


# applications & TOOLS

**MICROMASTER 4**  
Applikationsbeschreibung

**SIEMENS**



Projektierungshinweise mit Beispielen  
für MICROMASTER 4

## 1 Gewährleistung, Haftung und Support

Für die in diesem Dokument enthaltenen Informationen übernehmen wir keine Gewähr.

Unsere Haftung, gleich aus welchem Rechtsgrund, für durch die Verwendung der in diesem Dokument beschriebenen Beispiele, Hinweise, Programme, Projektierungs- und Leistungsdaten usw. verursachte Schäden ist ausgeschlossen, soweit nicht z.B. nach dem Produkthaftungsgesetz in Fällen des Vorsatzes, der grober Fahrlässigkeit, wegen der Verletzung des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit, wegen einer Übernahme der Garantie für die Beschaffenheit einer Sache, wegen des arglistigen Verschweigens eines Mangels oder wegen Verletzung wesentlicher Vertragspflichten zwingend gehaftet wird. Der Schadensersatz wegen Verletzung wesentlicher Vertragspflichten ist jedoch auf den vertragstypischen, vorhersehbaren Schaden begrenzt, soweit nicht Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit vorliegt oder wegen der Verletzung des Lebens, des Körpers oder der Gesundheit zwingend gehaftet wird. Eine Änderung der Beweislast zu Ihrem Nachteil ist hiermit nicht verbunden.

Die Applikationsbeispiele sind unverbindlich und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit hinsichtlich Konfiguration und Ausstattung sowie jeglicher Eventualitäten. Sie stellen keine kundenspezifische Lösungen dar, sondern sollen lediglich Hilfestellung bieten bei typischen Aufgabenstellungen. Sie sind für den sachgemäßen Betrieb der beschriebenen Produkte selbst verantwortlich. Diese Applikationsbeispiele entheben Sie nicht der Verpflichtung zu sicherem Umgang bei Anwendung, Installation, Betrieb und Wartung. Durch Nutzung dieses Applikationsbeispiels erkennen Sie an, dass Siemens über die oben beschriebene Haftungsregelung hinaus nicht für etwaige Schäden haftbar gemacht werden kann. Wir behalten uns das Recht vor, Änderungen an diesem Applikationsbeispiel jederzeit ohne Ankündigung durchzuführen. Bei Abweichungen zwischen den Vorschlägen in diesem Applikationsbeispiel und anderen Siemens Publikationen, wie z.B. Katalogen, hat der Inhalt der anderen Dokumentation Vorrang.

**Copyright© 2005 Siemens A&D. Weitergabe oder Vervielfältigung dieser Applikationsbeispiele oder Auszüge daraus sind nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich von Siemens A&D zugestanden.**

Bei Fragen zu diesem Beitrag wenden Sie sich bitte über folgende E-Mail-Adresse an uns:

<mailto:csweb@ad.siemens.de>

---

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

## 2 Definition und Warnung

### 2.1 Qualifiziertes Personal

im Sinne der Dokumentation sind Personen, die mit Aufstellung, Montage, Inbetriebsetzung, Betrieb und Instandhaltung der einzusetzenden Produkte MICROMASTER vertraut sind und über die ihrer Tätigkeit entsprechenden Qualifikationen verfügen

z. B.:

- Ausbildung oder Unterweisung bzw. Berechtigung, Stromkreise und Geräte gemäß den Standards der Sicherheitstechnik ein- und auszuschalten, zu erden und zu kennzeichnen.
- Ausbildung oder Unterweisung gemäß den Standards der Sicherheitstechnik in Pflege und Gebrauch angemessener Sicherheitsausrüstung.
- Schulung in Erster Hilfe.

Warnhinweise werden in dieser Dokumentation explizit nicht gegeben. Es wird jedoch ausdrücklich auf die Warnhinweise der Betriebsanleitung für das jeweilige Produkt verwiesen.

### 2.2 Verwendergruppe

Die Applikationssoftware bzw. das Applikationsbeispiel wurden entwickelt zur Unterstützung von Siemens-Mitarbeitern bei der Erstellung von Anwenderprogrammen für Maschinen oder Anlagen.

Sie sind nicht vorgesehen zur direkten Weitergabe bzw. Verkauf an Personen / Firmen außerhalb der Siemens AG.

Applikationssoftware darf nur als Bestandteil einer Gesamt-Maschinen- bzw. Anlagensoftware weitergegeben werden.

Bei Weitergabe einer nicht in ein Gesamtprojekt integrierten Applikationssoftware an Personen / Firmen außerhalb der Siemens AG trägt der Weitergebende die volle Verantwortung für etwaige Mängelhaftungs- bzw. Schadenersatzansprüche.

Die Applikationssoftware bzw. das Applikationsbeispiel darf nur von qualifiziertem Personal verwendet werden.

Unsachgemäße Verwendung kann zur Zerstörung von Anlagen und/oder zu Personenschäden führen.

*Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4*

## 2.3 Gültige Bedingungen

Es gelten die Bedingungen für Lieferungen und Leistungen im Siemens-internen Geschäft in der jeweils gültigen Fassung.

## 2.4 Hinweis auf Warenzeichen

SIMOVERT® ist ein Warenzeichen von Siemens

MICROMASTER ® ist ein Warenzeichen von Siemens

## 2.5 Änderungen / Verfasser

Version	Datum/Änderung	Verfasser
1.0	06/02, Erstausgabe	Fusetti
2.0	11/02, Überarbeite deutsche Ausgabe	Uhlig

## 3 Funktionsweise

### 3.1 Allgemeines

Frequenzumrichter ermöglichen den Einsatz von Drehstrom-Asynchronmotoren für Anwendungen mit variabler Geschwindigkeit. Damit können bisherige Lösungen mit Gleichstrommotoren abgelöst werden. Beim Gleichstrommotor ist die Regelung der Drehzahl und des Momentes sehr einfach möglich. Der Gleichstrommotor besitzt einige Nachteile, wie z.B. kein Normmotor, niedrigerer Schutzgrad, wartungsintensive Kollektoren und Bürsten usw. Der Asynchronmotor kann die konstruktiven Nachteile der Gleichstrommaschine ausgleichen, jedoch ist das Regeln von Drehzahl und Moment komplizierter.

Die Drehzahl eines Asynchronmotors verhält sich annähernd proportional zur Frequenz des speisenden Drehfeldes. Unter der Annahme, dass  $K$  für die Konstruktionsdaten des Motors steht, gilt folgende Beziehung:

$$n \approx K * f$$

Daraus folgt, dass zur Veränderung der Drehzahl die Speisefrequenz geändert werden muss. Es ist zu berücksichtigen, dass der Magnetfluss in der Maschine proportional zum Verhältnis von Spannung und Frequenz ist:

$$\varphi \approx \frac{U}{f}$$

Um eine Sättigung bzw. eine zu geringe Magnetisierung des Magnetkreises zu vermeiden, sollte der Fluss in der Maschine konstant gehalten werden. Somit ist eine gleichzeitige Veränderung von Motorspannung und -frequenz notwendig.

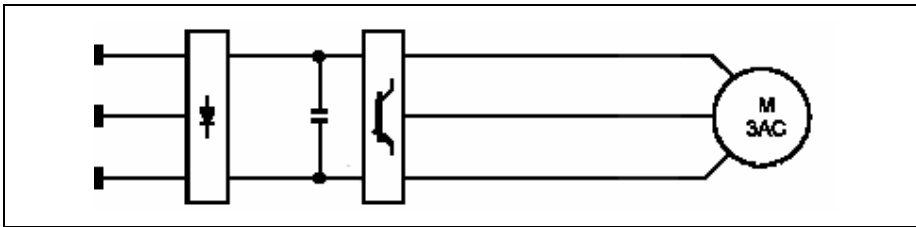
Das Drehmoment der Asynchronmaschine ist ebenfalls proportional zum Magnetfluss.

$$M \approx K * \varphi$$

Das Motormoment ist direkt vom Fluss in der Maschine abhängig und wird durch die Motorspannung und -frequenz mitbestimmt.

Für den Betrieb von drehzahlvariablen Drehstromantrieben werden heute vorrangig Frequenzumrichter mit Spannungszwischenkreis eingesetzt. Der Frequenzumrichter formt das starre Stromversorgungsnetz mit fester Spannung und Frequenz in ein Drehstromsystem mit variabler Spannung und Frequenz um. Dazu richtet er zu erst die Netzspannung gleich und formt die erhaltene Gleichspannung anschließend in ein Drehstromsystem mit gewünschter Frequenz und Spannung um. Für die genaue Regelung der Drehzahl und des Motormomentes stehen heute verschiedene Verfahren, wie z.B. die Vectorregelung, zur Verfügung.

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4



**Bild 3-1** Prinzipschaltbild Frequenzumrichter und Motor

Beim Einsatz von drehzahlveränderbaren Drehstromantrieben ergeben sich weitere Vorteile:

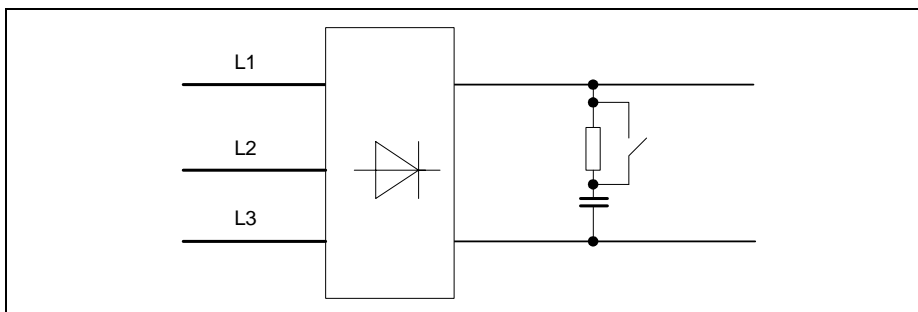
- Sanftes Beschleunigen und Bremsen
- Energieeinsparung
- Betrieb mit Frequenzen > 50Hz
- Zusätzliche Funktionen im Frequenzumrichter, wie z.B.: Motorschutz, PID-Regler, Logik
- Kommunikation über Feldbus
- usw.

### 3.2 Eingangs- und Vorladekreis

Den Eingangskreis des Frequenzumrichters besteht aus einem Gleichrichter, der die Netzwechselspannung in die Gleichspannung des Zwischenkreises umwandelt. Im Zwischenkreis sind Kondensatoren geschaltet, die folgende Funktionen übernehmen:

- die erzeugte Gleichspannung glätten
- die vom Motor benötigte Blindleistung zur Verfügung stellen
- die in den Übergangsvorgängen entstehende Energie speichern

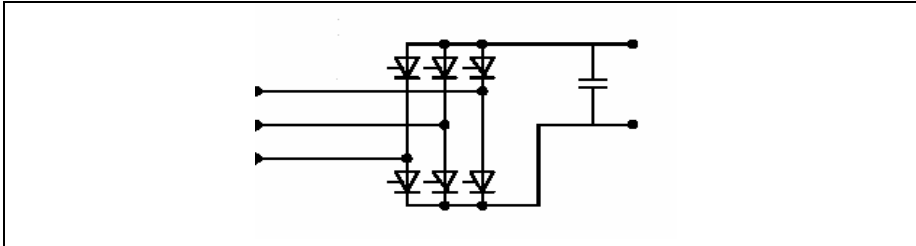
Der Eingangsgleichrichter ist bei kleinen Leistungen aus einer ein- oder dreiphasigen ungesteuerten Diodenbrücke und einer Vorladeschaltung vor den Kondensatoren aufgebaut.



**Bild 3-2** MICROMASTER 4 Eingangskreis

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Bei den Geräten MICROMASTER 4 ist der Eingangskreis entsprechend dem Bild 1-2 aufgebaut. Der Vorladekreis besteht aus ein in Reihe geschalteten Begrenzungswiderstand, der den Vorladestrom des Kondensators begrenzt und nach Beendigung des Ladevorgangs überbrückt wird.



**Bild 3-3 Thyristoreingangsbrücke**

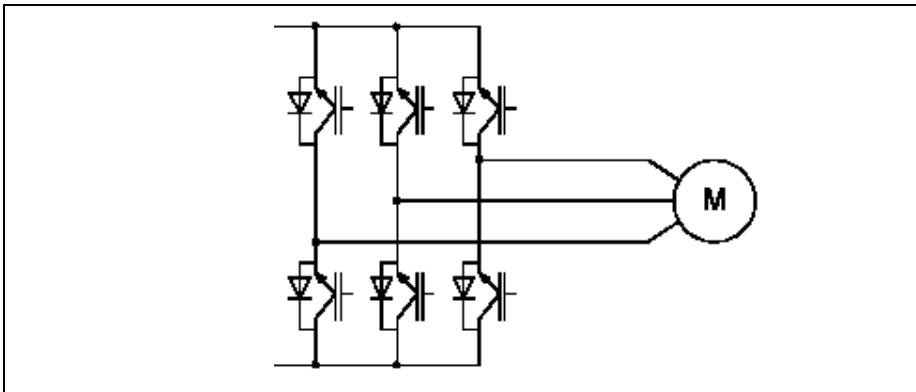
Bei leistungsstärkeren Umrichtern  $P_{umr} > 600\text{KW}$  werden meistens Thyristoreingangsbrücken eingesetzt. Die Steuerung der Vorladung der Kondensatoren erfolgt durch stufenweise Erhöhung der Aussteuerung der Thyristoren. Nach Beendigung der Vorladung bleiben die Thyristoren im Durchlasszustand geschaltet.

### 3.3 Ausgangskreis

Der aus einer dreiphasigen Transistorbrücke bestehende Ausgangskreis hat die Aufgabe, die Gleichspannung des Zwischenkreises in ein Drehstromsystem mit variabler Amplitude und Frequenz umzuformen.

Früher wurden die verschiedenen Komponenten der Leistungselektronik, wie z.B. bipolare Transistoren, MOSFET, GTO usw. benutzt. Heute hat sich der IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) durchgesetzt. Der IGBT besitzt die Vorteile des bipolaren Transistors, d.h. hoher Ausgangsstrom und hohe Pulsfrequenz. Zudem arbeitet er spannungsgesteuert und benötigt deshalb nur eine geringe Steuerleistung, was zu kürzeren Taktzeiten und einem höheren Wirkungsgrad führt.

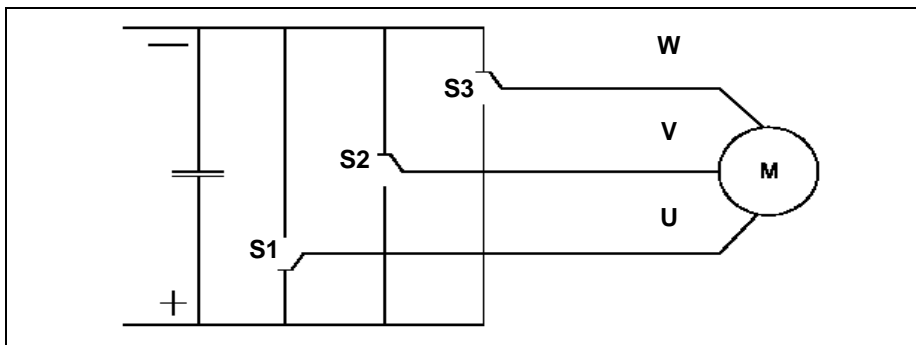
Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4



**Bild 3-4** Ausgangswechselrichter

Die Ausgangstransistoren arbeiten als Schalter, d.h. sie wechseln zwischen Durchlass- und Sperrzustand. Auf diese Weise verbinden sie die drei Phasen des Motors abwechselnd mit dem Zwischenkreis und erzeugen so einen Spannungsvektor mit konstanter Amplitude, der sich im Raum dreht.

