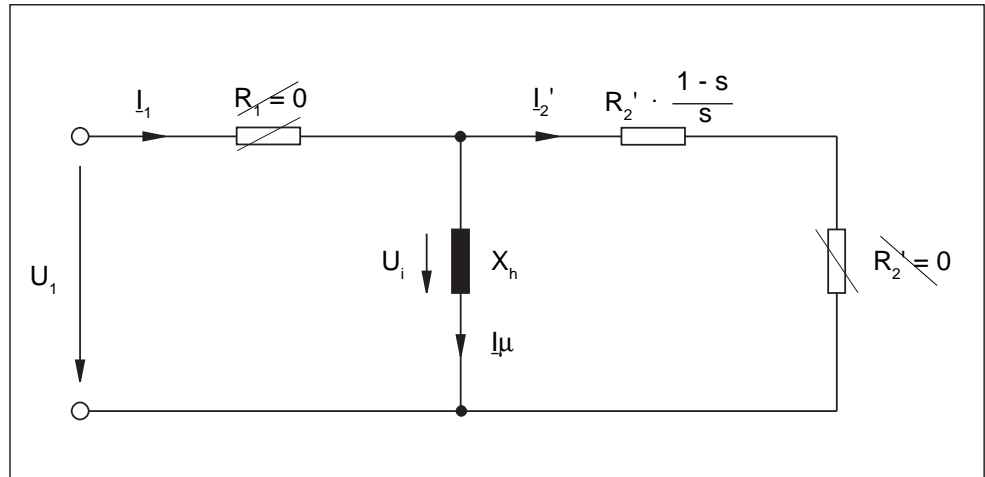
Aus Abb. 7 geht ebenfalls hervor, daß der Motorstrom mit steigendem Schlupf stetig zunimmt bis etwa zum 2,5 . . . 9fachen Nennstrom im Anlaufpunkt ( $s = 1$ ). Da der Motor auch im Leerlauf eine Magnetisierungsblindleistung benötigt, fließt in diesem Betriebspunkt ein Leerlaufstrom  $I_0 > 0$ .

Abb. 7  
Kennlinien des  
Drehstrom-  
Asynchronmotors



Vernachlässigt man im Ersatzschaltbild (Abb. 5) alle Streu- und Verlustwiderstände, was für grobe Betrachtungen insbesondere bei größeren Motorleistungen durchaus zulässig ist, so ergibt sich das folgende stark vereinfachte Ersatzschaltbild:

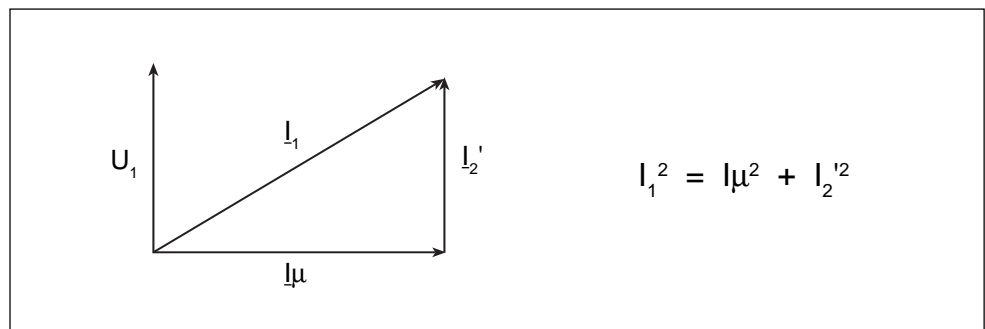
Abb. 8



Der Ständerstrom  $I_1$  teilt sich somit in den konstanten Magnetisierungsstrom  $I_\mu$  und einen schlupf- und damit lastabhängigen Läuferstrom  $I_2'$  auf. Da beide Ströme zueinander um  $90^\circ$  phasenverschoben sind, müssen sie geometrisch addiert werden (Abb. 9).

Abb. 9

Gleichung 15



Gleichung 16

Für kleine Schlupfwerte (schraffierter Bereich in Abb. 7)

gilt die Beziehung  $I_2' \sim s$ .

Gleichung 17

Mit  $M \sim \phi \cdot I_2'$  und  $\phi = \text{const.}$  folgt daraus:

$M \sim s$  (linearer Bereich der Kennlinie).

### 3.3 Motor- / Generatorbetrieb

Je nach Richtung des Lastmomentes wird der Asynchronmotor motorisch oder generatorisch belastet. Es gilt:

- Motorbetrieb: Drehmoment und Drehzahl haben gleiches Vorzeichen (wirken in die gleiche Richtung); der Motor nimmt Leistung aus dem Netz auf.  
 $0 < s < 1$                        $n < n_1$
  
- Generatorbetrieb: Drehmoment und Drehzahl haben unterschiedliche Vorzeichen (wirken in entgegengesetzte Richtungen); der Motor speist Leistung in das Netz ein.  
 $s < 0$                                $n > n_1$

Der Betriebsbereich  $s > 1$  wird als Gegenlauf-Bereich bezeichnet, da Drehfeld und Drehzahl unterschiedliche Richtungen haben. Eine Umkehrung der Drehrichtung erreicht man beim Asynchronmotor durch Vertauschen von 2 Phasen. Dabei versteht man unter Rechtslauf Drehung im Uhrzeigersinn, unter Linkslauf Drehung gegen den Uhrzeigersinn (jeweils von der Antriebsseite her betrachtet).

Die Betriebsbereiche des Motors lassen sich in den 4 Quadranten folgendermaßen darstellen:

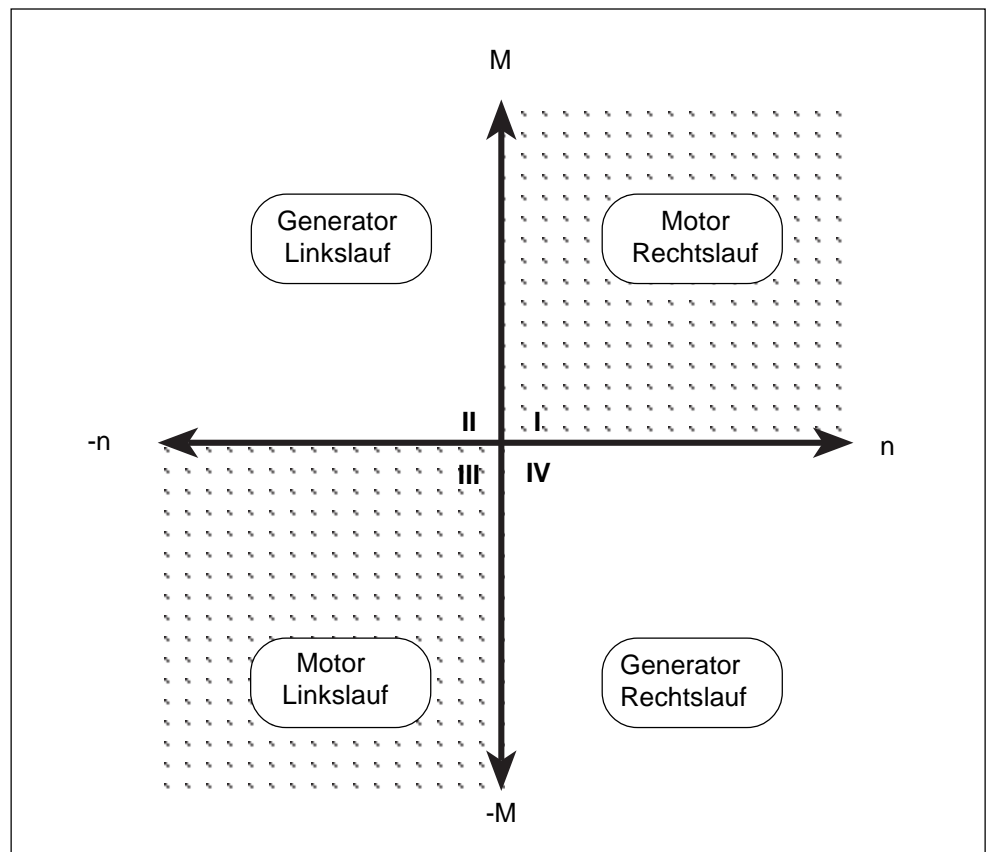


Abb. 10



### 3.4 Verhalten bei Spannungsabsenkung

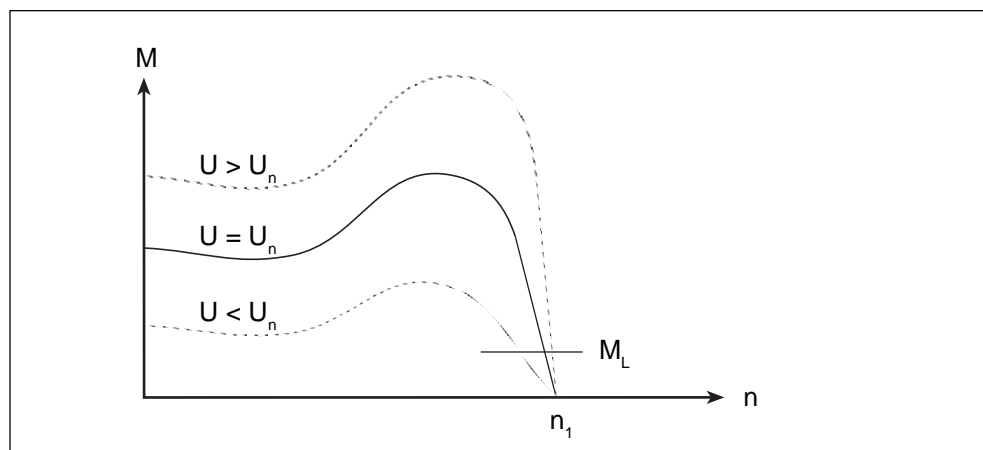
Nach Gl. 12 gilt  $M_i \sim U_i^2$ . Vernachlässigt man den ohmschen Ständerwiderstand  $R_1$ , so gilt  $U_i = U_1$ .

Eine Absenkung der Eingangsspannung hat einen verringerten Fluß (Feldschwächung) und einen verringerten Läuferstrom  $I_2'$  zur Folge und wirkt sich somit quadratisch auf das Drehmoment aus:  $M \sim \phi \cdot I_2'$ .

So hat z.B. eine Spannungsabsenkung um 10 % bereits einen Rückgang des Momentes um 19 % zur Folge.

An Abb. 11 erkennt man den Einfluß einer Spannungsabsenkung auf die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie des DASM.

Abb. 11



Anlaufmoment und Kippmoment gehen quadratisch mit der Spannung zurück, im Bereich zwischen Kippunkt und Leerlaufpunkt verläuft die Kennlinie flacher als bei voller Netzspannung.

Weiter wird aus Abb. 11 ersichtlich, daß bei konstantem Lastmoment der Schlupf des Motors mit abnehmender Spannung  $U$  zunimmt. Dies wird auch dadurch erklärlich, daß der für das Drehmoment verantwortliche Läuferstrom  $I_2'$  bei geringerer Speisespannung  $U$  nur über einen kleineren bezogenen Läuferwiderstand  $R_2'/s$  und damit einen größeren Schlupf  $s$  aufrechterhalten werden kann.

Genauso, wie eine Spannungsabsenkung einen flacheren Kennlinienverlauf der  $M$ - $n$ -Kennlinie zur Folge hat, erzeugt eine Spannungserhöhung eine steilere Kennlinie und damit einen reduzierten Schlupf bei konstantem Lastmoment. Dabei muß jedoch darauf geachtet werden, daß der Motor nicht übersättigt wird, da sich sonst eine Spannungserhöhung nur in Form zusätzlicher Eisenverluste (hoher Magnetisierungsstrom) auswirken würde. Die Auswirkungen der Spannungserhöhung werden später noch einmal beim Betrieb des Motors am Frequenzumrichter betrachtet (--> Boost, Generatorbetrieb).

### 3.5 Charakteristische Motor-daten

Folgende Tabelle soll einen groben Überblick über charakteristische Daten von 4poligen DASM unterschiedlicher Baugrößen geben:

Motor-daten	Motornennleistung			
	0,37 kW	1,5 kW	11 kW	75 kW
$s_n$	≈ 8 %	≈ 6 %	≈ 2,7 %	≈ 1,5 %
$n_n$	≈ 1380 min <sup>-1</sup>	≈ 1410 min <sup>-1</sup>	≈ 1460 min <sup>-1</sup>	≈ 1480 min <sup>-1</sup>
$M_n$	≈ 2,5 Nm	≈ 10,2 Nm	≈ 72 Nm	≈ 484 Nm
$\eta$	≈ 62 %	≈ 75 %	≈ 86 %	≈ 95 %
$\cos\varphi$	≈ 0,76	≈ 0,82	≈ 0,85	≈ 0,86
$R_1$	≈ 20 Ω	≈ 5 Ω	≈ 0,8 Ω	≈ 0,1 Ω

$$\frac{M_A}{M_n} \approx 1,5 \dots 3$$

$$\frac{M_k}{M_n} \approx 1,8 \dots 3,5$$

$$\frac{I_A}{I_n} \approx 2,5 \dots 9,0 \quad (\text{mit der Leistung steigend})$$

$s_n$ : Nennschlupf

$n_n$ : Nenndrehzahl

$M_n$ : Nennmoment

$\eta$ : Wirkungsgrad

$\cos\varphi$ : Leistungsfaktor

$R_1$ : ohmscher Ständerwiderstand

$M_A$ : Anlaufmoment

$M_k$ : Kippmoment

$I_A$ : Anlaufstrom (bei Netzbetrieb)

$I_n$ : Nennstrom

#### 4. Betriebsarten des Motors

Man unterscheidet beim Betrieb eines Motors vier Betriebsarten. Diese unterscheiden sich nach der Einschaltdauer (ED) und den Maschinenerwärmungs-Kennlinien.

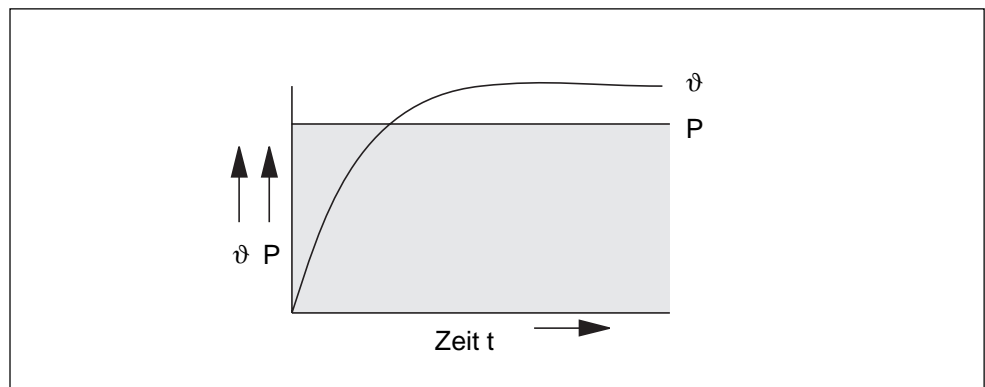
Die Einschaltdauer errechnet sich aus:

$$ED = \frac{\text{Belastungsdauer}}{\text{Belastungsdauer} + \text{Pause}} \cdot 100 \%$$

Es gibt den Dauerbetrieb (DB), Kurzzeitbetrieb (KB), Aussetzbetrieb (AB) und den Dauerbetrieb mit Aussetzbelastung (DAB).

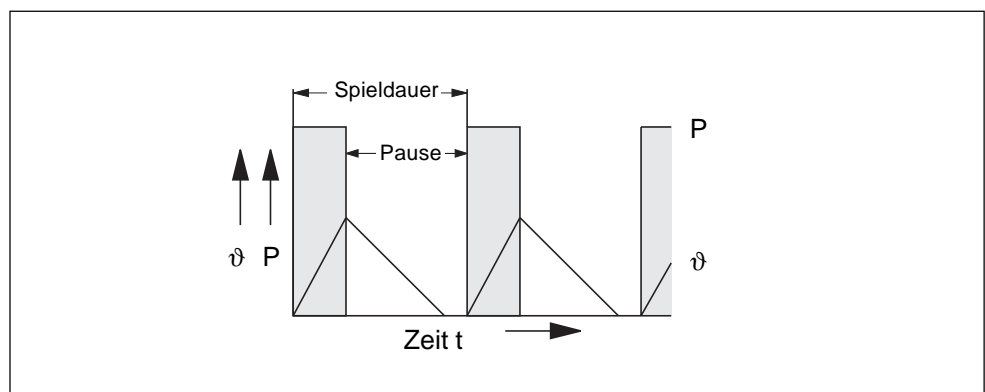
Bei Dauerbetrieb (DB) S1 ist die Betriebsdauer bei Nennleistung so lang, daß die Beharrungstemperatur erreicht wird. Dies ist bei normalen Motoren der Fall. Sie dürfen dauernd mit ihrem Nennmoment belastet werden.

Abb. 12a  
Dauerbetrieb  
(DB) S1



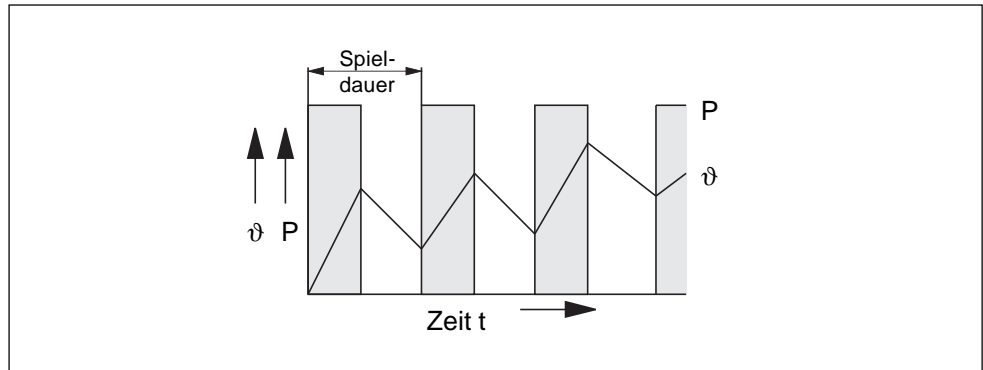
Bei Kurzzeitbetrieb (KB) S2 ist die Betriebsdauer so kurz, daß die Beharrungstemperatur nicht erreicht wird. In der anschließenden längeren Pause kühlt der Motor sich auf die Ausgangstemperatur ab.

Abb. 12b  
Kurzzeitbetrieb  
(KB) S2



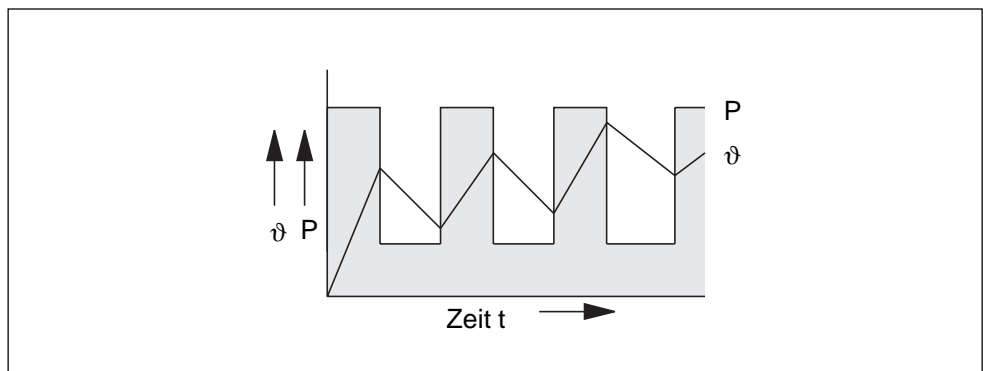
Bei Aussetzbetrieb (AB) S3 sind die Pausen so kurz, daß der Motor sich nicht auf die Raumtemperatur abkühlen kann.

Abb. 12c  
Aussetzbetrieb  
(AB) S3, S4, S5



Bei Durchlaufbetrieb mit Aussetzbelastung (DAB) S6 kann sich der Motor in den Leerlaufpausen ebenfalls nicht auf die Umgebungstemperatur abkühlen.

Abb. 12d  
Durchlaufbetrieb mit  
Aussetzbelastung  
(DAB) S6

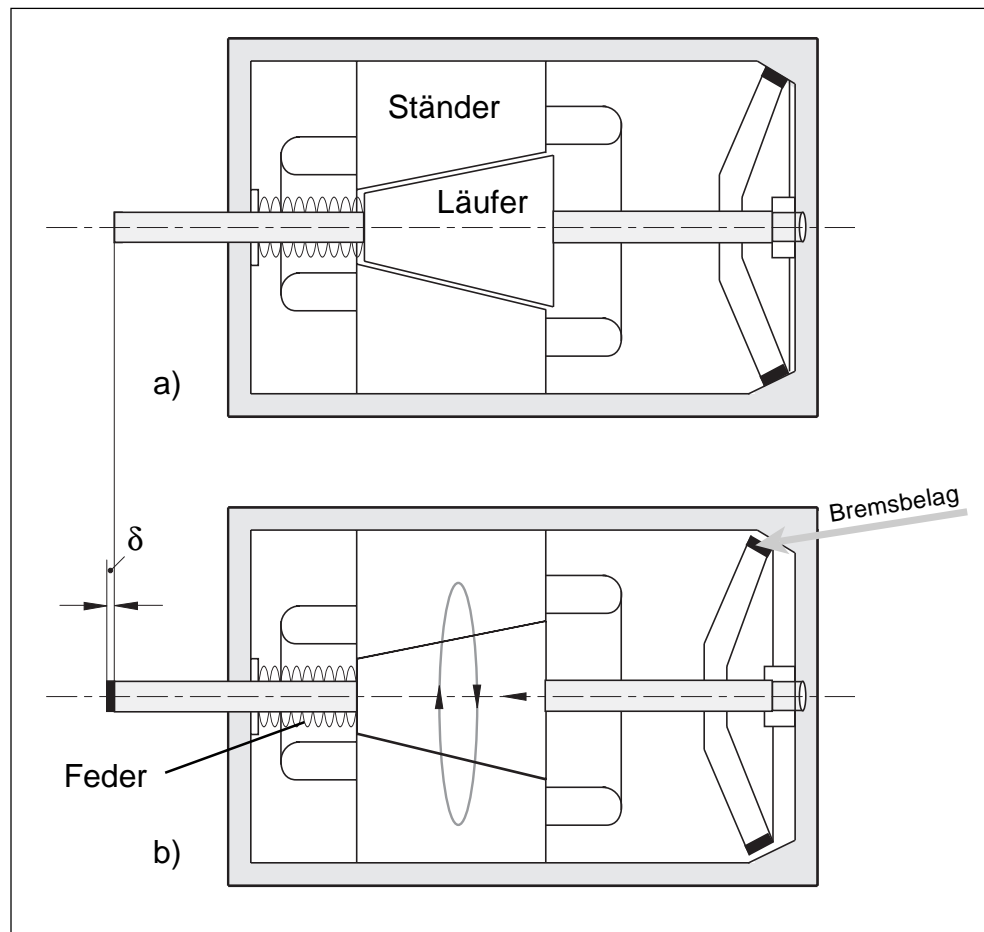


Motoren, die über Frequenzumrichter angesteuert werden, arbeiten bei Dauerbetrieb in der Betriebsart S1, im Aussetzbetrieb in der Betriebsart S3.

## 5. Weitere Motoren-typen und ihre Eigenschaften

### 5.1 Verschiebe-Anker-Bremsmotor

Abb. 13



Bei einem Verschiebe-Anker-Bremsmotor sind Ständer und Rotor konisch aufgebaut. Auf der einen Seite des Rotors befindet sich ein Bremsbelag, gegen die andere Seite drückt eine Feder.

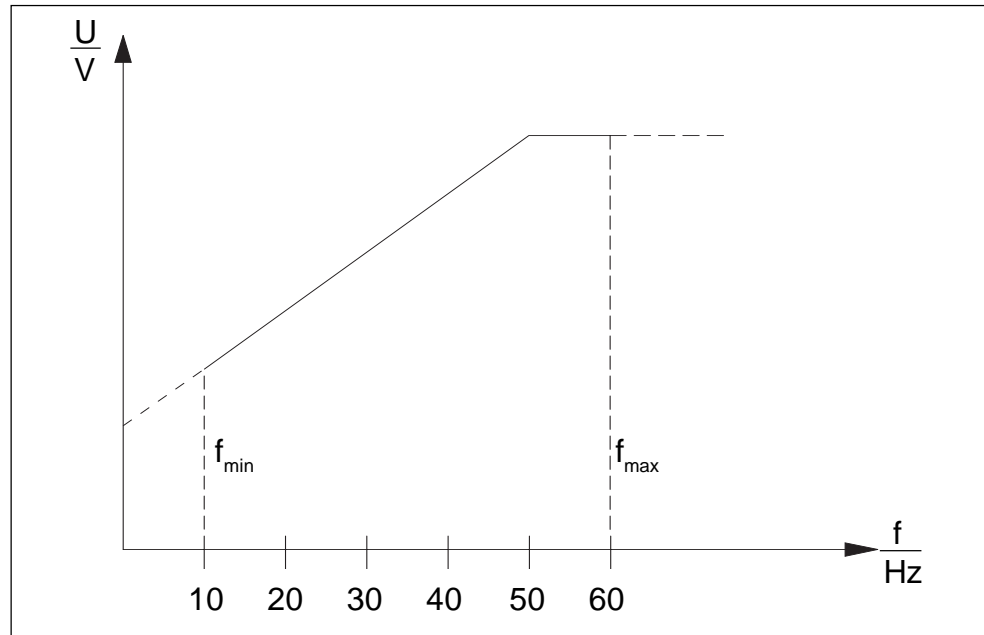
Ist der Motor spannungsfrei, so wird der Rotor durch die Feder gegen eine Bremsscheibe gedrückt und somit festgehalten.

Beim Einschalten des Motors wird durch das Magnetfeld des Ständers der Rotor aus seiner Ruhelage herausgezogen. Nun ist ein normaler Motorbetrieb möglich (geringer Luftspalt).

Um den Motor aus seiner Ruhelage zu bekommen, wird ein größerer Strom benötigt als beim Anlauf eines normalen Asynchronmotors. Dieses kann bei Frequenzumrichterbetrieb durch Einstellen von Boost erreicht werden. Der Frequenzumrichter muß für den Betrieb von Verschiebe-Anker-Bremsmotoren in der Regel um zwei Größen überdimensioniert werden.

Bei diesem Betrieb stößt man auf eine untere und obere Grenze im Frequenzbereich. Die untere Grenze liegt bei ca. 5 bis 10 Hz und wird dadurch begrenzt, daß der Anker wieder einfällt, da das Moment nicht mehr groß genug ist, um den Rotor gegen die Federkraft im gelüfteten Zustand zu halten bzw. der Strom überproportional ansteigt. Die obere Grenze liegt bei ca. 55 bis 65 Hz und wird durch die Feldschwächung und das Lastmoment bestimmt (Rotor fällt wieder ein) --> Abb. 14.

Abb. 14



**5.2 Bremsmotoren** Als Bremsmotoren werden Motoren mit einer Federdruckbremse ausgestattet. Sie haben folgende Aufgaben:

- Begrenzung des Nachlaufes nach dem Abschalten,
- Halten des Antriebes in einer definierten Position,
- Erhöhung der Schalzhäufigkeit des Motors.

Für die Ansteuerung bei Umrichterbetrieb gibt es zwei Möglichkeiten:

Zum einen kann die Bremse vom Umrichter bei abgeschalteter Modulation oder frequenzabhängig und bei Fehlermeldungen angesteuert werden. Zum anderen besteht die Möglichkeit, durch gleichzeitiges Schalten von Reglerfreigabe und Bremse den Motor zu stoppen.

Bremsmotoren finden auf den verschiedensten Gebieten Anwendung, z.B.

- als Stellantriebe und Vorschubantriebe,
- bei Werkzeugmaschinen,
- bei Kränen und Aufzügen,
- für Förderbänder.

### 5.3 Synchronmotor

Synchronmotoren haben konstante Betriebsdrehzahlen, die sich auch bei normalen Lastschwankungen nicht ändern. Sie arbeiten mit dem Schlupf  $s = 0 \%$ .

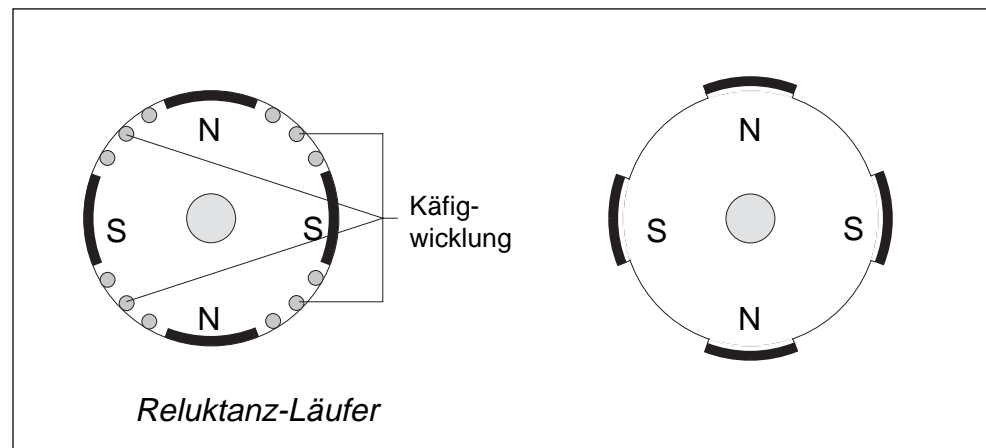
Synchronmotoren ziehen im nicht synchronen Betrieb ein Vielfaches des Nennstroms. Bei Überlast geraten sie außer Tritt.

Frequenzumrichter müssen für Synchronmotoren auf den Strom ausgelegt und entsprechend überdimensioniert werden.

Im allgemeinen werden Synchronmotoren jedoch nicht als Antriebsmotoren, sondern vielmehr als Stromerzeugungsaggregate verwendet, da sie deutlich teurer sind als Asynchronmotoren.

### 5.4 Reluktanzmotor

Abb. 15



Reluktanzmotoren sind selbstanlaufende, unerregte Synchronmotoren. Der mechanische Aufbau ist identisch mit normalen Drehstromasynchronmotoren. Der Läufer erhält jedoch  $2p$  Reluktanznuten und wird dadurch magnetisch unrund. --> Abb. 15

Wird ein solcher Läufer in ein Drehfeld mit ebenfalls  $2p$  Polen gebracht, so versucht er immer die Stellung des höchsten magnetischen Energiegehaltes einzunehmen, d.h. er läuft synchron mit.

Gute Betriebseigenschaften erhält man nur, wenn die Polzahlen von Ständer und Läufer übereinstimmen. Aus diesem Grunde ist es nicht möglich, polumschaltbare Reluktanzmotoren mit für beide Drehzahlen vertretbaren Betriebseigenschaften herzustellen.

Durch den ebenfalls vorhandenen Kurzschlußläuferkäfig läuft der Motor nach dem Einschalten asynchron bis nahe an die synchrone Drehzahl hoch. In diesem Betriebspunkt ist dem asynchronen Drehmoment ein Pendelmoment mit der verbleibenden Schlupffrequenz überlagert.

Ob der Motor synchronisiert ("in Tritt fällt"), hängt davon ab, ob das verbleibende Beschleunigungsmoment (= asynchrones Moment + positives Pendelmoment - Lastmoment) ausreicht, das gesamte Trägheitsmoment während der letzten (elektrischen) Umdrehung auf die synchrone Drehzahl zu beschleunigen. Hieraus folgt, daß die Angabe eines sog. "Intrittfallmomentes" allgemein nicht möglich ist.

