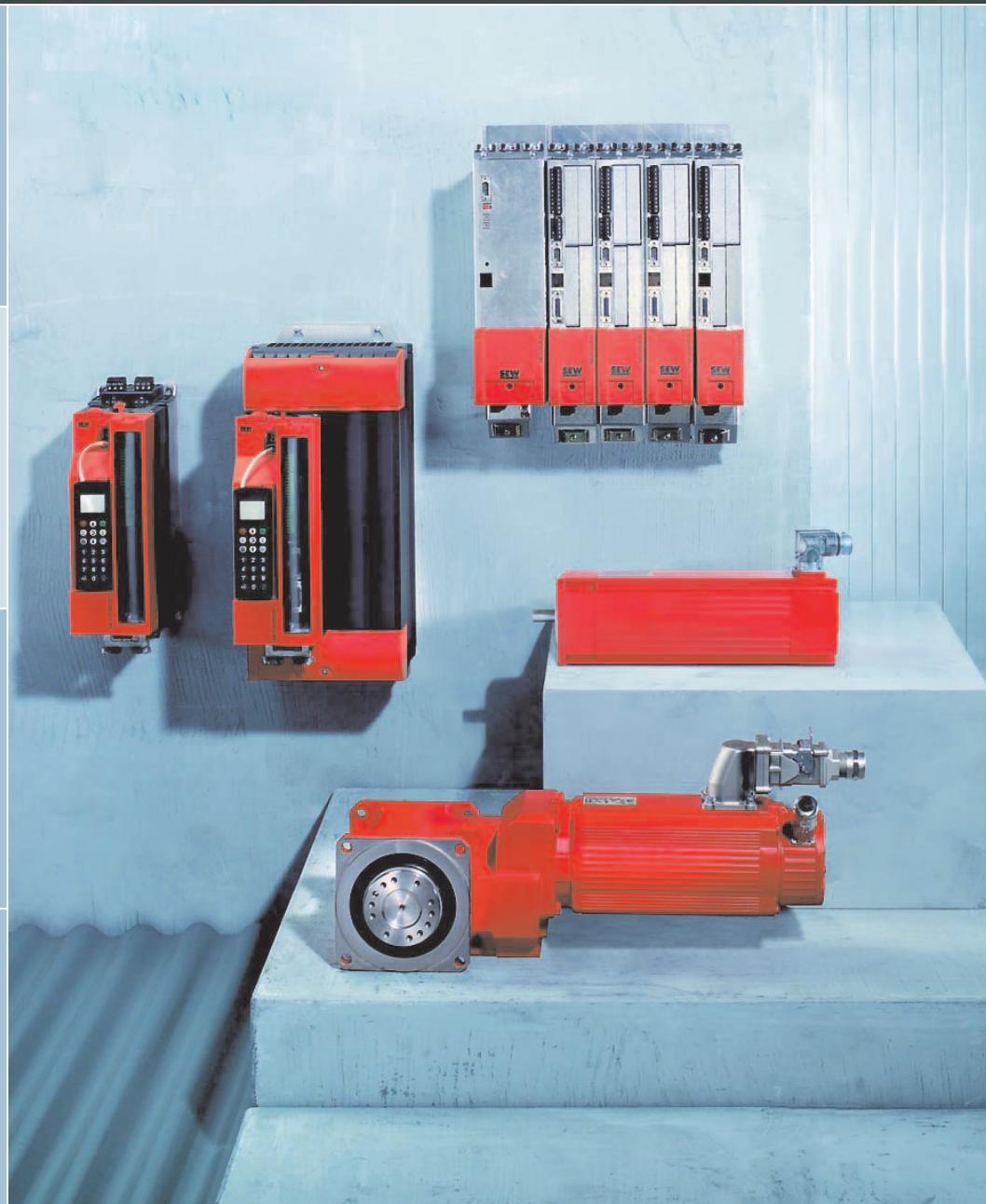




SEW
EURODRIVE



Servotechnik

KB000000

Ausgabe 09/2006
11322802 / DE

Praxis der Antriebstechnik





1 Einleitung	6
1.1 Produktnamen und Warenzeichen	6
1.2 Definition und Entwicklung der Servotechnik.....	7
1.3 Einsatzgebiete der Servotechnik.....	7
1.4 Komponenten eines Servosystems.....	8
2 Servomotoren	10
2.1 Übersicht gängiger Servomotoren	11
2.2 Merkmale von Synchron- und Asynchron-Servomotoren.....	12
2.3 Aufbau von Synchron-Servomotoren	13
2.3.1 Aufbau CMP-Motor	14
2.3.2 Aufbau CM-/DS-Motor	15
2.3.3 Aufbau CMD-Motor	16
2.3.4 Aufbau des Rotors	17
2.4 Funktionsweise von Synchron-Servomotoren.....	18
2.4.1 Optimaler Betriebspunkt	19
2.4.2 Stromverhältnisse im Stator.....	19
2.4.3 Sinusförmige Speisung	20
2.4.4 Blockförmige Speisung	21
2.4.5 Thermische und dynamische Grenzkennlinie	23
2.5 Aufbau von Asynchron-Servomotoren	25
2.5.1 Aufbau CT-/CV-Motor	25
2.6 Funktionsweise von Asynchron-Servomotoren.....	26
2.6.1 Motorkennlinie	31
2.7 Synchroner Linearmotor	33
2.7.1 Prinzipien der synchronen Linearmotoren	34
2.7.2 Motorkennlinie	36
2.7.3 Zubehör	39
2.8 Bremsen für rotative Servomotoren	43
2.8.1 Federdruckbremse als Haltebremse.....	43
2.8.2 SEW-Bremse mit Arbeitsvermögen	44
2.8.3 Permanent erregte Haltebremse	45
2.9 Bremsen für Linearmotoren	46
3 Gebersysteme	48
3.1 Inkrementalgeber	48
3.1.1 Inkrementelle Drehgeber mit TTL- und HTL-Signalen	48
3.1.2 Inkrementalgeber mit sin/cos-Spuren	51
3.2 Absolutwertgeber	52
3.2.1 Absolutwertgeber mit SSI-Schnittstelle und sin-/cos-Signalen	52
3.2.2 Absolutwertgeber mit HIPERFACE®-Schnittstelle.....	53
3.2.3 Resolver.....	56
3.3 Gegenüberstellung / Auswahlhilfe für Resolver, sin-/cos-Geber, TTL-Geber	59
3.3.1 Technische Daten der von SEW-EURODRIVE eingesetzten Geber.....	60
3.4 Direkte Wegmess-Systeme für lineare Servomotoren.....	61