Copyright © Siemens AG 2005 All rights reserved

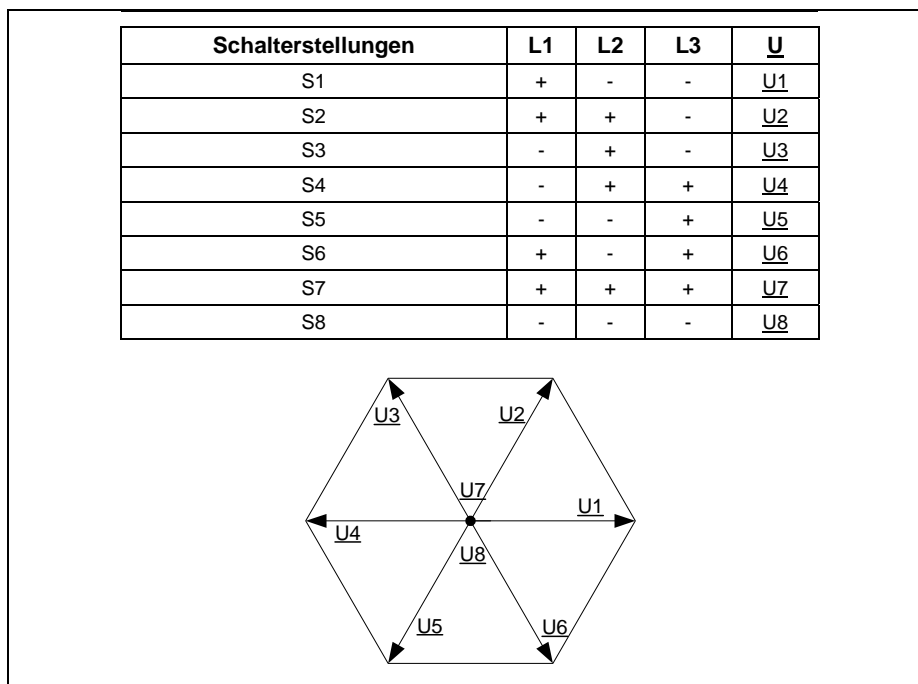


**Bild 3-5** Drehspannungserzeugung durch die Transistoren S1..S3

In der Abbildung Bild 1-5 ist der Wicklungsanschluss U mit dem positiven Zweig des Zwischenkreises verbunden, die Anschlüsse V und W hingegen mit dem negativen. Daraus resultiert der Spannungsvektor U1, dessen Amplitude der Spannung des Zwischenkreises entspricht. Schaltet man jetzt die Wicklung V auf den positiven Zweig des Zwischenkreises um, so dreht sich der resultierende Spannungsvektor um  $60^\circ$  zu U2 weiter. Die Amplitude ändert sich nicht. Jeder der möglichen Schalterstellungen kann man einen Spannungsvektor U1 bis U8 zuordnen.



Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

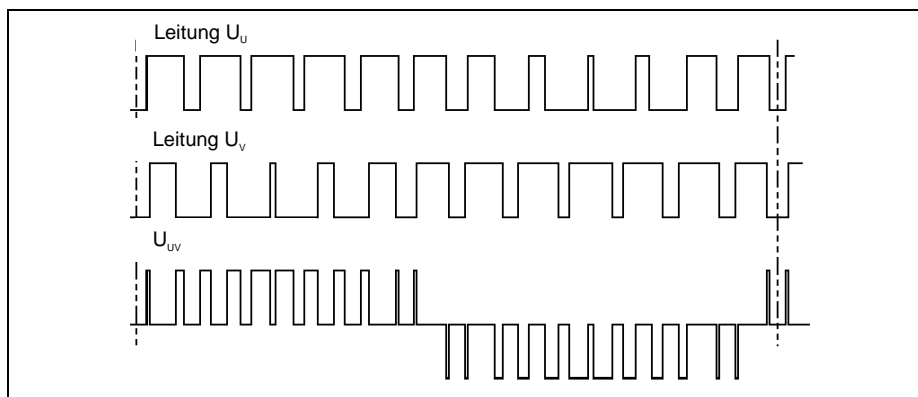


**Bild 3-6** Raumzeigerdiagramm mit Elementarraumzeiger U1..U8

In den Schalterstellungen 7 und 8 sind alle drei Wicklungsanschlüsse mit dem gleichem Potenzial verbunden, der resultierende Vektor hat deshalb die Länge null.

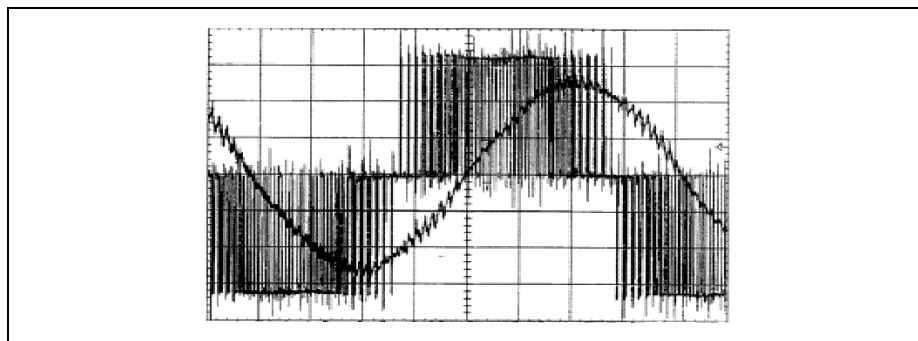
Wie bereits festgestellt wurde, ist der Motor mit variabler Frequenz und Spannung zu speisen. Dafür reicht es nicht aus, die Schalterstellungen S1 bis S6 nacheinander in der gewünschten Frequenz einzeln durchzutakten. Die sechseckige Kurvenform des umlaufenden Spannungsvektors liefert in der Praxis keine befriedigende Ergebnisse. Um einen kontinuierlich umlaufenden Spannungsvektor mit variabler Länge zu erhalten, müssen geeignete Modulationsverfahren, wie z.B. Pulsweitenmodulation (PWM) oder Raumzeigermodulation, genutzt werden.

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4



**Bild 3-7** Ausgangsspannung PWM

Die einzelnen Leiterspannungen bleiben bei der PWM gepulst. Deren Trägerfrequenz entspricht der Steuerfrequenz des Transistors. Man erkennt deutlich die unterschiedlichen Spannungszeitflächen, die sich entsprechend der Pulsvorgabe bilden. Aufgrund der Regel, nach der die Impulse moduliert werden, ergibt sich unter dem Einfluss der Motorinduktivität aus der gepulsten Spannungskurve eine Stromkurve mit annähernd sinusförmigem Verlauf.



**Bild 3-8** Ausgangsspannung und -strom

Ein möglichst sinusförmiger Stromverlauf ist deshalb wichtig, weil alle magnetischen Größen und somit auch das am Luftspalt übertragene Drehmoment vom Strom abhängen. Bei nicht sinusförmigem Verlauf erhöhen sich die Verluste im Motor und es kommt zu Drehmomentschwankungen an der Antriebswelle.

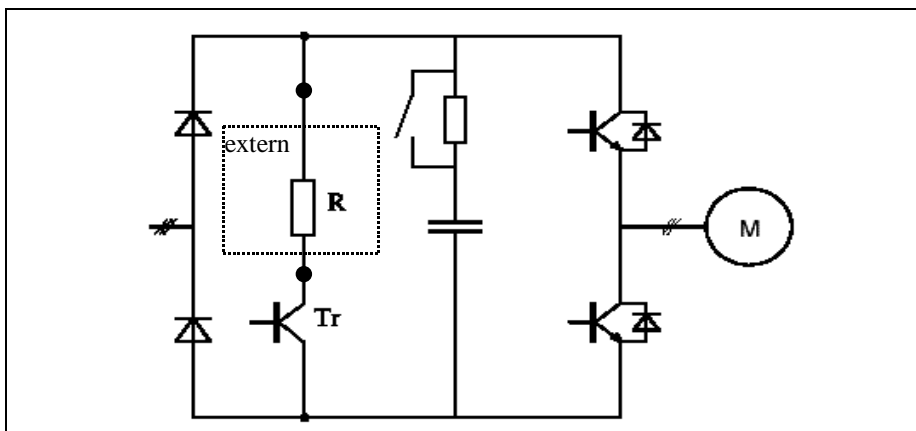
## 3.4 Bremsen des Motors

Es wird gefordert, den Motor mit angeschlossener Last kontrolliert bis zum Stillstand abzubremsen. Die Transistorbrücke im Ausgangskreis des Frequenzumrichters ist bidirektional, d.h. sie erlaubt den Stromdurchgang in beiden Richtungen. Arbeitet der Motor generatorisch, z.B. beim Abbremsen, fließt die Energie durch die Transistorbrücke in den Zwischenkreis zurück. Die ungesteuerte Diodenbrücke im Eingangskreis des Frequenzumrichters erlaubt jedoch keinen Rückfluss des Stroms ins Netz. Die vom Motor kommende Energie verbleibt im Zwischenkreis, lädt die Kondensatoren und erhöht somit die Zwischenkreisspannung. Das führt rasch zur Aktivierung der Zwischenkreisspannungsüberwachung. Bei Überschreitung der oberen Spannungsschwelle werden zum Schutz des Frequenzumrichters alle Ausgangstransistoren gesperrt und somit der Energiezufluss vom Motor in den Zwischenkreis unterbrochen. Der Motor wird nicht mehr kontrolliert abgebremst, sondern trudelt nun vielmehr aus.

Um die beschriebene Fehlerabschaltung des Frequenzumrichters zu vermeiden, bieten die Frequenzumrichter MICROMASTER 4 verschiedene Funktionen:

- Zwischenkreisspannungsregler
- Gleichstrom-Bremse
- Widerstand-Bremse
- Compound-Bremse

Eine Möglichkeit ist der Anschluss eines Bremswiderstandes bzw. einer Bremsseinheit am Frequenzumrichter.



**Bild 3-9** Blockschaltbild MICROMASTER440 mit Bremswiderstand

---

*Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4*

Dabei wird parallel zum Zwischenkreis ein externer Widerstand (R) geschaltet, dessen Versorgung über einen Transistor (Tr) erfolgt. Die Zwischenkreisspannung wird überwacht. Nach Überschreiten einer Spannungsschwelle wird über den Transistor der Belastungswiderstand zugeschaltet. Die rückgewonnene Energie wird vom Widerstand thermisch vernichtet. Der Widerstand ist so auszulegen, dass er während der gesamten Dauer des Bremsvorgangs die benötigte Leistung aufnehmen kann.

Eine zweite Möglichkeit für die Bremsung des Motors bis zum Stillstand ist die Gleichstrombremsung (DC-Bremse). Dabei wird der Motor über zwei Phasen der Ausgangsbrücke mit Gleichstrom gespeist, der ein konstantes Magnetfeld erzeugt. Nach dem Prinzip der Wirbelstrombremse wird der Rotor abgebremst. Diese Methode hat den Vorteil, dass keine externen Komponenten benötigt werden. Sie hat aber auch verschiedene Nachteile:

- Die Bremsung ist nicht präzise, weil sich das Drehmoment mit der Geschwindigkeit ändert und bei Geschwindigkeiten nahe null sehr klein wird.
- Für ein hohes Bremsmoment, das dem Nenndrehmoment des Motors nahe kommt muss ein starker Strom eingepreßt werden.
- Das Bremsmoment hängt von der Drehmomentcharakteristik des Motors ab.
- Die gesamte Bremsenergie wird im Motor vernichtet, der sich daher stark erhitzen kann.

## 4 Projektierung des Antriebs

### 4.1 Anschluss an das Versorgungsnetz

Der Betrieb von Frequenzumrichtern hat im Versorgungsnetz unerwünschte Rückwirkungen, die vor allem auf zwei Ursachen zurückzuführen sind:

- Nicht-Linearität der leistungselektronischen Bauelemente
- hohe Steuerfrequenz des Ausgangstransistors

Die Höhe der Rückwirkungen hängt dabei stark von mehreren Faktoren, wie z.B. den Netzeigenschaften des Versorgungsnetzes, Frequenzumrichtertyp und -leistung, ab. Um den Frequenzumrichter MICROMASTER 4 und das Versorgungsnetz zu schützen und Netzurückwirkungen effektiv zu dämpfen, gibt es verschiedene Optionen und Zubehörteile.

Zum Schutz des Eingangskreises sollte der Frequenzumrichter mit passenden Sicherungen bzw. Leitungsschutzschalter an das Versorgungsnetz angeschlossen werden. Beim MICROMASTER 4 sind zum Schutz des Umrichters keine Halbleitersicherungen erforderlich, normale Schmelzsicherungen für den Leitungsschutz vom Typ gL bzw. Motorschutzschalter reichen aus. Für den Schutz des Ausgangskreises sorgen die internen Schutzvorrichtungen des Frequenzumrichters.

Des Weiteren stehen EMV-Filter und eine Netzdrossel als Optionen zur Verfügung. Der EMV-Filter dämpft die von der Pulsfrequenz des Ausgangstransistors erzeugten hochfrequenten Störungen. Das Thema elektromagnetischen Störungen wird im Kapitel 2.3 ausführlich behandelt.

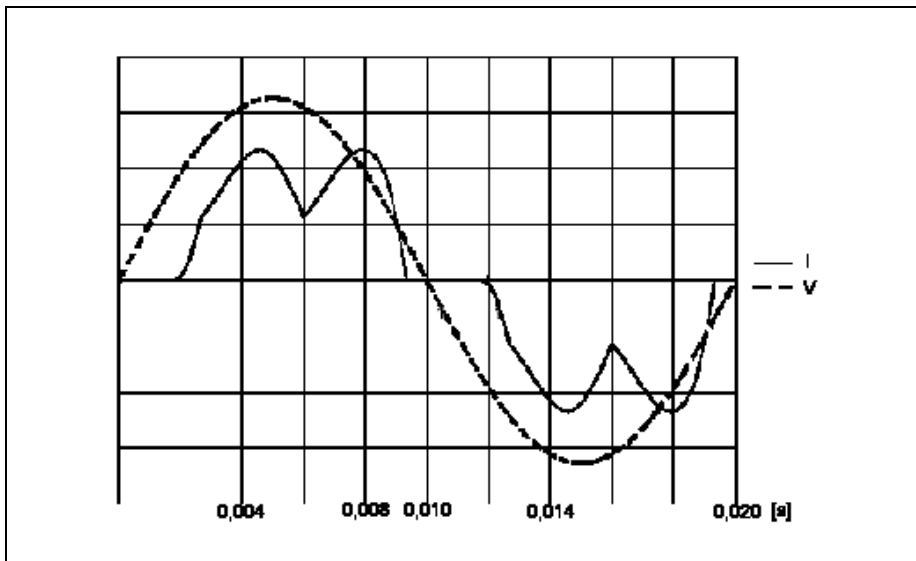
Die Netzdrossel dient zur Verringerung der Netzurückwirkungen des Frequenzumrichters, wie niederfrequente Oberschwingungen und periodischen Netzeinbrüchen.

#### 4.1.1 Niederfrequente Oberschwingungen

Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich ausschließlich auf Oberschwingungs-Spannungen und Ströme mit niedrigen Frequenzen bis max. 1kHz, mit denen der Frequenzumrichter das speisende Netz belastet.

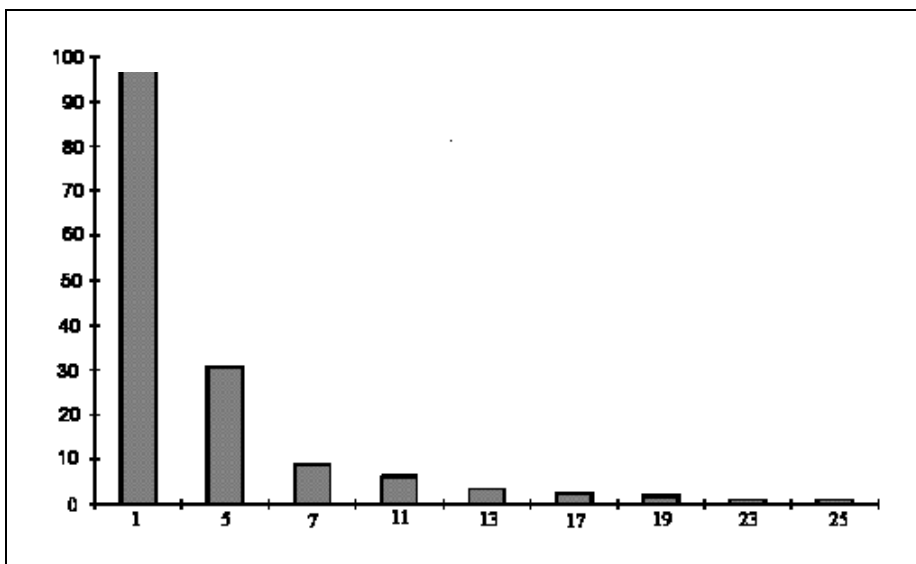
Der Eingangskreis des Frequenzumrichters besteht aus einer ungesteuerten Diodenbrücke und den nachgeschalteten Kondensatoren im Zwischenkreis. Da die Dioden erst leiten, wenn die Netzspannung die Kondensatorspannung übersteigt, werden die Kondensatoren kurzzeitig mit hohen Strompulsen nachgeladen, z.B. nach abgeschlossener Vorladung des Zwischenkreises erfolgt das Nachladen erst beim Maximum der Netzspannung. Der Stromfluss wird nur durch die Impedanzen des speisenden Netzes und des Zwischenkreises begrenzt. Der Stromverlauf ist nicht mehr sinusförmig, wie in der folgenden Abbildung gezeigt:

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4



**Bild 4-1** Spannungs- und Stromverlauf einer Netzphase

Die Fourieranalyse des Stroms zeigt, dass neben dem Grundschwingungsstrom auch Oberschwingungsströme auftreten.