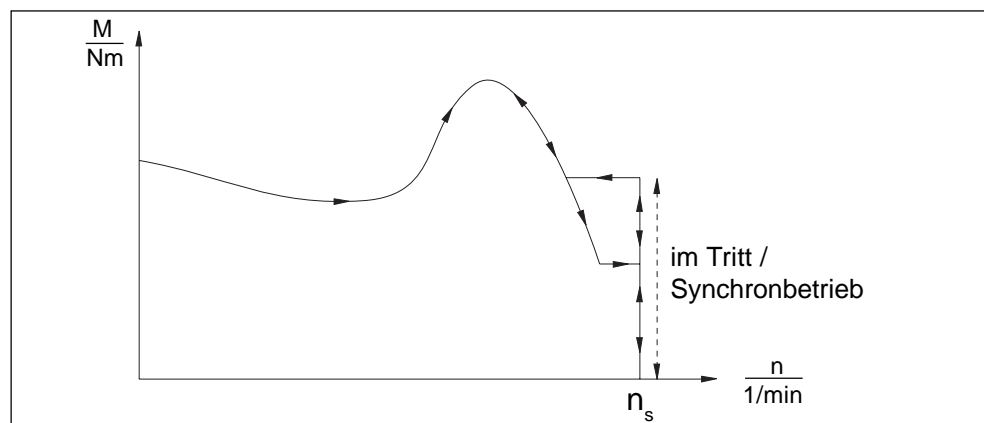
Im synchronen Betrieb gleicht der Motor einer Drehfeder, die unter Belastung gegen das Drehfeld verdreht wird. Wird hierbei das synchrone Kippmoment überschritten, fällt der Motor außer Tritt und läuft asynchron weiter. Dieser Betriebszustand führt bei längerer Dauer zur thermischen Zerstörung des Motors infolge erhöhter Stromaufnahme und ist daher zu vermeiden.

Da der Reluktanzmotor - wie auch jeder andere Synchronmotor - zusammen mit den externen Schwungmassen ein schwingfähiges Feder-Masse-System darstellt, können bei bestimmten Drehzahlen Eigenresonanzen auftreten. Besonders bei in größeren Drehzahlbereichen zu betreibenden Regelantrieben kann diese Tatsache Probleme bereiten und ist daher vor Serieneinsatz sorgfältig zu überprüfen.

Reluktanzmotoren sind wegen des einfachen Aufbaus im Vergleich zu Synchronmotoren besonders preiswert und robust. Dieser Vorteil wird allerdings erkauft durch einen schlechteren Wirkungsgrad und einen im allgemeinen wesentlich schlechteren Leistungsfaktor ( $\cos\phi = 0,3 \dots 0,7$ ) sowie ein größeres Volumen als bei normalen Asynchronmotoren.

Meist sind Reluktanzmotoren in Y-Schaltung 220 V verdrahtet. Es ist auf den Strom zu achten (z.B. 1,4 kW / 10,5 A). Der Frequenzumrichter für solch einen Motor muß unbedingt auf den Strom ausgelegt werden. Außerdem sollte man sich erkundigen, ob eine Umverdrahtung möglich ist. Anwendung findet der Motor überall dort, wo gleichlaufende Antriebe benötigt werden, z.B. Förderbänder, Textilmaschinen usw.

Abb. 16  
Drehzahl-  
Drehmoment-  
Kennlinie eines  
Reluktanzmotors



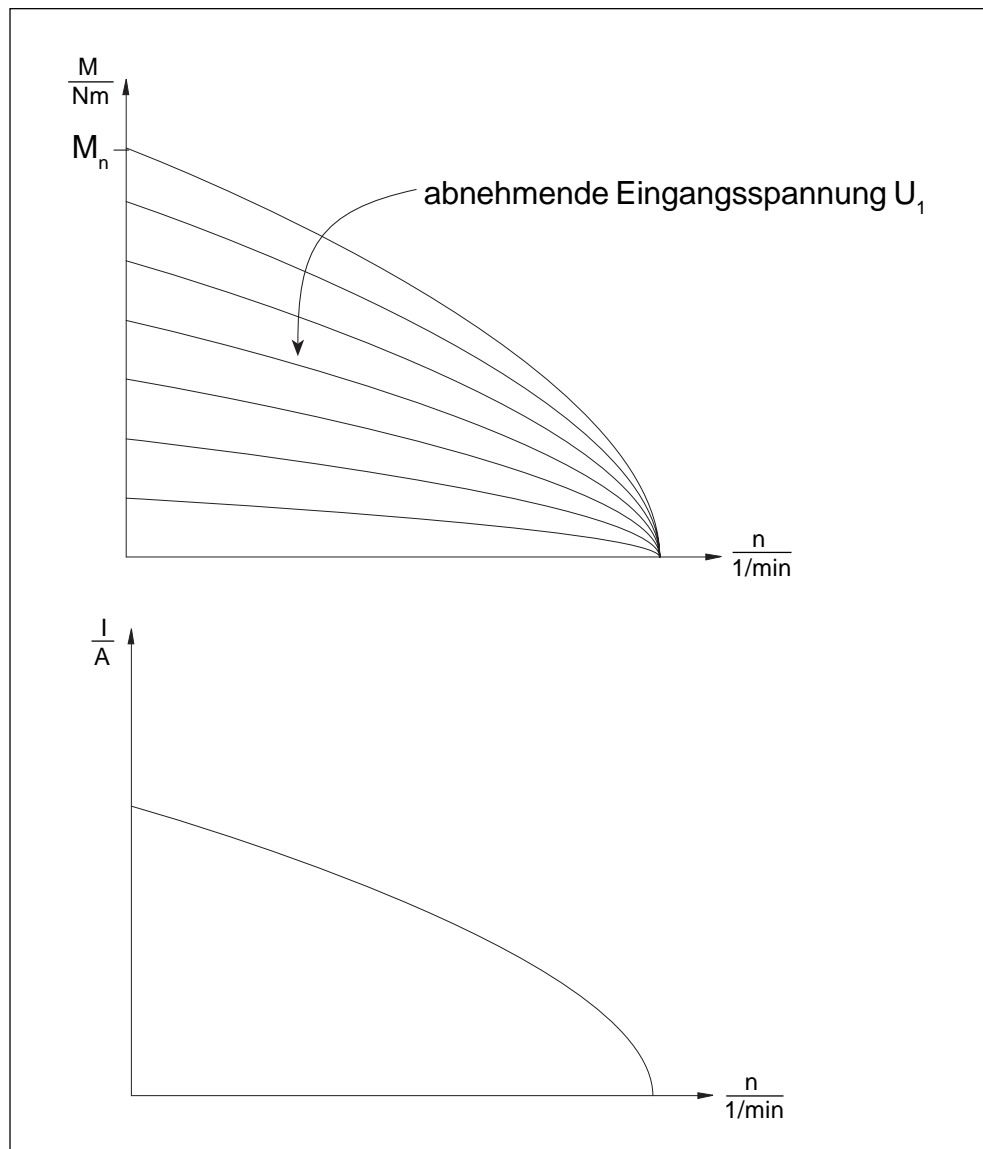


## 5.5 Drehfeld- magnete

Drehfeldmagnete sind Drehstrom-Asynchronmotoren mit besonderer Läuferform. Sie sind elektrisch so bemessen, daß sie bei Nennspannungen mit festgebremster Welle im Dauer- bzw. Aussetzbetrieb eingeschaltet bleiben können und dabei ihr größtes Drehmoment, das Stillstandmoment, entwickeln. Der Motornennstrom wird für den Stillstand angegeben. Diese Motoren werden meistens eingesetzt für:

- Stellantriebe,
- Unterstützungsantriebe,
- Wickelantriebe und
- Antriebe mit extremer Schalthäufigkeit am Netz.

Abb. 17  
 $M_n$  = Moment im  
Dauerbetrieb

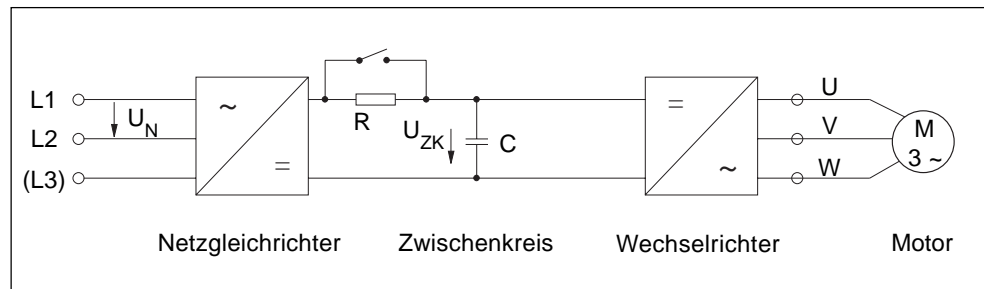


## 6. Der Frequenzumrichter (FU)

### 6.1 Prinzipieller Aufbau

In Abb. 18 ist der grundsätzliche Aufbau des Leistungsteils eines Frequenzumrichters mit Gleichspannungszwischenkreis (sog. „U - Umrichter“) dargestellt.

Abb. 18



Der Netzgleichrichter besteht aus einer ungesteuerten ein- oder dreiphasigen Brückenschaltung, wobei die einphasige Ausführung nur auf kleine Leistungen beschränkt ist. Seine Aufgabe ist es, die Wechselspannung des Netzes in eine Gleichspannung umzuwandeln, die durch den Zwischenkreiskondensator geglättet wird, so daß im Idealfall (Umrichter unbelastet) der Zwischenkreis auf eine Spannung von

Gleichung 18

$$U_{ZK} = \sqrt{2} \cdot U_N$$

aufgeladen ist.

Da beim Aufladen des Zwischenkreiskondensators kurzzeitig sehr hohe Ströme fließen, die zur Auslösung der Eingangssicherungen oder sogar zur Zerstörung des Netzgleichrichters führen würden, muß der Ladestrom auf ein zulässiges Maß begrenzt werden. Man erreicht dies durch den Einschaltstrom-Begrenzungswiderstand R in Reihe zum Kondensator, der nach erfolgter Aufladung des Kondensators z. B. durch ein Relais überbrückt wird und somit nur beim Einschalten des Umrichters aktiv ist.

Da zur Glättung der Zwischenkreisspannung eine große Kapazität erforderlich ist, führt der Kondensator nach der Trennung des Umrichters vom Netz noch für einige Zeit eine hohe Spannung, was durch eine sog. Charge-LED angezeigt wird.

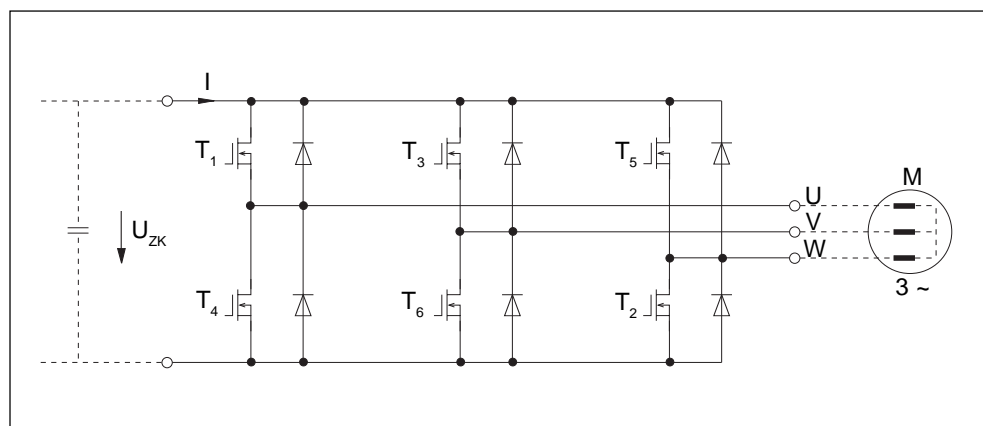
Die eigentliche Aufgabe des Frequenzumrichters, eine nach Frequenz und Amplitude variable Ausgangsspannung zur Steuerung eines Drehstrommotors zu erzeugen, übernimmt der Wechselrichter. Wie das geschieht, wird im folgenden Kapitel beschrieben.

## 6.2 Drehspannungserzeugung mit Pulsweitenmodulation (PWM)

Im Wechselrichter des Frequenzumrichters werden Transistoren eingesetzt, die im reinen Schaltbetrieb arbeiten. Während noch zu Beginn der 90er Jahre die Bipolartransistoren mit relativ kleinen Schaltfrequenzen bis 2 kHz dominierten, kommen heute fast ausschließlich die verlustärmeren Feldeffekttransistoren sowie IGBT's, eine Synthese aus beiden Typen, zum Einsatz. Diese Transistortypen ermöglichen Schaltfrequenzen bis 16 kHz und damit extrem geräuscharme Antriebe.

Die Schaltung des Wechselrichters ist in Abb. 19 dargestellt.

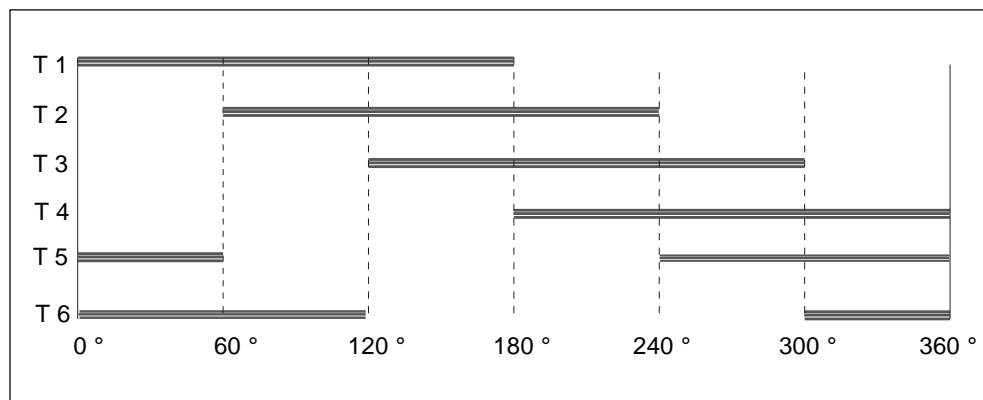
Abb. 19



Wie an Abb. 19 zu erkennen ist, kann nur dann ein Stromfluß durch die Motorwicklung zustande kommen, wenn mindestens einer der 3 Transistoren T1, T3 und T5 sowie zusätzlich einer der 3 Transistoren T4, T6 und T2 durchgeschaltet ist.

In der Praxis werden immer 3 Transistoren gleichzeitig angesteuert. Das Schema der Ansteuerung ist in Abb. 20 zu erkennen.

Abb. 20  
Zündfolge der Wechselrichterzweige (1 Zyklus)



Da beim Abschalten eines Transistors der Strom aufgrund der Motorinduktivität nicht schlagartig zu Null werden kann, sind antiparallele Dioden erforderlich, auf die der Strom im Schalt Augenblick kommutieren kann (vgl. Abb. 22).

Durch das zyklische Schalten der Wechselrichterzweige wechselt der Strom in den 3 Ausgangsphasen um  $120^\circ$  versetzt ständig seine Richtung, so daß ein symmetrisches Drehstromsystem entsteht, dessen Frequenz von der Zyklusdauer der Wechselrichterzündfolge (--> Abb. 20) abhängt und dessen Amplitude durch das Verhältnis von Einschalt- zu Ausschalt- dauer der Transistoren bestimmt wird.

Dieses Tastverhältnis ist bei der sinusbewerteten Pulsweitenmodulation zu Beginn und Ende einer Halbwelle klein, in der Mitte dagegen groß, so daß die Sinusform möglichst Oberschwingungsarm angenähert wird (--> Abb. 21).

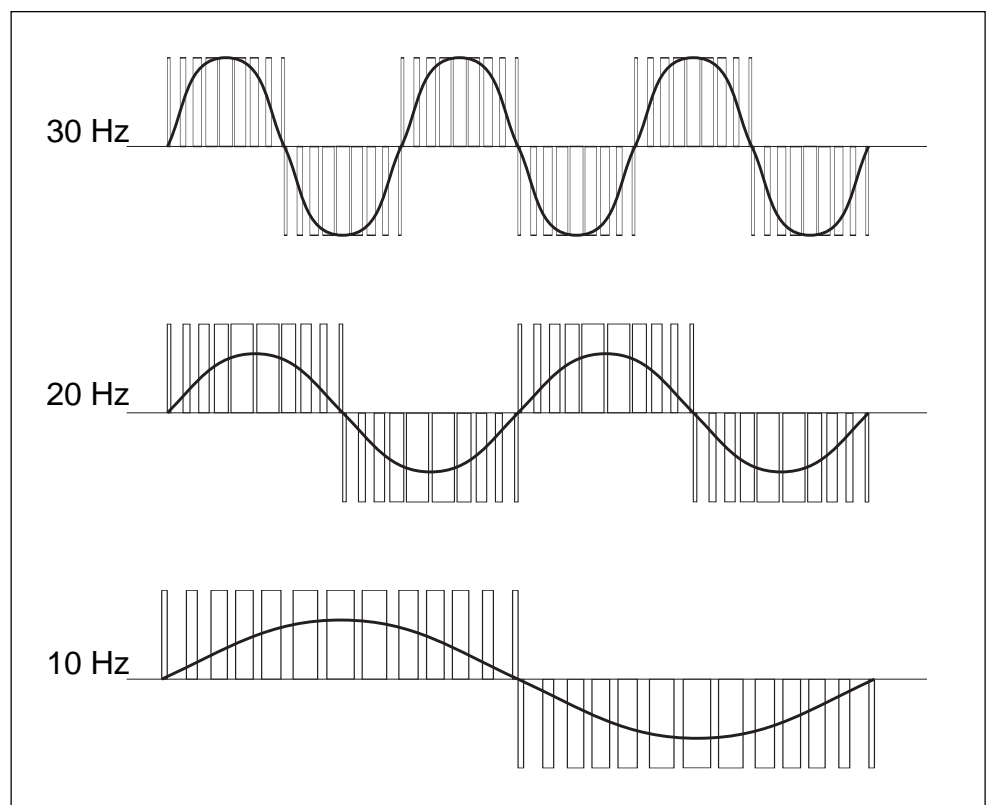


Abb. 21  
Ausgangsspannung  
des U-Umrichters  
(Pulsumrichter),  
prinzipielle Darstel-  
lung mit eingezeich-  
neter Grund-  
schwingung

Die vollständigen Strom- und Spannungsverläufe in der Wechselrichterphase U veranschaulicht Abb. 22.

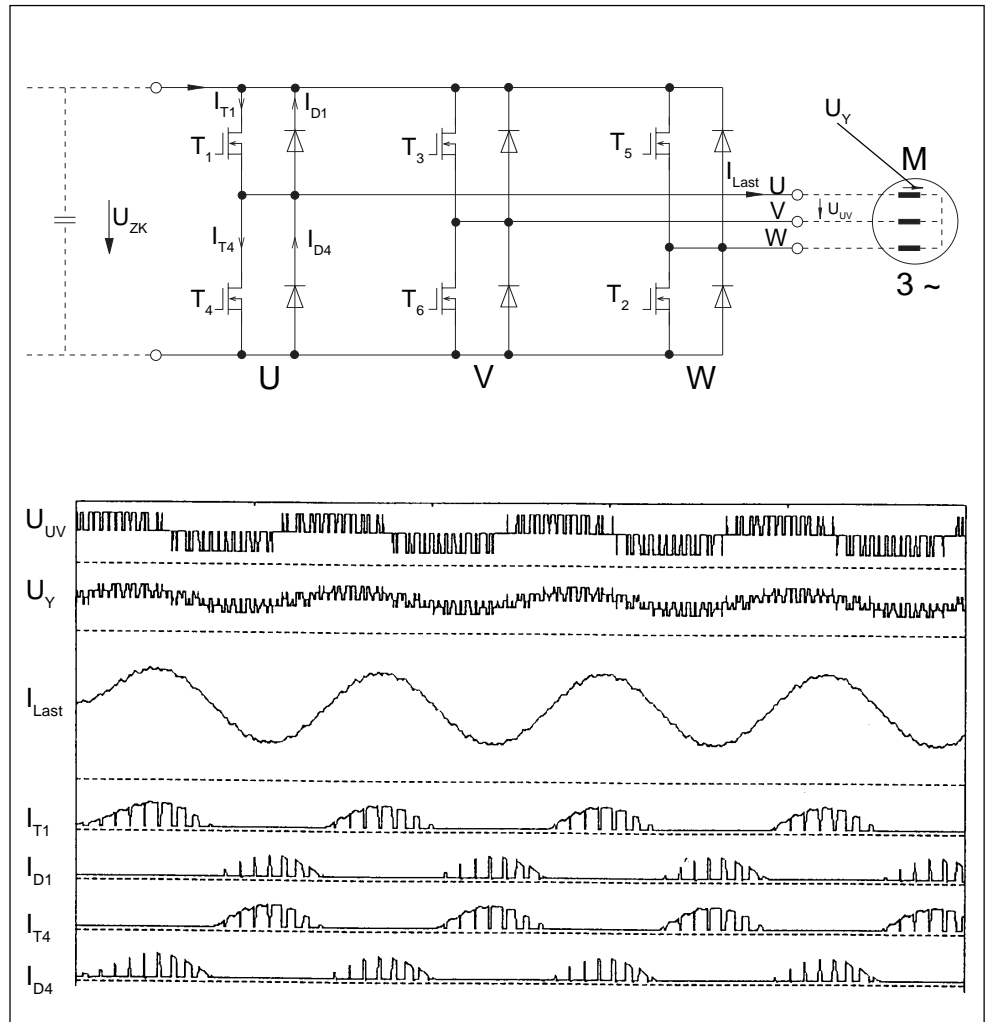


Abb. 22

Je höher die Taktfrequenz ist, d.h. die Frequenz, mit der die Transistoren während einer Halbwelle ein- und ausgeschaltet werden, umso genauer kann der Strom der Sinusform angenähert werden und umso geringer werden die zusätzlichen Verluste im Motor.

Gleichzeitig verschieben sich die Oberschwingungen zu höheren Frequenzen, die bei Taktfrequenzen ab etwa 16 kHz außerhalb des menschlichen Hörbereiches liegen.

## 6.3 Eingangs- und Ausgangsgrößen

### 6.3.1 Eingangsspannung, Eingangsstrom

Da die Strom- und Spannungsverläufe jedes Frequenzumrichters mehr oder weniger stark von der idealen Sinusform abweichen, sollen sie im folgenden genauer beschrieben werden.

Die Eingangsspannung ist diejenige Umrichtergröße, die der idealen Sinusform am nächsten kommt. Abweichungen treten nur auf, wenn bei zu großen Netzimpedanzen oder Zuleitungswiderständen durch die Nachladeströme des Zwischenkreiskondensators im Bereich des Scheitelwertes nennenswerte Spannungsabfälle im Netz bzw. in den Zuleitungen auftreten (Abb. 23).

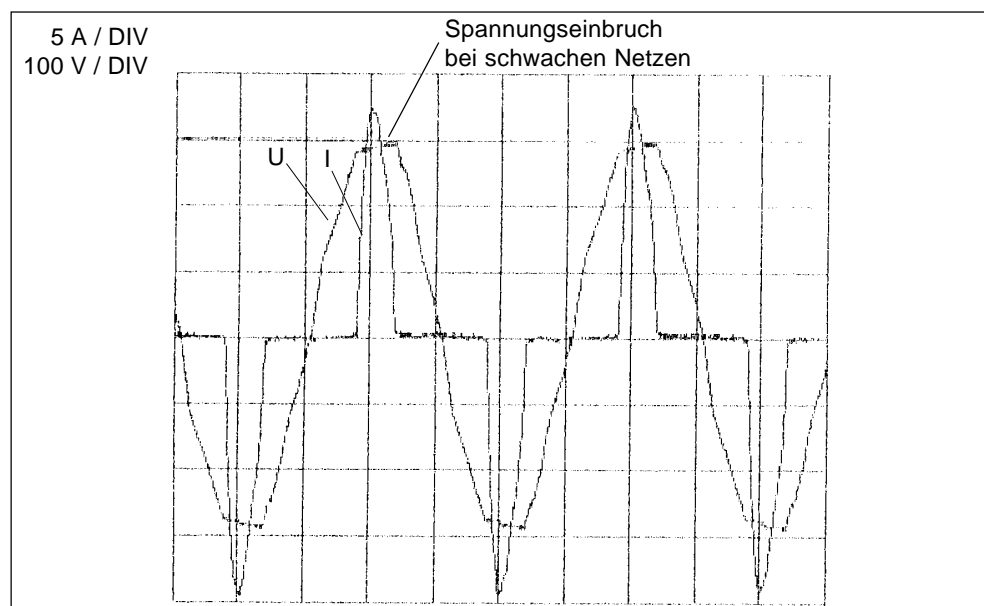


Abb. 23  
Eingangsgrößen  
des Umrichters bei  
1phasigem Anschluß

Der Eingangsstrom besteht aus Stromspitzen, die immer genau dann auftreten, wenn der Zwischenkreiskondensator über den Eingangsgleichrichter nachgeladen wird. Dieser Nachladevorgang setzt ein, wenn die Zwischenkreisspannung  $U_{ZK}$  auf den Betrag der augenblicklichen Netzspannung  $U_N$  zurückgegangen ist und die Gleichrichterbrücke damit vom sperrenden in den leitenden Zustand übergeht.

Der Spitzenwert des Stromes  $I_1$  liegt etwa um den Scheitelfaktor 3 ... 5 über dem Effektivwert, was insbesondere auch bei der Dimensionierung des Zuleitungsquerschnittes und der Sicherungen zu beachten ist.

Die Amplitude der Stromspitzen nimmt mit der Auslastung des Umrichters zu, da der Gleichrichter während der Nachladephase neben dem Ladestrom für den Zwischenkreiskondensator auch den Ausgangsstrom des Umrichters bereitstellen muß.

Die in Abb. 23 dargestellten Strom- und Spannungsverläufe sind nicht nur bei Frequenzumrichtern, sondern grundsätzlich bei allen Geräten mit ungesteuerten Netzgleichrichtern (z.B. bei Geräten der Unterhaltungselektronik) anzutreffen. Der Netzleistungsfaktor  $\cos\varphi$  ist kapazitiv und annähernd 1, allerdings muß das Netz eine nicht unerhebliche Verzerrungsblindleistung zur Verfügung stellen, die bei höheren Leistungen durch Netzdrosseln reduziert werden muß.

### 6.3.2 Zwischenkreisspannung

Der netzseitige Gleichrichter stellt dem Zwischenkreis eine ungeglättete Gleichspannung mit folgendem Verlauf zur Verfügung:

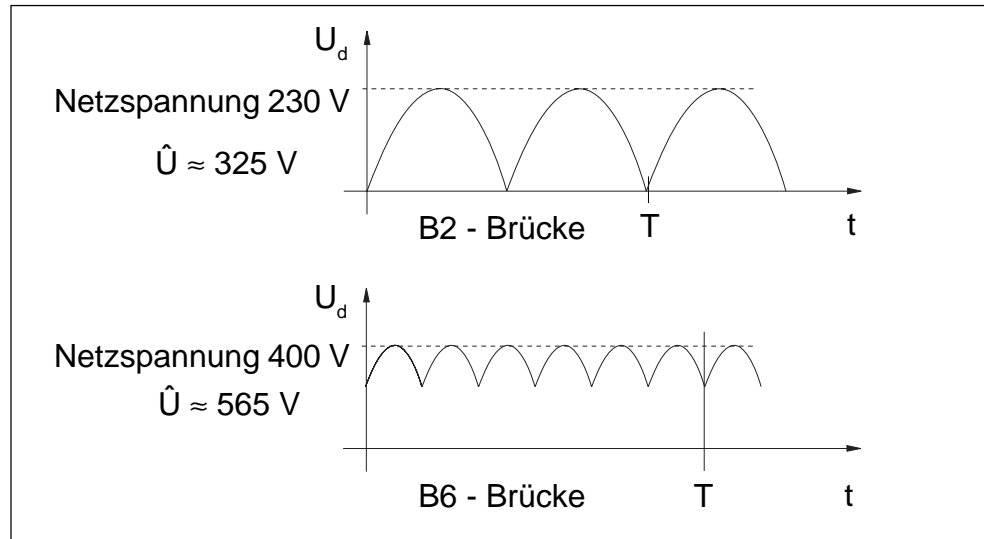


Abb. 24

Wie aus dem Verlauf der Spannungen  $U_d$  zu erkennen ist, ist zur Glättung der Ausgangsspannung der B2-Brücke eine größere Kapazität erforderlich als bei der B6-Brücke. Da der Scheitelwert geringer ist als die max. Spannungsfestigkeit der Kondensatoren (meist 400 V), brauchen jedoch keine Glättungskondensatoren in Reihe geschaltet zu werden, wie dies bei der B6-Brückenschaltung erforderlich ist.

Die Zwischenkreiskapazität ist mitentscheidend für die Stabilität der Ausgangsspannung sowie für den Oberschwingungsgehalt des Ausgangsstromes und damit den Rundlauf des Motors. Bei großen Zwischenkreiskapazitäten nimmt allerdings auch der Scheitelfaktor des Eingangsstromes deutlich zu, weshalb ein geeigneter Kompromiß bei der Dimensionierung des Zwischenkreises angestrebt werden muß.

### 6.3.3 Ausgangsspannung, Ausgangsstrom

Die Ausgangsspannung wird im Wechselrichter des Frequenzumrichters durch "Zerhacken", d.h. zyklisches Ein- und Ausschalten der Zwischenkreisspannung gebildet (--> Abb. 21). Somit besteht die Ausgangsspannung prinzipiell aus rechteckförmigen Spannungsböcken, deren Scheitelwert immer gleich der Zwischenkreisspannung ist. Unterzieht man die Ausgangsspannung einer Fourieranalyse, so erhält man neben der Grundschwingung mit der eingestellten Frequenz noch eine Vielzahl von Oberschwingungen, die jedoch in Abhängigkeit von der Lastinduktivität mehr oder weniger stark gedämpft werden.

Der Stromverlauf läßt sich aus dem Verlauf der Ausgangsspannung durch Integration gewinnen.

Gleichung 19

$$u = L \cdot \frac{di}{dt} \implies i = \frac{1}{L} \cdot \int u \, dt$$

Somit setzt sich der Ausgangsstrom bei rein induktiver Last aus Geradenabschnitten zusammen. Bei ohmsch-induktiver Last, wie sie z.B. ein Asynchronmotor darstellt, besteht der Ausgangsstrom aus Abschnitten von Exponentialfunktionen. Die Sinusform wird umso besser angenähert, je höher die Taktfrequenz des Wechselrichters und je größer die Lastinduktivität ist.

Durch Einsatz von Motordrosseln läßt sich - insbesondere bei Mittelfrequenzmotoren (kleine Induktivität) - die Stromwelligkeit reduzieren und die Flankensteilheit der Spannungsblöcke reduzieren. Dabei muß jedoch der Spannungsabfall über der Motordrossel beachtet werden.