3.4.1 Aufbau und Funktionsweise optischer Wegmess-Systemen	61
3.4.2 Aufbau und Funktionsweise magnetischer Wegmess-Systeme	62
3.4.3 Aufbau und Funktionsweise induktiver Wegmess-Systeme	63
3.5 Begriffsdefinitionen	65



Inhaltsverzeichnis

4	Servoverstärker	66
4.1	Allgemeine Informationen zu Servoverstärkern.....	66
4.1.1	Der Zwischenkreis	67
4.1.2	Der Wechselrichter	68
4.1.3	Überlastüberwachung	68
4.1.4	EMV-Betrachtung	70
4.1.5	Optionskarten	70
4.2	Das modulare Mehrachs-Servoverstärkersystem.....	71
4.2.1	Das Versorgungsmodul	71
4.2.2	Netzrückspeisung	73
4.2.3	Brems-Chopper und Bremswiderstand.....	73
4.2.4	Vergleich zwischen Netzrückspeisung und Brems-Chopper-Betrieb.....	74
4.2.5	Das Achsmodul.....	75
4.2.6	24-V-Versorgung	76
4.3	Der Einachsverstärker	77
4.4	Gegenüberstellung modulares Mehrachssystem / Einachssystem	78
4.5	Begriffsdefinitionen	78
5	Regelstruktur und Betriebsarten	79
5.1	Übersicht.....	79
5.2	Die Stromregelung	80
5.3	Die Drehzahlregelung	82
5.3.1	Struktur der Drehzahlregelung.....	82
5.3.2	Lage- und Drehzahlerfassung	83
5.3.3	Drehzahl-Istwertfilter	85
5.3.4	Aufbereitung des Drehzahl-Sollwertes	85
5.3.5	Drehzahlregler	86
5.3.6	Beschleunigungs-Vorsteuerung.....	87
5.3.7	Spieldfreie Lastankopplung	87
5.3.8	Spielbehaftete Lastankopplung	88
5.4	Lageregelung.....	89
5.5	Begriffsdefinitionen	89
6	Industrieller Einsatz	90
6.1	Netzverhältnisse	90
6.2	Umgebungsbedingungen	90
6.3	Hinweise zum Motor.....	90
6.3.1	Synchrone Motoren	91
6.3.2	Asynchrone Motoren.....	91
6.4	Leitungsverlegung	91
6.5	Elektromagnetische Störung / Elektromagnetische Verträglichkeit	91
6.6	Geräteschnittstellen.....	93
6.6.1	Feldbussysteme: Anbindung an übergeordnete Steuerung	93
6.6.2	Feldbussystem Profibus DP	94
6.6.3	Feldbussystem INTERBUS-S.....	95
6.6.4	Ethernet in Feldbus-Anwendungen	96
6.6.5	Achs-zu-Achs-Kommunikation.....	97
6.6.6	Diagnosebus	98
6.7	Begriffsdefinitionen	98