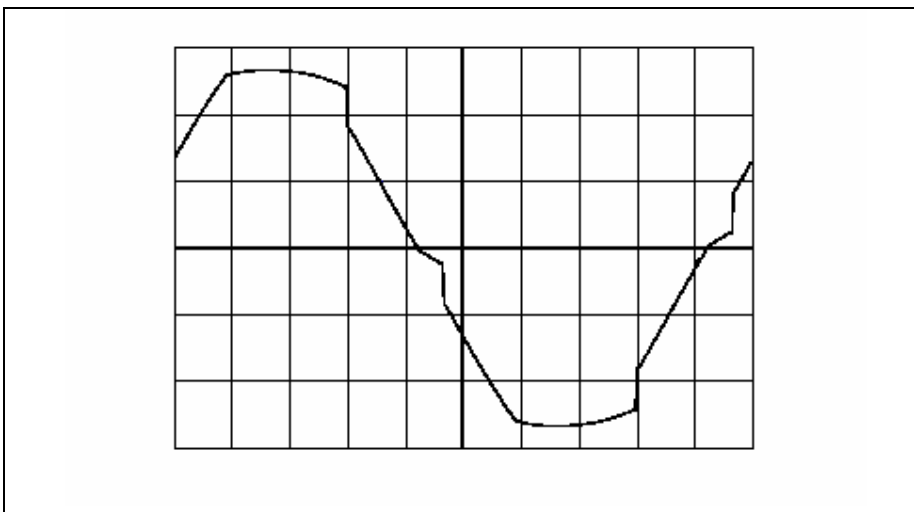


**Bild 4-2** Spektrum der Oberschwingungen

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Bei 6-pulsiger Diodenbrücke treten im wesentlichen nur ungeradzahlige, nicht durch 3 teilbare Oberschwingungsspannungen – und ströme auf der Netzseite auf.

Die im Versorgungsnetz auftretenden Funktionsstörungen sind nicht auf die Oberschwingungsströme selbst zurückzuführen, sondern auf die Spannungsabfälle, die diese im Netz bei den verschiedenen Oberschwingungsfrequenzen hervorrufen. Diese Spannungen führen infolge der Wechselwirkung mit der Netzspannung zu Verzerrungen der Spannungskurve.



**Bild 4-3**      **Verzerrte Spannungskurve**

Durch die Oberschwingungsanteile können im Versorgungsnetz des Frequenzumrichters Parallelresonanzen angeregt werden. Mit hoher Wahrscheinlichkeit treten diese Effekte auf, wenn zum Beispiel in dem Versorgungsnetz eine Blindleistungskompensation mit unverdrosselte Kondensatoren installiert ist.

Für eine Begrenzung der Netzurückwirkungen der Frequenzumrichter auf die zulässigen Werte ist die Erhöhung der Netzzuleitungsinduktivität durch den Einsatz einer Netzdrossel am effektivsten. Die Netzdrossel begrenzt den Stromanstieg, verlängert die Stromflusszeit, reduziert die Stromamplituden und in der Folge führt sie zur **Verringerung der Oberschwingungsströme**. Die Stromzeitfläche der Pulsströme bleibt im Vergleich zum unverdrosselten Betrieb konstant. Zusätzlich erhöht sich durch die Verringerung der Ladestromspitzen die Lebensdauer der Zwischenkreiskondensatoren.

Die Frage, ob überhaupt eine Netzkommutierungsdrossel erforderlich ist, hängt maßgeblich von dem für den Umrichtertyp zulässige Verhältnis von Umrichterbemessungsleistung zu Netzkurzschlussleistung ab. Der Einsatz

## Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

einer Netzdrossel beim MICROMASTER 4 ist notwendig, wenn für die Netzkurzschlussleistung gilt:

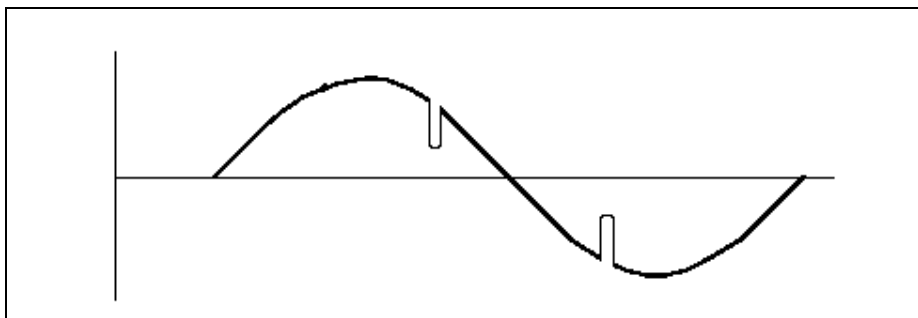
$$S_{K\_Netz} \geq 100 * S_{Umr}$$

$$S_{Umr} = \sqrt{3} * U_{netz} * I_{Umr\_Eingang}$$

Da in den meisten Fällen die Netzkurzschlussleistung  $S_{K\_Netz}$  nicht bekannt ist, wird empfohlen dem Frequenzumrichter steht's eine Netzdrossel vorzuschalten.

### 4.1.2 Netzeinbrüche

Die Verzerrung der Netzspannung wirken in Form periodischer Spannungseinbrüche, die unmittelbar durch die Kommutierungsvorgänge verursacht werden und deshalb auch Kommutierungseinbrüche genannt werden. Unter Kommutierung versteht man den Stromübergang vom stromführenden zum stromübernehmenden Zweig der Eingangsbrücke. Die betriebsmäßigen kurzzeitigen Kurzschlüsse verursachen Einbrüche in der Netzspannung, deren Höhe von dem Verhältnis der Netzinduktivität zu der dem Stromrichter oder Frequenzumrichter vorgeschaltete Induktivität (Kommutierungsdrossel) bestimmt wird.



**Bild 4-4** Spannungsverlauf einer Netzphase



---

## Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Bei ungesteuerten Diodenbrücken, wie sie bei den MICROMASTER 4 verwendet werden findet die Kommutierung stets in der Nähe des natürlichen Zündzeitpunktes statt. Somit ist fast keine „überlappende Kommutierung“ vorhanden. Die zu beobachteten Spannungslücken sind dementsprechend gering. Größere Kommutierungseinbrüche sind typisch für vollgesteuerte Thyristorenbrücken, wie sie bei Stromrichter verwendet werden. Zur Dämpfung der Spannungslücken und Begrenzung des Stromes werden bei Stromrichtern Kommutierungsdrosseln im Eingangskreis installiert.

Bei Frequenzumrichter der Baureihe MICROMASTER 4 ist der Einsatz von speziellen Kommutierungsdrossel nicht notwendig. Ist bereits eine Netzdrossel installiert, übernimmt diese die Funktion einer Kommutierungsdrossel mit.

### 4.2 Anschluss des Motors

Beim Anschluss des Motors am Frequenzumrichter wird dieser durch die gepulste Spannungskurve elektrisch und thermisch stärker belastet.

Der Verlauf der Spannungskurve besteht aus einer Impulsfolge, deren Amplitude der Spannung des Zwischenkreises entspricht. Die Anstiegszeit dieser Impulse wird durch die Schaltzeit der IGBT's von etwa 0,1µs bestimmt. Daraus ergibt sich ein Spannungsgradienten bei Versorgung mit 400V von:

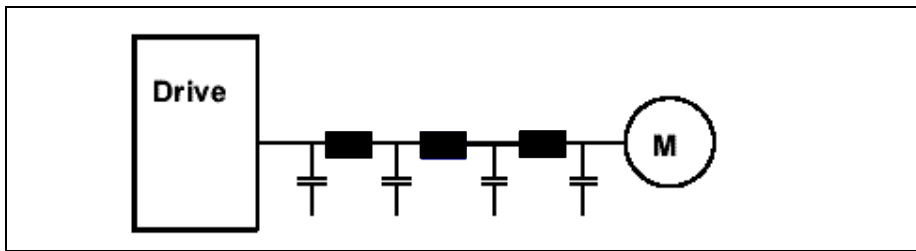
$$\frac{dv}{dt} = \frac{400V * 1,35}{0,1s} \approx \underline{\underline{5kV / \mu s}}$$

Die großen Spannungsgradienten sind die Hauptursache für die auftretenden Überströme und Spannungsspitzen, die den Frequenzumrichter, die Motorzuleitungen und die Motoren zusätzlich belasten.

#### 4.2.1 Überströme am Ausgang

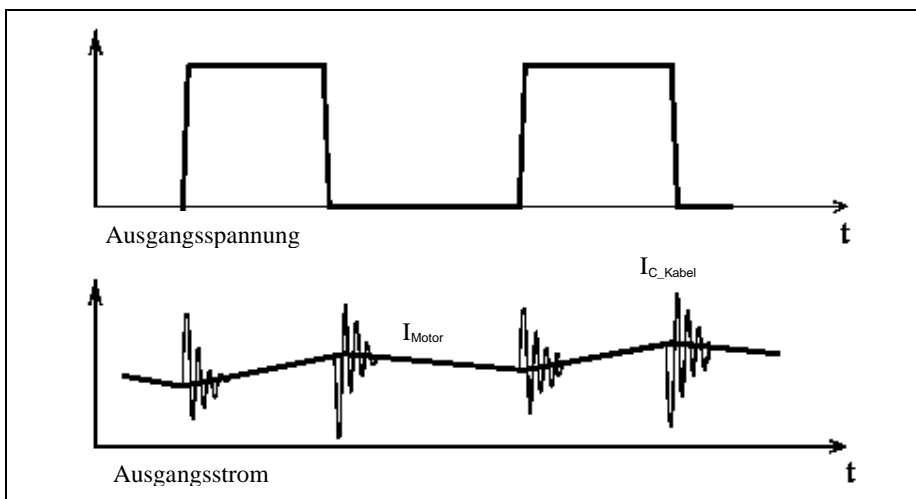
Höhere Ausgangsströme am Frequenzumrichter als tatsächlich benötigt entstehen aufgrund der Eigenkapazität des Motorleitungskabels, die bei den hier relevanten Frequenzen nicht vernachlässigt werden kann.

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4



**Bild 4-5** Kapazitäten des Motorleitungskabel

Die Impulsfolgen, die das Kabel durchlaufen, bewirken ein kontinuierliches Laden und Entladen der Kondensatoren. Die dadurch hervorgerufenen Ladeströme sind dem Effektivstrom überlagert und belasten den Frequenzumrichter zusätzlich.



**Bild 4-6** Ausgangsspannung – und strom

Diese Ströme sind um so größer, je höher die beteiligte Kapazität, je länger das Kabel und je höher Pulsfrequenz des Frequenzumrichter ist.

In den technischen Unterlagen der Frequenzumrichter, werden die maximal anschließbaren Kabellängen benannt. Durch den Einbau von speziellen Ausgangsdrosseln, können die Umladeströme gedämpft und somit die Leitungslängen verlängert werden.

## 4.2.2 Überspannungen am Ausgang

Die Erhöhung des Spannungswertes am Motor ist auch auf die steilen Spannungsfanken und sich dadurch ausbreitende Wanderwelle zurückzuführen. Dabei pflanzt sich die Wanderwelle zwischen Umrichteranschluss und dem Motor mit einer Geschwindigkeit von 150 m/μs im Kabel fort.

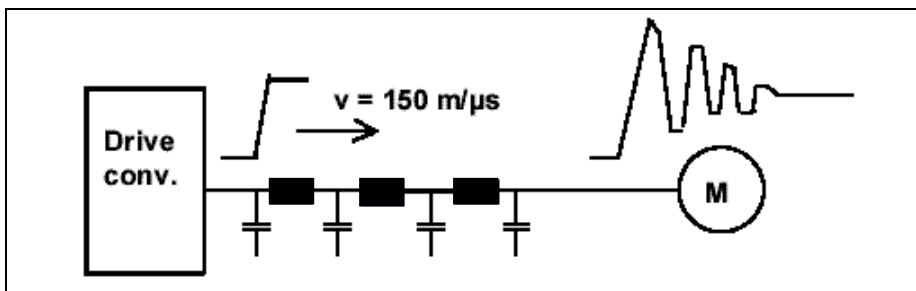


Bild 4-7 Spannungskurven am Umrichteranschluss und am Motor

Die Wanderwelle trifft am Motor plötzlich auf einen geänderten Wellenwiderstand von der Größe  $R_{Mot} \approx 10..20 * R_{Kabel}$  und wird zum Frequenzumrichter zurückreflektiert, dann erneut zum Motor usw. Nach einer Zeit von ca. 1 μs ist der Einschwingvorgang beendet. Im Betrieb bei Nennspannung können am Motor Spannungsspitzen auftreten mit dem Maximalwert von:

$$\hat{U}_{Max\_mot} = 1,9 * U_{ZK} = 2,6 * U_{Netz}$$

In den Übergangsphasen, z. B. den Brems- und Beschleunigungsphasen, steigt die Spannung im Zwischenkreis weiter an, was einen entsprechenden Anstieg der Spannungsspitzen an den Motorklemmen zur Folge hat.

Voraussetzung für die Spannungsreflexion in voller Höhe ist, dass die Spannungsanstiegszeit kleiner ist als die Laufzeit der Wanderwelle vom Frequenzumrichter zum Motor.

$$\Delta t < t_{Lauf} = \frac{l_{Kabel}}{v}$$

Daraus folgt für die kritische Kabellänge:

$$l_{Kabel} > v * \Delta t = 150 \frac{m}{\mu s} * 0,1 \mu s = \underline{15m}$$

Als Ergebnis erhält man, dass die volle Spannungsreflexionen bereits bei sehr kurzen Kabellängen ab 15 m auftritt. In der Praxis muss fast immer damit gerechnet werden.

---

*Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4*

Für die Reduzierung der Spannungsreflektionen werden als Optionen für den MICROMASTER 4 Ausgangsdrosseln und zukünftig auch LC-Filter angeboten. Die Ausgangsdrosseln dämpfen den Spannungsanstieg hinter der Drossel und verringern die kapazitiven Umladeströme. Die LC-Filter begrenzen den Spannungsanstieg und reduzieren die Spannungspitzen. Zusätzlich beeinflussen sie die Spannungskurve und nähern diese einer Sinus-Kurve an.

## **4.3 Elektromagnetische Verträglichkeit**

### **4.3.1 Allgemeines und relevante Normen**

Unter dem Begriff der Elektromagnetischen Verträglichkeit werden elektromagnetische Störungen wie z.B. starke magnetische Felder und elektrostatische Entladungen, zusammengefasst. Ein Frequenzumrichter muß selbst äußeren EMV-Einflüssen widerstehen können und darf im Betrieb nur begrenzt elektromagnetische Störungen für andere Geräte verursachen. Die vom Frequenzumrichter ausgehenden Störungen werden hauptsächlich von der hohen Taktfrequenz der Ausgangswechselrichter hervorgerufen.