Abb. 25  
Ausgangsstrom-  
verläufe

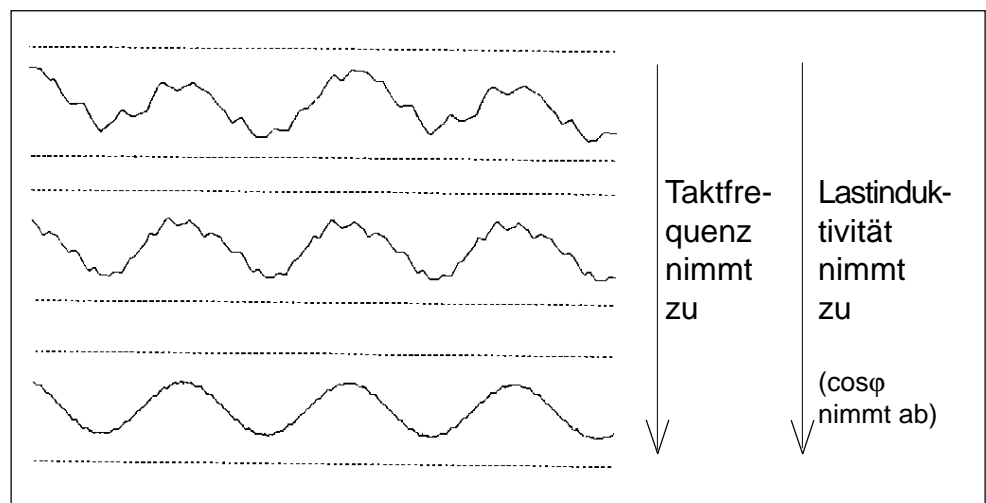
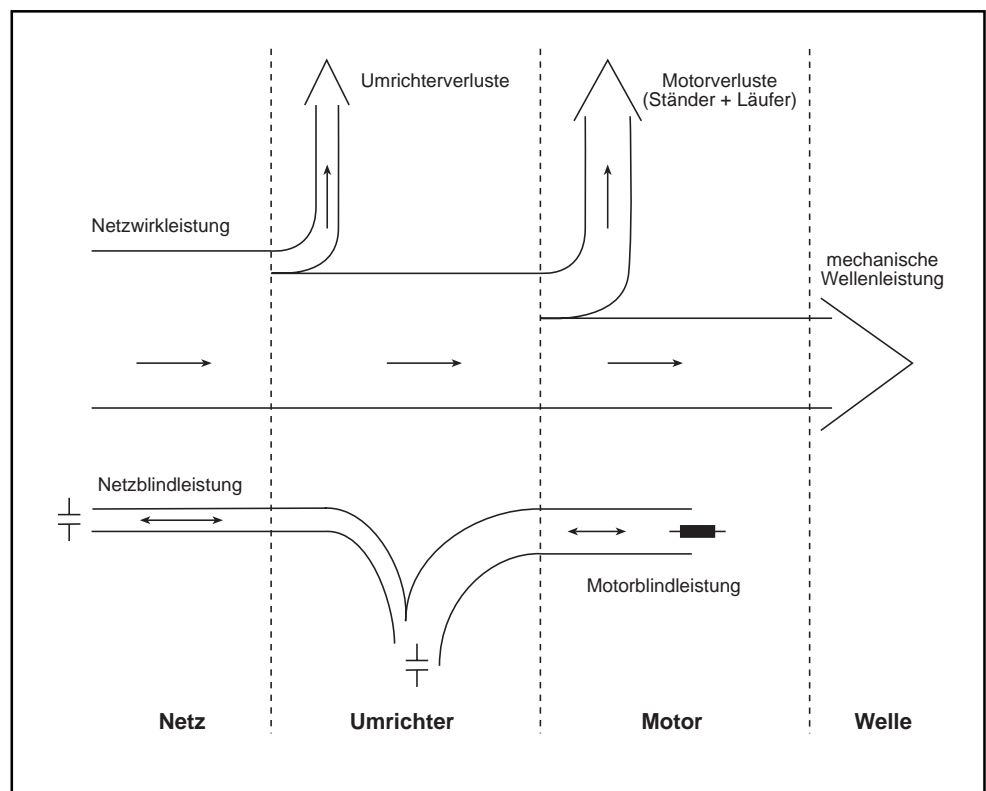


Abb. 26  
Leistungsbilanz  
eines  
Umrichtertantriebes





#### 6.4 Messung von Strömen und Spannungen

Aufgrund der nichtsinusförmigen Kurvenformen von Strömen und Spannungen sind nicht alle Meßgeräte für Messungen am Frequenzumrichter geeignet. Bei der Messung der Eingangsspannung ist nicht nur der Effektivwert, der sich mit jedem handelsüblichen Multimeter ermitteln läßt, von Bedeutung, sondern insbesondere auch der Scheitelwert, da dieser die Höhe der Zwischenkreisspannung und damit auch der Ausgangsspannung bestimmt. Ob und wie weit dieser Scheitelwert durch die Nachladeströme des Zwischenkreises zusammenbricht, läßt sich nur durch Oszillographieren der Eingangsspannung bei belastetem Umrichter ermitteln. Dabei darf der Massepunkt des Oszilloskops nicht mit der Haupterde verbunden sein (erreichbar z.B. durch Einsatz eines Trenntrafos zur Versorgung des Oszilloskops). Außerdem ist ein Tastkopf 1 : 100 zu verwenden.

Bei der Messung des Eingangsstromes interessiert in erster Linie der Scheitelwert, welcher mit Hilfe einer Strommeßzange mit analogem Spannungsausgang (proportional zum Augenblickswert) über ein Oszilloskop bestimmt werden kann. Die Strommeßzange sollte dabei über einen ausreichend großen Meßbereich verfügen, damit die Spitzenwerte nicht "gekappt" werden. Soll der Effektivwert des Stromes gemessen werden, so muß die Strommeßzange den hohen Scheitelfaktor verarbeiten können.

Die Messung des Effektivwertes der Ausgangsspannung mit einem digitalen Meßinstrument ist meist sehr ungenau, selbst wenn die Ausgangsfrequenz im zulässigen Frequenzbereich des Meßinstrumentes liegt, was bei Frequenzen  $\ll 50$  Hz häufig nicht mehr der Fall ist. Zusätzlich erschwert wird die Messung durch hohe Schaltfrequenzen. Die besten Ergebnisse liefern hier einfache analoge Drehspul- bzw. Dreheiseninstrumente. Um zu überprüfen, ob die Ausgangsspannung in allen 3 Phasen identisch ist, sollte der Motor vom Umrichter getrennt werden, um eine galvanische Verbindung der Phasen über die Motorwicklung und damit eine Verfälschung des Meßergebnisses zu vermeiden.

Der genaue zeitliche Verlauf der Ausgangsspannung und damit auch das Pulsmuster lassen sich mit einem Speicheroszilloskop festhalten, wobei wieder auf einen erdfreien Anschluß und die Verwendung eines Tastkopfes 1:100 zu achten ist. Der Scheitelwert der Ausgangsspannung entspricht der Gleichspannung im Zwischenkreis.

Für die Messung des Ausgangsstromes gilt ähnliches wie für die Ausgangsspannung. Auch hier sind Dreheisen- bzw. Drehspulinstrumente für die Messung des Effektivwertes zu bevorzugen. Ein genaues Abbild des Stromes kann wieder mit einer Strommeßzange mit analogem Spannungsausgang proportional zum Augenblickswert oszillographiert werden.

Recht ungenau sind dagegen meist Shunt-Messungen, wobei sich vor allem EMV-Störungen auf der Meßstrecke negativ bemerkbar machen. In vielen Fällen reicht eine alleinige Messung des Ausgangsstrom-Effektivwertes nicht aus, da der Umrichter die Augenblickswerte des Stromes und damit die Stromspitzen erfaßt und auswertet. Überstrom-Fehler sind somit nur durch eine genaue Erfassung der Spitzenwerte vorhersehbar und vermeidbar.

Aus dem Gesagten geht hervor, daß für genaue Messungen am Umrichter eine gute Strommeßzange mit analogem Ausgang und ein Speicheroszilloskop sowie für grobe Effektivwertmessungen ein analoges Drehspul- bzw. Dreheiseninstrument erforderlich sind.

Im Frequenzumrichter selbst werden zum Schutz des Gerätes ebenfalls Ströme und Spannungen erfaßt. Es sind:

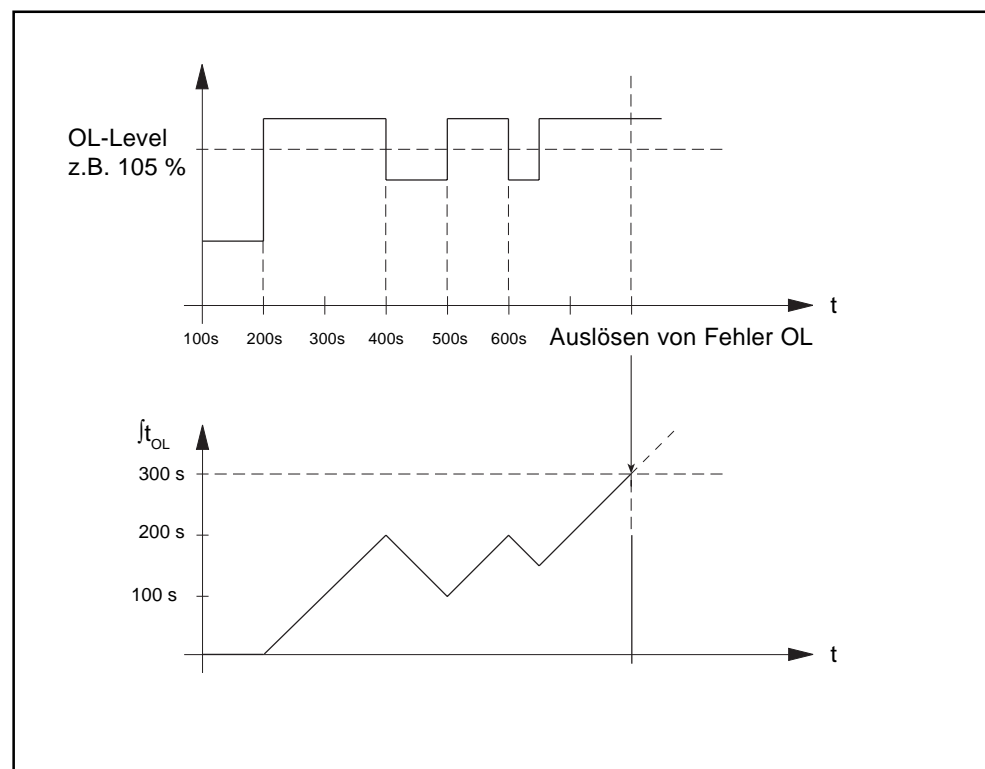
- die Zwischenkreisspannung,
- der Strom zwischen Kondensator und Wechselrichter (geräteabhängig),
- die Summe der drei Ausgangsströme (Erdschlußfassung) (geräteabhängig),
- die Ströme der Ausgangsphasen (geräteabhängig).

**6.5 Interne Schutzfunktionen / KEB-COMBIVERT** Um sich gegen zu hohe Ströme und Spannungen sowie thermische Überlastung zu schützen, sind im Frequenzumrichter zahlreiche Überwachungs- und Schutzfunktionen integriert.

Bei einer gerätetypabhängigen Auslastung von z. B.  $\geq 150\%$  bzw.  $\geq 200\%$  (= 1,5fachem bzw. 2fachem Umrichter-Nennstrom) schaltet der Umrichter innerhalb weniger Mikrosekunden mit der Fehlermeldung OC (= Überstrom) ab. Entscheidend hierfür ist der Stromspitzenwert.

Liegt die Auslastung im Überlastbereich des Umrichters, jedoch unterhalb des Abschaltpegels, so wird nach einer bestimmten, geräteabhängigen Zeit softwaremäßig die Fehlermeldung OL (Überlast) generiert. Dadurch wird eine thermische Überbeanspruchung der Halbleitermodule vermieden. Die OL-Schutzfunktion wirkt integrierend, d.h. die Zeiten mit Überlast werden addiert, die Zeiten ohne Überlast werden subtrahiert (siehe Abb. 27). Dieses ist insbesondere bei dynamischen Vorgängen (Taktantriebe) von Bedeutung.

Abb. 27  
Beispiel:  
Überlast- (OL-)  
Level = 105 %;  
Abschaltzeit = 300s



Um nach einem OL-Fehler eine weitere Aufheizung der Bauelemente und damit eine evtl. Zerstörung zu vermeiden, muß sich der Frequenzumrichter gegen ein sofortiges Zurücksetzen des Fehlers schützen. Er erreicht dieses durch eine interne Zeitfunktion, die einen sofortigen Reset verhindert. Erst nach Ablauf dieser Abkühlzeit - erkennbar durch die blinkende Anzeige "nOL" - kann der OL-Fehler durch einen Reset zurückgesetzt und der Frequenzumrichter wieder gestartet werden.

Auch ein Power-On-Reset, d. h. ein Aus- und Wiedereinschalten, kann den OL-Fehler erst nach Ablauf der Abkühlphase zurücksetzen. Da der OL-Fehler gespeichert wird und die Zeitfunktion nur bei anliegender Versorgungsspannung aktiv ist bzw. nach einem verfrühten Power-On-Reset wieder neu gestartet wird, darf der Frequenzumrichter während der Abkühlphase nicht vom Netz getrennt werden.

Die OC-Schutzfunktion erfaßt den Strom - je nach Umrichtertyp - in einer Zwischenkreisphase (siehe Abb. 28a) oder in beiden Zwischenkreisphasen (Abb. 28b) oder in den Ausgangsphasen (Abb. 28c).

Abb. 28a

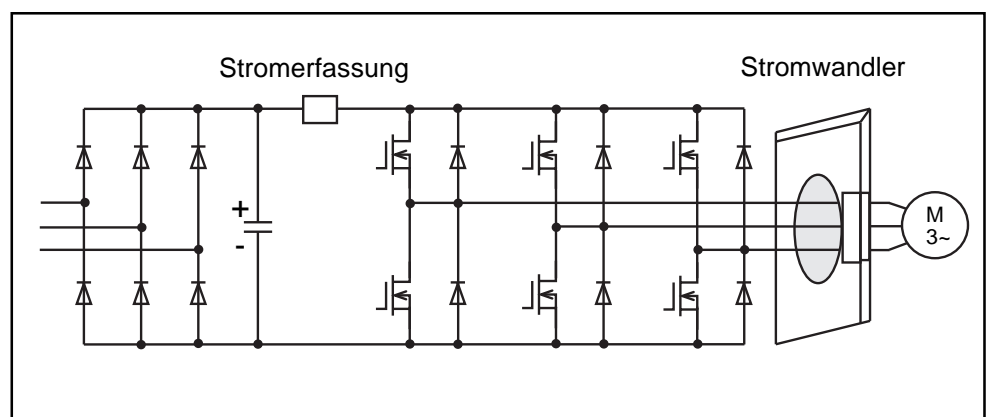


Abb. 28b

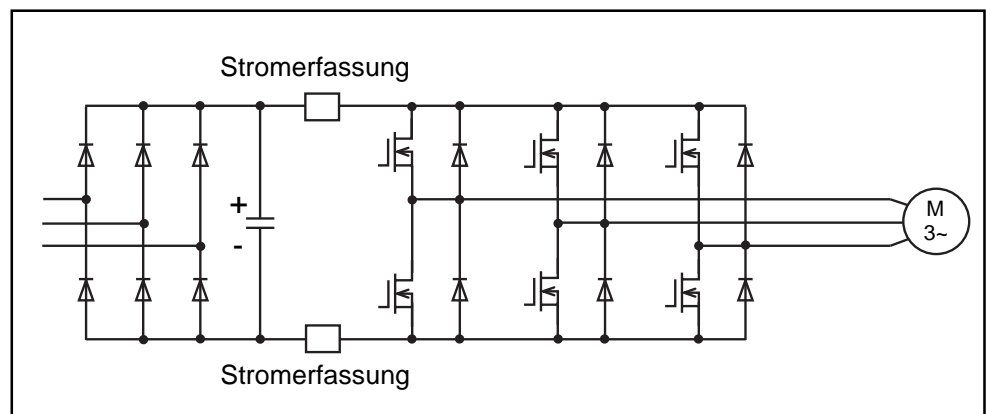
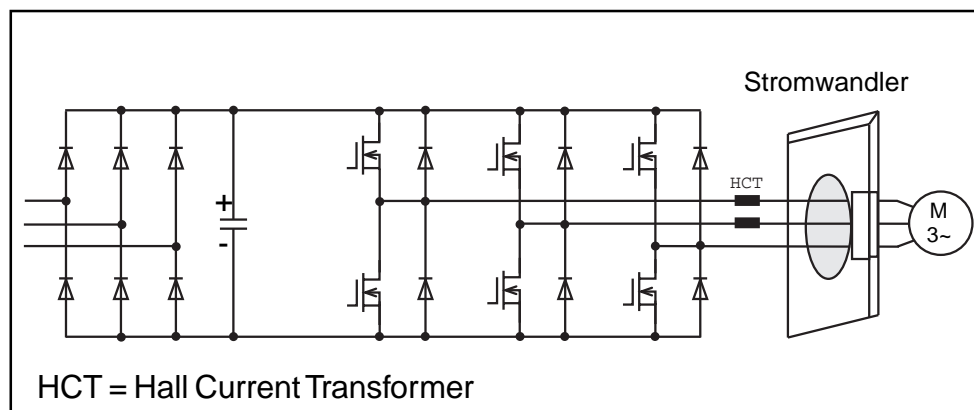


Abb. 28c



Auf diese Weise werden alle zu hohen Lastströme sowie Kurzschlüsse zwischen den Ausgangsphasen erfaßt. Erdschlüsse werden in den Abb. 28a und 28c über einen Stromwandler, der die Summe der Ausgangsströme erfaßt, detektiert. Dieser Stromwandler ist auf 50 Hz ausgelegt, da Erdschlußströme stets Netzfrequenz besitzen. Das maximale Potential gegenüber Erde beträgt an allen Punkten des Leistungsteils 325 V (bei 230 V Netzspannung).

In Abb. 28b kann der Stromwandler entfallen, da Erdschlußströme in jedem Fall über eine der beiden Stromerfassungen detektiert werden.

Neben einem Schutz gegen zu hohe Ströme muß sich der Frequenzumrichter auch gegen Überspannung und Unterspannung schützen. Beides wird durch eine ständige Erfassung der Zwischenkreisspannung detektiert. Durch Überwachung der Welligkeit der Zwischenkreisspannung wird bei belastetem Umrichter außerdem ein Phasenausfall am Umrichtereingang erkannt. Die Anzeige der aktuellen Ausgangsspannung wird softwaremäßig aus dem Modulationsverfahren und der gemessenen Zwischenkreisspannung berechnet. Die Schaltschwelle für den Bremschopper (GTR7) liegt etwa 5 bis 8 % unterhalb des OP-Levels.

## 7. Zusammenspiel von Frequenzumrichter (FU) und Drehstromasynchronmotor (DASM)

### 7.1 Prinzip der Drehzahlstellung

Betrachtet man den leerlaufenden DASM, so stellt sich folgende Drehzahl ein:

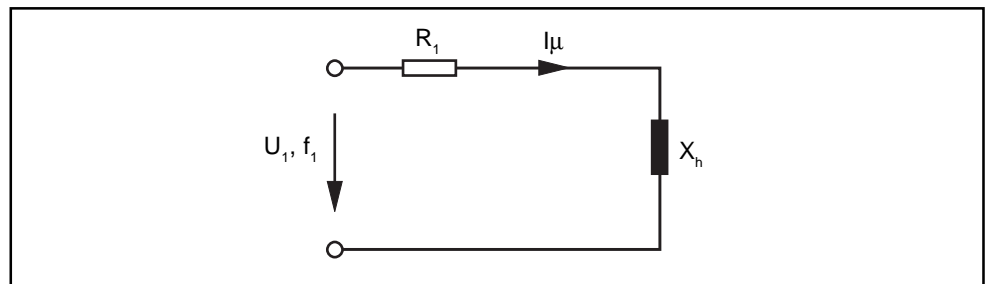
Gleichung 20

$$n_0 = \frac{f_1}{p}$$

$n_0$ : Leerlaufdrehzahl (in  $s^{-1}$ )  
 $f_1$ : Frequenz der Speisespannung  
 $p$ : Polpaarzahl (z. B. 4poliger Motor ==>  $p = 2$ )

Somit kann man durch Verändern der Speisefrequenz  $f_1$  die Drehzahl des Motors verstellen. Dabei muß jedoch berücksichtigt werden, daß der Magnetisierungsstrom  $I_\mu$  ebenfalls von der Speisefrequenz abhängt, wie aus dem Leerlaufersatzschaltbild (Abb. 29) hervorgeht.

Abb. 29  
Leerlaufersatzschaltbild der DASM



Gleichung 21

$$I_\mu = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + X_h^2}} = \frac{U_1}{\sqrt{R_1^2 + (2\pi f L_h)^2}}$$

$L_h$ : Hauptinduktivität  
 $R_1$ : Ständerwiderstand

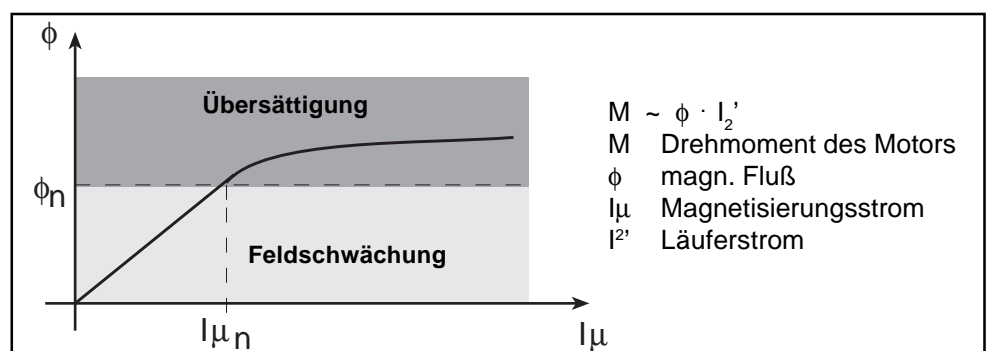
Vernachlässigt man in Gl. 21 den Ständerwiderstand  $R_1$ , so ergibt sich der Zusammenhang:

Gleichung 22

$$I_\mu \approx \frac{U_1}{2\pi f \cdot L_h} \Rightarrow I_\mu \sim \frac{U_1}{f}$$

Ziel muß es sein, diesen Magnetisierungsstrom  $I_\mu$  konstant auf dem Nennwert  $I_{\mu n}$  zu halten, damit die Asynchronmaschine stets mit Nennfluß  $\phi_n$  betrieben wird und damit in der Lage ist, über den gesamten Drehzahlbereich Nennmoment abzugeben (--> Abb. 30a).

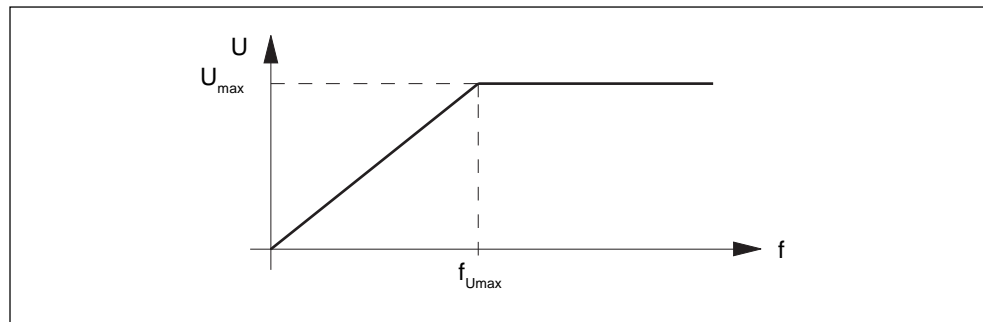
Abb. 30a



Um den Magnetisierungsstrom konstant zu halten, muß gemäß Gl. 22 somit die Spannung  $U_1$  proportional zur Frequenz verstellt werden. Wenn dieses nicht erfolgt, stellt sich entweder ein kleinerer Magnetisierungsstrom (Feldschwächung) oder ein größerer (Übersättigung) ein.

Aus diesem Grunde weisen U/f-kennliniengesteuerte Umrichter im Bereich bis zur Eckfrequenz  $f_{Umax}$  i.a. einen linearen Zusammenhang zwischen Ausgangsspannung und Frequenz auf (==> Abb. 30b).

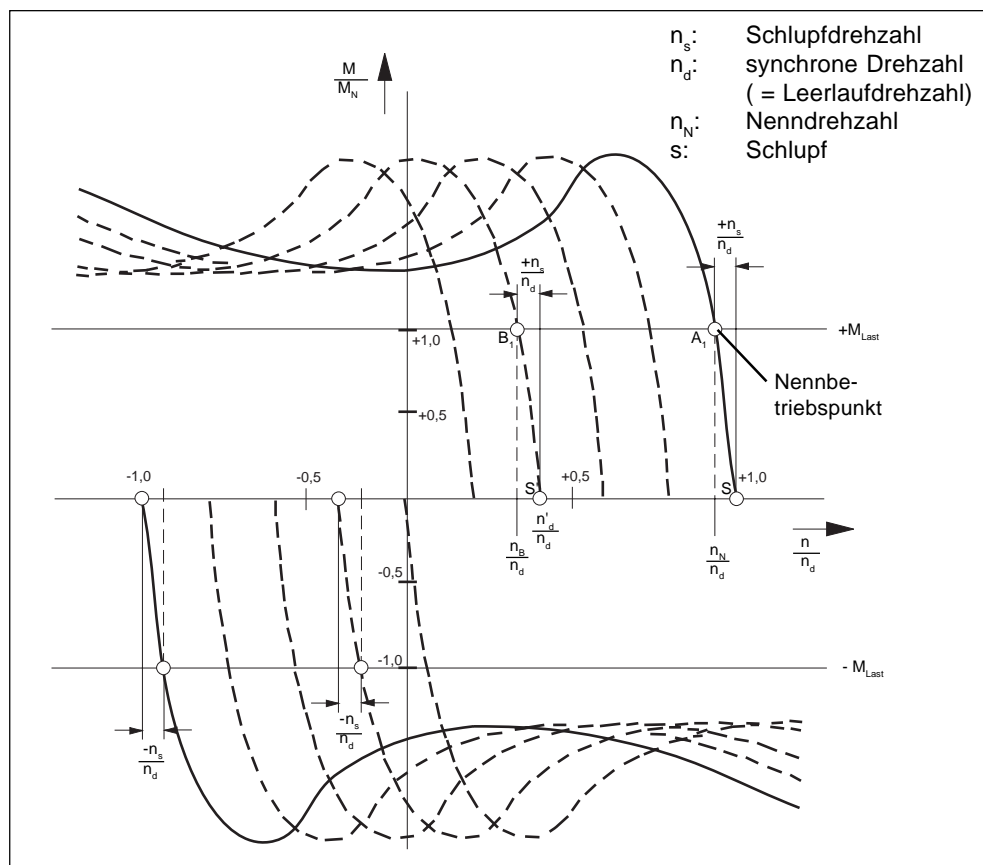
Abb. 30b



## 7.2 Motorkennlinien bei Umrichterbetrieb

Wenn der Umrichter so eingestellt ist, daß der Magnetisierungsstrom über den gesamten Frequenzbereich konstant bleibt, ergeben sich die folgenden Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien (==> Abb. 31).

Abb. 31



Man erkennt, daß eine Verringerung der Frequenz eine Parallelverschiebung der Kennlinien zur Folge hat und das Kippmoment im Idealfall für alle Frequenzen konstant bleibt. Unter diesen Voraussetzungen könnte der Motor somit über den gesamten Frequenzbereich bis zu seinem Kippmoment belastet werden.

In der Praxis müssen jedoch Abweichungen von diesen idealisierten Kennlinien in Kauf genommen werden. Wie aus Abb. 29 hervorgeht, muß auch der ohmsche Ständerwiderstand  $R_1$  in die Betrachtung einbezogen werden. Während dieser frequenzunabhängig ist, nimmt die Hauptreaktanz  $X_h$  linear mit der Frequenz zu, wodurch sich auch eine frequenzabhängige Spannungsaufteilung an  $R_1$  und  $X_h$  ergibt.

Bei höheren Frequenzen fällt fast die gesamte Eingangsspannung an der Hauptinduktivität ab;  $R_1$  hat daher kaum Einfluß auf den Magnetisierungsstrom. Zu kleineren Frequenzen hin nimmt  $X_h$  linear mit der Frequenz ab,  $R_1$  bleibt jedoch konstant, so daß der Spannungsabfall  $U_{R1}$  im Verhältnis zu  $U_{Xh}$  deutlich ansteigt und deshalb durch eine Anhebung der Eingangsspannung (**Boost**) kompensiert werden muß (==> Abb. 32).

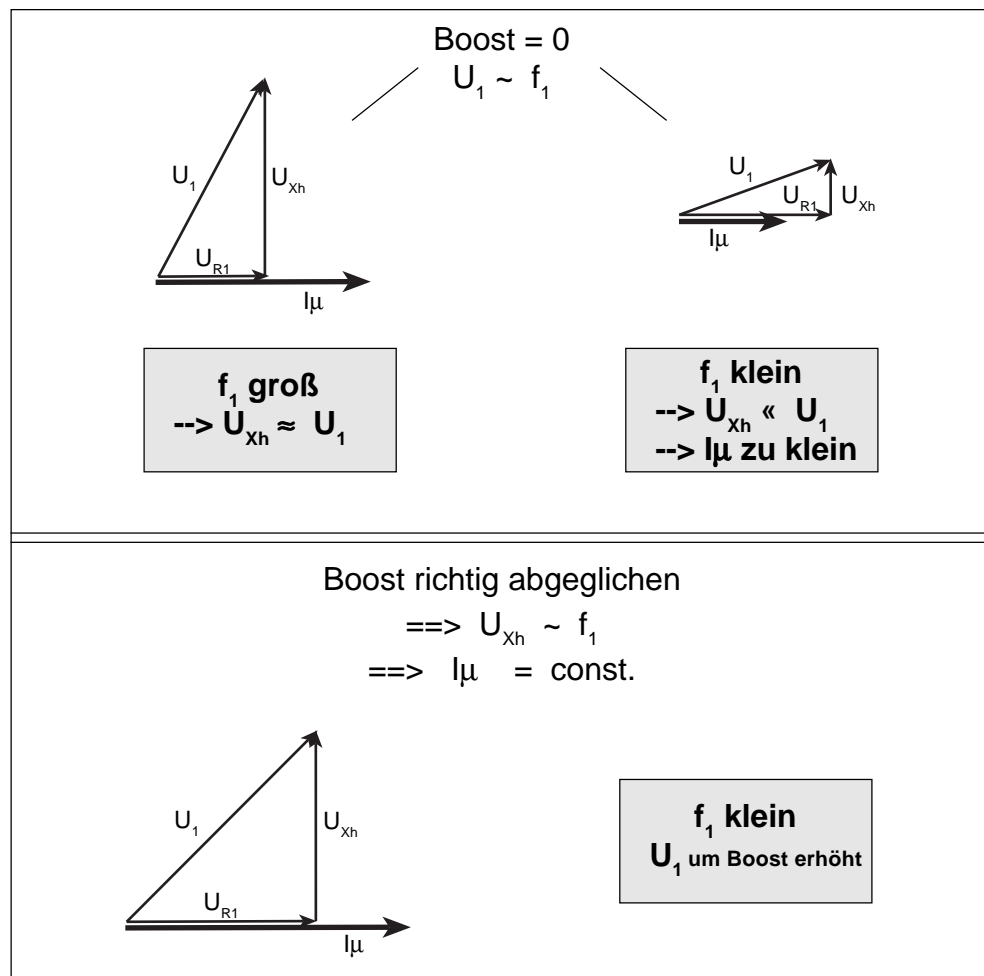


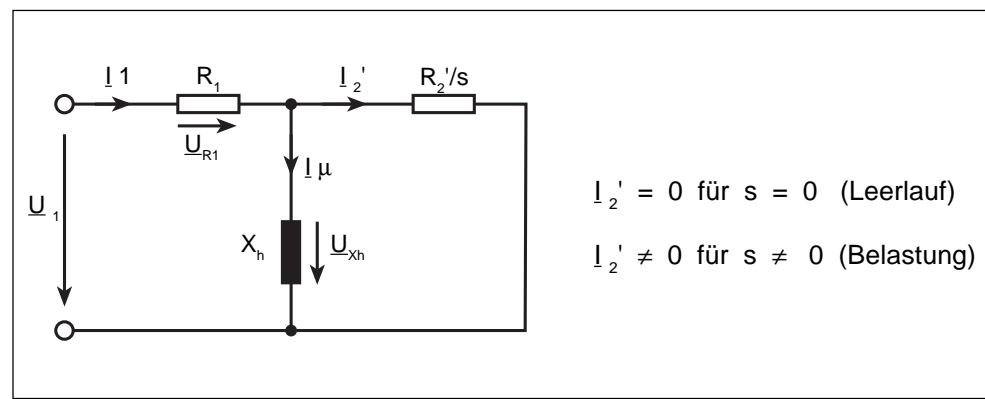
Abb.32



Nur wenn die Spannung  $U_{xh}$  frequenzproportional verstellt wird, bleibt der Magnetisierungsstrom  $I_\mu$  und damit der magnetische Fluß der Maschine konstant. Da die Spannung  $U_{xh}$  von außen nicht meßbar ist und i.a. die Motorgrößen  $R_1$  und  $X_h$  nicht bekannt sind, muß der erforderliche Boost empirisch ermittelt werden (==> Kap. 7.3).