Die Untersuchung dieser Phänomene, die in der Vergangenheit auf die mit realen Funktionsstörungen verbundenen kritischsten Fälle beschränkt war, wurde nach Einführung der Richtlinie 89/336/EWG über die elektromagnetische Verträglichkeit immer mehr ausgeweitet. Diese EMV-Richtlinie beschränkt sich auf die Anforderung, dass kein elektrisches Gerät in seiner Umgebung elektromagnetische Störungen hervorrufen bzw. durch Störungen aus der Umgebung beeinträchtigt werden darf, überlässt aber die Detailfragen im Hinblick auf die Realisierung dieser Anforderung den verschiedenen Anwendungsnormen. Für Frequenzumrichter ist dies die Norm EN-61800-3 und für den Einsatz im Wohnbereich die Fachgrundnorm für elektromagnetische Störungen im Wohnbereich EN50081-1. In der Norm wird unterschieden zwischen dem Einsatz in industriellen und kommerziellen Betriebsräumen (Klasse A) und im Wohnbereich (Klasse B).

- Bei Einsatz laut Klasse A sind die Anforderungen an die Störfestigkeit höher und die Anforderungen auf die Emission von Störungen bezogen hingegen niedriger.
- Bei Einsatz laut Klasse B sind die Anforderungen umgekehrt definiert.

## Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Es muss unterstrichen werden, dass der Frequenzumrichter in den geltenden Normen als "Komponente" eines "Systems" betrachtet wird und jede EMV-Zertifizierung und die darauf folgende Zuteilung des CE-Kennzeichens sich auf das gesamte System beziehen muss. Die Zertifizierung allein des Umrichters, wie auch jeder anderen Komponente, führt nicht automatisch zur Zertifizierung des Gesamtsystems.

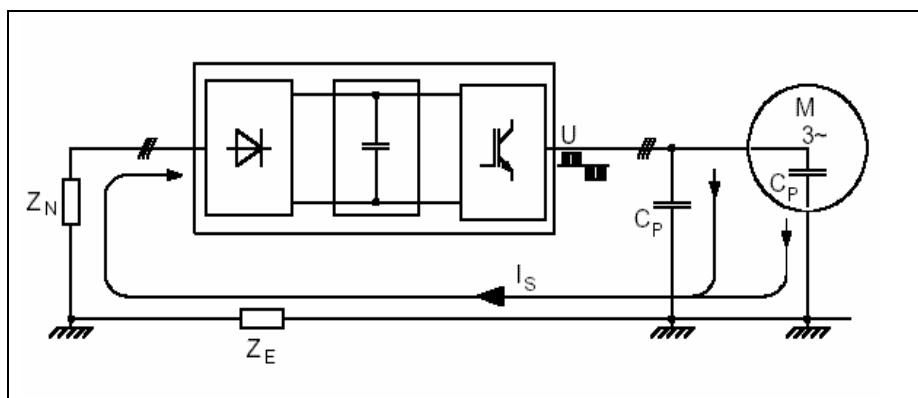
Dazu müssen alle Komponenten, vom Versorgungsnetz bis zum Motor, gemäß den Bestimmungen der EMV-Normen installiert und verkabelt sein. Abschließend kann der Konstrukteur seine Anlage entweder von einem speziellen Institut zertifizieren lassen oder die Einhaltung der Normen selbst zertifizieren. Eine umfassende Analyse der Anlage erfolgt meistens nur, wenn bereits Probleme mit EMV-Störungen aufgetreten sind.

### 4.3.2 Reduzierung der elektromagnetischen Störungen

Die Störungen werden, je nach Ausbreitungsart, unterteilt in:

- leitungsgebundene Störungen, die sich in den Kabeln und Abschirmungen ausbreiten
- nichtleitungsgebundenen Störungen als hochfrequente Störungen, die sich als elektromagnetische Welle ausbreiten

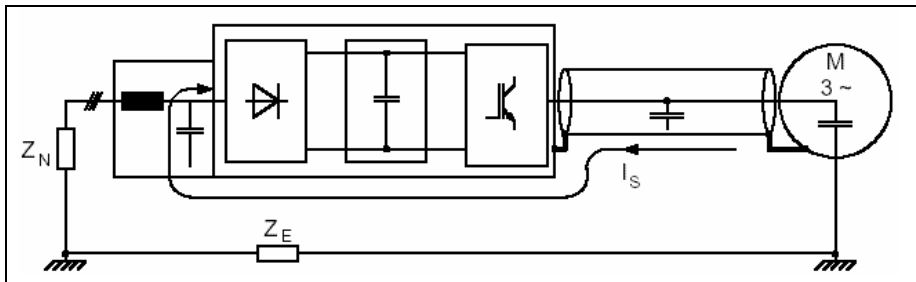
Ohne geeignete Maßnahmen breiten sich die Störsignale, z.B. in Form von Störströmen, unkontrolliert in der gesamten Anlage über die Verbindungskabel und das Erdungssystem aus. Eine Reduzierung der Störpegels kann nur durch gezielte Abhilfemaßnahmen für die Unterdrückung beider Ausbreitungsarten erreicht werden. Ziel ist dabei, dass sich die Störungen auf bestimmte Wege ausbreiten sollen um die Wechselwirkungen mit anderen Anlagenteilen zu verringern und die Störströme gezielt abzuleiten.



**Bild 4-8** Verlauf des Störstrom  $I_S$  bei ungeschirmten Motorzuleitungen

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Durch die gepulste Ausgangsspannung des Frequenzumrichter werden die parasitären Kapazitäten  $C_P$  geladen und entladen. Der Störstrom muss zu seiner Quelle, d.h.. den Frequenzumrichter, zurückfließen. Bei der Verwendung von ungeschirmten Leitungen fließt der Störstrom über die Impedanzen der Erde  $Z_E$  und der Netzzuleitung  $Z_N$ , wie z.B. Fundament-Erder, Kabelpitschen usw., undefiniert zurück. Der Störstrom und die von ihm verursachten Störspannungen können andere Geräte negativ beeinflussen und schädigen.



**Bild 4-9** Geschirmte Motorzuleitungen und Einbau eines EMV-Filters

Um den Störstrom auf einen definierten Weg zum Frequenzumrichter zurückfließen zu lassen, sind abgeschirmten Leitungen erforderlich. Die Abschirmung muss großflächig mit dem geerdeten Umrichtergehäuse und dem geerdeten Motorgehäuse verbunden werden. Der Leitungsschirm darf keine Unterbrechung aufweisen, wie z.B. an eventuellen Kabelverbindungsstellen. In manchen Fällen ist es sinnvoll durch ein separates flaches Erdungskabel mit großem Querschnitt einen Potenzialausgleich zwischen Motor und Umrichter herzustellen, um einen Teil des Störstrom zuleiten.

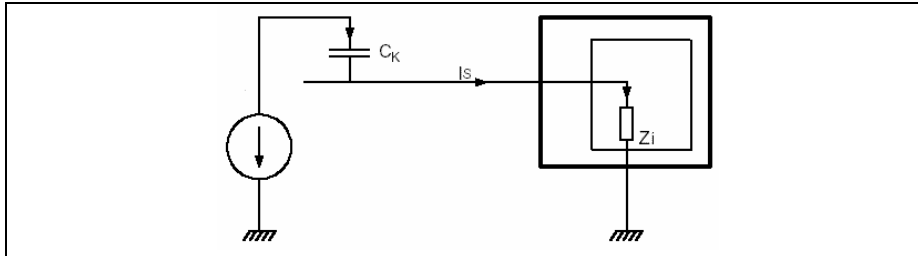
Damit der hochfrequente Störstrom über eine möglichst niedrige Impedanz zum Zwischenkreis des Umrichters zurückfließen kann, erfolgt eine kapazitive Ankopplung über Ableitkondensatoren. Die MICROMASTER 4 enthalten hierfür bereits eine Grundentstörung.

Weit bessere Ergebnisse erreicht man durch den Einsatz eines speziellen EMV-Filter am Netzeingang des Frequenzumrichters. Entsprechende EMV-Filter für die MICROMASTER 4 werden als Netzeingangsoption oder bereits im Gerät integrierte Filter angeboten.

Die Verbindung zwischen Umrichter und EMV-Filter muss möglichst kurz sein. Wichtig ist eine gute Verbindung des Umrichtersgehäuses mit dem Gehäuse des EMV-Filters. Im günstigsten Fall können die EMV-Filter direkt am Umrichter, z.B. Unterbaufilter MICROMASTER 4, angebaut werden. Ansonsten ist eine geschirmte Verbindungsleitung zwischen Filter und Umrichter zu verwenden. EMV-Filter und Umrichter müssen großflächig mit der Erde verbunden sein. Dies erreicht man durch Montage auf eine gemeinsame gut geerdete und gut leitende Montageplatte bzw. Schaltschrankrückwand.

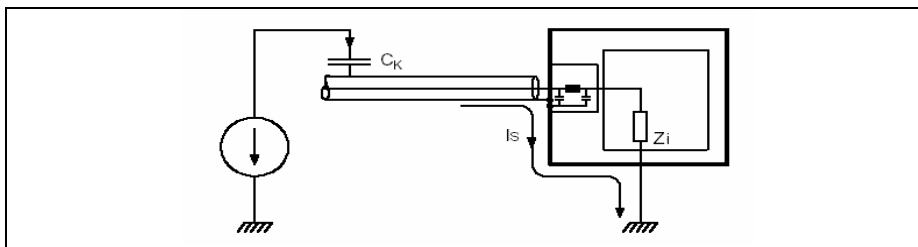
Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Zur Vermeidung von Störeinstrahlungen in Signalleitungen empfiehlt sich eine getrennte Verlegung von den Motorzuleitungen unter Einhaltung eines Mindestabstandes. Eine Parallelverlegung ist nach Möglichkeit zu vermeiden. Eine weitere Verbesserung erreicht man durch die Verwendung von abgeschirmten Signalleitungen.



**Bild 4-10** Einkoppelter Störstrom  $I_S$  in einem elektrischen Betriebsmittel

Bei kapazitiver Einkopplung über  $C_K$  bewirkt der Störstrom  $I_S$  an der Impedanz  $Z_i$  einen Spannungsabfall. Bei empfindlichen Komponenten, z. B. Mikroprozessoren, Eingangstreiber von digitalen Schaltungen usw., kann diese Spannung zu einer Funktionsstörung oder zur Zerstörung der Bauteile führen.

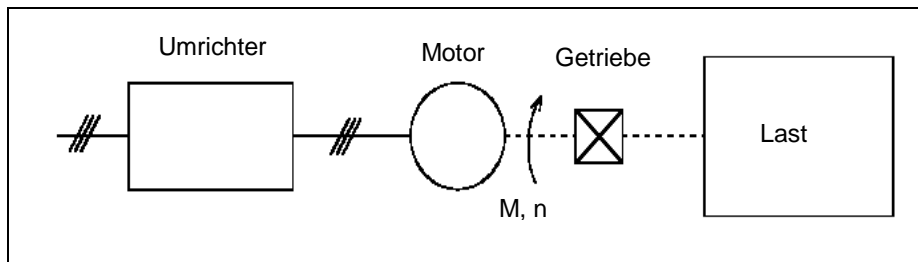


**Bild 4-11** Abgeleiteter Störstrom  $I_S$

Bei Verwendung abgeschirmter Signalleitungen wird der Störstrom  $I_S$  über das Gehäuse in die Erde abgeleitet und hat keine Auswirkungen auf die internen Stromkreise. Der Leitungsschirm muss auf beiden Seiten mit der Erde großflächig verbunden werden. Bei analogen Signalen kann das Signalrauschen, so genannte Brummschleifen, verursachen. In diesem Fall erdet man eines der beiden Enden über einen Kondensator ( $0,01 \div 0,1 \mu F$ ), der bei den hohen Frequenzen eine sehr kleine Impedanz aufweist.

## 5 Auslegung des Antriebssystem

Auslegung des Antriebssystem bedeutet, dass auf der Grundlage der mechanischen Daten alle für die gewünschte Anwendung benötigten Komponenten spezifiziert werden. Der prinzipielle Aufbau eines Antriebssystem ist im Bild 3-1 zu sehen.



**Bild 5-1** Prinzipieller Aufbau eines Antriebssystem mit Last

Die Auswahl und Berechnung eines Antriebssystem erfolgt heute häufig durch den Einsatz von komfortablen Softwaretools.

### Die wichtigsten Projektierungsschritte umfassen:

- Sammlung der verfügbaren mechanischen Daten
- Festlegen einer Lastkennlinie bzw. eines Lastzyklus bei einer Applikation
- Berechnung der relevanten Last- bzw. Überlastmomente und Drehzahlen
- Wahl der Getriebeübersetzung
- Auswahl des passenden Motortyps
- Auswahl des Frequenzumrichters auf Grundlage der geforderten Last- und Überlastströme

### Zusätzliche Auswahlkriterien und Einflussfaktoren sind:

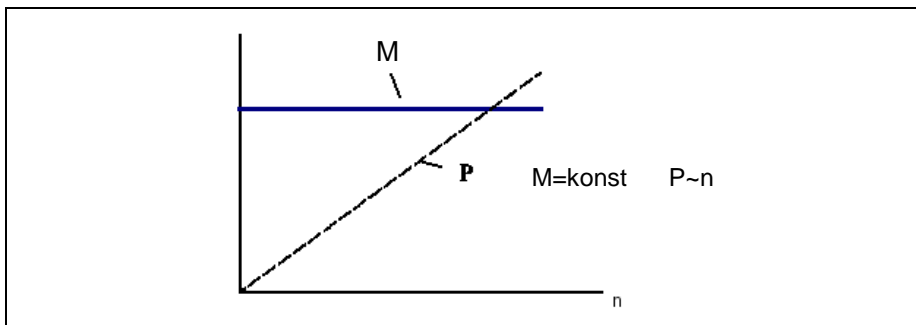
- Zulässige mechanische Grenzdrehzahlen der Motoren und Getriebe
- Thermische und dynamische Motormomentengrenzen
- Umgebungstemperatur
- Aufstellungshöhe
- Wärmeklasse des Motors



## 5.1 Lastkennlinien

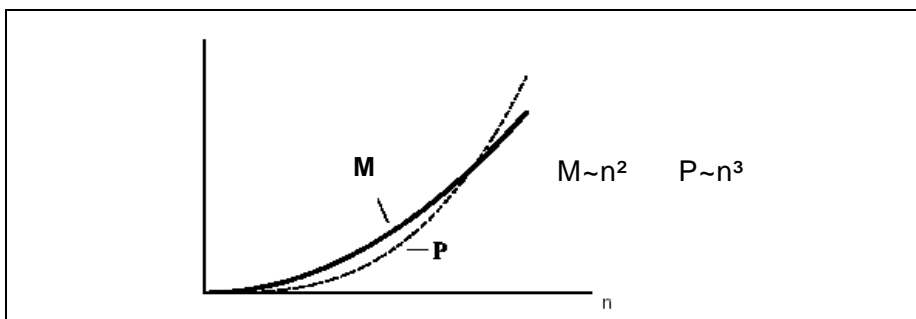
Lastkennlinien gibt es für Antriebe, die überwiegend im stationärem Betrieb eingesetzt werden. Das Lastmoment ist als Funktion der Drehzahl gegeben.

Bei den Lasten mit Konstantmoment ändert sich das Drehmoment nicht, wenn sich die Drehzahl ändert.



**Bild 5-2** Konstantes Lastmoment

Bei Lasten mit quadratischer Lastkennlinie, ändert sich das Lastmoment proportional zum Quadrat der Drehzahl. Dies ist typisch für Maschinen zum Fördern von Flüssigkeiten und Gasen, d.h. für Pumpen, Zentrifugen und Ventilatoren.