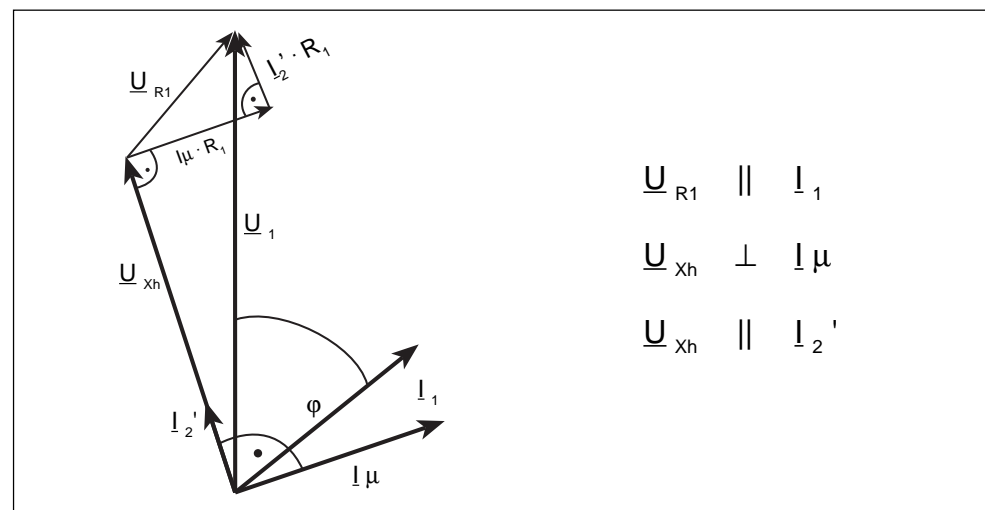
Die bisherigen Betrachtungen beziehen sich nur auf den Leerlaufbetrieb der Maschine. Wird der Motor nun belastet, so stellt sich ein Schlupf  $s \neq 0$  ein, der einen Läuferstrom  $I_2'$  bewirkt, wie aus dem Ersatzschaltbild (Abb. 33) hervorgeht.

Abb. 33  
Vereinfachtes  
Ersatzschaltbild  
des belasteten  
DASM



Dieser zusätzliche Läuferstrom - ein reiner Wirkstrom - bewirkt einen zusätzlichen Spannungsabfall an  $R_1$ , so daß eine weitere Anhebung der Eingangsspannung  $U_1$  erforderlich ist, um den Magnetisierungsstrom  $I_\mu$  konstant zu halten. Diese Anhebung ist streng gesehen abhängig vom Lastmoment (bzw. vom Schlupf). Da in der Praxis i.a. nur ein fester Boost-Wert eingestellt wird, sollte dieser einen Kompromiß zwischen belastetem und unbelastetem Antrieb darstellen. (==> Kap. 7.3). Das Zeigerdiagramm für die belastete Asynchronmaschine zeigt Abb. 34.

Abb. 34  
Zeigerdiagramm  
der belasteten  
DASM



Der Frequenzbereich von 0 bis  $f_{U_{max}}$  ( $\Rightarrow$  Abb. 30b), d.h. der Bereich, in dem die Spannung  $U_1$  proportional zur Frequenz ansteigt, wird als Ankerstellbereich bezeichnet. Die Frequenz, bei der die maximale Umrichter Ausgangsspannung erreicht ist, nennt man Eckfrequenz oder auch Typenpunkt. Zu untersuchen ist nun noch das Verhalten für höhere Frequenzen als  $f_{U_{max}}$ , im sog. Feldschwächbereich. Da hier keine Erhöhung der Spannung mehr möglich ist, nimmt der Magnetisierungsstrom  $I_\mu$  mit steigender Frequenz immer weiter ab, wodurch der magnetische Fluß der Maschine geschwächt wird (daher der Name "Feldschwächbereich"). Aus den Zusammenhängen

Gleichung 23

$$M \sim \Phi \cdot I_2' \quad // \quad \Phi \sim \frac{U_{Xb}}{f}$$

folgt sofort, daß damit auch das Drehmoment umgekehrt proportional zur Frequenz abnimmt. Für das Kippmoment gilt unter Vernachlässigung des Ständerwiderstandes  $R_1$  die Beziehung

Gleichung 24

$$M_k \sim \frac{U_1^2}{f_1^2}$$

Daraus folgt, daß das Kippmoment im Feldschwächbereich proportional zu  $1/f^2$  zurückgeht ( $U_1 = \text{const.}$ ). Damit ergeben sich bei Umrichterbetrieb folgende Drehzahl- / Drehmoment-Kennlinien:

Abb. 35

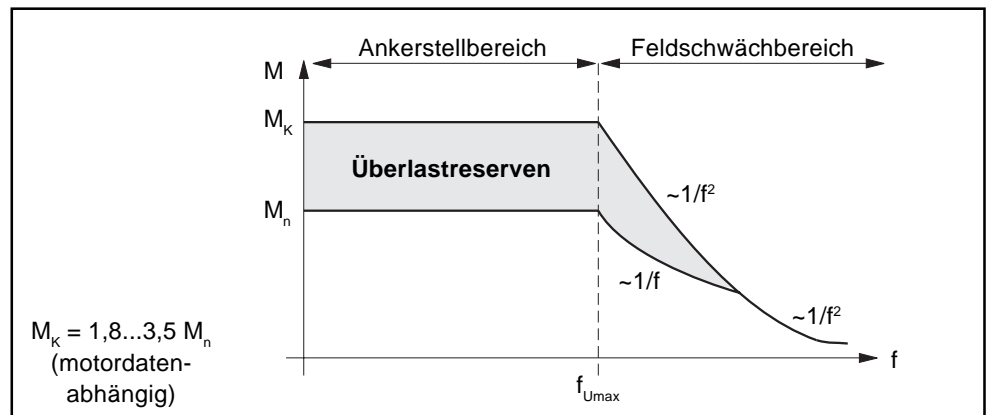
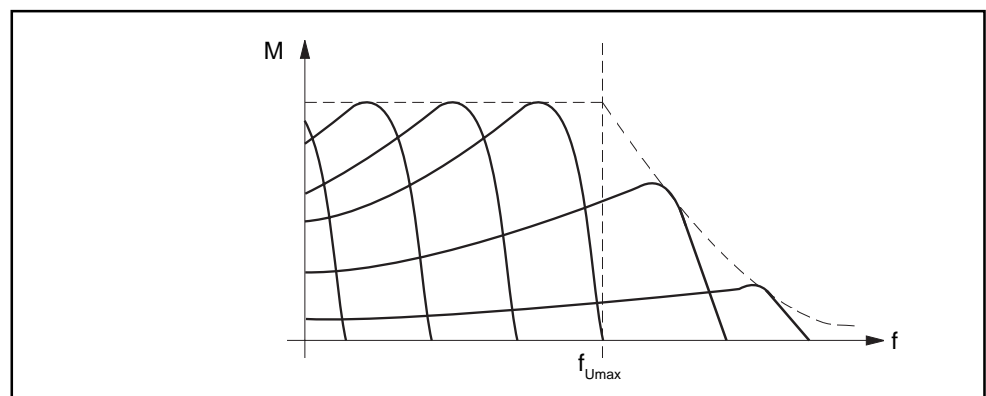


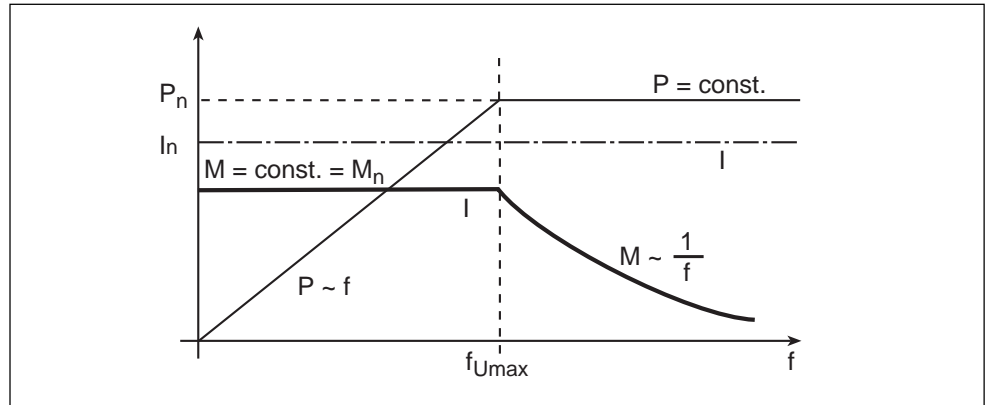
Abb. 36



Man erkennt den drastischen Drehmomentrückgang im Feldschwächbereich. Auch die Steigung der Kennlinien im Arbeitsbereich ( $s < s_{Kipp}$ ) wird flacher und damit der Schlupf größer (Abb. 36).

Der Strom- und Leistungsverlauf in Abhängigkeit von der Frequenz stellt sich folgendermaßen dar:

Abb. 37

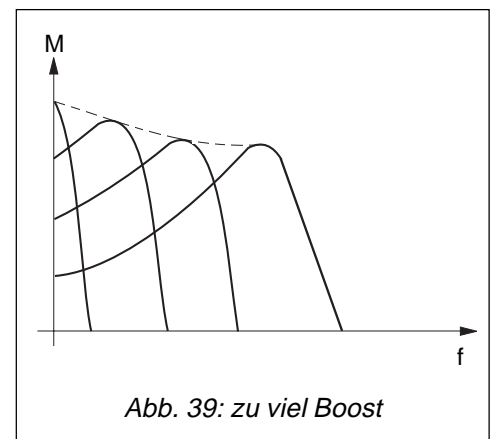
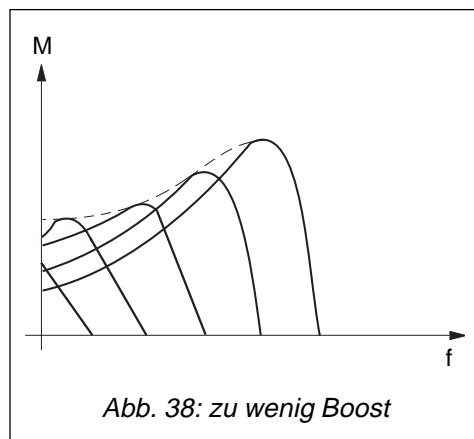


Wird in der Praxis nicht auf eine korrekte Einstellung des Boostes geachtet, ergeben sich folgende Auswirkungen:

- zu wenig Boost (==> Feldschwächung) --> Abb. 38
  - Kippmoment nimmt zu kleineren Frequenzen hin extrem stark ab
  - Steigung der Kennlinien im Arbeitsbereich wird flacher ==> höherer Schlupf
- zu viel Boost --> Abb. 39
  - Kippmoment steigt zu kleineren Frequenzen hin u.U. sogar an
  - Steigung der Kennlinien wird steiler ==> weniger Schlupf
  - Maschine wird übersättigt, d.h. Magnetisierungsstrom steigt stark an ==> thermische Überlastung

Abb. 38

Abb. 39



Da der Boost nur bis zur Eckfrequenz wirkt, beeinflusst er die Kennlinien im Feldschwächbereich nicht.

## Messungen zur Auswirkung des Boostes auf das Drehmoment

Statische Kennlinien 2,2 kW - FU

Motor: 2,2 kW

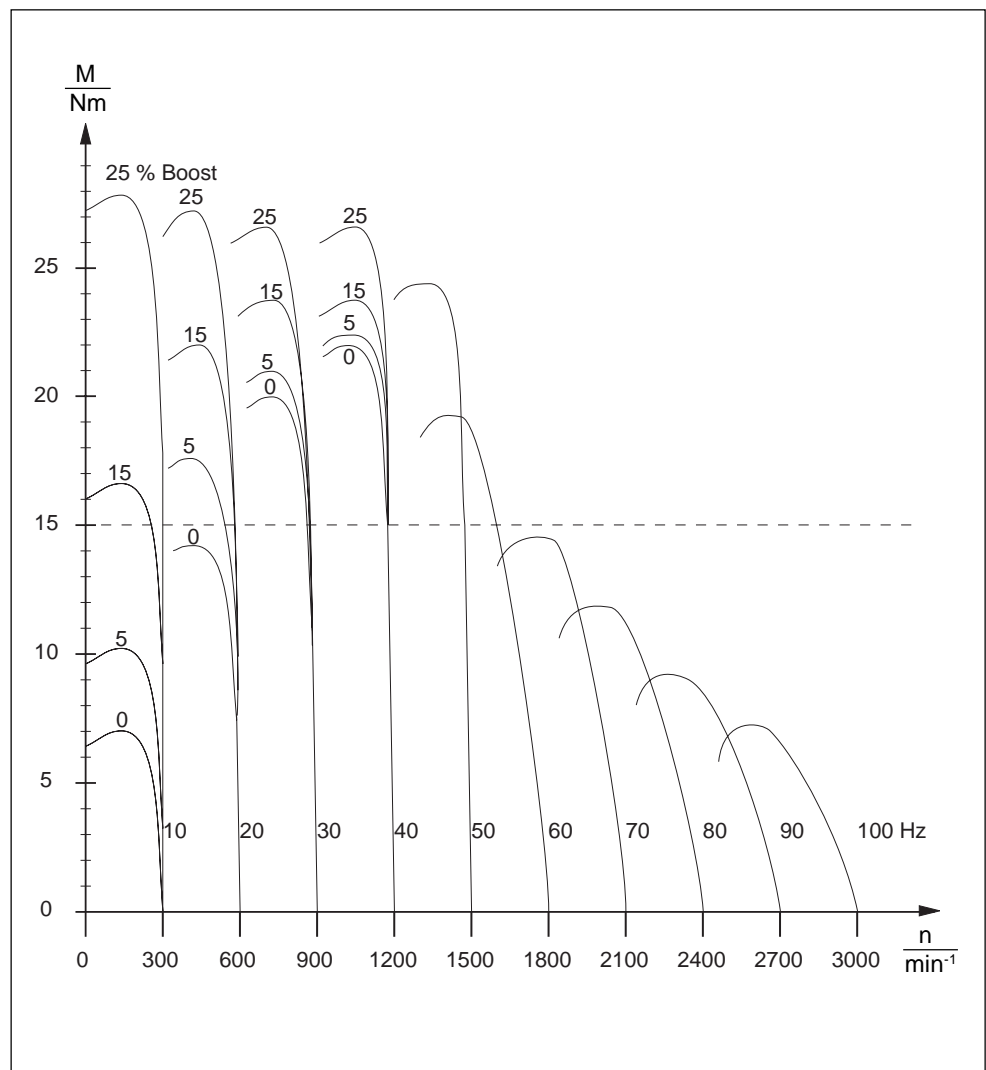
$M_N = 15 \text{ Nm}$

$I_N = 9,4 \text{ A}$

$U_{\text{Netz}} = 220 \text{ V}$

$n_N = 1420 \text{ min}^{-1}$

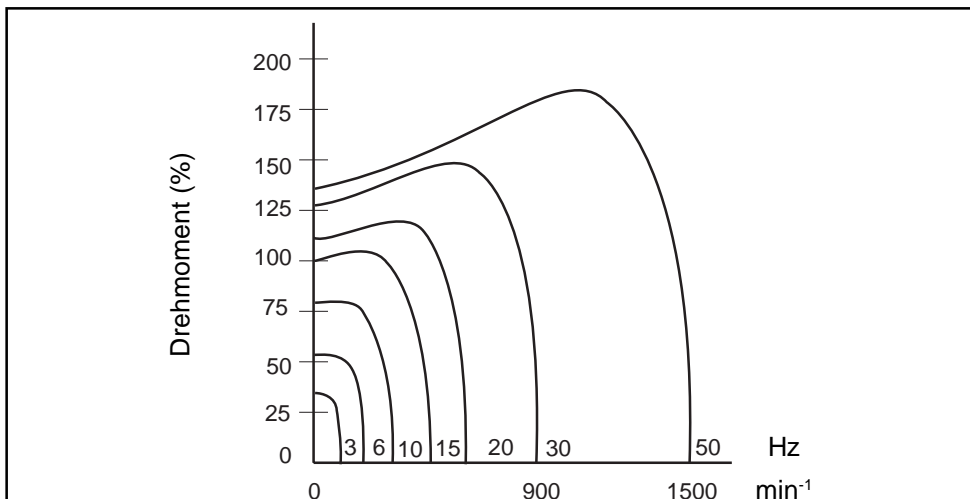
Abb. 40



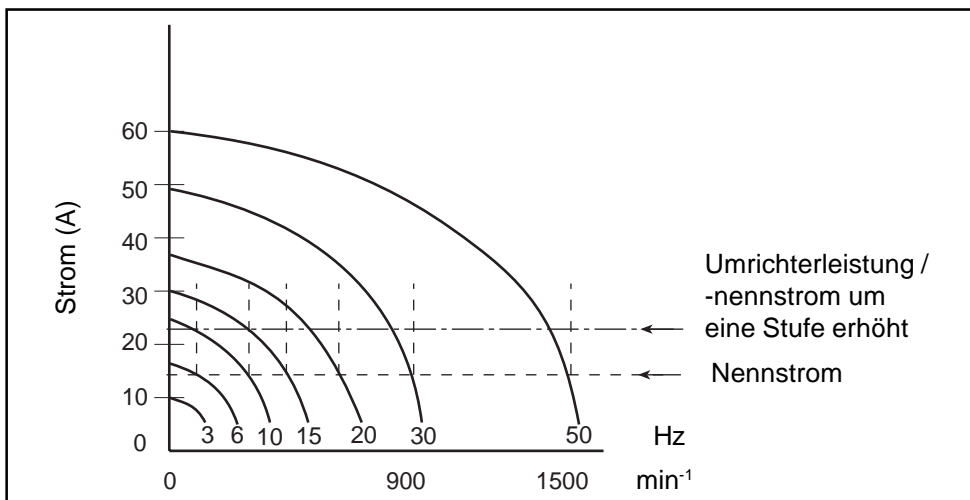
In der Praxis darf ohne Fremdlüfter oder bei Teillast bzw. Leerlauf nicht im Dauerbetrieb bei kleinen Frequenzen mit hohem Boost gefahren werden (thermische Zerstörung des Motors!). Daher ist im unteren Drehzahlbereich mit verringerten Kippmomenten gegenüber dem Nennbetrieb zu rechnen, wie aus der folgenden Abbildung hervorgeht.

Abb. 41  
Antriebskennlinien  
für verschiedene  
Umrichter-  
frequenzen

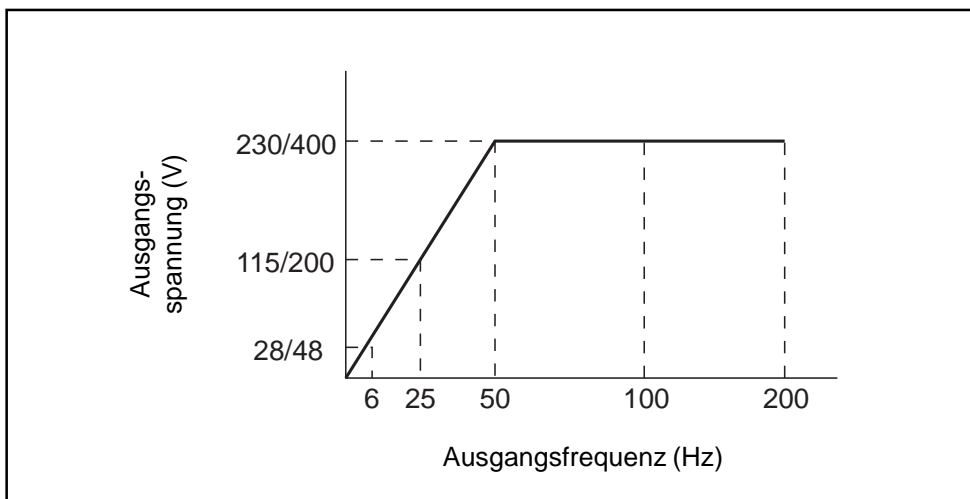
a) Drehzahl /  
Drehmoment



b) Drehzahl /  
Ausgangsstrom



c) U/f-Kennlinie



### 7.3 Einstellung des Boostes

Wie beschrieben, hängt der erforderliche Boost, also die Anhebung der Motorspannung, von folgenden Parametern ab:

- Verhältnis von Ständerwiderstand  $R_1$  zu Hauptreaktanz  $X_n$ ,
- Frequenz  $f_1$  der Umrichter Ausgangsspannung,
- Belastung des Motors (--> Schlupf  $s$ ).

Es ist daher nur näherungsweise möglich, mit einem einzigen Boostwert eine gute Einstellung für alle Betriebszustände des Motors zu finden. Diese Einstellung könnte folgendermaßen erfolgen:

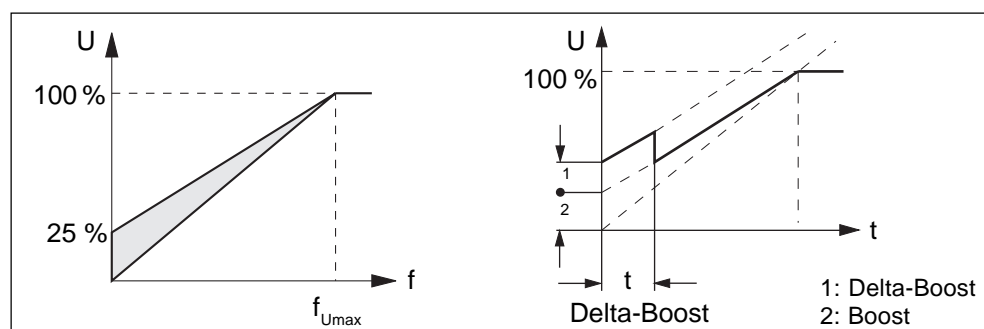
- Messung der Umrichterauslastung bei der Eckfrequenz ( $\hat{=} 50$  Hz bei Standard-Normmotoren) mit leerlaufender Maschine.
- Boostwert so einstellen, daß bei kleinen Frequenzen ( $f \approx 5 \dots 10$  Hz) und Leerlauf die gleiche Auslastung wie bei der Eckfrequenz angezeigt wird. Dadurch ist gewährleistet, daß der Magnetisierungsstrom im Leerlauf für alle Frequenzen nahezu konstant ist.
- Um den Einfluß des Lastmomentes auf den Fluß  $\phi$  zu kompensieren, diesen Boostwert um ca. 50 % erhöhen.

Um die Schwierigkeiten bei der Boost-Einstellung zu umgehen, werden alle neuen Umrichterreihen mit einer automatischen Boost-Einstellung ausgestattet (Autoboost). Dabei wird der jeweils richtige Boostwert automatisch aus den Motordaten und der Messung des Motorstroms berechnet. Die Funktion kann je nach Bedarf ein- oder ausgeschaltet werden.

Für die Einstellung des Boostes existieren häufig zwei Möglichkeiten:

- Einstellung eines permanenten Boostes
- Einstellung eines zeitlimitierten Boostes (Delta-Boost)

Abb. 42



Der Delta-Boost ist sinnvoll zur Überwindung eines erhöhten Anlaufmomentes (Losbrechmoment), da er nur für die eingestellte Zeitspanne ab dem Startzeitpunkt aktiv ist. Da der Motor bei eingestelltem Boost und einem Sollwert von 0 Hz mit Gleichstrom beaufschlagt wird, kann dieser Fall u.U. zur thermischen Überlastung des Motors führen. Um den Motor einerseits mit Boost zu beschleunigen und andererseits ohne Boost und damit ohne thermische Belastung bei  $f_{\text{soll}} = 0$  Hz zu betreiben, ist ebenfalls der Delta-Boost vorzuziehen. Auch eine Kombination aus Boost und Delta-Boost ist möglich, wobei sich beide Werte addieren.

**7.4 Betrieb eines 230 V - Motors am 400 V - Umrichter / 87 Hz - Kennlinie**

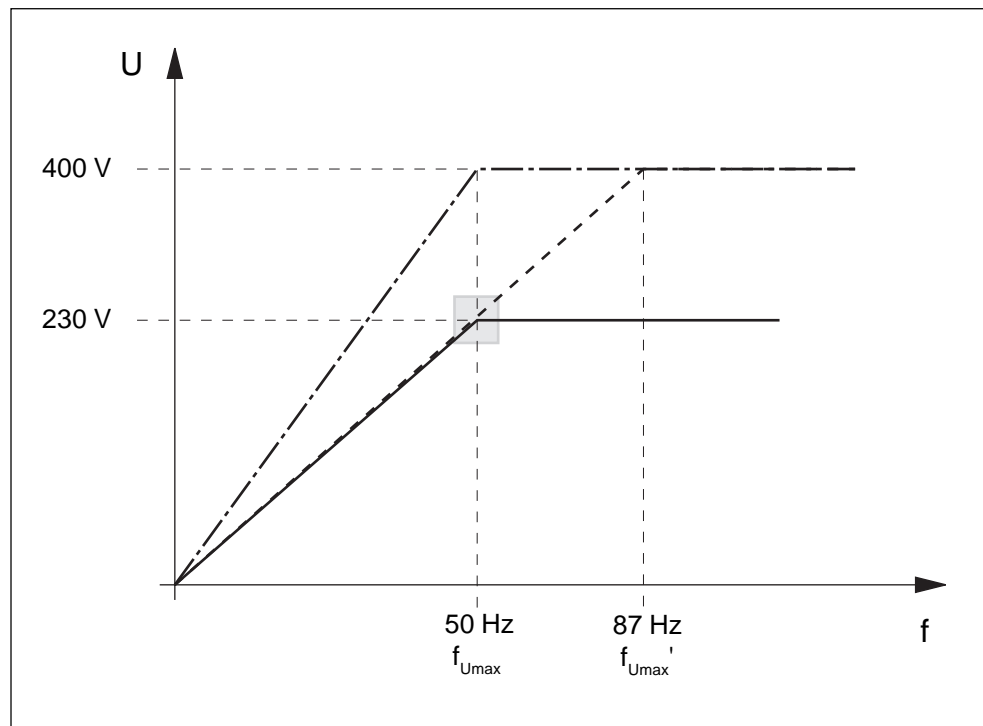
Handelsübliche 230/400 V - Drehstrommotoren werden an 230 V - Umrichtern in Dreieck- und an 400 V - Umrichtern in Sternschaltung betrieben. Bei dieser Verschaltung ist die Eckfrequenz des Umrichters jeweils auf 50 Hz einzustellen, um den Motor mit Nennfluß zu betreiben.

Mit einem kleinen Trick besteht jedoch auch die Möglichkeit, in Dreieck geschaltete 230/400 V - Motoren am 400 V - Umrichter zu betreiben, ohne den Motor zu übersättigen. Da die Strangspannung des Motors bei dieser Konstellation normalerweise um den Faktor  $\sqrt{3}$  zu hoch liegt, muß die U/f-Kennlinie des Umrichters um eben diesen Faktor abgesenkt werden, um wieder Nennmagnetisierung zu erreichen. Dieses erreicht man durch eine Verschiebung der Eckfrequenz zu einer um  $\sqrt{3}$  höheren Frequenz  $f_{Umax}'$  (==> Abb. 43).

Gleichung 25

$$f_{Umax}' = 50 \text{ Hz} \cdot \sqrt{3} = 87 \text{ Hz}$$

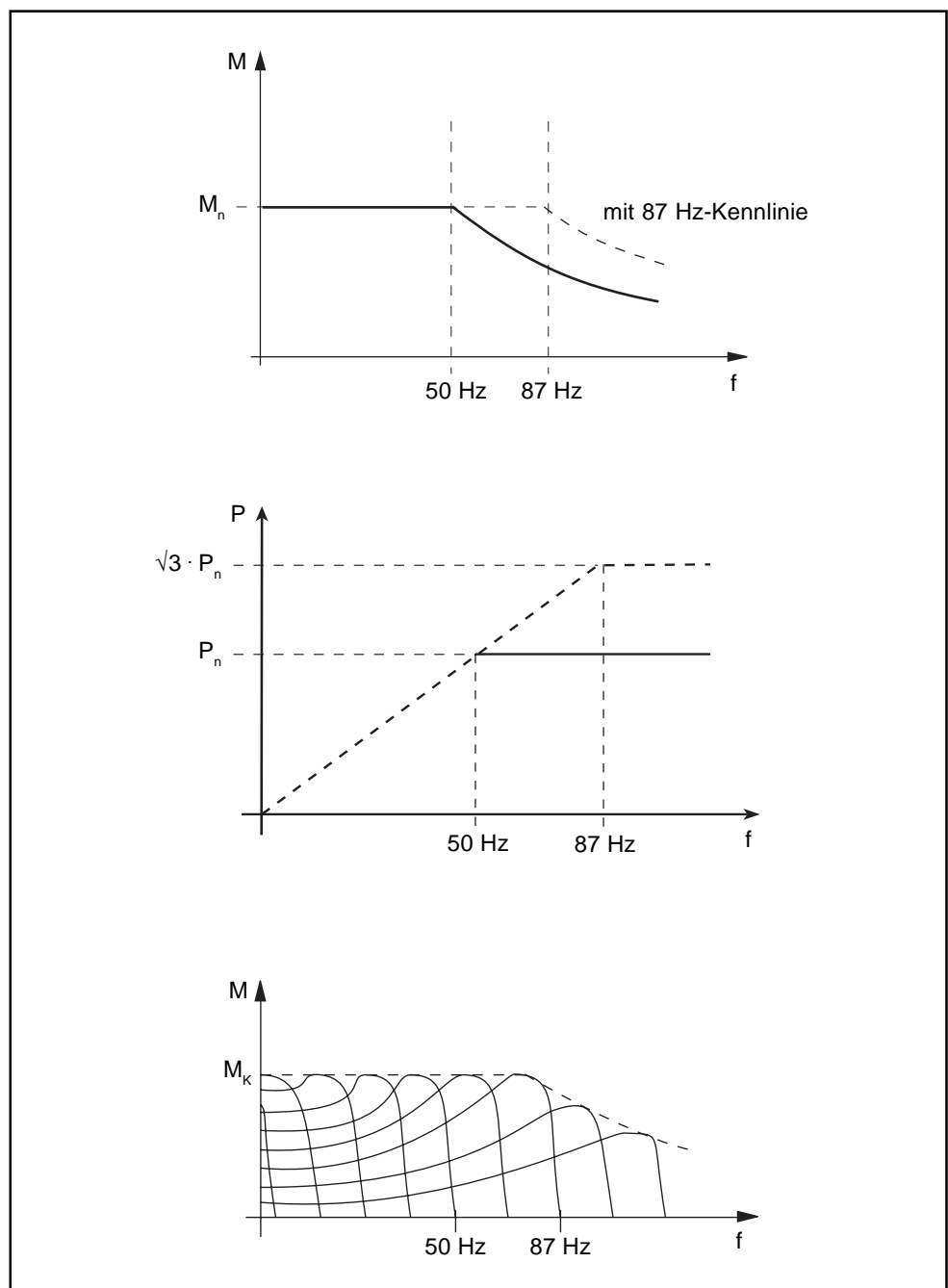
Abb. 43  
87 Hz-Kennlinie



Aus dieser Betriebsart des Motors ergeben sich folgende Konsequenzen:

- Der Motor wird bis 87 Hz mit Nennmagnetisierung betrieben ( $\phi \sim U/f = \text{const.}$ ) und gibt daher auch bis 87 Hz Nennmoment ab.
- Die abgegebene Leistung bei 87 Hz entspricht der  $\sqrt{3}$ -fachen Motornennleistung (==> Abb. 44). Der FU muß unter Berücksichtigung des Stromes, der ebenfalls über den gesamten Drehzahlbereich um den Faktor  $\sqrt{3}$  höher ist, auf diese Leistung ausgelegt werden.