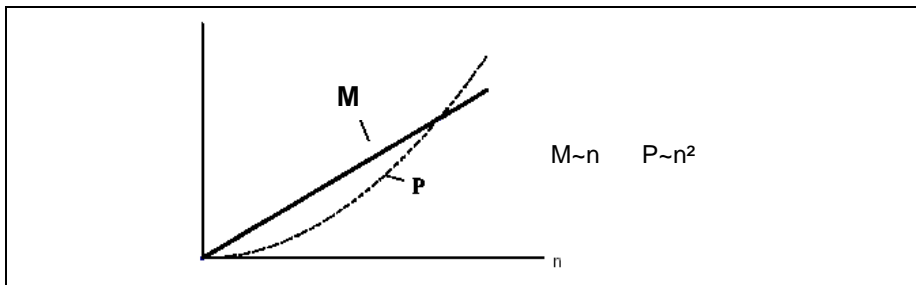


**Bild 5-3** Quadratische Lastkennlinie

Bei der Auslegung der Maschinen ist zu berücksichtigen, dass die Verdrängerpumpen (z. B. Kolben-, Zellen- und Zahnrادpumpen) Maschinen mit Konstantmoment sind.

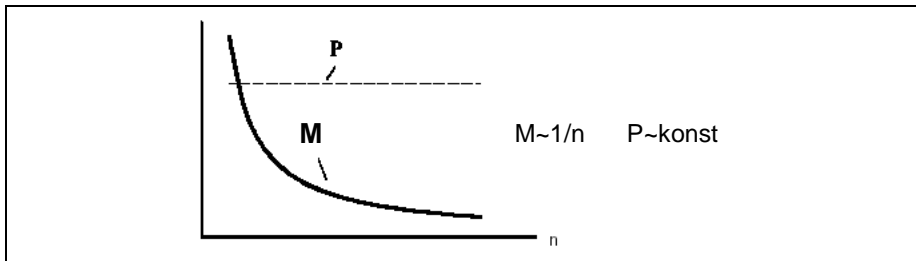
Lastenkennlinien bei denen das Drehmoment typischerweise linear mit der Geschwindigkeit ansteigt sind z. B. Walzwerke.

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4



**Bild 5-4** Lineare Lastkennlinie

Antriebe, bei denen das Drehmoment bei wachsender Geschwindigkeit abnimmt, sind z.B. Wickler- und Spindelantriebe.



**Bild 5-5** Abnehmende Lastkennlinie

Die letztgenannten Typen sind jedoch Spezialfälle, der Großteil der Anwendungen wird von den ersten beiden Lasttypen (mit Konstantlast bzw. quadratischem Lastmoment) abgedeckt.

Bei der Auslegung des Motors ist zu berücksichtigen, dass beim Standard-Asynchronmotor die Kühlung durch einen auf die Welle aufgedrückt Lüfter erfolgt, dessen Kühlleistung proportional zu  $n^3$  ist. Prinzipiell gibt es eine direkte Abhängigkeit zwischen Motormoment, Motorstrom und Motortemperatur.

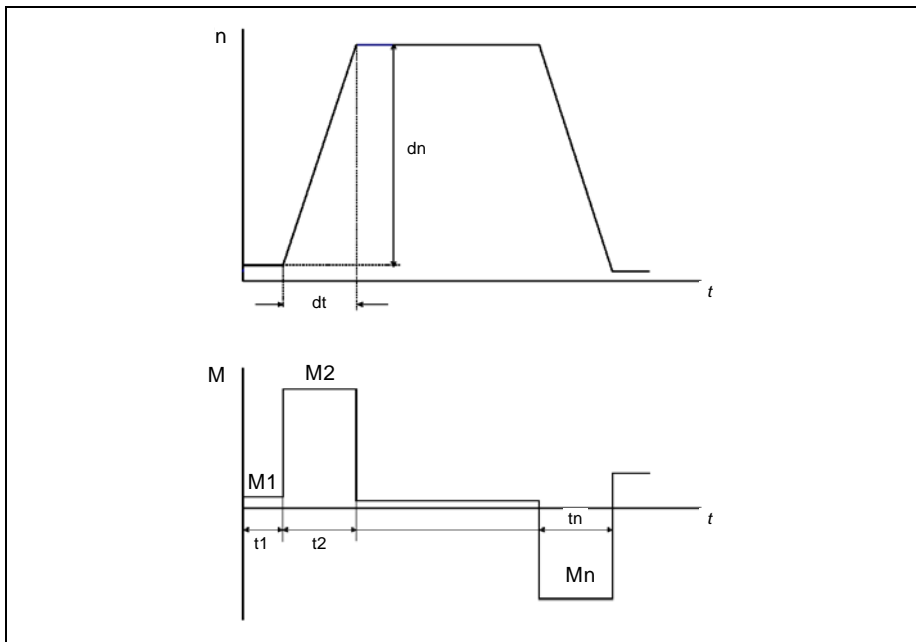
Beim Betrieb mit quadratischem Lastmoment wächst das Lastmoment mit der Drehzahl. Der Motor wird immer ausreichend gekühlt und nicht thermisch überlastet.

Beim Betrieb mit Konstantlast hingegen schafft es der Lüfter bei niedrigen Drehzahlen nicht, die gesamte erzeugte Wärme abzuleiten. In diesem Fall, um thermische Überbeanspruchung oder Zerstörung des Motors zu verhindern, muss ein Fremdlüfter am Motor angebaut werden.

## 5.2 Lastzyklen

Die Auslegung des Antriebs auf Grundlage eines Lastzyklus wird eingesetzt für Antriebe mit periodischen applikationsspezifischen Lastkurven. Die sich zyklisch verändernden Größen Lastmoment und -drehzahl müssen zu erst aus dem mechanischen System und Einsatzbedingungen, wie z.B. Fahrwerk, abgeleitet werden. Dabei setzt sich das Moment aus Beschleunigungsmoment, Lastmoment, Reibmoment usw. zusammen.

Für die Berechnungen ist es zweckmäßig den gesamten Zyklus in mehrere Teilabschnitte, wie z.B. Anfahren, konstant Fahrt und Bremsen, zu teilen. Nach Berechnung des maximalen Momentes und des effektiven Momentes mit den jeweils zugehörigen Drehzahlen, kann ein Motor ausgewählt werden. Aus der Ableitung der benötigten Motorströme aus den Motormomenten, kann dann ein passender Frequenzumrichter gewählt werden.



**Bild 5-6** Beispiel eines Drehzahl- und Momentenverlaufes für einen Lastzyklus

Das maximale Drehmoment ergibt sich aus den größten Lastfall. Das effektive Drehmoment errechnet sich aus:

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{M_1^2 * t_1 + M_2^2 * t_2 + \dots + M_n^2 * t_n}{t_1 + t_2 + \dots t_n}}$$

---

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Wie im Bild 3-6 zu sehen ist, wird während der Beschleunigung der Last das Moment M2 benötigt. Dabei setzt sich das Moment M2 aus dem konstanten Lastmoment M1 und dem Beschleunigungsmoment zusammen. Beim Bremsen subtrahieren sich das Bremsmoment und das konstante Lastmoment.

Für die Bereitstellung der maximalen Lastmomente kann sowohl die Überlastfähigkeit der Asynchronmotoren, wie auch der Frequenzumrichter genutzt werden. Zu beachten sind dabei:

- Die dynamischen und thermischen Momentengrenzen der Motoren im Konstantflussbereich bzw. im Feldschwächbereich
- Die verschiedenen Überlastzyklen der Frequenzumrichter, die abhängig sind von Typ und Baugröße des Gerätes.

Bei Lasten mit quadratischem Lastmoment (englisch: Variable Torque) erfolgt die Auswahl der Umrichterleistung nach einer sogenannten VT-Tabelle. Hintergrund hierfür ist, dass für den Betrieb nach quadratischer Lastkennlinie, der maximale Lastpunkt erst bei Nenndrehzahl erreicht wird. Des weiteren müssen häufig keine weiteren Überlasten berücksichtigt werden. Für den Frequenzumrichter bedeutet das, dass ein größerer Dauerlaststrom bei jedoch kleinerer Überlastfähigkeit zulässig ist.

Für den MICROMASTER 4 ergeben sich für ein Gerät somit eine höhere zulässige VT-Leistung, z.B.:

MM440 mit der Bestellnummer 6SE6440-2UC24-0CA1

**CT (konstantes Drehmoment)**

Leistung 4,0kW,  $I_{Umr\_aus} = 17,5A$

$I_{Umr\_max} = 1,5 * 17,5A$  für 60s Zyklus 300s

**VT(variables Drehmoment)**

Leistung 5,5kW,  $I_{Umr\_aus} = 22A$

$I_{Umr\_max} = 1,1 * 17,6A$  für 60s Zyklus 300s

Zu beachten ist, dass bei Lüfter mit großen Trägheitsmomenten und relativ raschen Drehzahländerungen größere Beschleunigungsmomente auftreten können. In diesem Fall ist die Umrichterauswahl in Bezug auf die benötigten maximalen Motorströme zu überprüfen.

## 5.2.1 werden, damit Momentengrenzen des Asynchronmotors

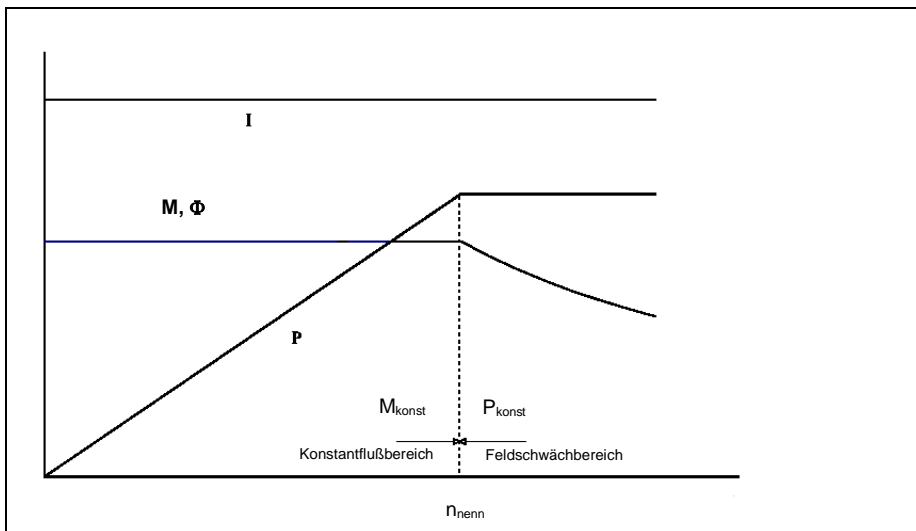
Zur Veränderung der Drehzahl bei Asynchronmotoren werden Spannung und Frequenz durch den Frequenzumrichter eingestellt. Um die Forderung nach konstanten Fluss in der Maschine zu erfüllen, muss das Verhältnis zwischen Spannung und Frequenz konstant sein. Damit erhält man auch ein konstantes Moment.

$$M \approx \varphi \approx \frac{U}{f} = konst$$

Im Konstantflussbereich ergibt sich bei konstanten Moment auch ein konstanter Motorstrom.

Bei Erreichen der maximalen Ausgangsspannung des Frequenzumrichter lässt sich das Verhältnis  $U/f$  nicht mehr konstant einstellen. Ab diesen Punkt beginnt für die Asynchronmaschine der Feldschwächbereich. Durch Erhöhung der Frequenz kann die Drehzahl des Motors weiter erhöht werden, z.B. bis zur mechanischen Grenzdrehzahl.

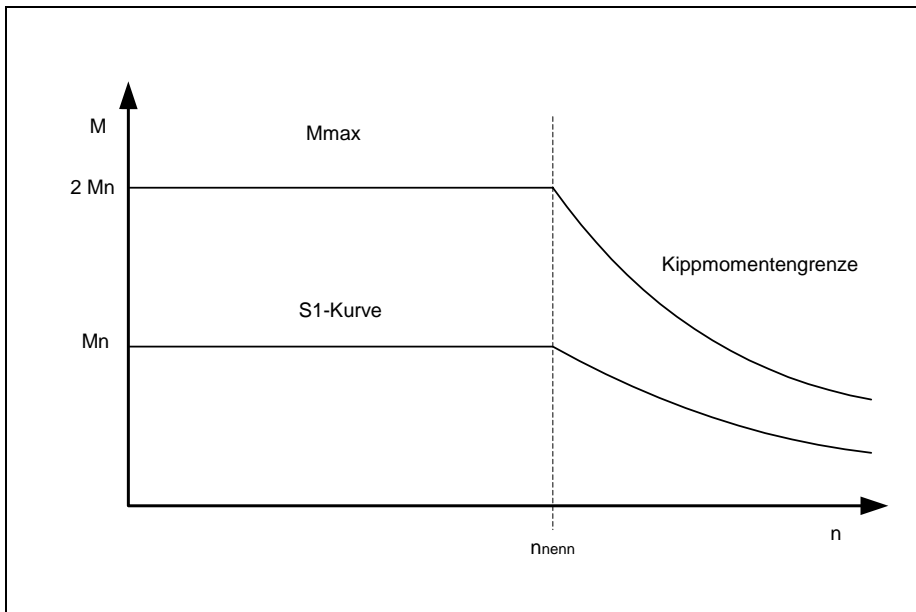
Im Feldschwächbereich kann der Asynchronmotor etwa mit konstanter Leistung betrieben bleiben auch etwa die Verluste und der Motorstrom konstant. Das Drehmoment ist in diesem Bereich proportional zu  $1/n$ .



**Bild 5-7 Verhältnisse zwischen Moment, Fluss, Leistung und Strom**

Bei der Dimensionierung der Motoren müssen die spezifischen Momentengrenzen des Antriebes eingehalten werden.

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4



**Bild 5-8** Grenzkurve des Asynchronmotors

Für den Dauerbetrieb gibt die S1-Grenzkurve das thermisch zulässige Motormoment an. Für den Netzbetrieb ist das Nennmoment gleich dem S1-Moment. Das max. Moment sollte aus Stabilitätsgründen nicht größer als  $2 M_n$  sein. Im Feldschwäcbereich muss ein genügend großer Abstand zur Kippgrenze eingehalten werden. Allerdings muss beachtet werden, dass bei Feldschwächung das Kippmoment des Motors quadratisch zurückgeht.

Im Feldschwäcbereich gilt für das Moment

$$M \approx \frac{1}{f}, \text{ dagegen für das Kippmoment hingegen } M_{\text{kipp}} \approx \frac{1}{f^2}.$$

Bei der Projektierung sollte eine Sicherheitsreserve von etwa 30% zur Kippmomentengrenze eingehalten werden, um ein Kippen des Motors auszuschließen.

## 6 Beispiele für die Dimensionierung

- Im Folgenden werden Beispiele für die Dimensionierung von Antrieben dargestellt. Die Beispiele schliessen die Auswahl des Frequenzumrichter und der erforderlichen zusätzlichen optionalen Komponenten mit ein. Für alle Beispiel gelten folgende Bedingungen:
- Umgebungstemperatur 20°C Frequenzumrichter und 40 °C Motor
- Aufstellungshöhe <1000m
- Motorausnutzung nach Wärmeklasse F

### 6.1 Last mit quadratischem Drehmoment

#### 6.1.1 Beschreibung

Gesucht ist ein Antriebsmotor für einen Ventilator zur Rauchgasabsaugung. Die Drehzahl wird durch den Frequenzumrichter MM440 druckabhängig geregelt. Der Hochlauf des Ventilators aus dem Stillstand auf Nenndrehzahl muss in 30s beendet sein. Der Antrieb wird höchstens einmal pro Stunde eingeschaltet. Im Betrieb sind aufgrund der Regelung Drehzahlschwankungen von  $\pm 5\%$  innerhalb von 5s zulässig. Die Kabellänge zwischen Motor und Umrichter beträgt ca. 30 m.