Abb. 44  
Idealisierte  
M-, P-Diagramme  
bei Betrieb mit  
87 Hz - Kennlinie





→ Die Wicklungsisolation wird stärker beansprucht als im "normalen" Betrieb mit Sternschaltung, da die Strangspitzenspannung im motorischen Betrieb nun 560 V statt 320 V beträgt (==> Abb. 45 und 46). Im generatorischen Betrieb sind noch höhere Zwischenkreisspannungen bis max. 800 V möglich, die als Scheitelwerte an der Wicklung auftreten. Durch Resonanzen infolge langer Leitungen kann diese Spannung sogar noch erheblich überschritten werden. Es muß sichergestellt sein, daß die Isolation dieser hohen Spannung standhält. Genaue Angaben über die zulässige Maximalspannung erteilen die Motorenhersteller.

Abb. 45  
"Normaler" Umrichterbetrieb  
(Eckfrequenz bei 50 Hz)

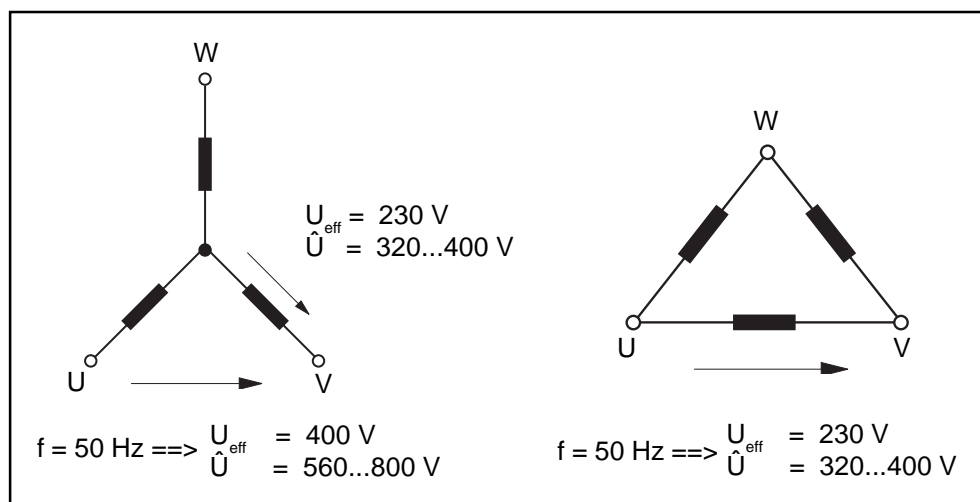
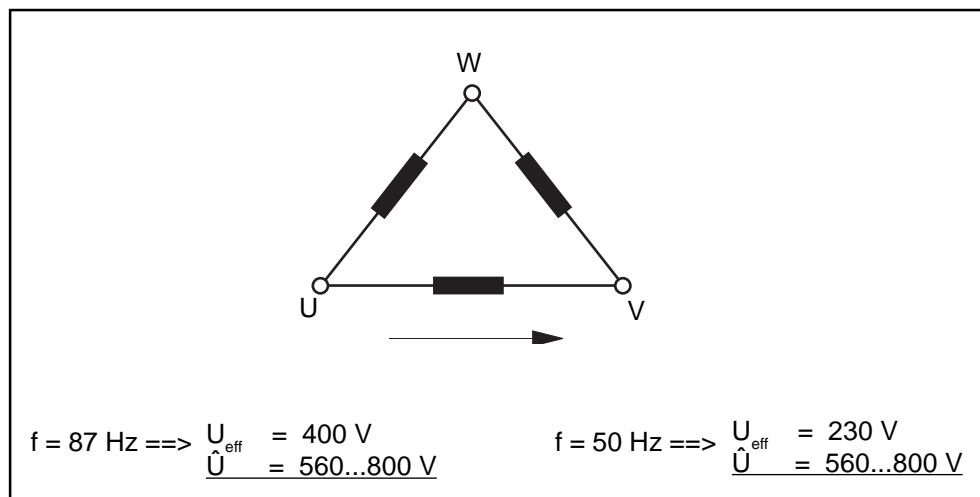


Abb. 46  
Beanspruchung der Wicklungs-  
isolation bei 87-  
Hz-Kennlinie



→ Beim Betrieb mit 87-Hz-Kennlinie nimmt der Oberschwingungsgehalt von Motorspannung und Motorstrom zu, da die wirksame Motorinduktivität in  $\Delta$ -Schaltung um den Faktor  $1/\sqrt{3}$  kleiner ist als in Y-Schaltung und die Spannungsblöcke bei gleichem Effektivwert schmaler werden ( $\Rightarrow$  Abb. 47). Daraus ergibt sich ein etwas schlechterer Rundlauf des Motors und bei kleineren Frequenzen eine geringfügig höhere Verlustleistung.

→ Da die Eisenverluste  $\frac{P_{Fe}}{P_{Fen}} \sim \left( \frac{f}{f_n} \right)$

vor allem im Rotor auftreten, die dadurch entstehende Wärme aber nur zum Teil auf das Gehäuse übertragen wird und somit nicht durch Kühlung abgeführt werden kann, ergibt sich bei Frequenzen oberhalb der Nennfrequenz durch die erhöhten Eisenverluste u. U. ein thermisches Problem, das auch durch die erhöhte Eigenkühlung infolge der höheren Lüfterdrehzahl nicht beseitigt werden kann. Da die Erwärmung des Rotors mit einer thermischen Zeitkonstante behaftet ist, ist die Schaltung für kurzzeitige Einsätze durchaus verwendbar. Der Dauerbetrieb sollte nur nach Absprache mit dem Motorenhersteller erfolgen und ist häufig nur bis zu einer Leistungssteigerung von 20 bis 40 % möglich.

Abb. 47  
Verlauf der Motor-  
spannung bei  
Betrieb mit  
87 Hz-Kennlinie

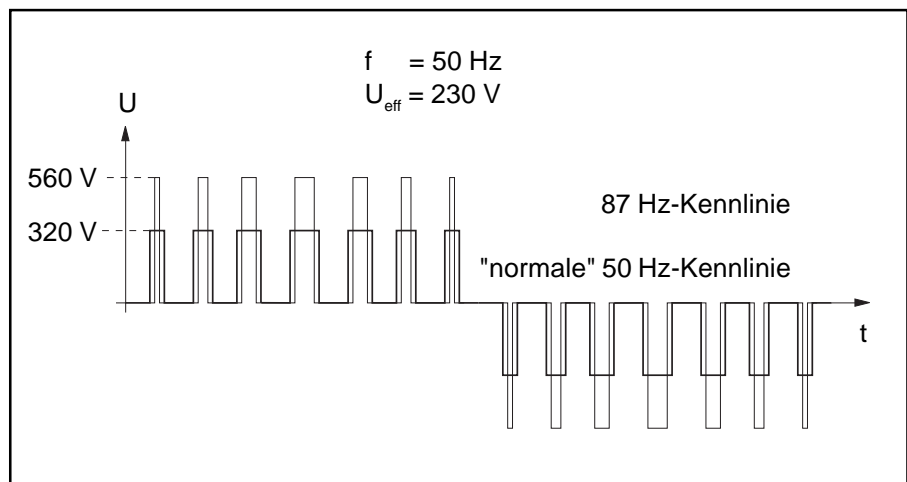


Abb. 48  
4 kW Umrichter  
mit 1,5 kW Motor;  
Sternschaltung,  
Eckfrequenz 50 Hz

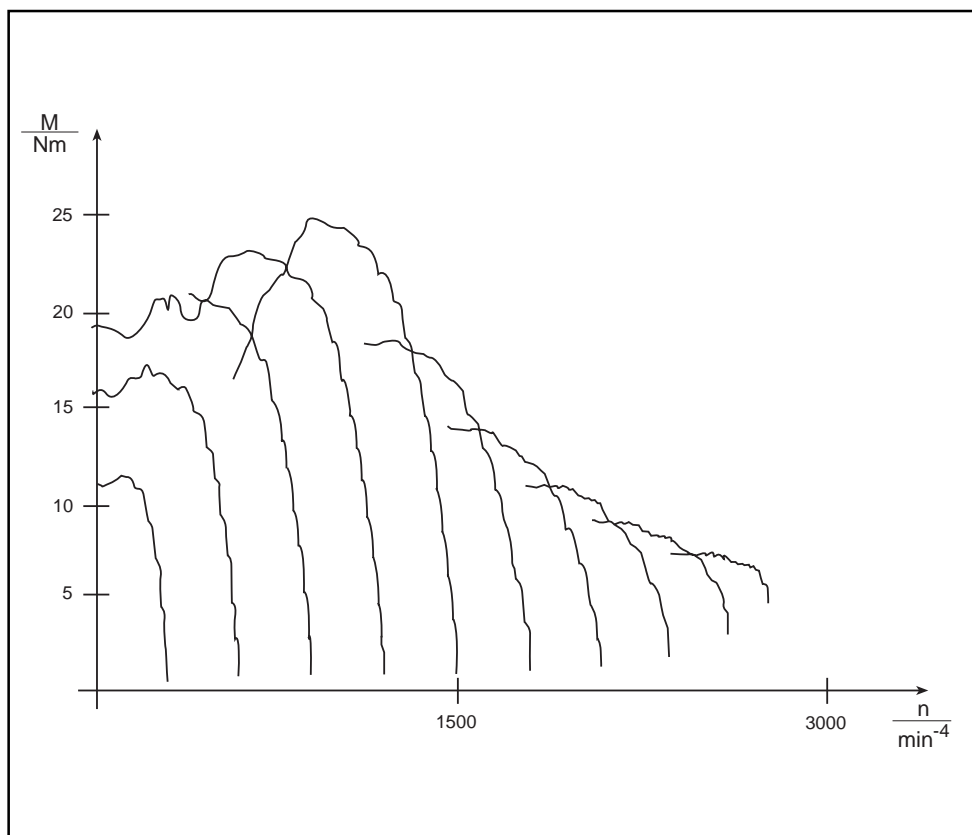
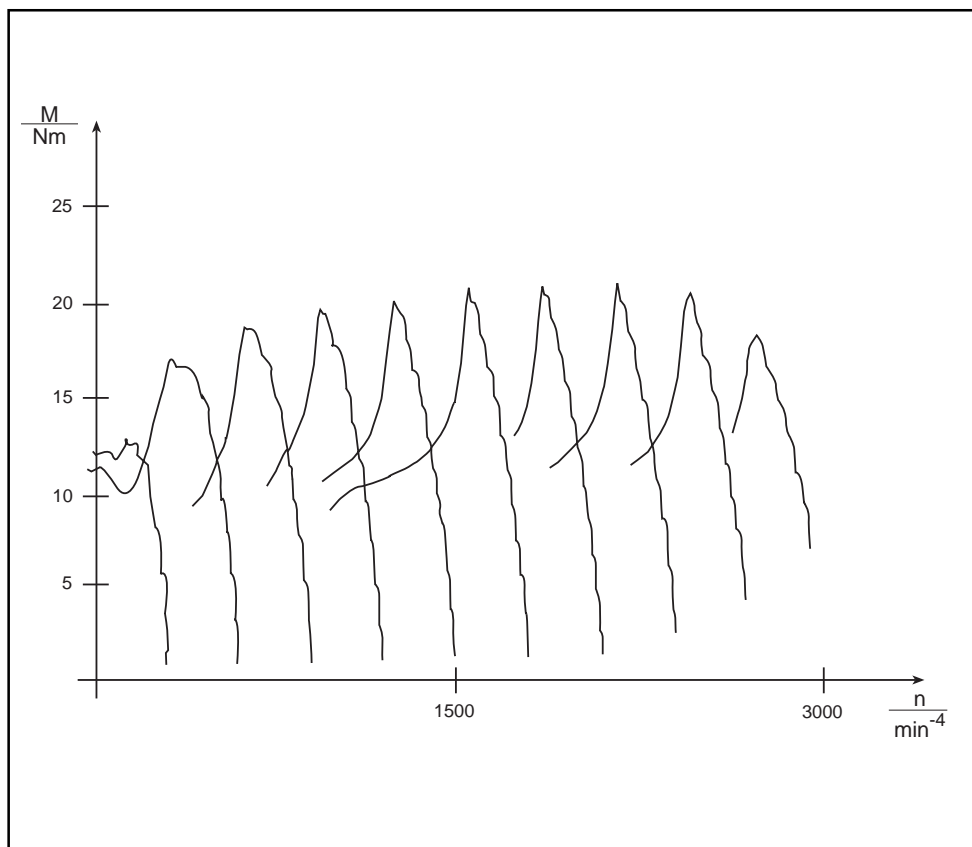


Abb. 49  
4 kW Umrichter  
mit 1,5 kW Motor;  
Dreieckschaltung,  
Eckfrequenz 87 Hz



## 7.5 Verhalten im generatorischen Betrieb

Alle bisherigen Betrachtungen beziehen sich auf den motorischen Betrieb des Asynchronmotors, d.h. Motormoment und -drehzahl besitzen gleiches Vorzeichen.

Wie beim Netzbetrieb des DASM (==> Kap. 3.3), so ist auch beim Einsatz am Frequenzumrichter generatorischer Betrieb möglich, wobei die Energie jedoch bei Verwendung eines Standardumrichters nicht ins Netz zurückgespeist werden kann, da der ungesteuerte Eingangsgleichrichter nur den Stromfluß in eine Richtung erlaubt. Eine Rückspeisung ins Netz ist nur unter Verwendung eines erheblich teureren 4Q-Stromrichters möglich und rentiert sich bei kleinen Leistungen i.a. nicht.

Um einen Motor auch mit einem Standardumrichter generatorisch abbremsen zu können, muß dafür gesorgt werden, daß die Bremsenergie im Antriebssystem selbst umgesetzt werden kann.

Dieses geschieht folgendermaßen:

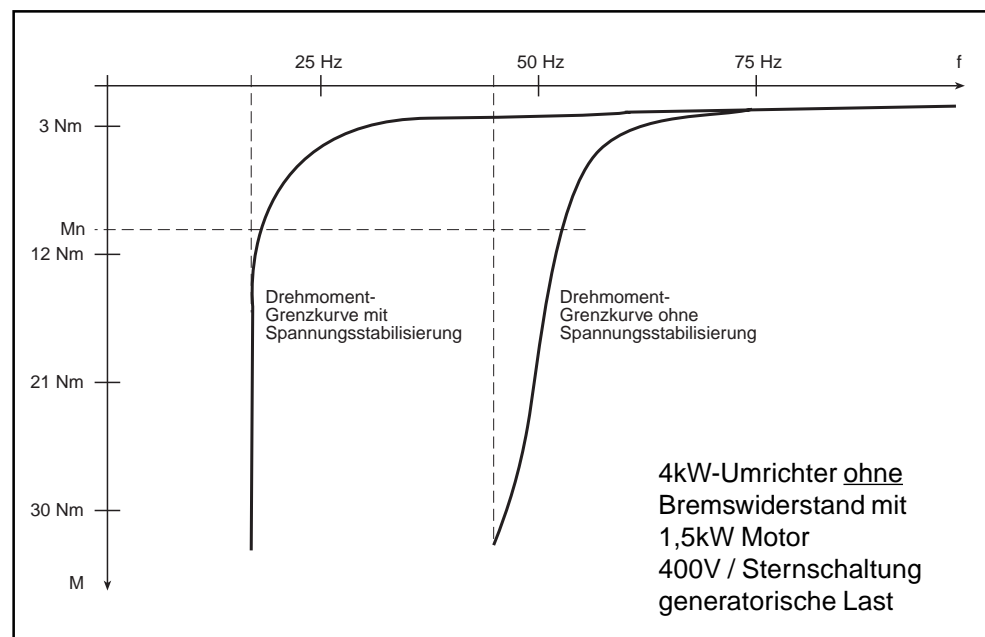
- generatorische Wirkleistung wird vom Motor in den Zwischenkreis des Umrichters zurückgespeist;
- am Zwischenkreiskondensator wird diese in Blindleistung umgewandelt und dem Motor als Magnetisierungsblindleistung wieder zur Verfügung gestellt;
- bei beiden Vorgängen tritt an den ohmschen Motorwiderständen Verlustleistung auf. Dieser Teil nimmt umgekehrt proportional zum Motorwirkungsgrad zu.

Daraus ergeben sich folgende Schlüsse:

Jede Antriebskombination aus Frequenzumrichter und Drehstromasynchronmotor hat ein spezifisches Eigenbremsmoment (systemeigene Verluste). Ohne Bremsmodul beträgt das mögliche Eigenbremsmoment bei kleinen Motoren (schlechter Wirkungsgrad) mind. 25 % von  $M_n$ , bei großen Motoren, z.B. 75 kW, mind. 5 % von  $M_n$ . Dieses Bremsmoment ist stark frequenzabhängig (siehe Abb. 50) und steigt zu kleinen Frequenzen hin stark an.

Ist ein größeres Bremsmoment erforderlich, so muß ein Bremsmodul eingesetzt werden. Dieses wandelt die in den Zwischenkreis zurückgespeiste Energie in Wärme um und verhindert somit die Überladung der Zwischenkreiskondensatoren und das daraus resultierende Abschalten des Frequenzumrichters mit der Fehlermeldung E.OP (Überspannung).

Abb. 50  
Typische  
Grenzkurven für  
OP-Fehler im  
Generatorbetrieb



Die erwähnten Bremsmomente von 5 % bis 25 % gelten nur für den Feldschwächbereich. Im Ankerstellbereich kann mit wesentlich höheren Bremsmomenten gerechnet werden, so daß der Einsatz eines Bremsmoduls häufig nur im Feldschwächbereich erforderlich ist.

### 7.5.1 Berechnung eines Bremswiderstandes

Zur Berechnung eines Bremswiderstandes kann nach folgendem Schema verfahren werden:

- |   |   |  |
|---|---|--|
| 1. Berechnung der max. Motordrehzahl $n_{max}$  | ↓ |  |
| 2. Berechnung des max. Bremsmomentes $M_{Bmax}$   | ↓ | $M_{Bmax} = \frac{J_{ges} \cdot (n_1 - n_2)}{9,55 \cdot t_B} - M_{Last}$   |
| 3. Berechnung der max. Bremsleistung $P_{Bmax}$   | ↓ | $P_{Bmax} = \frac{M_{Bmax} \cdot n_1}{9,55}$   |
| 4. Ermittlung des Reduktionsfaktors $k$ für Generatorbetrieb gemäß Tabelle 1                                | ↓ |  |
| 5. Berechnung der max. zurückgespeisten elektr. Bremsleistung unter Berücksichtigung der Motoreigenverluste | ↓ | $P_{elektr.} = P_{Bmax} - k \cdot P_{nMotor}$<br>$P_{elektr.} < 0$ bedeutet, daß keine elektr. Leistung zurückgespeist wird<br>$\implies$ kein Bremsmodul erforderlich |
| 6. Berechnung des ohmschen Widerstandes des Bremsmoduls   | ↓ | $R_B \leq \frac{U_B^2}{P_{elektr.}}$<br>$U_B = 760 \text{ V}$ für die 400 V-Klasse<br>$U_B = 380 \text{ V}$ für die 200 V-Klasse                                       |
| 7. Berechnung der Einschaltdauer (ED) des Bremswiderstandes   | ↓ | $ED = \frac{\text{Bremszeit } t_B}{\text{Zykluszeit } t_z}$ für $t_z \leq 120s$<br>$ED = \frac{\text{Bremszeit } t_B}{120 \text{ s}}$ für $t_z \leq 120s$              |
| 8. Ermittlung der ED-abhängigen Konstante $f_k$ gemäß Abb. 50   | ↓ |  |
| 9. Berechnung der Nennleistung des Bremswiderstandes  | ↓ | $P_{Bn} = \frac{P_{elektr.}}{f_k}$   |
| 10. Auswahl des Bremswiderstandes anhand von $R_B$ , $P_{Bn}$ sowie $P_{elektr.}$ (Spitzenleistung)         |   |  |

*Tabelle 1  
Reduktionsfaktor k  
für Generatorbetrieb  
von Asynchron-  
motoren*

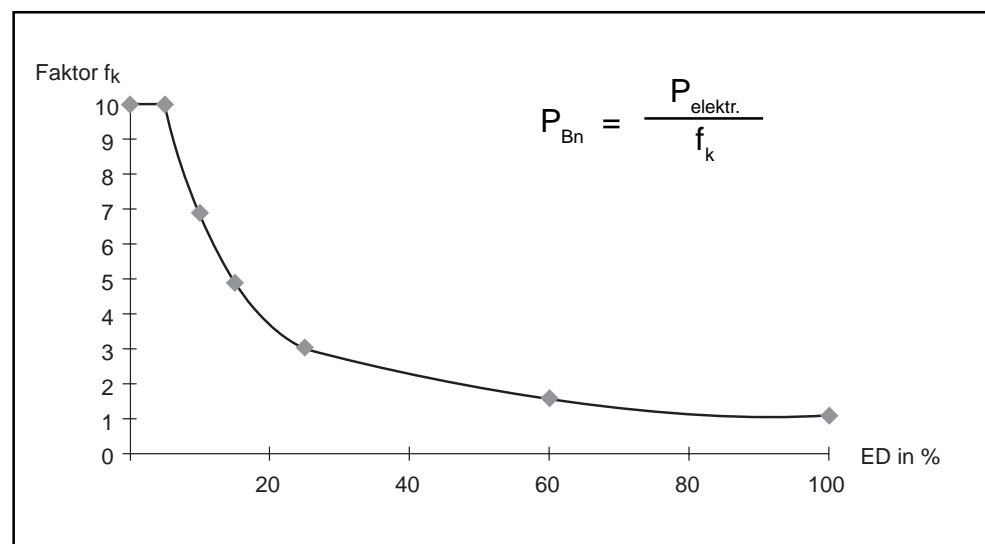
<b>Motorleistung</b>		<b>Faktor k</b>
bis	1,5 kW	0,25
2,2 ... 4	kW	0,20
5,5 ... 11	kW	0,15
15 ... 45	kW	0,08
>	45 kW	0,05

Die in der Tabelle angegebenen Faktoren sind lediglich Richtwerte und können, abhängig von Motorwirkungsgrad, Drehzahl und Umrichter-Ausgangsspannung, stark schwanken.

Der Faktor k nimmt zu bei:

- schlechterem Motorwirkungsgrad
- geringerer Drehzahl
- höherer Umrichter-Ausgangsspannung

*Abb. 51  
ED-abhängige  
Konstante  $f_k$  von  
Bremswiderständen*



Im generatorischen Betrieb muß ein weiterer Effekt beachtet werden:

Der Zwischenkreis wird auf eine wesentlich höhere Spannung aufgeladen als im motorischen Betrieb. Diese Spannung kann maximal den OP-Level erreichen bzw. bei Einsatz eines Bremsmoduls den GTR7-Level, kann also je nach Gerätetyp um Faktor 1,2 . . . 1,5 erhöht sein. Aufgrund dieser höheren Spannung wird der Motor im Ankerstellbereich übermagnetisiert; der Feldschwächbereich beginnt erst bei deutlich höheren Frequenzen (ca. 60 . . . 75 Hz).

Durch die Übermagnetisierung nimmt der Motor einen erheblich höheren Magnetisierungsstrom als im Nennbetrieb auf; der Frequenzumrichter muß auf diesen erhöhten Strom dimensioniert werden, um ein Abschalten mit OC zu vermeiden.

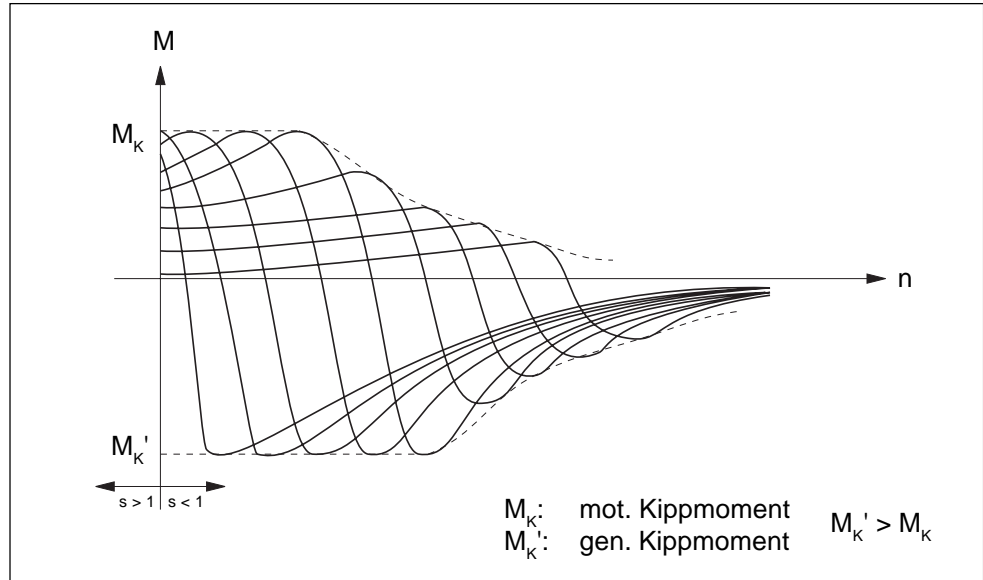
Dieser negative Effekt kann durch Aktivierung der Funktion „Ausgangsspannungsstabilisierung“ vermieden werden (geregelter Ausgangsspannung, unabhängig von Schwankungen der Zwischenkreis-spannung).

Bei einer erhöhten Ausgangsspannung liegt auch das generatorische Kippmoment deutlich höher, so daß das Bremsmoment deutlich über dem Beschleunigungsmoment liegen darf, sofern für eine vollständige Umsetzung der Bremsenergie in Motor bzw. Bremswiderstand gesorgt ist und sowohl Motor als auch Umrichter strommäßig nicht überlastet werden.



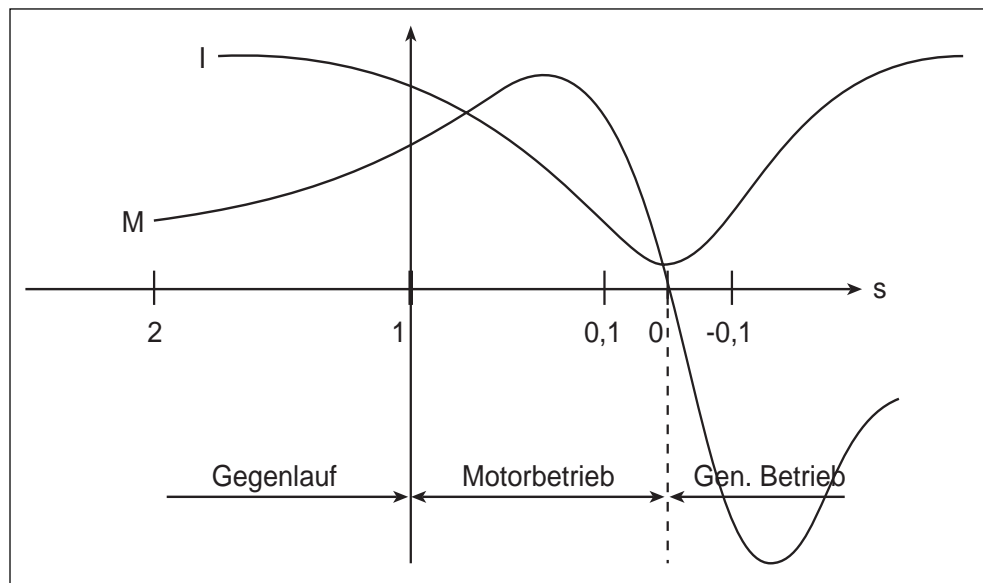
Die vollständigen Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien nehmen damit folgende Gestalt an:

Abb. 52  
Drehzahl-Drehmoment-Kennlinien  
im motorischen  
u. generatorischen  
Betrieb



Der Bereich  $s > 1$  wird als *Gegenlauf* bezeichnet, da Drehrichtung des Motors und Drehfeld entgegengesetztes Vorzeichen aufweisen. Obwohl auch hierbei ein Bremsmoment erzeugt wird, muß dieser Betriebsfall bei Umrichterbetrieb aufgrund der hohen Ströme vermieden werden. (==> Abb. 53).

Abb. 53  
Betriebsbereiche  
des Motors

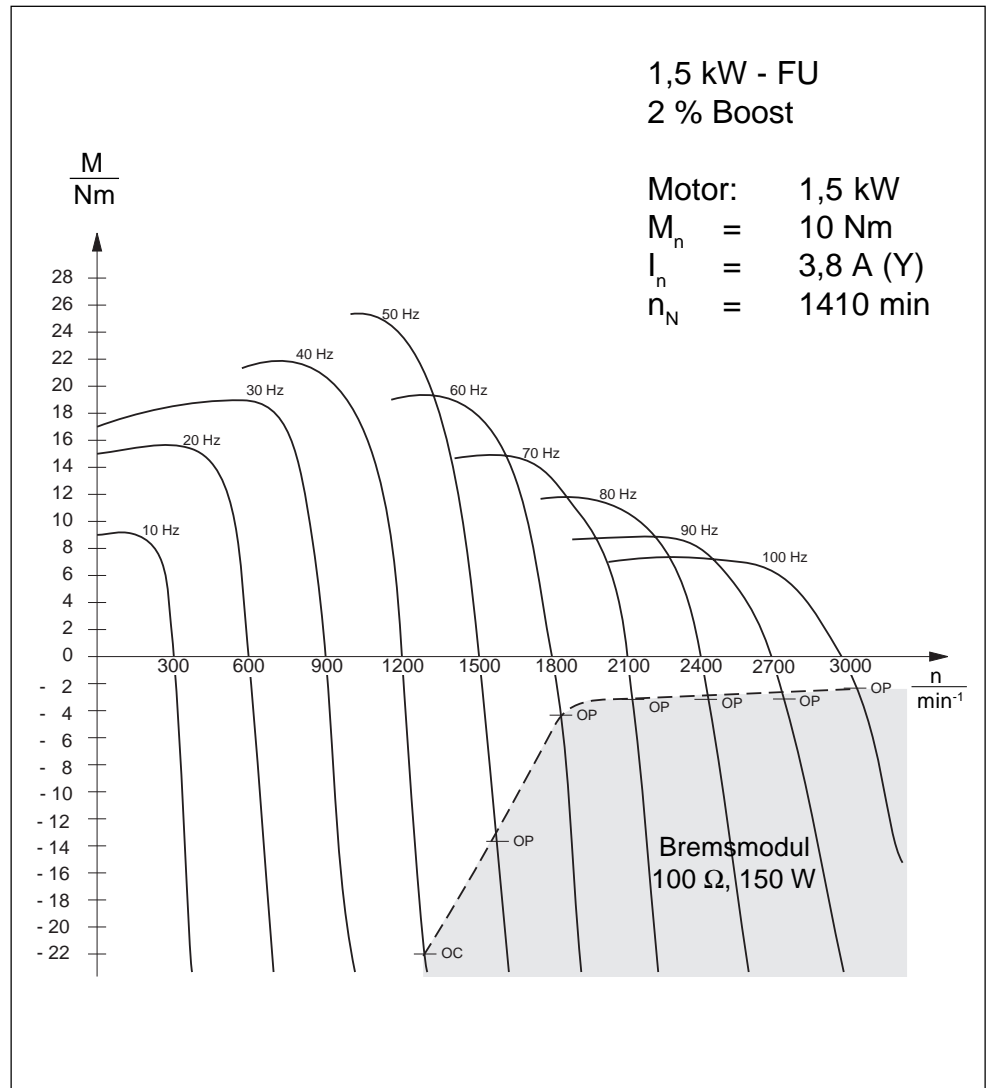


## Messungen zum Verhalten eines Motors bei Umrichterbetrieb

$M > 0$  = Motorbetrieb

$M < 0$  = Generatorbetrieb

Abb. 54

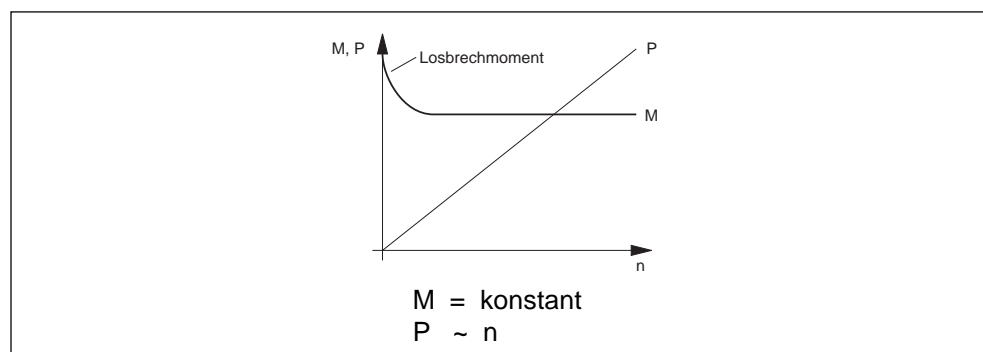


**7.6 Lastkennlinien / Abkippen des Antriebes** In der Praxis treten in Abhängigkeit vom Einsatzfall die unterschiedlichsten Belastungskennlinien auf, bei denen sich folgende vier Grundtypen unterscheiden lassen:

- **Konstantes Moment über der Drehzahl**

- Tritt auf bei:
- Hebezeugen
  - Förderanlagen (Fließbänder)
  - Walzwerken
  - Kolbenpumpen

Abb. 55

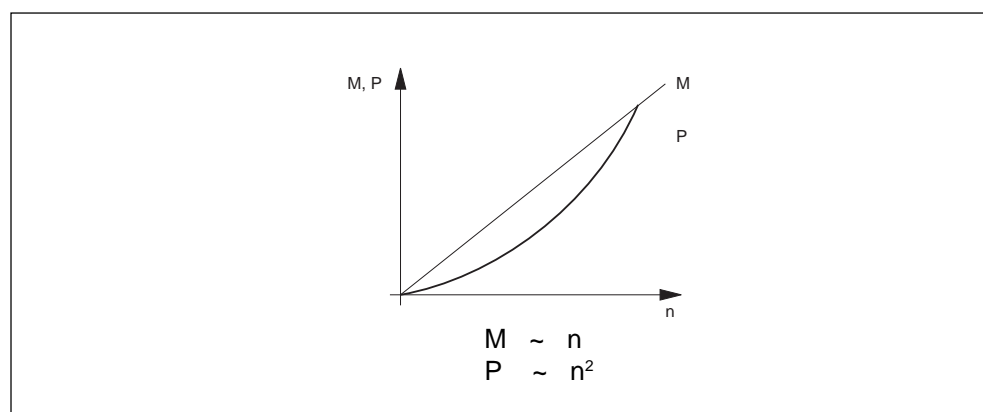


Bei der Dimensionierung des Umrichters muß das u. U. recht hohe Losbrechmoment beachtet werden, das der Frequenzumrichter im Rahmen seiner Überlastreserven bewältigen muß. Soll der Antrieb auch bei kleinen Drehzahlen im Dauerbetrieb arbeiten können, so ist der Motor fremd zu belüften oder das Drehmoment zu reduzieren.

- **Proportional zur Drehzahl ansteigendes Drehmoment**

- Tritt auf bei:
- Papierverarbeitungsmaschinen
  - Wirbelstrombremsen

Abb. 56

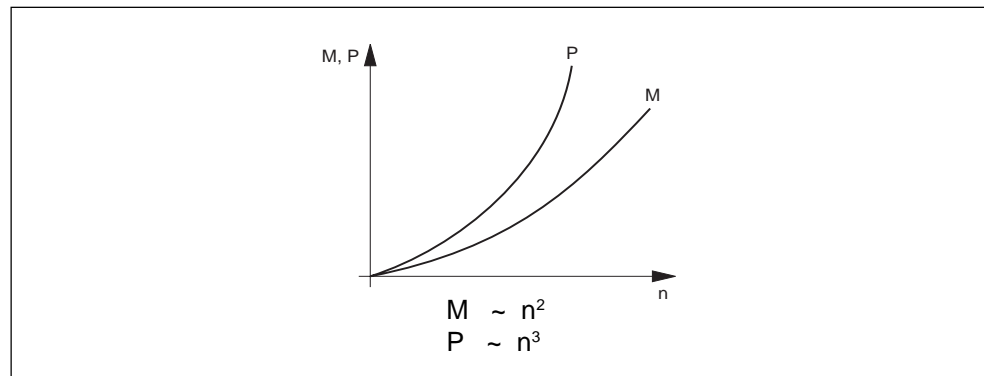


Die Dimensionierung des Umrichters richtet sich nach der maximalen Antriebsdrehzahl; Losbrechmomente sind i.a. zu vernachlässigen.

- **Quadratisch mit der Drehzahl ansteigendes Lastmoment**

- Tritt auf bei:
- Lüftern
  - Kreiselpumpen
  - Zentrifugen
  - Rührwerken

Abb. 57

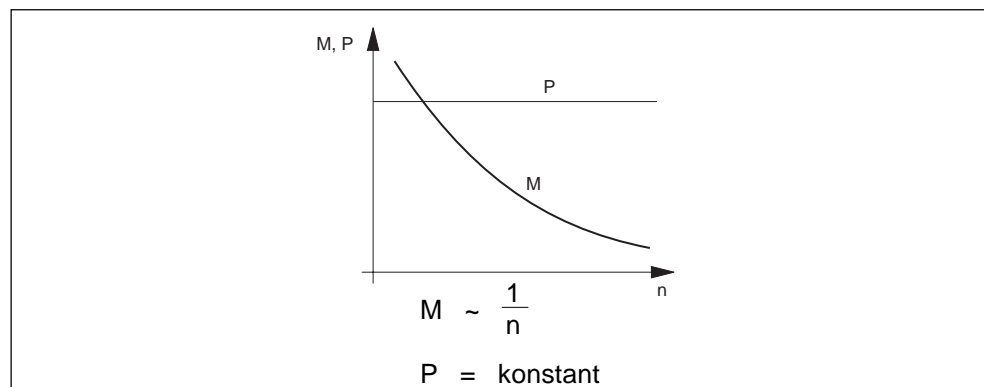


Bei dieser Kennlinienart ist die Dimensionierung des Umrichters ebenfalls auf die maximale Drehzahl vorzunehmen; Losbrechmomente treten wiederum kaum auf. Die Ausgangsspannung des Umrichters kann u. U. im unteren Teillastbereich abgesenkt werden, um die Motorverluste zu reduzieren (Energiesparfunktion); ein Betrieb im Feldschwächbereich ist wegen des hier abnehmenden Motormomentes und des gleichzeitig ansteigenden Lastmomentes nicht üblich.

- **Konstante Leistung über der Drehzahl**

- Tritt auf bei:
- Wicklern
  - Bohrmaschinen
  - spanabhebenden Werkzeugmaschinen

Abb. 58



Die Dimensionierung des Frequenzumrichters hat auf das Drehmoment bei der minimalen Drehzahl zu erfolgen. Sollen niedrige Drehzahlen im Dauerbetrieb gefahren werden, ist eine Fremdbelüftung des Motors erforderlich. Der Betrieb im Feldschwächbereich ist i.a. unkritisch.

Die vier vorgestellten Kennlinientypen treten in der Praxis selten in idealer Form auf, können jedoch für überschlägige Berechnungen zugrunde gelegt werden. Bei der Bemessung eines Umrichterantriebes sollte immer auf eine ausreichende Sicherheitsreserve zum Motorkippmoment geachtet werden, um auch kurzzeitige Laststöße oder Spannungseinbrüche auffangen zu können. Dabei muß beachtet werden, daß das Kippmoment quadratisch von der Motorspannung abhängt, die wiederum von Netzspannungsschwankungen und Spannungsabfällen an Leitungen und Filtern beeinflusst wird.

Motoren müssen nach VDE 0530 ein Kippmoment von mindestens 180 % des Nennmomentes aufweisen (bei Netzbetrieb). Um bei der Auslegung des Antriebes auf der sicheren Seite zu liegen, sollte mit einer Umrichter-Ausgangsspannung gerechnet werden, die im ungünstigsten Fall (Netzspannungsschwankungen und Spannungsabfälle berücksichtigt) nur etwa 80 % der Nennspannung beträgt.

**Beispiel:**

$$\frac{M_K}{M_{Kn}} = \left( \frac{U}{U_n} \right)^2 = (0,8)^2 = 0,64$$

$$\implies M_K = 0,64 \cdot M_{Kn}$$

mit  $M_{Kn} \geq 1,8 \cdot M_n$  folgt daraus

$$\implies M_K \geq 0,64 \cdot 1,8 \cdot M_n \geq 1,15 \cdot M_n$$

$M_n$ : Motornennmoment

$M_{Kn}$ : Nennkippmoment lt. Motorkatalog

$U_n$ : Netzennspannung

$U$ : Umrichterspannung

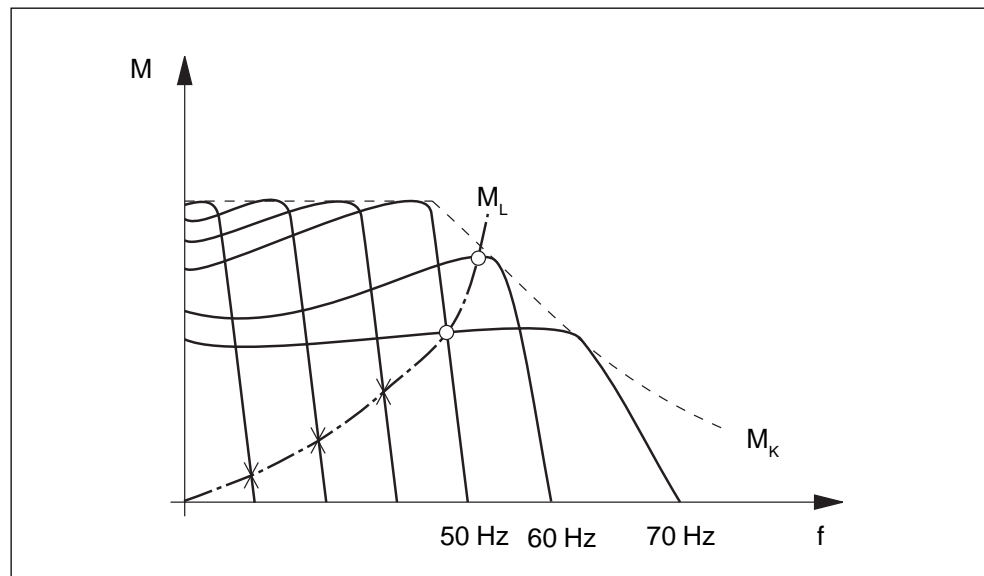
Um die gewünschten Sicherheitsreserven zum Kippmoment einzuhalten, dürfte der Motor in diesem Fall nur mit etwa 95 % seines Nennmomentes belastet werden. Es sind daher stets Motoren mit großem Verhältnis

$$\frac{M_K}{M_n}$$

vorzuziehen, sofern der Motor nicht ohnehin überdimensioniert wird.

Der Schlupf und damit die tatsächliche Antriebsdrehzahl lässt sich über den Schnittpunkt der jeweiligen Motorkennlinie mit der Lastkennlinie ermitteln (Abb. 59).

Abb. 59  
Schnittpunkt von  
Last- und Motor-  
kennlinien bei Um-  
richterbetrieb (Bsp.:  
Ventilatorantrieb)



- X: zulässige Betriebspunkte
- 0: Betriebspunkte bei *abgekipptem* Antrieb (unzulässig)

Wird das Lastmoment höher als das Kippmoment des Motors, so sinkt die Motordrehzahl unter die Kippdrehzahl ab (im Extremfall bis auf Null); der Antrieb *kippt ab*. Damit verbunden ist ein hoher Schlupf und ein großer Motorstrom, der u.U. zum Abschalten des Umrichters führt. Selbst wenn der Frequenzumrichter den Strom bewältigen kann, würde ein Abkippen des Antriebes nach kurzer Zeit zur thermischen Zerstörung des Motors führen. Durch die Aktivierung von Schutzfunktionen im Frequenzumrichter kann ein Abkippen des Antriebes bei bestimmter Lastcharakteristik ( $M \sim n$ ,  $M \sim n^2$ ) sowie beim Hochlauf i.a. verhindert werden (==> Kap. 7.8).

## 7.7 Dynamische Vorgänge (Beschleunigen / Verzögern)

Die Hauptaufgabe des Umrichters ist die Drehzahlverstellung von Antrieben. Um einen Antrieb auf eine höhere Drehzahl zu beschleunigen, ist vom Motor neben dem statischen Lastmoment zusätzlich ein dynamisches Moment zur Beschleunigung des Massenträgheitsmomentes des Antriebes aufzubringen.

Dabei gilt die Beziehung:

Gleichung 26 
$$M_{\text{Mot}} = M_L + M_{\text{dyn}} \quad \text{mit} \quad M_{\text{dyn}} = \frac{1}{9,55} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt}$$

$J$  Massenträgheitsmoment des Antriebes (auf die Motorwelle bezogen) in  $\text{kgm}^2$

$\frac{dn}{dt}$  Drehzahländerung pro Zeiteinheit in  $\frac{\text{min}^{-1}}{\text{s}}$

$M_L$  statisches Lastmoment (auf die Motorwelle bezogen) in Nm

$M_{\text{Mot}}$  vom Motor abzugebendes Moment in Nm

$M_{\text{dyn}}$  dynamisches Moment

Aus Gl. 26 geht hervor, durch welche Einflüsse das an der Motorwelle abverlangte Drehmoment bei Beschleunigungsvorgängen ansteigt:

- höheres statisches Lastmoment,
- höheres Massenträgheitsmoment,
- größerer Drehzahlsollwertsprung ( $dn$ )
- kürzere Beschleunigungszeit ( $dt$ )

Bei der Einstellung des Drehzahlsollwertes und der Beschleunigungszeit muß beachtet werden, daß ein Hochlauf auf die Soll Drehzahl nur dann möglich ist, wenn in allen Betriebspunkten die Beziehung  $M_{\text{Mot}} \leq M_{\text{Kipp}}$  gilt und der Motorstrom nicht größer als der max. Umrichterstrom wird. Anderenfalls kippt der Antrieb ab oder der Umrichter geht auf Überstrom-Fehler (OC) oder in die Strombegrenzung. Dabei sollten auch bei dynamischen Vorgängen ausreichende Sicherheitsreserven eingehalten werden.

Ferner ist zu beachten, daß Belastungen im Überlastbereich (oberhalb des Umrichternennstromes) zum OL-Fehler führen können, sofern die Überlast die zulässige Dauer überschreitet oder sich zu dieser Dauer aufaddiert (z.B. bei Taktantrieben).

Beim Verzögern eines Antriebes gilt ähnliches wie beim Beschleunigen, jedoch muß unterschieden werden, ob das Lastmoment die Verzögerung unterstützt oder behindert.

Entsprechend gilt:

Gleichung 27 
$$M_{\text{Mot}} = \frac{1}{9,55} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt} + M_L$$
 Lastmoment behindert die Verzögerung

Gleichung 28 
$$M_{\text{Mot}} = \frac{1}{9,55} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt} - M_L$$
 Lastmoment unterstützt die Verzögerung

Am Beispiel des Hebens und Senkens einer Last seien diese Zusammenhänge veranschaulicht.

Abb. 60

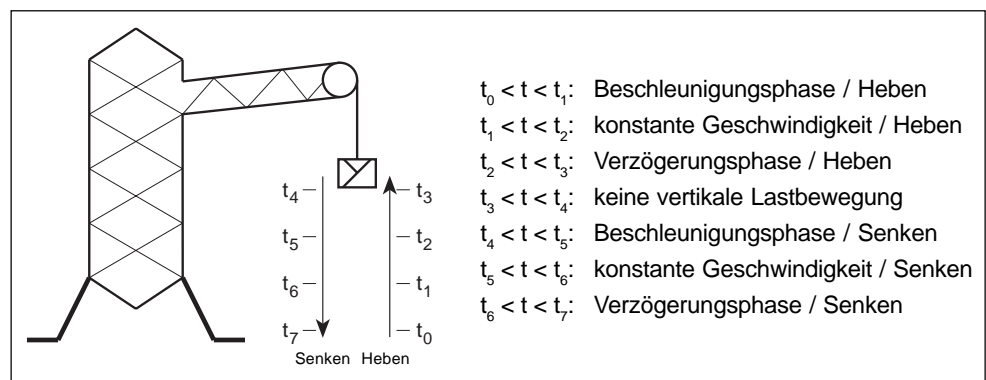
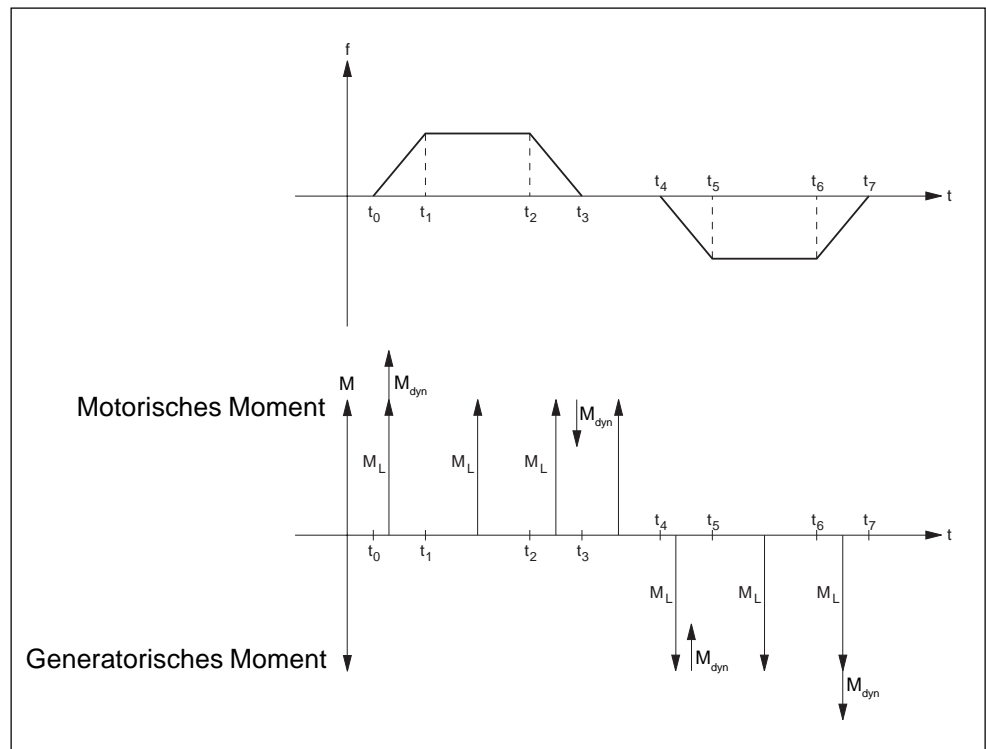


Abb. 61



Gleichung 28 gilt somit für  $t_2 < t < t_3$  und  $t_4 < t < t_5$

Gleichung 27 gilt somit für  $t_0 < t < t_1$  und  $t_6 < t < t_7$



**7.8 Bedeutung der Schutzfunktionen (Keep on running)**

FUNKTION	ANWENDUNG	WIRKUNGSWEISE
1. Rampenstop	Zu hohe Stromaufnahme des Antriebes während der Beschleunigungsphase.	Bei Erreichen eines einstellbaren Stromlevels wird die Rampe solange unterbrochen, bis der Strom wieder abgesunken ist.
2. Verzögerungsstop	Generatorische Überlast des Antriebes während der Verzögerungsphase.	Bei Erreichen eines einstellbaren Zwischenkreis-Spannungslevels wird die Verzögerung solange unterbrochen, bis dieser Level wieder unterschritten wird.
3. Stromgrenze bei Konstantlauf	Überlastung des Antriebes während des Dauerbetriebs.	Veränderung der Ausgangsfrequenz bei Erreichen eines einstellbaren Stromlevels. Nach Beseitigung der Überlastung wird die Ausgangsfrequenz wieder auf den Sollwert gefahren.
4. Hardware-Strombegrenzung	Sehr schnelles Abfangen und Ausregeln hoher Stromspitzen (z. B. bei Schalten am Umrichter-ausgang).	Bei Erreichen des max. zul. Umrichterstromes in einer Ausgangsphase werden die Ansteuersignale der jeweiligen Leistungstransistoren kurzzeitig gesperrt.
5. Drehzahlsuche	Zuschalten des Frequenzumrichters auf einen laufenden Motor.	Nach Aktivierung dieser Funktion werden die Ausgangsfrequenz und die Rotordrehfrequenz des Motors synchronisiert (Einfangen). Der Motor wird anschließend wieder auf den eingestellten Sollwert beschleunigt.
6. Automatischer Wiederanlauf nach Fehlern	Spannungseinbruch, Spannungsausfall, Störungen.	Ermöglicht wird ein automatischer Neustart des Antriebes nach Beseitigung einer Störung. Da beim Neustart der Motor noch nachlaufen kann, ist u. U. eine Kombination mit der Drehzahlsuche sinnvoll.

**Zu 1. Rampenstop**

Die Schutzfunktion Rampenstop ist besonders dann sinnvoll einzusetzen, wenn ein Antrieb mit unbekannter oder stark schwankender Last beschleunigt werden soll. Kann der Antrieb z.B. bei zu großer Belastung das Beschleunigungsmoment nicht aufbringen, so steigt der Schlupf und damit auch der Strom stark an; der Frequenzumrichter erkennt dies und hält bei einem vorgegebenen Stromlevel die Beschleunigungsrampe an, bis der Schlupf so weit abgesunken ist, daß der Strom wieder unterhalb des eingestellten Stromlevels liegt. Dann wird die Beschleunigungsrampe fortgesetzt usw. (==> Abb. 62a).

Auch beim Schalten auf einen laufenden Motor kann die Rampenstop-Funktion u.U. ein Abschalten des Umrichters verhindern, sofern die eingestellte Beschleunigungszeit nicht zu klein ist. In diesem Fall liegt zunächst ein hoher Schlupf vor ( $f_{FU}$  klein,  $n_{Motor}$  groß), so daß die Stromgrenze sehr schnell erreicht wird. Der Motor wird nun mit dem eingestellten Stromlevel fast bis zum Stillstand abgebremst und dann wieder mit der Rampe beschleunigt.

Abb. 62a  
Rampenstop-  
Funktion

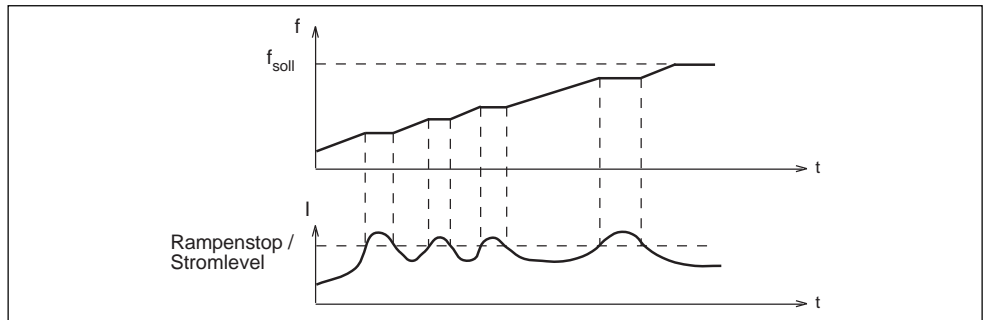


Abb. 62 b  
Funktion von  
Rampenstop  
und Stromgrenze

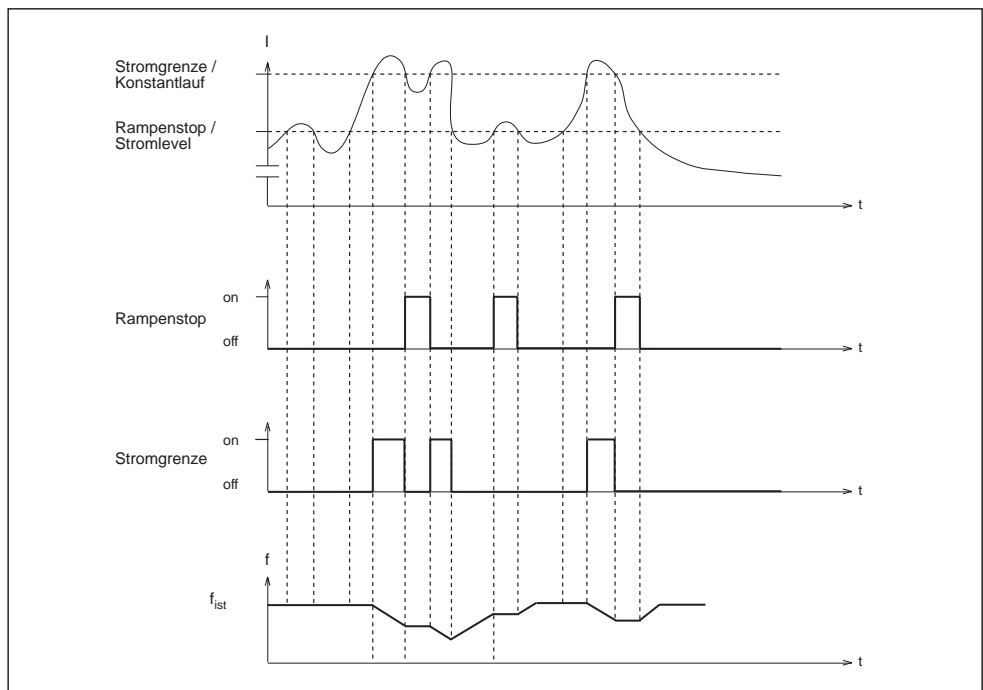
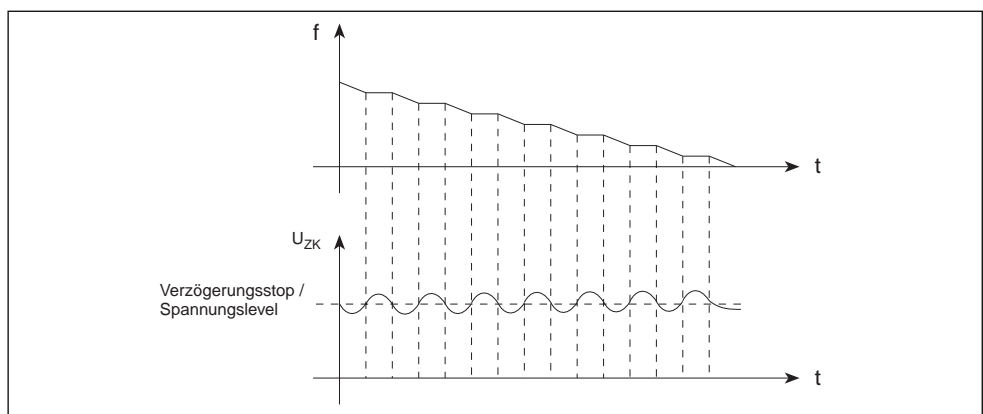


Abb. 62c  
Wirkungsweise  
der Verzögerungs-  
stop-Funktion



**Zu 2.  
Verzögerungs-  
stop**

Beim Verzögern speist der Motor Energie in den Frequenzumrichter zurück (generatorischer Betrieb), was zur Aufladung des Zwischenkreiskondensators führt. Wird die zurückgespeiste Leistung zu groß (kurze Verzögerungszeiten, große Schwungmassen) oder wird die im Motor umgesetzte Verlustleistung zu klein (bes. bei Betrieb im Feldschwäcbereich), so wird der Zwischenkreis auf unzulässig hohe Spannungen aufgeladen; der Umrichter schaltet mit Überspannungsfehler E.OP ab.

Dieses Abschalten wird durch ein rechtzeitiges Unterbrechen der Verzögerungsrampe vermieden (--> Abb. 62c). Hierdurch wird der generatorische Schlupf und damit die Rückspeiseleistung begrenzt. Die Schutzfunktion Verzögerungsstop eignet sich besonders, wenn mit schwankenden oder unbekanntenen Lasten bzw. Trägheitsmomenten während der Verzögerung gerechnet werden muß.

**Zu 3.  
Stromgrenze  
bei Konstant-  
lauf**

Bei einer Überlastung des Antriebs im Dauerbetrieb steigt ebenfalls der Schlupf und damit der Strom an. Um der Gefahr eines OC-Fehlers vorzubeugen, muß z.B. die Ausgangsfrequenz des Frequenzumrichters und damit auch der Schlupf verringert werden. Dieses wird durch die Funktion „Stromgrenze bei Konstantlauf“ erreicht, wobei je nach Charakteristik der Lastkennlinie eine Absenkung oder Anhebung der Frequenz in einer programmierbaren Zeit erfolgt. Bei schnellen Lastsprüngen sollte diese Zeit nicht zu groß gewählt werden, um noch einen ausreichenden Schutz zu gewährleisten.

Die Wirkungsweise der Stromgrenze ist folgendermaßen an die Lastkennlinie des jeweiligen Antriebes anzupassen (vgl. auch Kap. 7.6):

- höheres Lastmoment bei kleineren Drehzahlen  
==> Erhöhung der Frequenz bei Erreichen der Stromgrenze
- geringeres Lastmoment bei kleineren Drehzahlen  
==> Verminderung der Frequenz bei Erreichen der Stromgrenze

**Zu 4.  
Hardware-  
Strombe-  
grenzung**

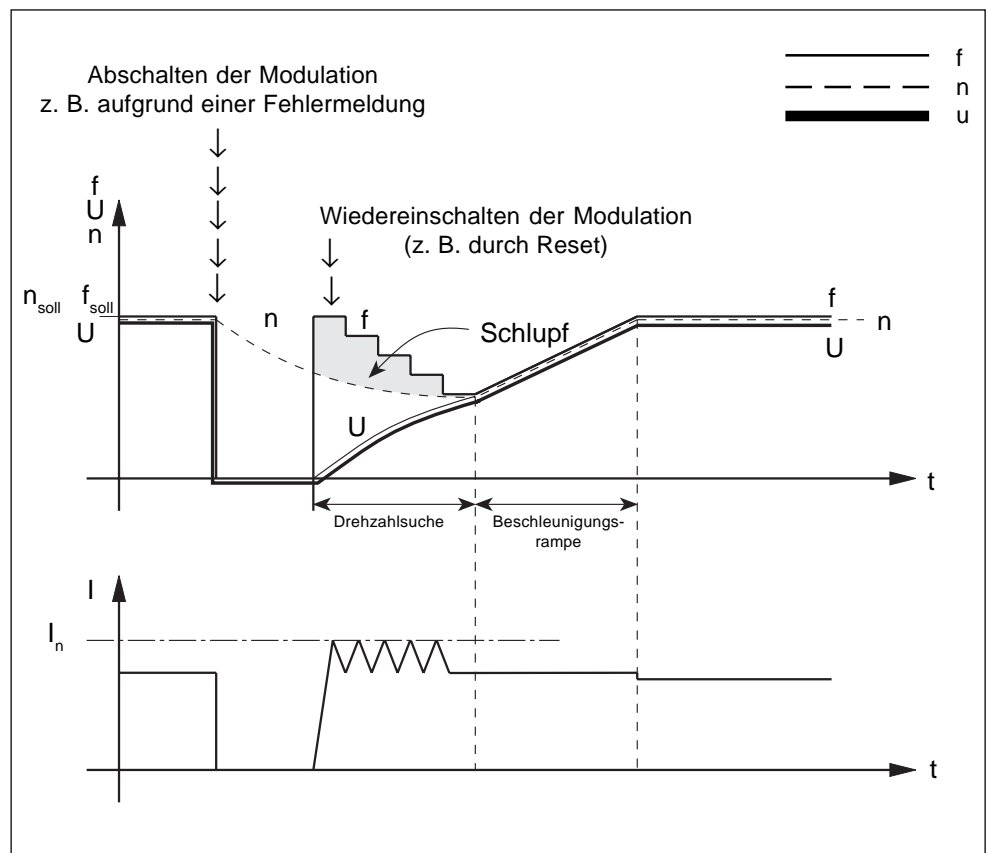
Bei einigen Anwendungsfällen lassen sich kritische Stromspitzen nicht vermeiden, z. B. beim Zuschalten von Motoren am Umrichterausgang oder extrem kurzen Rampenzeiten. In diesen Fällen sind sowohl die Rampenstop-Funktion als auch die Stromgrenze bei Konstantlauf aufgrund der Software-Laufzeiten nicht schnell genug, um den Stromanstieg zu begrenzen; der Umrichter würde trotz dieser Funktionen mit dem Fehler OC abschalten. Nur eine sofortige hardwaremäßige Sperrung der jeweils überlasteten Endstufen-Transistoren innerhalb weniger  $\mu\text{s}$  kann diese Fehlermeldung verhindern; genau dieses leistet die Hardware-Strombegrenzung. Zu beachten ist die mit Auslösung dieser Funktion reduzierte Ausgangsspannung und das dadurch reduzierte Drehmoment, verbunden mit zusätzlichen Geräuschen im Motor.