#### 6.1.2 Daten

Für die Auslegung des Motors gelten folgende die Lastdaten:

Vom Ventilator benötigtes Drehmoment  $M_{Vent} = 240 \text{ Nm}$

Drehzahl Ventilator  $n_{vent} = 1100 \text{ min}^{-1}$

Trägheitsmoment des Ventilators  $J_{Vent} = 10 \text{ kgm}^2$

Gesamtwirkungsgrad  $\eta=0,80$

#### 6.1.3 Berechnung

Aus den angegebenen Lastverhältnissen kann man die erforderliche Antriebsleistung am Ventilator ableiten.

$$P_{Vent} = 0,105 * M_{Vent} * n_{Vent} = 0,105 * 240Nm * 1100 \text{ min}^{-1} \approx \underline{28kW}$$

Das im Betrieb vom Ventilator benötigte Drehmoment ist bekannt; nun berechnet man das Beschleunigungsmoment für den Hochlauf auf Nenndrehzahl:

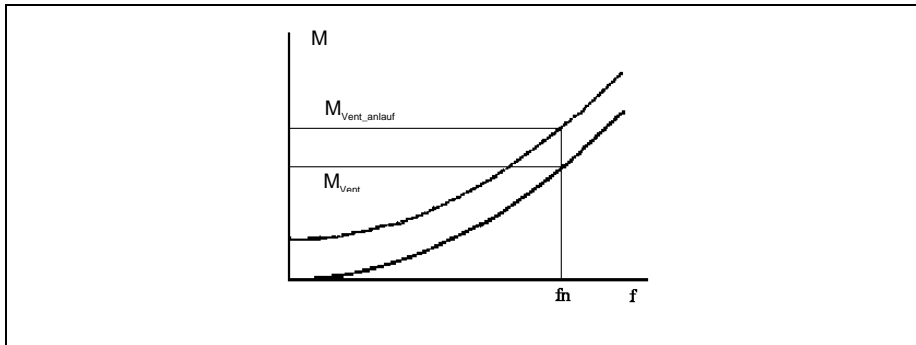
$$M_{besch} = \frac{J_{Vent} * \Delta n}{9,55 * t_{hoch}} = \frac{10kgm^2 * 1100 \text{ min}^{-1}}{9,55 * 30s} \approx \underline{38Nm}$$

Das zum Anlauf erforderliche Gesamtdrehmoment ist:

$$M_{Vent\_anlauf} = M_{vent} + M_{besch} = 240Nm + 38Nm = \underline{278Nm}$$

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Da wir es mit einer Last mit quadratischem Drehmoment zu tun haben, wird dieses Gesamtdrehmoment nur am Ende der Beschleunigungsphase benötigt.



**Bild 6-1 Drehmomentenverlauf**

Das Anlaufdrehmoment  $M_{vent\_anlauf}$  ist höchstens einmal pro Stunde erforderlich und kann bei der thermischen Auslegung des Motors vernachlässigt werden. Gleichwohl ist ein Frequenzumrichter zu verwenden, der den Anlaufstrom liefern kann.

Betrachten wir jetzt, die während des geregelten Betriebs auftretenden Drehzahl- und Drehmomentenschwankungen. Zulässig sind Drehzahlschwankungen von  $\pm 5\%$  der Nenngeschwindigkeit in 5s. Für das erforderliche Drehmoment gilt:

$$M_{Vent\_reg} = \frac{J_{Vent} * \Delta n}{9,55 * \Delta t} = \frac{10kgm^2 * 0,05 * 1100 \text{ min}^{-1}}{9,55 * 5s} = \underline{\underline{12Nm}}$$

Der ungünstigste Fall ist die Regelung bei Nennlast und Nenngeschwindigkeit des Ventilators. Das ermittelte Drehmoment ist in einer Richtung zum max. Lastdrehmoment zu addieren, in der anderen von ihm abzuziehen, so dass sich zwei Werte ergeben:

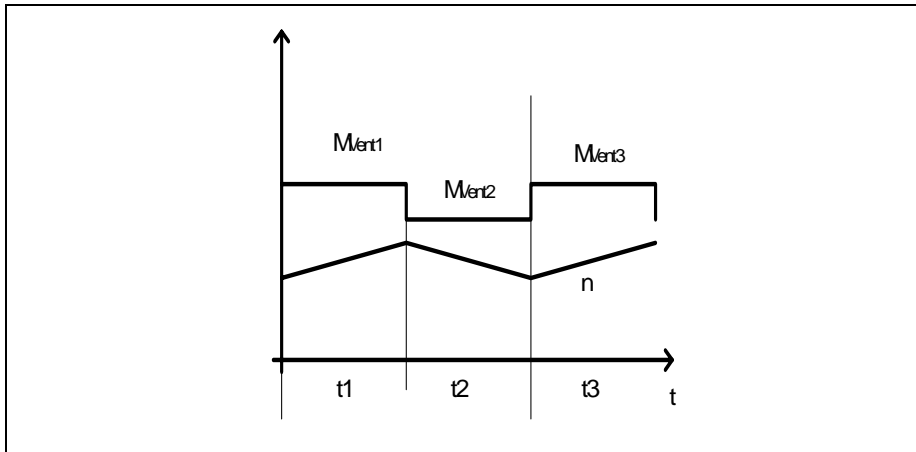
$$M_{Vent1} = M_{Vent} + M_{Vent\_reg} = 240Nm + 12Nm = \underline{\underline{252Nm}}$$

$$M_{Vent2} = M_{Vent} - M_{Vent\_reg} = 240Nm - 12Nm = \underline{\underline{228Nm}}$$

Man nehme einen symmetrischen Zyklus, vergl. Bild 4.2, für den schlechtesten Lastfall an und berechne das mittlere Drehmoment im Zyklus.



Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4



**Bild 6-2** Symmetrischer Zyklus

$$M_{Vent\_eff} = \sqrt{\frac{M_{Vent1}^2 * t_1 + M_{Vent2}^2 * t_2}{t_1 + t_2}}$$

$$M_{Vent\_eff} = \sqrt{\frac{(252Nm)^2 * 5s + (228Nm)^2 * 5s}{5s + 5s}} \approx \underline{\underline{245Nm}}$$

Man stellt fest, dass die Regelung, was das effektive Drehmoment angeht, nicht zu einer starken Verschiebung des erforderlichen Drehmomentwerts führt.

In der Bremsphase bewirkt dieses Drehmoment eine Leistungsrückgewinnung in Höhe von

$$\Delta P_{Vent\_reg} = 0,105 * M_{Vent\_reg} * \Delta n = 0,105 * 12Nm * 55 \text{ min}^{-1} = \underline{\underline{0,070kW}}$$

Dies sind weniger als 1% der Ventilatornennleistung. Ein Bremswiderstand ist nicht erforderlich, da diese Leistung durch die internen Verluste im Frequenzumrichter und durch die Übertragungsverluste vernichtet wird.

Man geht von der Verwendung eines vierpoligen Motors mit  $n=1500 \text{ min}^{-1}$  aus, um ihn bei voller Geschwindigkeit nutzen zu können, muss zwischen Lüfter und Motor ein Getriebe geschaltet werden mit der Untersetzung:

$$i = \frac{n_{mot}}{n_{Vent}} = \frac{1500}{1100} \approx 1,36$$

## Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

In diesem Fall gibt man einem vierpoligen Motor den Vorzug gegenüber einem sechspoligen mit  $1000 \text{ min}^{-1}$ , da der Letztgenannte stark in Feldschwächung betrieben werden müsste, um die erforderliche Geschwindigkeit zu erreichen.

Aus den bisher für die Lastseite (Ausgang des Reduziergetriebe) berechneten Momente, ergeben sich folgende Motormomente (Eingangsseite des Getriebes):

$$P_{\text{mot}} = \frac{1}{\eta_{\text{gesamt}}} * P_{\text{Vent}} = \frac{1}{0,8} * 28 \text{ kW} \approx \underline{\underline{35 \text{ kW}}}$$

$$M_{\text{mot}} = \frac{1}{\eta} * \frac{1}{i} * M_{\text{Vent}} = \frac{1}{0,8} * \frac{1}{1,36} * 240 \text{ Nm} \approx \underline{\underline{220 \text{ Nm}}}$$

$$M_{\text{mot\_eff}} = \frac{1}{\eta} * \frac{1}{i} * M_{\text{Vent\_eff}} = \frac{1}{0,8} * \frac{1}{1,36} * 245 \text{ Nm} \approx \underline{\underline{225 \text{ Nm}}}$$

$$M_{\text{mot\_anlauf}} = \frac{1}{\eta} * \frac{1}{i} * M_{\text{Vent\_anlauf}} = \frac{1}{0,8} * \frac{1}{1,36} * 278 \text{ Nm} \approx \underline{\underline{255 \text{ Nm}}}$$

### 6.1.4 Wahl der Komponenten

Für den Betrieb des Ventilators wird ein Lastmoment am Motor von 220 Nm bei  $1500 \text{ min}^{-1}$  bzw. ein effektives Moment von 225 Nm benötigt. Diesen Anforderungen kommt der Motor 1LA5220-4AA\_\_ am nächsten. Um Toleranzen und Datungenauigkeiten ausreichend Rechnung zu tragen, sollte man jedoch den nächst größeren Motor und Umrichter verwenden.

Motor 1LA5223-4AA\_\_

$$P_n = 45 \text{ kW}; n_n = 1470 \text{ min}^{-1}; M_n = 293 \text{ Nm} \quad I_n = 80 \text{ A}; \cos \varphi = 0,87$$

Das maximal erforderliche Drehmoment ist kleiner als das Nennmoment des Motors 1LA5223-4AA\_\_, so dass kein Überlaststrom berechnet werden muss. Zur weiteren Überprüfung kann nun mit den gewählten Motor die Getriebeübersetzung genauer angepasst werden. Anschließend können die entsprechenden Lastmomente nachgerechnet werden. Aufgrund der großen Leistungsreserven des Motors verzichten wir an dieser Stelle auf diese Überprüfung.

Der Umrichter kann für den Nennstrom des Motors ausgelegt werden. Das es um eine Last mit quadratischem Lastmoment geht, kann der Umrichter nach den Werten der VT-Tabelle ausgesucht werden. Für den Einsatz in industriellen Betriebsräumen ist in den Umrichter ein Filter Klasse A eingebaut.

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

MM440 6SE6440-2AD33-7EA1

$P_n = 45 \text{ kW (VT)}$ ;  $I_n = 90 \text{ A}$

Die passenden Eingangsoptionen sind:

Netzdrossel 6SE6400-3CC08-3ED0

Sicherungen 3 x 3NA3032

Aufgrund der kurzen Leistungslänge zwischen Motor und Frequenzumrichter ist der Einsatz von Ausgangsdrosseln nicht notwendig.

## 6.2 Last mit konstantem Drehmoment

Angetrieben werden soll eine Förderanlage mit zwei Achsen, einer horizontalen und einer vertikalen. Die Bewegungsführung erfolgt durch eine externe Baugruppe, die mit analogen Signalen die Frequenzumrichter steuert. Das Verbindungskabel zwischen den Motoren und den Umrichtern hat eine Länge von 100 m.

### 6.2.1 Daten

**Tabelle 6-1 Daten für Beispielrechnung**

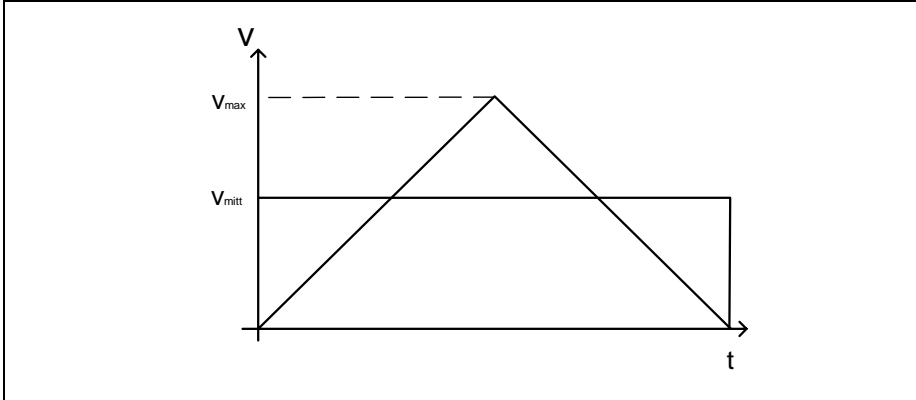
	Vertikale Achse	Horizontale Achse
Verfahrweg	s1 = 1m	s2 = 2m
Zeit	t1 = 2s	t2 = 2s
Gewicht	m1 = 500 kg	M2 =800kg

Je Achse eine Bewegung alle 3 s. Die Übertragung der Bewegung erfolgt durch Riemenscheiben mit einem Durchmesser von 20 cm.

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

## 6.2.2 Berechnung

Bei der Wahl des Verfahrprofil der Achsen wird ein dreieckiges Profil gewählt, was den Vorteil einer geringeren Beschleunigung und damit einer geringeren mechanischen Belastung hat.



**Bild 6-3 Dreiecksverfahrprofil**

Verfahrweg  $s = v_{mitt} * t = \frac{1}{2} v_{max} * t$

Maximale Geschwindigkeit  $v_{max} = 2 * v_{mitt}$

Mittlere Geschwindigkeit  $v_{mitt} = \frac{s}{t}$

### Vertikale Achse

Zunächst werden die Parameter für den Zyklus berechnet:

$$v_{mitt\_1} = \frac{s_1}{t_1} = \frac{1m}{2s} = \underline{\underline{0,5m/s}}$$

$$v_{max\_1} = 2 * v_{mitt\_1} = \underline{\underline{1m/s}}$$

$$t_{bes\_1} = t_{bre\_1} = \frac{t_1}{2} = \frac{2s}{2} = \underline{\underline{1s}}$$

$$a_1 = \frac{v_{max\_1}}{t_{bes\_1}} = \frac{1m/s}{1s} = \underline{\underline{1m/s^2}}$$

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Zum Heben der Last ist eine Kraftkomponente zur Überwindung der Trägheit und eine zweite Kraftkomponente zum Ausgleich der Gewichtskraft notwendig. Für die Beschleunigung der Masse wird die Kraft von

$$F_{\text{beschl}_1} = m_1 * a_1 = 500\text{kg} * 1\text{m/s}^2 = \underline{\underline{500\text{N}}} \text{ benötigt.}$$

woraus sich für die Beschleunigungsleistung ergibt:

$$P_{\text{beschl}_1} = \frac{F_{\text{beschl}_1} * v_{\text{max}_1}}{1000} = \frac{500\text{N} * 1\text{m/s}}{1000} = \underline{\underline{0,5\text{kW}}}$$

Dann berechnet man die zum Anheben des gegebenen Gewichts erforderliche Kraft und Leistung:

$$F_{\text{Gewicht}_1} = m_1 * g = 500\text{kg} * 9,81\text{m/s}^2 = \underline{\underline{4905\text{N}}}$$

$$P_{\text{Gewicht}_1} = \frac{F_{\text{Gewicht}_1} * v_{\text{max}_1}}{1000} = \frac{4905\text{N} * 1\text{m/s}}{1000} \approx \underline{\underline{4,9\text{kW}}}$$

Beim Heben der Last wird die maximale Leistung während der Beschleunigungsphase benötigt.

$$P_{H\_beschl} = P_{\text{beschl}_1} + P_{\text{Gewicht}_1} = 0,5\text{kW} + 4,9\text{kW} = \underline{\underline{5,4\text{kW}}}$$

Während in der Bremsphase beim Heben der Last sind hingegen die beiden Leistungen voneinander abzuziehen.

$$P_{H\_brems} = -P_{\text{beschl}_1} + P_{\text{Gewicht}_1} = -0,5\text{kW} + 4,9\text{kW} = \underline{\underline{4,4\text{kW}}}$$

Für das Absenken der Last ergeben sich folgende Leistungen.

$$P_{S\_beschl} = P_{\text{beschl}_1} - P_{\text{Gewicht}_1} = 0,5\text{kW} - 4,9\text{kW} = \underline{\underline{-4,4\text{kW}}}$$

$$P_{S\_brems} = -P_{\text{beschl}_1} - P_{\text{Gewicht}_1} = -0,5\text{kW} - 4,9\text{kW} = \underline{\underline{-5,4\text{kW}}}$$

Mit Hilfe der gegebenen mechanischen Daten, rechnen wir nun die translatorischen Größen in rotatorischen Größen um.

Umfang der Riemenscheibe:  $U = \pi * d = \pi * 0,2\text{m} = \underline{\underline{0,628\text{m}}}$

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Die maximale lineare Geschwindigkeit entspricht einer maximalen Drehzahl von:

$$n_{\max\_1} = \frac{v_{\max\_1}}{U} = \frac{1m/s}{0,628m} = 1,159s^{-1} = \underline{\underline{95,54 \text{ min}^{-1}}}$$

Bei Verwendung eines vierpoligen Motors ergibt sich  $n_{mot} = 1500 \text{ min}^{-1}$

Das erforderliche Reduziergetriebe hat somit die Untersetzung

$$i = \frac{n_{mot}}{n_{\max\_1}} = \frac{1500 \text{ min}^{-1}}{95,54 \text{ min}^{-1}} = \underline{\underline{15,7}}$$

Bei einem Wirkungsgrad des Antriebs von 0,85 und einem Wirkungsgrad des Motors von 0,86 ergeben sich für das maximale und minimale erforderliche Motordrehmoment folgende Werte:

$$M_{H\_bes} = \frac{9,55 * P_{H\_beschl}}{\eta_{mot} * \eta_{mech} * n_{mot}} = \frac{9,55 * 5400W}{0,86 * 0,85 * 1500 \text{ min}^{-1}} \approx \underline{\underline{47 Nm}}$$

$$M_{H\_bre} = \frac{9,55 * P_{H\_brems}}{\eta_{mot} * \eta_{mech} * n_{mot}} = \frac{9,55 * 4400W}{0,86 * 0,85 * 1500 \text{ min}^{-1}} \approx \underline{\underline{38 Nm}}$$

$$M_{S\_bes} = \eta_{mot} * \eta_{mech} \frac{9,55 * P_{S\_beschl}}{n_{mot}} = 0,86 * 0,85 * \frac{9,55 * -4400W}{1500 \text{ min}^{-1}} \approx \underline{\underline{-21 Nm}}$$

$$M_{S\_bre} = \eta_{mot} * \eta_{mech} \frac{9,55 * P_{S\_brems}}{n_{mot}} = 0,86 * 0,85 * \frac{9,55 * -5400W}{1500 \text{ min}^{-1}} \approx \underline{\underline{-25 Nm}}$$

Wie bereits gezeigt, treten motorische wie auch generatorische Momente auf. Bei der Berechnung des mittleren Drehmomentes wird ein Zyklus aus Heben und Senken mit einer Pause von 3s angenommen.

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

$$M_{eff\_1} = \sqrt{\frac{M_{H\_bes}^2 * t_{bes\_1} + M_{H\_bre}^2 * t_{bre\_1} + M_{S\_bes}^2 * t_{bes\_1} + M_{S\_bre}^2 * t_{bre\_1}}{(2s + 3s + 2s + 3s)}}$$

$$M_{eff\_1} = \sqrt{\frac{(47Nm)^2 * 1s + (38Nm)^2 * 1s + (-21Nm)^2 * 1s + (-25Nm)^2 * 1s}{10s}}$$

$$M_{eff\_1} \approx \underline{\underline{22Nm}}$$

### Horizontale Achse

Für die Berechnungen zur horizontale Achse verfährt man analog. Bei der Berechnung der Kräfte sind die Gewichtskräfte als Reibungskräfte zu überwinden, die die Bewegung bremsen.

Die Parameter des Zyklus berechnen sich als:

$$v_{mitt\_2} = \frac{s_2}{t_2} = \frac{2m}{2s} = \underline{\underline{1m/s}}$$

$$v_{max\_2} = 2 * v_{mitt\_2} = \underline{\underline{2m/s}}$$

$$t_{bes\_2} = t_{bre\_2} = \frac{t_2}{2} = \frac{2s}{2} = \underline{\underline{1s}}$$

$$a_2 = \frac{v_{max}}{t_{bes\_2}} = \frac{2m/s}{1s} = \underline{\underline{2m/s^2}}$$

Die erforderliche Beschleunigungskraft ist:

$$F_{beschl\_2} = m_2 * a_2 = 800kg * 2m/s^2 = \underline{\underline{1600N}}$$

Daraus folgt für die Beschleunigungsleistung:

$$P_{beschl\_2} = \frac{F_{beschl\_2} * v_{max\_2}}{1000} = \frac{1600N * 2m/s}{1000} = \underline{\underline{3,2kW}}$$

Bei einem Reibungskoeffizienten von 0,05 wird somit zur Realisierung der Bewegung die Kraft

$$F_{reib\_2} = F_{Gewicht\_2} * \mu = (800kg * 9,81m/s^2) * 0,05 = \underline{\underline{392N}}$$

benötigt; für die erforderliche Leistung folgt daraus:

$$P_{reib\_2} = \frac{F_{reib\_2} * v_{max\_2}}{1000} = \frac{392Nm * 2m/s}{1000} \approx \underline{\underline{0,8kW}}$$

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Für das Fahrprofil erhalten wir für die Beschleunigungsphase die max. Leistung von

$$P_{\max_2} = P_{\text{beschl}_2} + P_{\text{reib}_2} = 3,2 + 0,8 = \underline{\underline{4kW}}$$

und während der Bremsphase die minimale Leistung von

$$P_{\min_2} = -P_{\text{beschl}_2} + P_{\text{reib}_2} = -3,2 + 0,8 = \underline{\underline{-2,4kW}}$$

Mit Hilfe der gegebenen mechanischen Daten, rechnen wir nun die translatorischen Größen in rotatorische Größen um.

Umfang der Riemenscheibe:  $U = \pi * d = \pi * 0,2m = \underline{\underline{0,628m}}$

Die maximale lineare Geschwindigkeit entspricht einer maximalen Drehzahl von:

$$n_{\max_2} = \frac{v_{\max_2}}{U} = \frac{2m/s}{0,628m} = 3,185s^{-1} = \underline{\underline{191,08 \text{ min}^{-1}}}$$

Bei Verwendung eines vierpoligen Motors ergibt sich  $n_{\text{mot}} = 1500 \text{ min}^{-1}$

Das erforderliche Reduziergetriebe hat somit die Untersetzung

$$i = \frac{n_{\text{mot}}}{n_{\max_2}} = \frac{1500 \text{ min}^{-1}}{191 \text{ min}^{-1}} = \underline{\underline{7,85}}$$

Bei einem mechanischen Wirkungsgrad des Antriebs von 0,85 und einem Wirkungsgrad des Motors von 0,86 ergeben sich für das maximale und minimale erforderliche Motordrehmoment folgende Werte:

$$M_{\text{mot}_{\max_2}} = \frac{9,55 * P_{\max_2}}{\eta_{\text{mot}} * \eta_{\text{mech}} * n_{\text{mot}}} = \frac{9,55 * 4000W}{0,86 * 0,85 * 1500 \text{ min}^{-1}} \approx \underline{\underline{35Nm}}$$

$$M_{\text{mot}_{\min_2}} = \eta_{\text{mot}} * \eta_{\text{mech}} \frac{9,55 * P_{\min_2}}{n_{\text{mot}}} = 0,86 * 0,85 * \frac{9,55 * -2400W}{1500 \text{ min}^{-1}}$$

$$M_{\text{mot}_{\min_2}} \approx \underline{\underline{-11Nm}}$$

Bei der Berechnung des effektiven Drehmomentes wird ein Zyklus aus Fahren mit einer Pause von 3s angenommen.



Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

$$M_{eff\_2} = \sqrt{\frac{M_{mot\_max2}^2 * t_{bes\_2} + M_{mot\_min2}^2 * t_{bre\_2}}{(2+3)}}$$

$$M_{eff\_2} = \sqrt{\frac{(35Nm)^2 * 1s + (-11Nm)^2 * 1s}{5}} \approx \underline{\underline{16,5Nm}}$$

### 6.2.3 Wahl der Komponenten

Da die Anwendung auch bei relativ niedriger Geschwindigkeit eine relativ hohe Regelgenauigkeit benötigt, entscheidet man sich für den Betrieb im geschlossenen Regelkreis mit Geschwindigkeitsrückführung (Impulsgeber). Die beiden Achsen, insbesondere die vertikale, können auch für längere Zeit mit anstehendem Drehmoment stillstehen, deshalb werden Motoren mit externen Lüftern verwendet.

Darüber hinaus werden die beiden Motoren aus Sicherheitsgründen mit Feststellbremsen ausgerüstet.

#### Vertikale Achse

Dem benötigten Drehmoment am nächsten kommt der Motortyp 1LA7113-4AA\_\_, der genau den berechneten Drehmomentwert (22 Nm) aufweist. Um Toleranzen und Datenungenauigkeiten ausreichend Rechnung zu tragen, sollte man jedoch besser einen etwas größer ausgelegten Motor verwenden. Die Wahl trifft daher auf den Motortyp:

*Motor*                    1LA7130-4AA\_\_-Z  
                               H64=Anbau Bremse, Fremdlüfter und  
                               Impulsgeber  
                                $P_n=5,5 \text{ kW}$ ,  $n_n=1440 \text{ min}^{-1}$ ,  $M_n=36 \text{ Nm}$ ,  
                                $I_n=11,4 \text{ A}$ ,  $\cos \varphi = 0,83$ ,  $J = 0,018 \text{ Kgm}^2$

Dann ist der Einfluss der Motorträgheit zu prüfen. Dazu berechnet man das zur Beschleunigung des Rotors erforderliche Drehmoment:

$$M_{Rotor\_beschl1} = \frac{J_{mot1} * \Delta n}{9,55 * t_{beschl\_1}} = \frac{0,018 \text{kgm}^2 * 1500 \text{ min}^{-1}}{9,55 * 1s} \approx \underline{\underline{2,8Nm}}$$

Wenn man die Berechnung des effektiven Drehmoments noch einmal durchführt und dabei diesen Wert einsetzt, wird man feststellen, dass sein Einfluss vernachlässigt werden kann. Das Beschleunigungsmoment für Rotor des Motors wird nur bei sehr starker Beschleunigung relevant, wenn die Rotorträgheit einen mit der zu bewegenden Last vergleichbaren oder diese übertreffenden Wert annimmt.

### Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Da beim gewählten Motor das Nenndrehmoment unter dem von der Last benötigten Maximaldrehmoment liegt, muss man den am Umrichter benötigten Überstrom berechnen. Bei Asynchronmotoren ergibt sich der Motorstrom für einen beliebigen Lastpunkt näherungsweise zu:

$$\text{Konstantflussbereich} \quad I_{Motor} \approx \sqrt{I_{\mu}^2 + \left(\frac{M}{M_n}\right)^2 * I_w^2}$$

$$\text{Feldschwächbereich} \quad I_{Motor} \approx \sqrt{\left(\frac{n_n}{n}\right)^2 I_{\mu}^2 + \left(\frac{M}{M_n}\right)^2 * \left(\frac{n}{n_n}\right)^2 * I_w^2}$$

Mit dem Nennstrom des Motors und seinem Leistungsfaktor ergibt sich:

$$\text{Wirkstrom} \quad I_w = I_n * \cos \varphi = 11,4A * 0,83 = \underline{\underline{9,46A}}$$

$$\text{Leerlaufstrom} \quad I_{\mu} = \sqrt{I_n^2 - I_w^2} = \sqrt{(11,4A)^2 - (9,46A)^2} = \underline{\underline{6,36A}}$$

$$\text{Max.Moment} \quad M = M_{H\_bes} + M_{Rotor\_besch1}$$

$$M = 47Nm + 2,8Nm \approx \underline{\underline{50Nm}}$$

Für den Gesamtstrom unter der Berücksichtigung, dass aufgrund der begrenzten Ausgangsspannung des MM440 der Einsatzpunkt der Feldschwächung früher stattfindet, ergibt sich für den Motorstrom:

$$I_{Motor} \approx \sqrt{\left(\frac{0,91 * n_n}{n}\right)^2 I_{\mu}^2 + \left(\frac{M}{M_n}\right)^2 * \left(\frac{n}{0,91 * n_n}\right)^2 * I_w^2}$$

$$I_{Motor} \approx \sqrt{\left(\frac{1310 \text{ min}^{-1}}{1500 \text{ min}^{-1}}\right)^2 (6,36A)^2 + \left(\frac{50Nm}{36Nm}\right)^2 * \left(\frac{1500 \text{ min}^{-1}}{1310 \text{ min}^{-1}}\right)^2 * (9,46A)^2}$$

$$I_{Motor} \approx \underline{\underline{16A}}$$

Beim Umrichter fällt die Wahl daher auf den Typ

MM440 mit integr. Filter Klasse A 6SE6440-2AD25-5CA1

$P_n = 5,5 \text{ kW}, I_n = 13,2 \text{ A}$



Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

### Horizontale Achse

Für die horizontale Achse kommt der Motortyp 1LA7107-4AA\_\_ mit einem Nenndrehmoment von 20 Nm dem benötigten Drehmoment am nächsten. Aus den gleichen Gründen wie oben wird auch hier ein etwas größerer Motor gewählt.

Motor 1LA7113-4AA\_\_-Z  
H64=Anbau Bremse, Fremdlüfter und  
Impulsgeber  
 $P_n=4 \text{ kW}$ ,  $n_n=1440 \text{ min}^{-1}$ ,  $M_n=27 \text{ Nm}$ ,  
 $I_n=8,2 \text{ A}$ ,  $\cos \varphi = 0,83$ ,  $J = 0,011 \text{ Kg}m^2$

Dann ist der Einfluss der Motorträgheit zu prüfen. Dazu berechnet man das zur Beschleunigung des Rotors erforderliche Drehmoment:

$$M_{\text{Rotor\_beschl2}} = \frac{J_{\text{mot2}} * \Delta n}{9,55 * t_{\text{beschl}_1}} = \frac{0,011 \text{ kg}m^2 * 1500 \text{ min}^{-1}}{9,55 * 1 \text{ s}} \approx \underline{\underline{1,73 \text{ Nm}}}$$

Das für die Beschleunigung des Rotors benötigte Moment ist relativ klein und kann daher bei der Berechnung des effektiven Drehmomentes vernachlässigt werden.

Mit dem Nennstrom des Motors und seinem Leistungsfaktor ergibt sich:

Wirkstrom  $I_w = I_n * \cos \varphi = 8,2 \text{ A} * 0,83 = \underline{\underline{6,8 \text{ A}}}$

Leerlaufstrom  $I_\mu = \sqrt{I_n^2 - I_w^2} = \sqrt{(8,2 \text{ A})^2 - (6,8 \text{ A})^2} = \underline{\underline{4,6 \text{ A}}}$

Max.Moment  $M = M_{\text{mot\_max2}} + M_{\text{Rotor\_beschl2}}$

$M = 35 \text{ Nm} + 1,73 \text{ Nm} \approx \underline{\underline{37 \text{ Nm}}}$

Für den Gesamtstrom unter der Berücksichtigung, dass aufgrund der begrenzten Ausgangsspannung des MM440 der Einsatzpunkt der Feldschwächung früher stattfindet, ergibt sich für den Motorstrom:

$$I_{\text{Motor}} \approx \sqrt{\left(\frac{0,91 * n_n}{n}\right)^2 I_\mu^2 + \left(\frac{M}{M_n}\right)^2 * \left(\frac{n}{0,91 * n_n}\right)^2 * I_w^2}$$

$$I_{\text{Motor}} \approx \sqrt{\left(\frac{1310 \text{ min}^{-1}}{1500 \text{ min}^{-1}}\right)^2 (4,6 \text{ A})^2 + \left(\frac{37 \text{ Nm}}{27 \text{ Nm}}\right)^2 * \left(\frac{1500 \text{ min}^{-1}}{1310 \text{ min}^{-1}}\right)^2 * (6,8 \text{ A})^2}$$

$I_{\text{Motor}} \approx \underline{\underline{11,4 \text{ A}}}$

*Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4*

Beim Umrichter fällt die Wahl daher auf den Typ

*MM440 mit integr. Filter Klasse A*                      *6SE6440-2AD24-0BA1*

*$P_n = 4 \text{ kW}$ ,  $I_n = 10,2 \text{ A}$*

Nun ist zu prüfen, ob auch für das Fahrwerk ein Bremswiderstand erforderlich ist. Während eines Fahrzyklus entsteht nur beim Abbremsen generatorische Energie.