**Zu 5.  
Drehzahl-  
suche**

Eine elegante Möglichkeit, auf einen laufenden Motor zu schalten, stellt die Funktion „Drehzahlssuche“ dar. Dabei sucht sich der Frequenzumrichter selbständig die aktuelle Motordrehzahl und beschleunigt anschließend anhand seiner eingestellten Rampenzeit auf den Sollwert. Der Synchronisiervorgang läuft folgendermaßen ab (==> Abb. 63):

- Beginn der Drehzahlssuche beim eingestellten Sollwert;
- Ausgangsspannung wird nur so weit angehoben, daß max. Nennstrom fließt;
- ist der Nennstrom erreicht, so wird die Frequenz stufenweise zurückgenommen und die Spannung erhöht, bis der zur Frequenz passende Spannungswert erreicht wird;
- von diesem Punkt aus wird mit der eingestellten Rampenzeit wieder beschleunigt.

Abb. 63  
Drehzahlssuche



Je nach Einstellung am Frequenzumrichter kann die Drehzahlsuche durch folgende Schaltvorgänge ausgelöst werden:

- Reglerfreigabe,
- Reset von Fehlern,
- Einschalten der Umrichterversorgung (Power on),
- Automatischer Wiederanlauf nach Fehlern.

Die Drehzahlsuche sucht die Drehzahl nur in der am Frequenzumrichter gesetzten Drehrichtung. Stimmt diese mit der aktuellen Drehrichtung des Motors nicht überein, kommt es nach Beendigung der Funktion u.U. zu einem OC-Fehler, sofern der Antrieb noch in die entgegengesetzte Richtung rotiert und keine weitere Schutzfunktion - z.B. Rampenstop - die Beschleunigungsrampe anhält (==> Abb. 64).

Abb. 64  
Drehzahlsuche bei falsch gesetzter Drehrichtung ohne Schutzfunktion Rampenstop

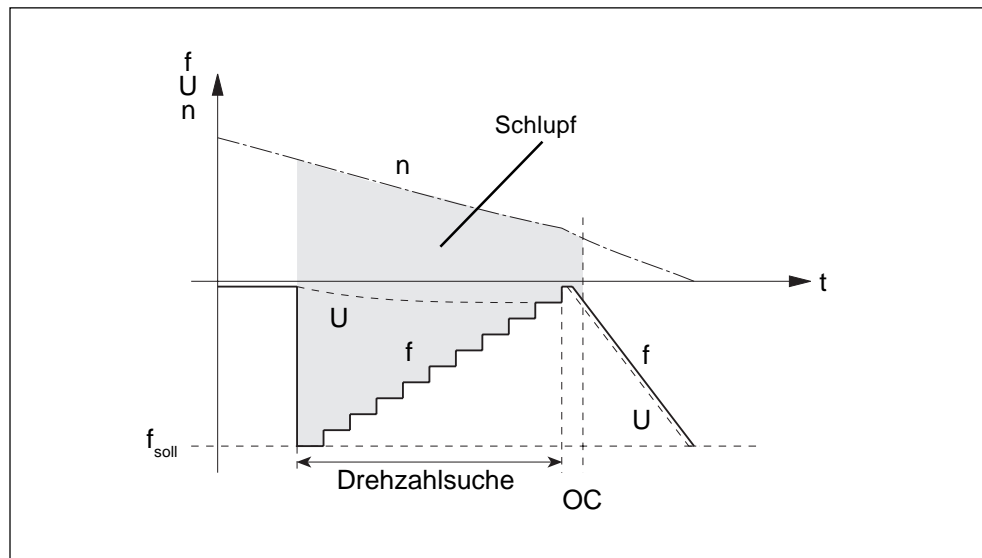
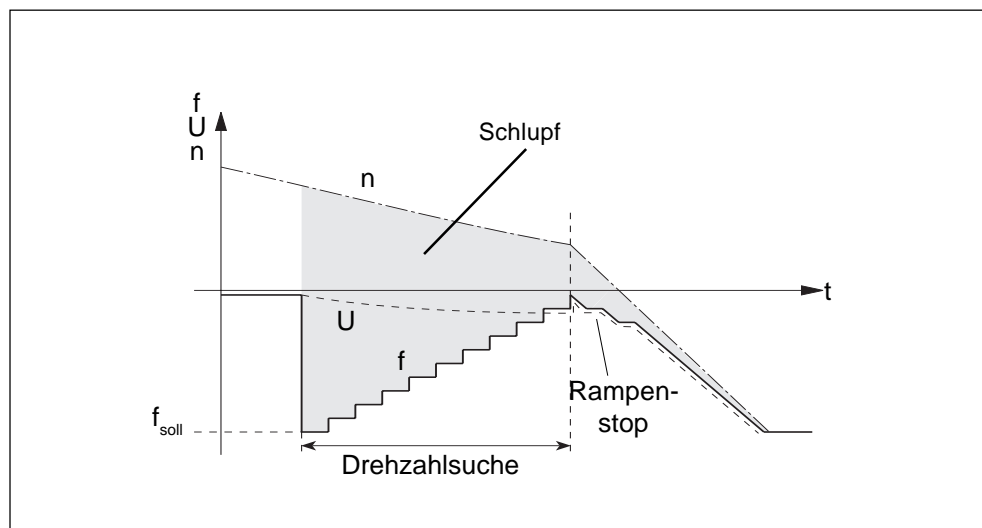


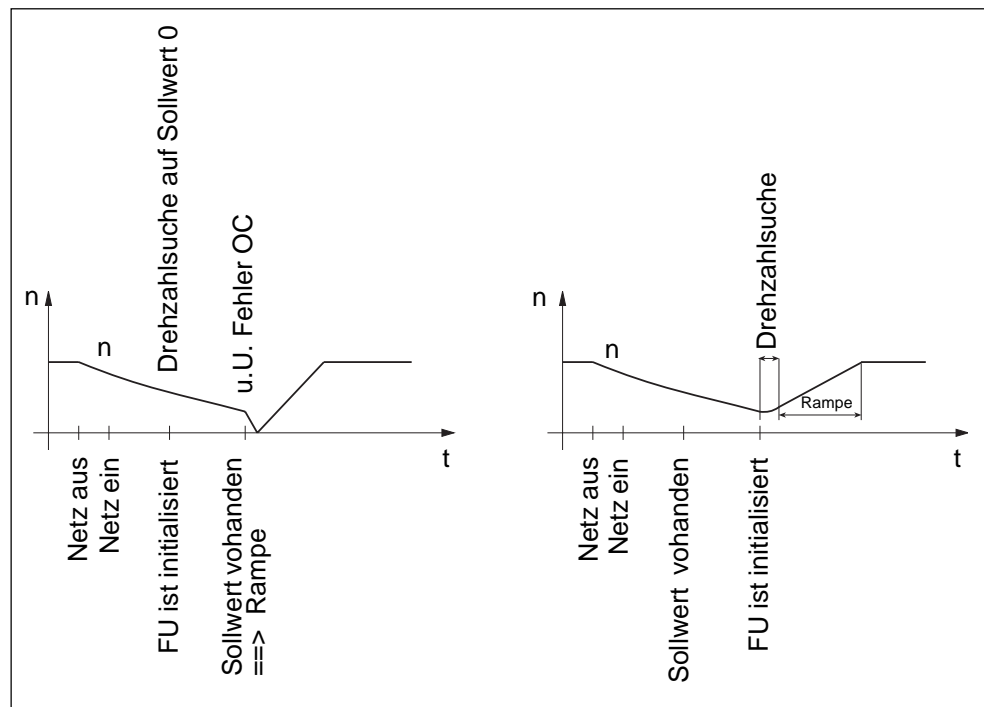
Abb. 65  
Drehzahlsuche bei falsch gesetzter Drehrichtung mit zusätzlich aktivierter Rampenstop-Funktion



Da die Funktion „Drehzahlsuche“ die Motordrehzahl immer unterhalb der Sollfrequenz sucht, muß der Sollwert unbedingt über der Ist-drehzahl liegen. Aus diesem Grunde darf die Drehzahlsuche für Antriebe, bei denen die Drehzahl nach Abschalten der Modulation weiter ansteigt oder sofort wieder volles Drehmoment und damit volle Motorspannung benötigt wird (z. B. bei Hubwerken), nicht angewendet werden.

Bei übergeordneten Steuerungen (z.B. SPS) muß sichergestellt sein, daß nach einem Spannungsausfall der Sollwert vor Abschluß der Initialisierungsphase des Frequenzumrichter anliegt, da der Frequenzumrichter anderenfalls einen Sollwert  $f_{\text{soll}} = 0$  registrieren und die Phase der Drehzahlsuche sofort wieder verlassen würde (==> Abb. 66).

Abb. 66  
Verhalten bei  
Netzausfall  
und aktivierter  
Drehzahlsuche



Wird während der Drehzahlsuche die Drehrichtung um- oder weggeschaltet, so wird die Drehzahlsuche erst abgeschlossen und anschließend die Rampe gefahren.

### Zu 6. Automatischer Wiederanlauf nach Fehlern

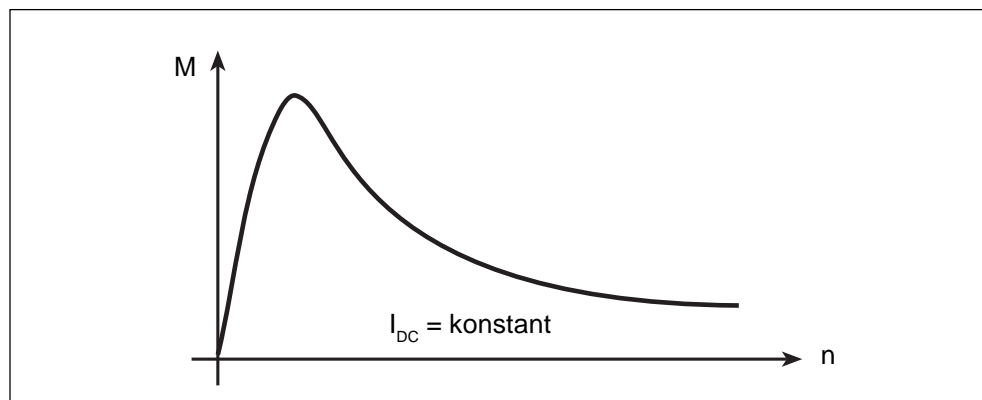
Wenn ein kurzzeitiger Spannungseinbruch bzw. -ausfall oder sonstige Störungen für das Antriebssystem unkritisch sind, kann durch die Aktivierung dieser Funktion ein sofortiger Wiederanlauf ohne externen Neustart (Reset) erreicht werden, wobei der frei auslaufende Motor z. B. durch Aktivierung der Funktion Drehzahlsuche wieder eingefangen werden kann. Hierdurch wird ein kontinuierlicher Prozeßablauf aufrechterhalten.

Die Möglichkeiten zur Einstellung der Funktion „Automatischer Wiederanlauf“ sind steuerkartenabhängig (siehe Betriebsanleitung).

## 7.9 Gleichstrom- (DC-)Bremsung

Zur Realisierung kurzer Verzögerungszeiten bei großen Schwungmassen und hohen Drehzahlen unter Einsparung eines Bremsmoduls ist es sinnvoll, den Motor nicht generatorisch mit Hilfe der Verzögerungsrampe abzubremsen, sondern stattdessen eine Gleichspannung auf die Motorwicklung zu geben. Bei dieser sog. DC-Bremsung wird nach dem Prinzip der Wirbelstrombremse ein Bremsmoment erzeugt, dessen Verlauf in Abhängigkeit von der Drehzahl in Abb. 67 dargestellt ist.

Abb. 67  
 DC-Bremsung /  
 Verlauf des  
 Bremsmomentes  
 über der Drehzahl



Bei gleichem Strom ist jedoch das erzielbare Bremsmoment bei generatorischer Bremsung über die Verzögerungsrampe im Ankersstellbereich größer als bei DC-Bremsung. Während bei generatorischer Bremsung nur die kinetische Energie der rotierenden Massen im Motor und im Bremswiderstand umgesetzt werden muß, wird dem Motor bei DC-Bremsung zusätzlich noch Energie aus dem Umrichter zugeführt. Dadurch verschlechtert sich die Energiebilanz, und der Motor wird stärker erwärmt (wichtig bei häufigen Bremsvorgängen!). Da bei der DC-Bremsung jedoch die gesamte Bremsenergie im Motor umgesetzt wird und keine Rückspeisung in den Zwischenkreis erfolgt, besteht hier nicht die Gefahr eines OP-Fehlers.

Eine wichtige Zeitkonstante, die in die DC-Bremszeit eines Antriebes eingeht, ist die sog. Base-Block-Zeit, die zwischen Aufruf und Auslösung der DC-Bremsung verstreicht. Während dieser Zeit, die je nach Antriebsleistung zwischen 150 ms bei 0,37 kW und einigen Sekunden bei 200 kW liegt, werden alle Endstufentransistoren gesperrt, um eine Entregung der Motorwicklung über den Zwischenkreis abzuwarten. Erst danach darf wieder ein Transistor ohne die Gefahr eines hohen Kurzschlußstromes durchgeschaltet werden (Abb.68). Da dieser Kurzschlußstrom nicht über die Stromerfassung im Zwischenkreis fließt, würde in diesem Fall kein Schutz der Endstufen gegen Überstrom bestehen; es könnte zur Zerstörung des Endstufenmoduls kommen. Aus diesem Grunde ist eine ausreichend große Base-Block-Zeit für alle Fälle, bei denen die Modulation abgeschaltet wird, unbedingt einzuhalten (z.B. bei Auftreten einer Fehlermeldung, Reglerfreigabe, DC-Bremsung). Diese Base-Block-Zeit ist ab Werk fest eingestellt.

Abb. 68  
Zur Erläuterung der  
Base-Block-Zeit

Abb. 68a  
Motorischer  
Betrieb

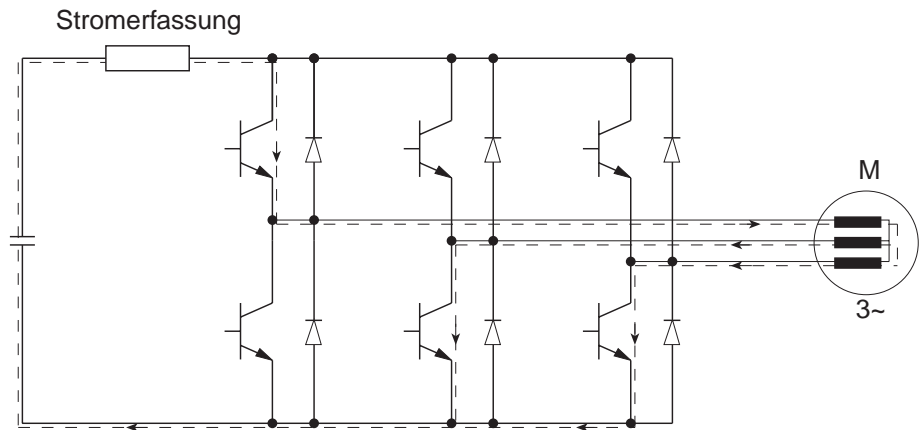


Abb. 68b  
Motorentregung  
(Strom über  
Freilaufzweige)

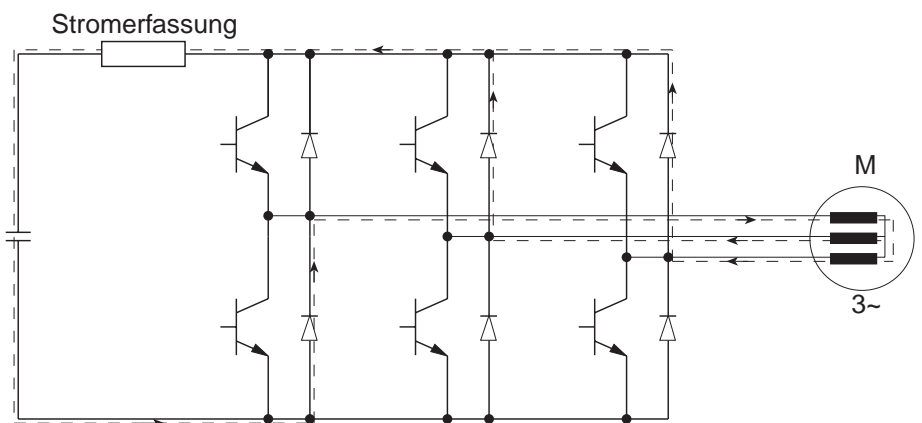
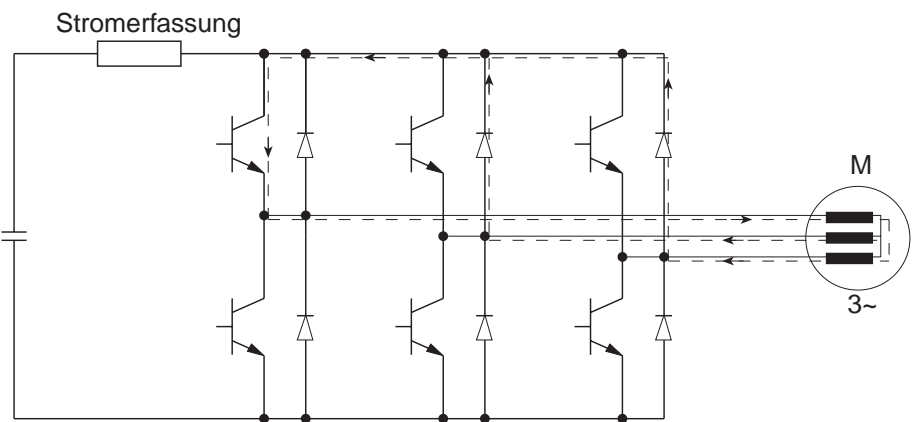


Abb. 68c  
Kurzschlußstrom  
bei frühzeitigem  
Wiedereinschalten  
eines Endstufen-  
transistors (bei zu  
kurzer oder fehlen-  
der Base-Block-  
Zeit).

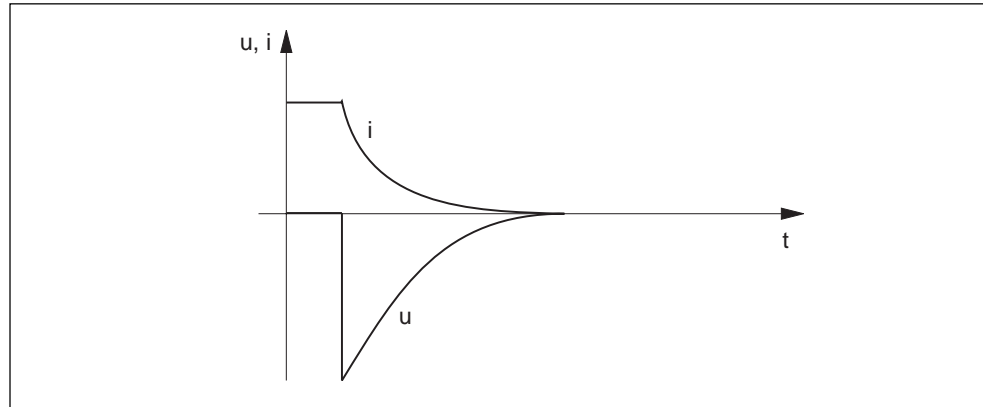




## 7.10 Schalten am Ausgang / lange Motorzuleitung

Der DASM stellt eine ohmsch-induktive Belastung für den Umrichter dar. Beim Schalten an Induktivitäten kann der Strom nicht schlagartig zu Null werden; es entsteht am Schaltkontakt kurzzeitig eine hohe Spannung, die den Strom aufrechtzuerhalten versucht (Funkenbildung; Abb.69).

Abb. 69  
 Strom und Spannung beim Schalten an einer Induktivität



Die Höhe und der Verlauf dieser Ausgleichsspannung sind abhängig vom abzuschaltenden Strom sowie von der Induktivität und dem ohmschen Widerstand im Schaltkreis.

Untersucht man diese Spannung anhand einer Fourier-Analyse, so stellt man einen hohen Anteil hochfrequenter Oberschwingungen fest, die sich wiederum induktiv oder kapazitiv in elektronische Schaltkreise einkoppeln und dort Störungen hervorrufen können. Außerdem können die Endstufenmodule durch zu hohe Spannungsspitzen beschädigt werden.

Um diese Gefahren auszuschließen, sollte am Ausgang möglichst nur dann geschaltet werden, wenn kein Strom zwischen Umrichter und Motor fließt. Dieses ist der Fall in den Betriebszuständen:

- no operation (nOP), d.h. Reglerfreigabe ausgeschaltet
- low speed (LS), d.h. keine Drehrichtung vorgegeben
- 0 Hz, Boost = 0 %

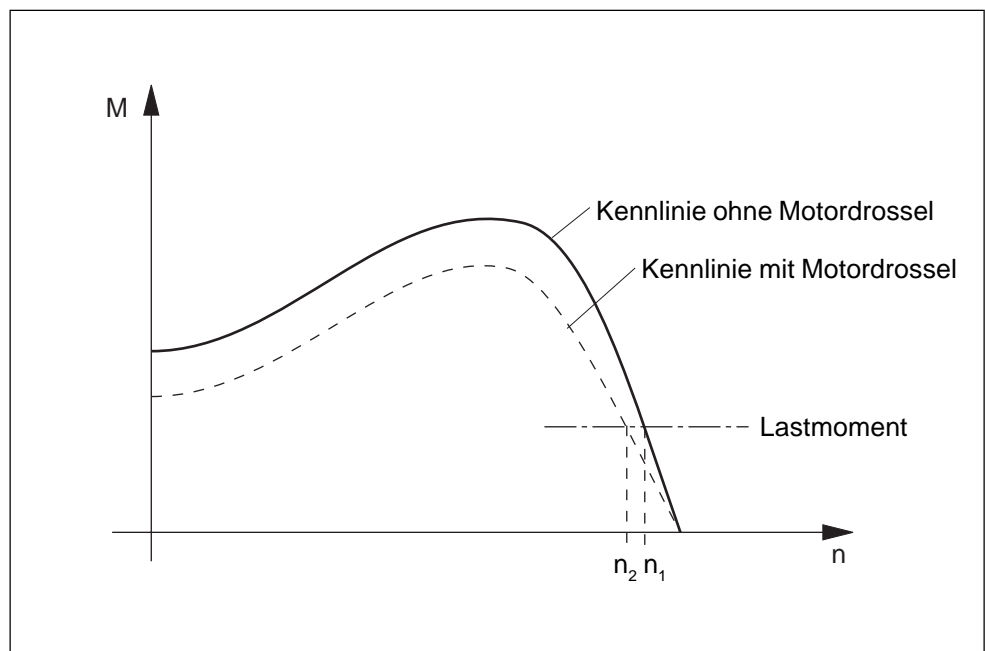
Lässt sich das Schalten am Ausgang im Betrieb nicht vermeiden (z.B. bei Betrieb mehrerer Motoren an einem Umrichter), so können durch Einsatz von Ferritringkernen, die über die Ausgangsleitungen des Umrichters gezogen werden, die hochfrequenten Oberschwingungen stark bedämpft werden. Dabei kann für jede Ausgangsphase ein eigener Ferritkern oder ein Ferritkern für alle Phasen zusammen verwendet werden. Die erstgenannte Lösung bedämpft auch symmetrische Oberschwingungen, beinhaltet jedoch die Gefahr, daß der Ferritkern in die Sättigung getrieben wird und dadurch seine Wirkung verliert. Dies ist nicht der Fall, wenn alle drei Phasen durch einen Ringkern geführt werden, da dann der Summenstrom zu Null und der Ferrit nur durch unsymmetrische Oberschwingungsströme belastet wird. Eine Kombination beider Varianten stellt die optimale Lösung dar.

Bei Einsatz langer Motorleitungen kommt es durch die Spannungsfanken der Ausgangsspannung (mehrere  $\frac{kV}{\mu s}$  !) zu hohen nadelförmigen Ableitströmen über die Abschirmung des Motorkabels, was im Extremfall zum Ansprechen der Erdschlußfassung oder eines FI-Schutzschalters führen kann.

Besonders bei hohen Schaltfrequenzen (z. B. 16 kHz) ist dieser Effekt zu beobachten.

Zur Vermeidung kann eine Motordrossel oder ein Ausgangsfilter eingesetzt werden. In jedem Fall ist bei sehr langen Leitungen und / oder Ausgangsfiltern mit einer verringerten Motorspannung und einer flacheren Motorkennlinie zu rechnen (==> Abb. 70).

Abb. 70



### 7.11 Umrichter- rückwirkungen

Wie bereits in Kapitel 6.3 beschrieben, ist der Eingangsstrom des Umrichters nicht sinusförmig. Er kann in eine Grundschwingung sowie ungeradzahlige Vielfache davon zerlegt werden. Diese rufen an der Netzimpedanz Oberschwingungsspannungen hervor, die wiederum Störungen anderer Verbraucher verursachen können. Macht sich der Einfluß dieser Oberschwingungen störend bemerkbar, was z. B. bei hoher Anschlußleistung der Fall ist, so ist der Einsatz einer Netzdrossel oder eines sog. NHF-Filters erforderlich.

Auch im Ausgangsstrom des Umrichters sind Oberschwingungen enthalten, die sich auf den Antrieb auswirken. Sie führen zu Geräuschen sowie zusätzlichen Verlusten der Asynchronmaschine und damit zu einem reduzierten Wirkungsgrad im Vergleich zum Netzbetrieb. Bei gleicher Belastung der Asynchronmaschine ergibt sich damit eine stärkere Erwärmung und eine etwas verringerte Lebensdauer der Maschine. Der Oberschwingungsanteil des Motorstromes nimmt jedoch mit steigender Schaltfrequenz (oder sinkender Ausgangsfrequenz) stark ab und spielt bei modernen IGBT-Umrichtern mit Schaltfrequenzen  $\geq 4$  kHz in Verbindung mit 50 Hz-Normmotoren kaum noch eine Rolle.

In Kombination mit dem Grundfeld rufen Oberschwingungsströme Pendelmomente hervor, die sich ungünstig auf den Motorrundlauf auswirken und in ungünstigen Fällen zu Dreheigenresonanzen des Antriebs führen können. Höherfrequente Oberschwingungen führen häufig zu unangenehmen Geräuschanregungen des Blechpaketes der Maschine. Bei einer Schrägung des Läuferkäfigs und Sehnung der Ständerwicklung werden die Oberschwingungen bedämpft, stromverdrängungsarme Rotoren vermindern die Läuferverluste.

Auch der Einsatz einer Motordrossel bedämpft die Oberströme, reduziert jedoch auch die Klemmenspannung des Motors und damit das Kippmoment. Da die Frequenzen der Oberschwingungsströme in der Nähe der Taktfrequenz des Umrichters und deren Vielfachen liegen, kommt dieser eine große Bedeutung zu. Durch eine höhere Taktfrequenz werden auch die Oberschwingungen zu höheren Frequenzen verschoben und damit durch die Motorinduktivität besser bedämpft. Bei Taktfrequenzen  $\geq 16$  kHz liegen sie außerhalb des menschlichen Hörbereichs (man spricht hier von „geräuschlosen“ bzw. „geräuscharmen“ Antrieben).

## 7.12 Spezielle Probleme

### • Mehrere Motoren an einem Umrichter

Sollen mehrere Motoren an einem Umrichter betrieben werden, so ist sicherzustellen, daß der Umrichter in allen Betriebspunkten den erforderlichen Strom bereitstellen kann. Werden die Motoren nicht gleichzeitig, sondern nacheinander hochgefahren, ist bei der Dimensionierung darauf zu achten, daß der Umrichter im Rahmen seiner Überlastreserven zusätzlich zu den Strömen der bereits laufenden Motoren auch den **Anlaufstrom** des jeweils zugeschalteten Motors aufbringen kann, sofern nicht durch Schutzfunktionen wie die Hardware-Strombegrenzung ein Abschalten mit Überstrom verhindert wird.

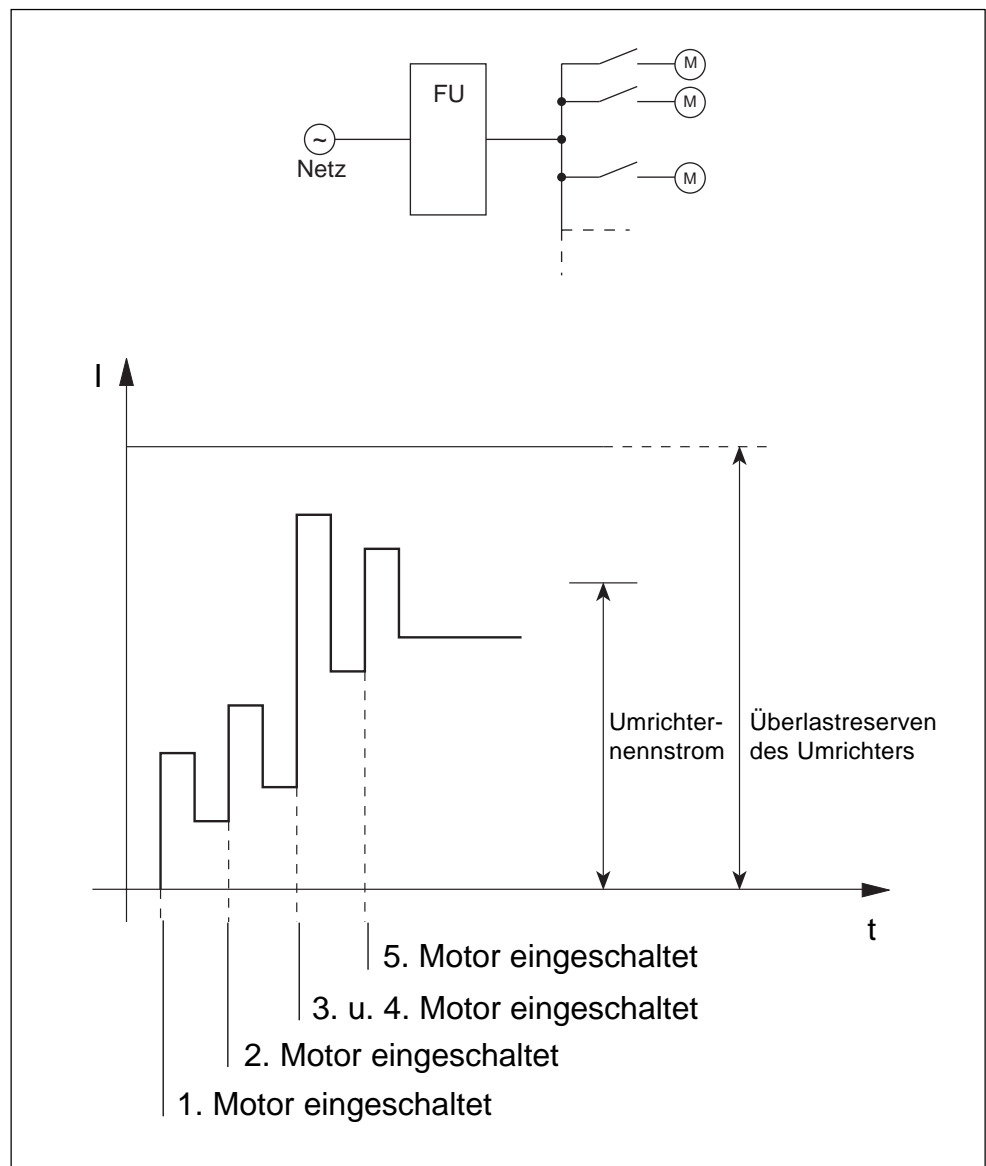
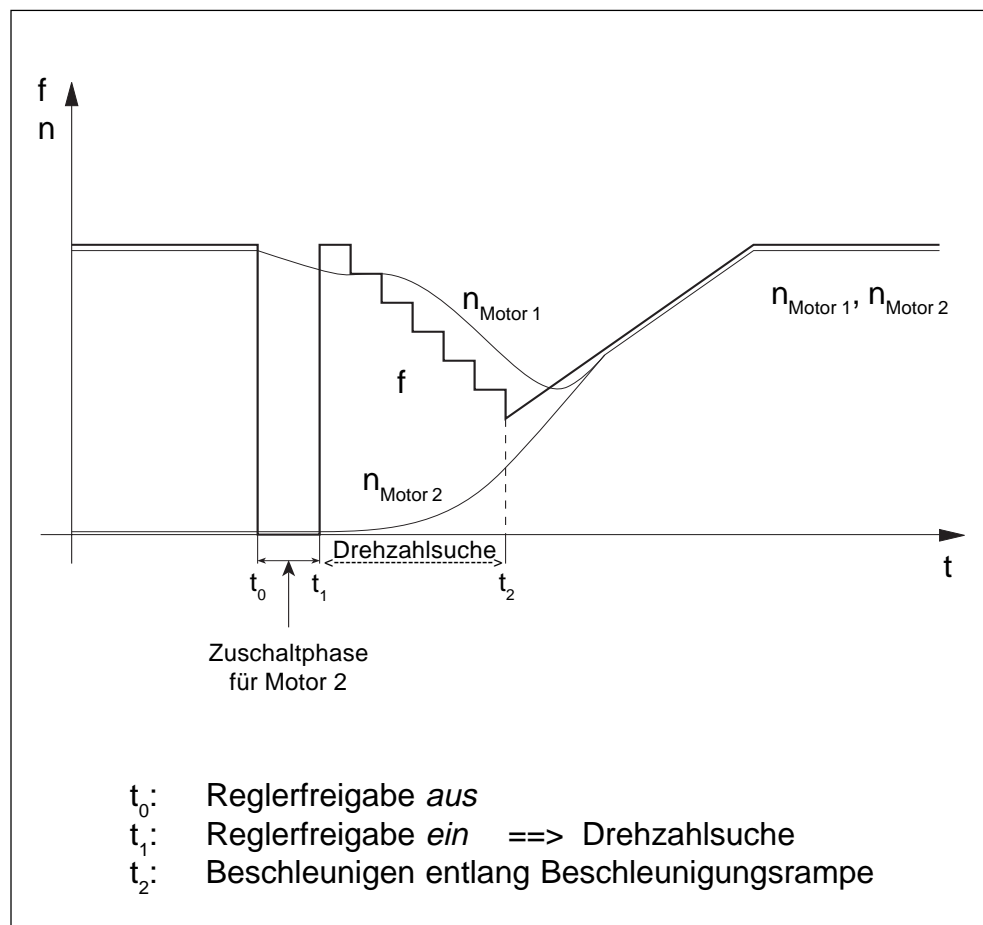


Abb. 71  
Mehrmotoren-  
betrieb

Wird beim Zuschalten von Motoren auf den bereits hochgefahrenen Frequenzumrichter die Funktion „Drehzahlsuche“ aktiviert (z.B. durch kurzes Aus- und Einschalten der Reglerfreigabe), so ist sichergestellt, daß der Umrichter nicht mit OC abschaltet, da die Drehzahlsuche strombegrenzend wirkt. Allerdings bricht dabei die Drehzahl der bereits rotierenden Motoren kurzzeitig ein, was nicht bei allen Anwendungen akzeptabel ist.

Abb. 72  
Zuschalten  
eines Motors bei  
aktivierter Funktion  
„Drehzahlsuche“



Die Stromgrenze bietet beim Zuschalten eines Motors auf den laufenden Umrichter keinen ausreichenden Schutz, da sie nicht in der Lage ist, die Frequenz und damit auch die Spannung schnell genug zurückzunehmen; dieses ist nur bei aktivierter Hardware-Strombegrenzung möglich.

Wird ein laufender Motor vom Umrichter getrennt, so sind Maßnahmen gegen die auftretenden Spannungsspitzen zu treffen (z.B. RC-Beschaltung des Schützes, Ferritringkerne am Umrichterausgang).

- **Motorschwebungen**

Neben mechanischen Resonanzen, die vor allem durch niederfrequente Stromüberschwingungen und daraus resultierende Pendelmomente bei bestimmten Drehzahlen angeregt werden können, treten u.U. auch elektrische Resonanzen in Erscheinung, die in extremen Fällen sogar zum Abschalten des Umrichters mit E.O.C führen können. Diese lassen sich damit begründen, daß das elektrische System aus Zwischenkreiskondensator, Motorwiderstand und -induktivität einen gedämpften elektrischen Schwingkreis darstellt und damit zu Eigenschwingungen fähig ist. Die daraus resultierenden Stromschwankungen führen zu Drehzahlschwebungen des Motors.

**Dieses Phänomen tritt besonders dann auf, wenn**

- das Massenträgheitsmoment des Antriebs - bezogen auf die Motorwelle - gering ist (--> kleine mechanische Dämpfung),
- der Motor im Leerlauf oder mit geringer Last betrieben wird (--> kleiner Schlupf --> kleiner ohmscher Anteil des Motors --> kleine elektr. Dämpfung),
- der Motor einen guten Wirkungsgrad besitzt (--> kleiner ohmscher Widerstand in Ständer und Läufer --> kleine elektr. Dämpfung),
- mit hoher Taktfrequenz und/oder abgeschalteter Totzeitkompensation des Umrichters gearbeitet wird.

Da Motoren mit größerer Leistung einen kleineren ohmschen Anteil und besseren Wirkungsgrad als kleinere Motoren aufweisen, neigen sie eher zu Schwebungen. Reluktanzmotoren und Synchronmotoren neigen eher zu Schwebungen als Asynchronmotoren.

**Mögliche Maßnahmen zur Reduzierung oder Verlagerung von Schwebungen sind:**

- Verändern der U/f-Kennlinie (Boost, Typenpunktverschiebung, Ausgangsspannungsstabilisierung)
- Verwendung eines anderen Motors bzw. - falls möglich - eines kleineren Motors (--> mehr Schlupf --> höherer ohmscher Anteil --> bessere elektr. Dämpfung),
- Einsatz einer Motordrossel und damit evtl. Verlagerung der Resonanzfrequenz,
- falls möglich, Vergrößerung der Schwungmasse des Antriebssystems,
- falls möglich, Verringern der Taktfrequenz; Änderung des Modulationsverfahrens; Totzeitkompensation
- softwaremäßige oder steuerungstechnische Maßnahmen, z.B. Ausblendung der Resonanzfrequenzen

- **Transformator am Eingang des Umrichters**

Stimmt die Netzspannung unter Einbeziehung ihrer Toleranzen nicht mit der zulässigen Eingangsspannung des Umrichters überein, so muß ein Eingangstransformator zur Spannungsanpassung eingesetzt werden. Dieser sollte etwa um den Faktor 1,5, bezogen auf die Umrichter-scheinleistung, überdimensioniert werden, damit er durch die hohen Eingangsstromspitzen nicht zu weit in die Sättigung getrieben wird.

Sättigungserscheinungen sind deshalb kritisch, weil die Stromspitzen im Bereich des Spannungsscheitels auftreten und zu einer sättigungs-abhängigen Reduzierung des Spannungsscheitelwertes führen. Damit verbunden ist eine verringerte Zwischenkreisspannung, eine geringere Ausgangsspannung des Umrichters und damit ein geringeres Kippmoment des Motors.

- **Transformator zwischen Umrichter und Motor**

Weicht die Motornennspannung deutlich von der Umrichterausgangsspannung ab, was z.B. bei Mittelfrequenz- und Sondermotoren häufig der Fall ist, so muß ein Transformator zwischen Umrichter und Motor zur Spannungsanpassung geschaltet werden. Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- Der Transformator kann keine Gleichspannung übertragen. Daher darf z.B. nicht mit DC-Bremse gearbeitet werden.
- Auch bei kleinen Frequenzen wird der Transformator schnell in die Sättigung getrieben, so daß dieser Frequenzbereich möglichst schnell durchfahren werden sollte (kurze Rampenzeiten, wenig Boost).
- Die kVA-Leistung des Transformators muß mindestens so groß sein wie die kVA-Leistung des Umrichters (evtl. zzgl. Überlastreserven).
- Der Transformator übt auf den Motorstrom die gleiche glättende Wirkung aus wie eine Motordrossel.

### 7.13 Gegenüberstellung Netzbetrieb / Umrichter- betrieb

Nachfolgend sind noch einmal die wichtigsten Unterschiede aufgelistet, die sich zwischen Netzbetrieb und Umrichterbetrieb einer Asynchronmaschine ergeben.

#### Netzbetrieb

nur eine Drehzahl oder bei polumschaltbaren Motoren mehrere feste Drehzahlstufen möglich

kein geführter Hochlauf möglich, Hochlaufzeit stellt sich entsprechend der Motorkennlinie und des Lastmomentes ein

keine geführte Verzögerung möglich, Verzögerungszeit stellt sich entsprechend den Reib- bzw. Lastmomenten ein

Reversierbetrieb nur durch Phasentausch möglich --> zusätzliche Kosten für Schütz

festes Anlaufmoment (vorgegeben durch Bauart des Motors)

hoher Anlaufstrom --> u.U. Stern-/Dreieck-Anlauf erforderlich

Drehstrommotoren erfordern generell Drehstromanschluß (oder Anlaufkondensator --> Wechselstrommotor mit schlechterem Wirkungsgrad und weniger Drehmoment)

keine Leistungserhöhung des Motors durch Änderung der Verdrahtung möglich

*volle Nennspannung --> volles Kippmoment des Motors*

*sinusförmiger Strom, sinusförmige Spannung*

hoher Blindleistungsbedarf ( $\cos\phi$  ca. 0,8), daher bei höherer Leistung Kompensation erforderlich

schlechter Wirkungsgrad und erhöhte thermische Belastung bei Taktbetrieb

zusätzliche Funktionen (z.B. Motorschutz, Sanftanlauf, Gleichstrombremsung) mit zusätzlichen Kosten verbunden

*günstiges Geräuschverhalten des Motors*

#### Umrichterbetrieb

stufenlose Drehzahlverstellung auch über die Motornennzahl hinaus

geführter Hochlauf, Hochlaufzeit einstellbar

Drei Möglichkeiten, den Antrieb zu stoppen:  
1. geführte Verzögerung, Verzögerungszeit einstellbar (evtl. mit Bremsmodul)  
2. Gleichstrombremsung  
3. ungeführter Auslauf (Modulation ausschalten)

geführter Reversierbetrieb dank elektronischer Drehfeldumkehr ohne zusätzlichen Aufwand

einstellbares Anlaufmoment über U/f-Kennlinie des Frequenzumrichters

begrenzter Anlaufstrom; Strom abhängig vom Beschleunigungs- und Lastmoment

Drehstrommotoren kleiner Leistung (bis max. 2,2 kW) können über Frequenzumrichter auch am Wechselstromnetz betrieben werden

bei 400 V-Betrieb und Dreieckschaltung eines 230/400 V-Motors kurzzeitige Leistungssteigerung bis zu 70 % möglich (87 Hz-Kennlinie)

*Spannungsverluste im Umrichter an Zuleitungen und Filtern --> weniger Kippmoment als bei Netzbetrieb*

*nichtsinusförmige Stromaufnahme --> Belastung des Netzes mit Oberschwingungen, getaktete Motorspannung --> Funkstörungen --> höherer Entstöraufwand*

$\cos\phi$  ca. 1, daher keine Kompensation nötig, jedoch Aufnahme von Verzerrungsblindleistung

optimaler Wirkungsgrad auch bei Taktbetrieb

Umrichter übernimmt zusätzliche Funktionen (Strom- und Spannungsüberwachung, Steuerungsfunktionen etc.)

*Zusatzgeräusche bei Taktfrequenzen < 16 kHz*



## 8. Betrieb von Reluktanzmotoren an Frequenzumrichtern

Reluktanzmotoren werden vorteilhaft als Regelantriebe mit Frequenzumrichtern eingesetzt, da sie keinen Schlupf aufweisen und daher eine exakte Bestimmung der Drehzahl mit einfachen Mitteln erlauben. Besonders, wenn mehrere Motoren mit exakt gleicher Drehzahl arbeiten müssen (Textilmaschinen, Fördereinrichtungen), kann bei Einsatz von Reluktanzmotoren auf komplizierte Gleichlaufregelungen verzichtet werden. Bei Gleichlaufbetrieb vieler Motoren kleinerer Leistung stellt der Reluktanzmotor oft die einzige wirtschaftliche Lösung dar.

Da das synchrone Kippmoment dieses Motortyps mehr als quadratisch (bei kleinen Motoren u. U. mehr als kubisch) von der Klemmenspannung abhängt, sind an die Umrichter bezüglich der Stabilität der Ausgangsspannung erhöhte Anforderungen zu stellen (--> Spannungsstabilisierung!).

### Weitere Anforderungen an den Umrichter:

- Übernahme kurzzeitiger Spitzenströme bis zum doppelten Motor-nennstrom in motorischer und generatorischer Richtung, um Pendelungen abzufangen (niedrige Ausgangsimpedanz).
- Reduzierung der Frequenz bei Überlast (Stromgrenze), um ein vollständiges Abkippen des Antriebes zu vermeiden, es sei denn, dieses Verhalten ist ausdrücklich gewünscht.
- In weiten Grenzen anpaßbare Spannungs-Frequenzkennlinie im unteren Frequenzbereich, um rechtzeitigen Synchronlauf sicherzustellen (Boost).
- Gleichmäßiges, ruckfreies Durchfahren des gesamten Frequenzbereiches, besonders bei hohen externen Schwungmassen.

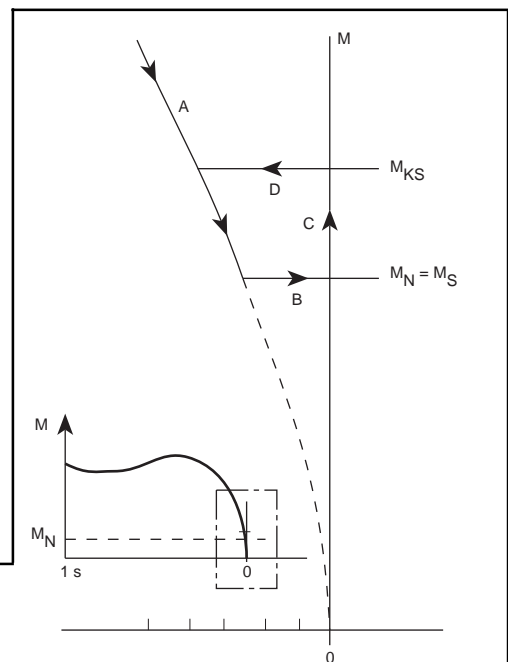
Da Reluktanzmotoren nur für relativ kleine Leistungen bis ca. 10 kW wirtschaftlich herstellbar und betreibbar sind, und da sie konstruktiv bedingt meistens hohe thermische Reserven aufweisen, ist die Kurvenform der Spannung nicht von erheblicher Bedeutung. Wichtig ist jedoch, daß unabhängig von der Kurvenform die Spannungs-Zeitfläche der Grundschwingung mit der tatsächlich benötigten weitestgehend übereinstimmt.

Um einen exakten Gleichlauf mehrerer Reluktanzmotoren zu erreichen, müssen diese an **einem** Umrichter betrieben werden. Zusätzlich müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Im unteren Frequenzbereich (bis etwa 10 Hz) sollten die Motoren nicht über ihr Nennmoment  $M_N$  hinaus belastet werden, um ein Außertrittfallen zu vermeiden.
- Bei Frequenzen im Bereich zwischen 10 Hz und 50 Hz darf das Lastmoment nicht größer sein als das Außertrittfallmoment  $M_{KS}$ . Das Verhältnis von  $M_{KS}$  zu  $M_N$  schwankt von Hersteller zu Hersteller. Auf jeden Fall muß beachtet werden, daß sowohl  $M_N$  als auch  $M_{KS}$  bei Umrichterbetrieb aufgrund von Spannungsabfällen u. U. erheblich geringer sind als bei Netzbetrieb.
- Der Motor sollte mit genügend Boost beaufschlagt werden, um im Stillstand ein dynamisches Haltemoment zu erzeugen und im unteren Drehzahlbereich genügend Drehmoment zur Verfügung zu stellen.
- Beim Schalten der Reglerfreigabe laufen die Motoren frei aus, sofern keine Bremse einfällt. In diesem Betriebszustand ist somit kein Synchronlauf möglich. Gleiches gilt während der Base-Block-Zeit (z.B. zu Beginn einer DC-Bremmung).

Da Reluktanzmotoren einen schlechteren Wirkungsgrad und Leistungsfaktor besitzen als Standard-Asynchronmotoren, nehmen sie bei gleicher abgegebener Leistung einen höheren Strom auf. Der Umrichter muß auf diesen Strom ausgelegt werden, wodurch eine Überdimensionierung um den Faktor 1,5 ... 2,0 nötig wird. Die Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie des Reluktanzmotors ist in Abb. 73 dargestellt.

Abb. 73  
Schematischer Drehmomentverlauf beim Hochlaufen, Synchronisieren und Überlasten eines Reluktanzmotors



- |          |   |   |
|----------|---|---|
| $M_N$    | = | Nennmoment  |
| $s$      | = | Schlupf   |
| $M_{KS}$ | = | Synchrones Kippmoment                             |
| $M_S$    | = | Synchrones Intrittfallmoment                      |
| A        | = | Kennlinie bei Betrieb als Asynchronmotor (Anlauf) |
| B        | = | Synchronisierung (Intrittfallen)                  |
| C        | = | Belastung bis zum Kippmoment (synchroner Lauf)    |
| D        | = | Außertrittfallen und asynchroner Lauf             |

## 9. Typische Fehler beim Anschluß und bei der Parametrierung von Frequenzumrichtern

Treten bei der Inbetriebnahme oder im täglichen Einsatz eines Frequenzumrichters Probleme auf, so wird häufig ein technischer Defekt des Umrichters vermutet. In den meisten Fällen liegt der Fehler jedoch in einer falschen Verdrahtung oder einer Fehlparametrierung bzw. Fehlbedienung des Umrichters. Daher sind im folgenden stichwortartig häufige Fehlerursachen aufgeführt.

- Falsche Dimensionierung des Antriebes:
  - a) Motor zu klein
    - > kann Lastmoment nicht aufbringen (bes. im Feldschwächbereich)
    - > kippt ab
    - > Frequenzumrichter geht u. U. auf Fehler OC oder in die Strombegrenzung
  - b) FU zu klein
    - > kann Motorstrom nicht aufbringen (siehe Auslastungsanzeige)
    - > schaltet ab mit Fehler OC oder OL oder geht in die Strombegrenzung
- Beschleunigungszeit zu kurz eingestellt:
  - > erforderliches Beschleunigungsmoment zu groß
  - > Motor kann der Frequenz des Umrichters nicht folgen
  - > großer Schlupf
  - > großer Strom
  - > Abschalten mit OC oder Ansprechen der Strombegrenzung
- Verzögerungszeit zu kurz eingestellt:
  - > erforderliches Bremsmoment zu groß
  - > Motor kann der Frequenz des Umrichters nicht folgen
  - > großer generatorischer Schlupf
  - > großer Rückspeisestrom in den Zwischenkreis
  - > Aufladung des Zwischenkreiskondensators
  - > Abschalten mit OP oder OC oder Ansprechen der Strombegrenzung

## **ABHILFE:**

bei Fehler OP: Einsatz eines Bremsmoduls oder Verlängerung der Verzögerungszeit; evtl. Abschalten der Spannungsstabilisierung

bei Fehler OC: Einsatz eines größeren Umrichters oder Verlängerung der Verzögerungszeit;

bei Einsatz eines Bremsmoduls: Aktivierung der Spannungsstabilisierung

- Falscher Anschluß der Steuerklemmleiste:
  - > Eingänge werden nicht gesetzt oder vertauscht
  - > Versorgungsspannungen werden kurzgeschlossen oder überlastet
- Schalten auf den laufenden Motor, ohne daß eine Schutzfunktion (z.B. Drehzahlsuche) aktiviert ist:
  - > FU fährt gegen den Antrieb Beschleunigungsrampe hoch
  - > hoher generatorischer Schlupf
  - > hoher generatorischer Strom
  - > Abschalten mit OC oder OP oder Ansprechen der Strombegrenzung
- Falsche Verdrahtung des Motors (Y/ $\Delta$ ):

Standard - 230 / 400 V-Motoren müssen an 230 V-Umrichtern in Dreieck-, an 400 V-Umrichtern in Sternschaltung betrieben werden.

Bei Sternschaltung an 230 V-Umrichtern:

Strangspannung um Faktor  $1/\sqrt{3}$  zu niedrig

  - > mag. Fluß des Motors ebenfalls um Faktor  $1/\sqrt{3}$  geschwächt
  - > Kippmoment geht um Faktor 3 zurück
  - > Motor kann i.a. das Lastmoment nicht mehr aufbringen
  - > kippt ab

### Bei Dreieckschaltung an 400 V-Umrichtern:

Strangspannung um Faktor  $\sqrt{3}$  zu hoch

- > Motor übermagnetisiert, geht in die Sättigung
- > hoher Magnetisierungsstrom
- > Umrichter schaltet i.a. mit Fehler OC ab oder geht in die Strombegrenzung; verkräftet der FU den Strom, würde der Motor nach einiger Zeit thermisch zerstört. Unter Umständen ist der Betrieb bei einer Eckfrequenzverschiebung auf 87 Hz zulässig (s. Kap. 7.4). 400 / 690 V-Motoren können sinnvollerweise nur an 400 V-Umrichtern in  $\Delta$ -Schaltung betrieben werden.

- Versuch, OL-Fehler durch Reset oder Power-On-Reset zurückzusetzen, bevor die Abkühlzeit abgelaufen ist (erkennbar an blinkender Anzeige nOL); während der Abkühlphase muß der Umrichter an Netzspannung liegen.

- Ausgangsspannung zu hoch, z. B. weil Boost, Delta-Boost oder Ausgangsspannungsstabilisierung zu hoch oder Eckfrequenz zu niedrig eingestellt ist:

- > Motor wird übermagnetisiert
- > hoher Strom
- > Fehler OC bzw. OL oder Ansprechen der Strombegrenzung

- Bei DC-Bremmung: Bremsspannung bzw. -zeit zu klein gewählt:

- > Motor bremst nicht bis zum Stillstand ab
- > läuft frei aus

Wird ein Defekt im Umrichter vermutet (z. B. Kurzschluß eines Endstufen-Transistors), so sollte ein Startversuch mit abgeklemmtem Motor unternommen werden. Geht der Umrichter dabei auf Störung (z. B. E.OC), so liegt der Fehler mit großer Sicherheit im Gerät. Schaltet der Umrichter nur bei angeschlossenem Motor mit einer Fehlermeldung ab, so ist zunächst die Parametrierung (spez. die U/f-Kennlinie) und anschließend Motorzuleitung und Motor sowie evtl. Filter zu prüfen.

## 10. Die Umgebung des Frequenzumrichters

Viele Anwendungsfälle können mit einem Standard-Frequenzumrichter allein nicht gelöst werden. Es werden besondere Funktionen benötigt, für die der Umricher mit einer speziellen Steuerkartensoftware und/oder mit einer erweiterten Hardware ausgestattet werden muß. Werden Frequenzumrichter in einer komplexen Anlage eingesetzt, die zentral gesteuert und überwacht wird, so empfiehlt sich ihre Vernetzung über ein Feldbus-System. Man muß davon ausgehen, daß in Zukunft seitens der Anwender immer mehr Wert auf die Kompatibilität der Umricher zu bestehenden Automatisierungssystemen gelegt wird.

### 10.1 Vernetzung von Frequenzumrichter, serielle Schnittstellen

Abb. 74a  
Parallele E/A-Kommunikation (Einzelverdrahtung)

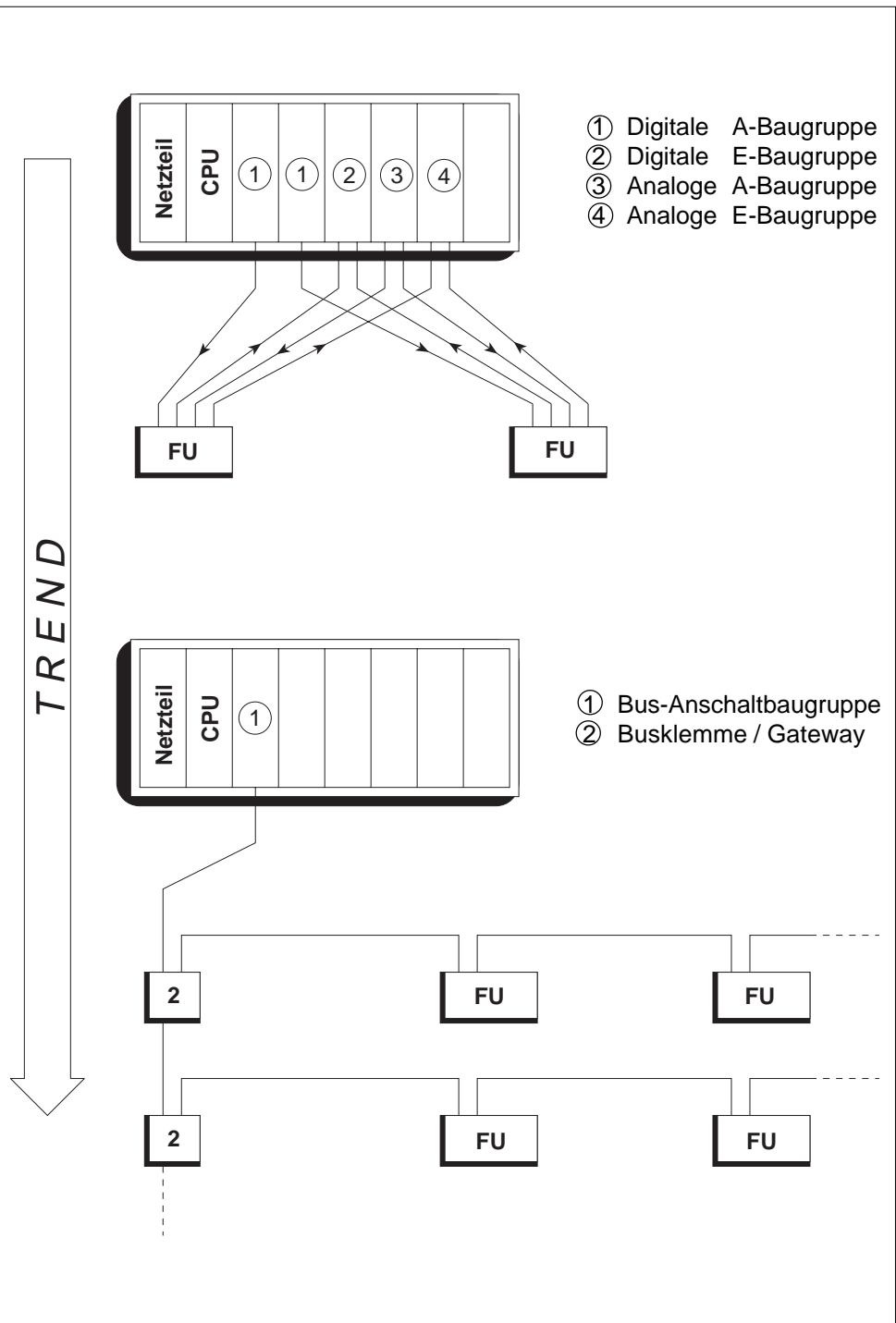


Abb. 74b  
Serielle Kommunikation (Bus)

Die moderne Industrieautomatisierung verlangt zunehmend nach einer zentralen Steuerung aller Antriebe sowie anderer Sensoren und Aktoren einer Anlage (z.B. Lichtschranken, Temperaturfühler, Näherungsinitiatoren etc.).

Diese Forderung kann durch eine konventionelle parallele Verdrahtung aller Systemkomponenten oder eine intelligente serielle Vernetzung erfüllt werden.

Der Trend geht hin zum Einsatz eines Feldbussystems, für das KEB mehrere Lösungen anbietet:

- einfache RS 485-Vernetzung über DIN 66019-Protokoll
- Profibus - Anschaltung
- CAN-Bus - Anschaltung
- InterBus-S - Anschaltung
- LON - Anschaltung

In allen Steuerkarten ist serienmäßig das ANSI-Protokoll X3.28 (DIN 66019) integriert, das eine serielle Vernetzung ohne zusätzlichen Hardwareaufwand von bis zu 30 Umrichtern (mit zusätzlichen Verstärkern sogar bis zu 240 Umrichtern) ermöglicht. Die diversen Protokolle unterscheiden sich hinsichtlich der Hardware (z. B. Übertragungsmedium, Schnittstellen und Stecker), der Software (z. B. Übertragungsprotokoll), der Anschlußmöglichkeiten an Steuerungen diverser Hersteller der Bustopologie (Ring, Netz; Master/Slave) sowie der technischen Daten (z. B. mögl. Übertragungsdistanzen, Übertragungsgeschwindigkeit, Teilnehmerzahlen) teilweise erheblich.

### **Der Einsatz vernetzter Frequenzumrichter bietet dem Anwender eine Vielzahl von Vorteilen:**

- Der Verkabelungsaufwand ist im Verhältnis zur konventionellen Verdrahtung umso geringer, je mehr Umrichter miteinander vernetzt werden. Auch die Installation selbst wird wesentlich vereinfacht.
- Der Frequenzumrichter wird für die Steuerung transparent, d.h. alle Parameter können über den Bus eingelesen bzw. ausgelesen werden. Ausgelesene Parameter (z. B. die Auslastung) können in der Steuerung ausgewertet und z. B. als Grundlage zur Änderung von Eingangsparametern verwendet werden. Das Laden kompletter Parametrierungen ist problemlos innerhalb kürzester Zeit möglich.
- Die Sollwertvorgabe erfolgt digital und damit absolut genau und reproduzierbar ohne den Einfluß von Brummeinstreuungen und Störspannungen.
- Die Fehlerdiagnose wird einfacher, da Fehler gespeichert werden können. Auch eine Früherkennung von Fehlern - z. B. ein starker Anstieg der Auslastung infolge von fehlender Lager-schmierung und daraus resultierende Wartungsmöglichkeiten vor dem Ausfall einer Maschine - kann durch die Vernetzung von Umrichtern in Verbindung mit einer entsprechenden Steuerungssoftware realisiert werden.
- Die nachträgliche Erweiterung der Anlage bereitet meist keine Schwierigkeiten, da zusätzliche Elemente einfach an den Bus angekoppelt werden. Es ist i. a. nicht mehr nötig, die Steuerleitungen jedes Umrichters bis zur Steuerung zu verlegen.
- Aufgrund der digitalen Signalübertragung können auch große Entfernungen problemlos überbrückt werden (abhängig von Übertragungsmedium und Schnittstelle).
- Die Sicherheit gegen Fehlbedienung nimmt zu, da alle Parameter per Software (Download-Funktion) jederzeit neu geladen werden können. Durch die eingebauten Diagnosefunktionen können z.B. Leitungsunterbrechungen sofort festgestellt werden.
- Es werden analoge und digitale SPS- Ein- und Ausgabemodule eingespart; somit entfallen auch die Kosten und der Programmieraufwand dafür.







**Karl E. Brinkmann GmbH**  
**Försterweg 36 - 38 • Postfach 11 09**  
**D - 32677 Bartrup • Telefon 0 52 63 / 4 01-0**  
**Teletex 5 263 811 keb • Telefax 4 01 - 116**