Die mittlere Bremsleistung berechnet sich, ohne Berücksichtigung des Wirkungsgrades, wie folgt:

$$\bar{P} = \frac{\left(\frac{P_{\min_2}}{2} * t\right)}{t_{\text{Brems\_Zyklus}}} \qquad \bar{P} = \frac{\left(\frac{2,4\text{kW}}{2} * 1\text{s}\right)}{5\text{s}}$$

$$\bar{P} = \underline{\underline{240\text{W}}}$$

Die berechnete Bremsleistung muss mit Hilfe eines Bremswiderstandes vernichtet werden. Für die Auswahl des Bremswiderstandes gilt, dass die mittlere Bremsleistung des Lastzyklus kleiner ist als die zulässige Dauerbremsleistung des Widerstandes. Wir wählen daher die folgenden Komponenten:

*Bremswiderstand*    *6SE6400-4BD16-5CA0*  
 *$P_n = 650 \text{ W}$  ;  $P_{\max} = 13 \text{ kW}$*

*Leitungsschutzsicherungen:*                      *3 x 3NA3007*

*Netzdrossel:*    *6SE6400-3CC01-4BD0*

*Ausgangsdrosseln:*                                      *6SE6400-3TC01-0BD0*

*Impulsgeberbaugruppe:*                              *6SE6400-0EN00-0AA0*

Da am Motor abgeschirmte Kabel mit einer Länge > 50m (Höchstgrenze für abgeschirmte Kabel) verwendet werden, müssen Ausgangsdrosseln installiert werden.

---

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

## 6.3 Aufwickler

### 6.3.1 Beschreibung

In unserem Beispiel erfolgt die Berechnung des Durchmessers und die Regelung der Zugkraft außerhalb des Frequenzumrichters. Der Zug wird indirekt durch Momentenbegrenzung geregelt. Der Frequenzumrichter erhält von der übergeordneten Steuerung einen Drehmoment- und ein Geschwindigkeitssollwert.

### 6.3.2 Daten

max. Durchmesser	$d_{\max} = 1,5 \text{ m}$
min. Durchmesser	$d_{\min} = 0,18 \text{ m}$
Zugkraft	$F = 100 \text{ Kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 981 \text{ N}$
Bandgeschwindigkeit	$v = 200 \text{ m/min}$
Getriebeübersetzung	$i = 4$
Wirkungsgrad Getriebe	$\eta = 0,95$
Gewicht voller Wickler	$m = 1000 \text{ Kg}$
Zusatzträgheitsmomente	$J_{\text{zus}} = 0,03 \text{ kgm}^2$
Hoch-/Rücklaufzeit	$t = 10 \text{ s}$

### 6.3.3 Berechnung

Geschwindigkeit und Drehmoment werden für stationären Betrieb mit leerer und mit voller Rolle berechnet.

Beim minimalen Durchmesser erhält man:

$$n_{\max} = \frac{v}{\pi \cdot d_{\min}} = \frac{200 \text{ m/min}}{\pi \cdot 0,18 \text{ m}} = \underline{\underline{354 \text{ min}^{-1}}} \quad (\text{max. Drehzahl})$$

$$M_{\text{stat\_min}} = F \cdot \frac{d_{\min}}{2} = 981 \text{ N} \cdot \frac{0,18 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{88 \text{ Nm}}} \quad (\text{min. Drehmoment})$$

Beim maximalen Durchmesser hingegen:

$$n_{\min} = \frac{v}{\pi \cdot d_{\max}} = \frac{200 \text{ m/min}}{\pi \cdot 1,5 \text{ m}} = \underline{\underline{42,4 \text{ min}^{-1}}} \quad (\text{min. Drehzahl})$$

$$M_{\text{stat\_max}} = F \cdot \frac{d_{\max}}{2} = 981 \text{ N} \cdot \frac{1,5 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{736 \text{ Nm}}} \quad (\text{max. Drehmoment})$$

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Die Wickelleistung berechnet sich als:

$$P_{Wickler} = 0,105 * M * n = 736Nm * 42,4 \text{ min}^{-1} \approx \underline{\underline{3,3kW}}$$

Ein Wickler besitzt eine fallende Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinie, dabei ist die Leistung für alle Betriebspunkte im stationären Betrieb konstant.

Die benötigte Motorleistung leitet sich unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades direkt ab. Da dies, die vom Motor effektiv gelieferte Leistung ist, könnte als optimale Dimensionierung ein Motor gleicher Nennleistung verwendet werden. Die Nenndrehzahl des Motors entspräche gleich der min. Drehzahl und die max. Drehzahl wird vom Antrieb im Feldschwäcbereich erreicht. Am Eingang des Reduziergetriebes erhält man folgende Werte:

$$n_{Motor-max} = n_{max} * i = 354 \text{ min}^{-1} * 4 = \underline{\underline{1416 \text{ min}^{-1}}}$$

$$n_{Motor-min} = n_{min} * i = 42,4 \text{ min}^{-1} * 4 = \underline{\underline{170 \text{ min}^{-1}}}$$

$$M_{Motor-max} = \frac{1}{\eta} * \frac{1}{i} * M_{stat-max} = \frac{1}{0,95} * \frac{1}{4} * 736Nm = \underline{\underline{193,68Nm}}$$

$$M_{Motor-min} = \frac{1}{\eta} * \frac{1}{i} * M_{stat-min} = \frac{1}{0,95} * \frac{1}{4} * 88Nm = \underline{\underline{23,16Nm}}$$

Wie in unserem Beispiel zu sehen ist, entspricht die min. Drehzahl keiner Nenndrehzahl eines Standardmotors.

Im zweiten Schritt werden die Geschwindigkeiten und Drehmomente für den dynamischen Betrieb mit leerem und mit vollem Aufwickler berechnet.

Trägheitsmoment des vollen Wicklers:

$$J_{Wickler} = \frac{1}{2} * m * \left( \left( \frac{d_{max}}{2} \right)^2 + \left( \frac{d_{min}}{2} \right)^2 \right)$$

$$J_{Wickler} = \frac{1}{2} * 1000kg * \left( \left( \frac{1,5m}{2} \right)^2 + \left( \frac{0,18m}{2} \right)^2 \right) = \underline{\underline{285,30kgm^2}}$$

1) Beschleunigung unter Zug, leerer Wickler

$$M_{Beschl_1} = J_{zus} * \frac{\Delta n}{9,55 * t_{hoch}} + M_{min}$$

$$M_{Beschl_1} = 0,03kgm^2 * \frac{354 \text{ min}^{-1}}{9,55 * 10s} + 88Nm = \underline{\underline{88,11Nm}}$$

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

2) Beschleunigung mit Zug, voller Wickler

$$M_{\text{Beschl}_2} = (J_{\text{zus}} + J_{\text{Wickler}}) * \frac{\Delta n}{9,55 * t_{\text{hoch}}} + M_{\text{max}}$$

$$M_{\text{Beschl}_2} = (0,03 + 285,30) \text{kgm}^2 * \frac{42,4 \text{min}^{-1}}{9,55 * 10\text{s}} + 736 \text{Nm} = \underline{\underline{862,68 \text{Nm}}}$$

3) Verzögerung ohne Zug, leerer Wickler

$$M_{\text{Verz}_1} = J_{\text{zus}} * \frac{\Delta n}{9,55 * t_{\text{hoch}}} = 0,03 \text{kgm}^2 * \frac{-354 \text{min}^{-1}}{9,55 * 10\text{s}} = \underline{\underline{-0,11 \text{Nm}}}$$

4) Verzögerung ohne Zug, voller Wickler

$$M_{\text{Verz}_2} = (J_{\text{zus}} + J_{\text{Wickler}}) * \frac{\Delta n}{9,55 * t_{\text{rück}}}$$

$$M_{\text{Verz}_2} = (0,03 + 285,30) \text{kgm}^2 * \frac{-42,4 \text{min}^{-1}}{9,55 * 10\text{s}} = \underline{\underline{-126,68 \text{Nm}}}$$

Was die Momente im dynamischen Betrieb angeht, so liegt das maximale Antriebsmoment logischerweise bei Beschleunigung unter Zug (Fall 2), das maximale Bremsmoment hingegen beim Bremsen ohne Zug (Fall 4) vor.

Bezogen auf die Eingangsseite des Getriebes ergeben sich folgende Momente:

$$M_{\text{Motor}_\text{-} \text{Beschl}_1} = \frac{1}{\eta} * \frac{1}{i} * M_{\text{Beschl}_1} = \frac{1}{0,95} * \frac{1}{4} * 88,11 \text{Nm} \approx \underline{\underline{23 \text{Nm}}}$$

$$M_{\text{Motor}_\text{-} \text{Beschl}_2} = \frac{1}{\eta} * \frac{1}{i} * M_{\text{Beschl}_2} = \frac{1}{0,95} * \frac{1}{4} * 863 \text{Nm} \approx \underline{\underline{227 \text{Nm}}}$$

$$M_{\text{Motor}_\text{-} \text{Verz}} = \frac{1}{\eta} * \frac{1}{i} * M_{\text{Verz}_2} = \frac{1}{0,95} * \frac{1}{4} * -127 \text{Nm} \approx \underline{\underline{-34 \text{Nm}}}$$



Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

### 6.3.4 Wahl der Komponenten

Die obigen Ausführungen lassen den Schluss zu, dass es sinnvoll ist, den Betrieb im Feld mit konstanter Leistung zu nutzen. Daher wird ein achtpoliger Motor mit einem Drehmoment  $\geq 194 \text{ Nm}$  bei  $170 \text{ min}^{-1}$  gewählt. Der Motortyp 1LA5207-8AB kommt diesem Wert mit einem Nenndrehmoment von  $198 \text{ Nm}$  am nächsten. Dieser Motor wird im Feldschwächbereich mit konstanter Leistung bis zu einer Drehzahl von  $1416 \text{ min}^{-1}$  verwendet. Es ist zu prüfen, ob bei der Maximaldrehzahl noch ein ausreichendes Motordrehmoment vorliegt. Im Bereich der Feldschwächung ist der Aufwickler leer, d.h. es wird nur das statische Moment  $M_{\text{Motor\_min}}$  bzw. das  $M_{\text{Motor\_Beschl1}}$  zum Beschleunigen des Wicklers benötigt.

Von den Katalogdaten ist bekannt, dass  $M_{\text{kippl}} = 2,2 * M_n$

Im Feldschwächbereich gilt für das max. Motormoment:

$$M_{\text{Mot\_max}} = M_{\text{kippl}} * \left( \frac{n_n}{n_{\text{max}}} \right)^2$$

Um einen genügend großen Abstand zur Kippgrenze einzuhalten, sollte mit einer Sicherheitsreserve von etwa 30 % gerechnet werden.

$$M_{\text{Mot\_max}} = \frac{M_{\text{kippl}}}{1,3} * \left( \frac{n_n}{n_{\text{max}}} \right)^2 = \frac{2,2 * 198 \text{ Nm}}{1,3} * \left( \frac{725 \text{ min}^{-1}}{1414 \text{ min}^{-1}} \right)^2 = \underline{\underline{86,3 \text{ Nm}}}$$

Dieser Wert liegt weit über den erforderlichen Werten:

$$M_{\text{Motor\_min}} \text{ bzw. } M_{\text{Motor\_Beschl1}} \leq 86,3 \text{ Nm}$$

Bei der Auswahl des Motors ist darauf zu achten, dass der Motor fremdbelüftet ausgeführt wird. Für eine genaue Regelung des Momentes ist der Einsatz eines Impulsgebers empfehlenswert.

Motor 1LA5207-8AB\_\_-Z H61  
H61=Fremdlüfter+Impulsgeber  
 $P_n=15 \text{ kW}$ ,  $n_n=725 \text{ min}^{-1}$   $M_n=198 \text{ Nm}$   
 $I_n=32 \text{ A}$ ,  $\cos \varphi = 0,78$

---

## Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Der passende MM440 mit Eingangsfiler Klasse A ist der Typ:

*MM440*

*6SE6440-2AD31-8DA1*

$$P_n = 18,5 \text{ kW}, I_n = 38 \text{ A}, I_{max} = 57 \text{ A}$$

Für die Auswahl des Bremswiderstandes ist zu prüfen, wie groß die maximale Bremsleistung für das Abbremsen des vollen Wicklers ohne Zug ist. Die maximale Bremsleistung berechnet sich wie folgt:

$$\hat{P} = 0,105 * M_{Motor\_Verz} * n_{Motor\_min}$$

$$\hat{P} = 0,105 * -34 \text{ Nm} * 170 \text{ min}^{-1} \approx \underline{\underline{-0,6 \text{ kW}}}$$

In den meisten Fällen, ist die mittlere Bremsleistung im Betrieb sehr klein. Für eine genaue Berechnung wäre die Betrachtung eines Arbeitszyklus erforderlich. Sind die Bedingungen der maximalen Bremsleistung erfüllt, wählen wir den zu den Umrichtertyp passenden Unterbaubremswiderstand.

*Bremswiderstand*

*6SE6400-4BD21-2DA0*

$$P_n = 1200 \text{ W}, P_{max} = 24 \text{ kW}$$

*Der Antrieb wird vervollständigt mit:*

*Leitungsschutzsicherungen:*

*3 x 3NA3022*

*Netzschutzdrossel:*

*6SE6400-3CC04-4DD0*

*Impulsgeberbaugruppe:*

*6SE6400-0EN00-0AA0*

## 7 Anhang

### 7.1 Formelsammlung

#### Formelzeichen und Einheiten

Drehmoment	M [Nm]
Kraft	F [N]
Leistung	P [W]
Durchmesser	d [m]
Drehzahl	n [1/min]
Weg	s [m]
Zeit	t [s]
Geschwindigkeit	v [m/s]
Winkelgeschwindigkeit	$\omega$ [1/s]
Beschleunigung	a [m/s <sup>2</sup> ]
Erdbeschleunigung	g=9,81m/s <sup>2</sup>
Gleitreibungszahl	$\mu$ [-]
Masse	m [kg]
Trägheitsmoment	J [kgm <sup>2</sup> ]

#### Mechanik

Konst. Geschwindigkeit	$v = \frac{s}{t}$ $a = \frac{\Delta v}{t}$
Winkelgeschwindigkeit	$\omega = 2 * \pi * f = 2 * \pi * \frac{n}{60}$
Konst. Beschleunigung	$s = \frac{1}{2} * \Delta v * t$ $s = \frac{1}{2} * a * t$
Gewichtskraft	$F_G = m_1 * g$
Reibungskraft	$F_R = \mu * F_G$
Drehmoment	$M = F * \frac{d}{2}$
Leistung	$P_{trans} = F * v$ $P_{rot} = 0,105 * M * n$

Projektierungshinweise mit Beispielen für MICROMASTER 4

Trägheitsmoment Hohlzylinder  $J = \frac{1}{2} * m * ((\frac{d_{\max}}{2})^2 + (\frac{d_{\min}}{2})^2)$

Beschleunigungsmoment  $M_{\text{beschl}} = \frac{1}{\eta} * \frac{J * \Delta n}{9,55 * t_{\text{beschl}}}$

Bremsmoment  $M_{\text{brems}} = \eta * \frac{J * \Delta n}{9,55 * t_{\text{brems}}}$

Effektives Drehmoment  $M_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{M_1^2 * t_1 + M_2^2 * t_2 + M_3^2 * t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}$

Übersetzung  $i = \frac{n_{\text{mot}}}{n_{\text{Last}}}$

Motormoment  $M_{\text{mot}} = \frac{1}{i} * M_{\text{Last}}$

## 7.2 Literaturverzeichnis

- Projektierungshandbuch: SIMOVERT MASTERDRIVES Baureihen 6SE70/6SE71 ;A&D LD IO PA Hr. Klautschek; Ausgabe 05/2001
- Antriebsauslegung mit Pfad Plus Version V.2.6.;A&D MC PM4; Ausgabe 08/2002
- Moderne Stromrichterantriebe: Leistungselektronik und Maschinen, Arbeitsweise drehzahlveränderbarer Antriebe mit Stromrichtern und Antriebsvernetzung; Peter F. Brosch; 4.Auflage Würzburg; Vogel 2002-11-18
- Stromrichtergespeiste Drehstromantriebe: Theorie und Betriebsverhalten von Asynchronantrieben; Peter Klaus-Budig; VDE-Verlag 2001
- Elektrische Maschinen und Antriebe: Grundlagen und Berechnungsbeispiele für Einsteiger; Prof. Dr.-Ing Hermann Merz; VDE-Verlag 2001
- Der Drehstrommotor: Ein Lexikon für die Praxis; Dr.-Ing. Karl Falk; VDE-Verlag 1997