7	Servogetriebe	99
7.1	Anforderungen an ein Servogetriebe	99
7.2	Allgemeine Getriebeübersicht	100
7.2.1	Servo-Planetengetriebe	100
7.2.2	Servo-Kegelradgetriebe	102
7.2.3	Stirnradgetriebe	103
7.2.4	Kegelradgetriebe	104
8	Projektierung	105
8.1	Allgemeine Hinweise	105
8.2	Daten zur Antriebs- und Getriebeauslegung	106
8.3	Projektierungsablauf eines Servo-Getriebemotors	109
8.4	Projektierungsbeispiel eines Servo-Getriebemotors	114
8.5	Projektierungsablauf eines linearen Servoantriebs	128
8.6	Projektierungsbeispiel eines linearen Servoantriebs SL2	129
9	Index	140



1 Einleitung

SEW-EURODRIVE ist ein führendes Unternehmen auf dem Weltmarkt der elektrischen Antriebstechnik. Der Hauptsitz der Firmengruppe befindet sich in Bruchsal / Deutschland. In Fertigungswerken in Deutschland, Frankreich, Finnland, USA, Brasilien und China werden die Komponenten des Antriebsbaukastens von SEW-EURODRIVE mit höchstem Qualitätsanspruch hergestellt. In 61 Montagewerken in 44 Industrieländern der Welt werden aus diesen lagerhaltigen Komponenten kundennah mit besonders kurzer Lieferzeit und in gleichbleibend hoher Qualität die individuellen Antriebssysteme montiert. Vertrieb, Beratung, Kundendienst und Ersatzteilservice von SEW-EURODRIVE finden Sie weltweit in über 60 Ländern.

Die weltweite Präsenz, das umfangreiche Produktprogramm und das breite Dienstleistungsspektrum machen SEW-EURODRIVE zum idealen Partner für anspruchsvolle Automatisierungslösungen.

Besonders der Bereich der Servotechnik hat sich in den letzten Jahren zu einem starken Wachstumszweig mit einer hohen Innovationsgeschwindigkeit entwickelt. Die marktgerechte Produktentwicklung von SEW-EURODRIVE trägt diesem dynamischen Marktgeschehen Rechnung.

Der vorliegende Band aus der Reihe "Praxis der Antriebstechnik" wendet sich an technische Fachkräfte, die Servoapplikationen bearbeiten, und vermittelt in anschaulicher Weise Kenntnisse über den Aufbau und die Funktionsweise von gängigen Komponenten der Servotechnik sowie deren Einsatzgebiete und Projektierung.

SEW-EURODRIVE - Driving the world.

Bruchsal, September 2006

1.1 Produktnamen und Warenzeichen

Die in diesem Band genannten Marken und Produktnamen sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Titelhalter.



1.2 **Definition und Entwicklung der Servotechnik**

Der Ausdruck Servo leitet sich vom lateinischen "servus" ab, was soviel wie Sklave, Diener oder Helfer bedeutet. Zutreffend war dieser Ausdruck in den Zeiten, als Servoantriebe nur als Hilfsantriebe für untergeordnete Aufgaben eingesetzt wurden, z. B. als Stellantriebe in Werkzeugmaschinen. Dieser beschränkte Einsatz lag begründet in den schlechten Wirkungsgraden der so genannten Linearverstärker mit Leistungstransistoren und der begrenzten Lamellenspannung der Kommutatoren an Gleichstrommaschinen von ca. 200 V. Die Regelung der Antriebe erfolgte analog, wodurch der Funktionsumfang stark eingeschränkt war und jede Funktionserweiterung einen sehr großen Aufwand bedeutete.

Entscheidend für den Erfolg der heutigen Servotechnik war die rasante Entwicklung auf dem Gebiet der Halbleitertechnik und der modernen Mikro-Controller. Hochintegrierte und leistungsfähige Rechnersysteme sowie die zugehörigen Speicherbausteine ermöglichen jetzt den Einsatz digitaler Regelungen. Dadurch konnte der Funktionsumfang für die Antriebssysteme deutlich erhöht werden.

Aufgrund dieser Entwicklung werden moderne Servosysteme heute immer häufiger als Hauptantriebe eingesetzt und immer weniger für untergeordnete Hilfsaufgaben.

1.3 **Einsatzgebiete der Servotechnik**

Die zunehmende Automatisierung in allen Bereichen des Maschinen- und Anlagenbaus erfordert immer kürzere Taktzeiten und eine höhere Flexibilität bei einem Produktwechsel. Diese Forderungen lassen sich mit konventioneller Asynchrontechnik oder mit hydraulischen bzw. mit pneumatischen Komponenten immer weniger realisieren. Diese Entwicklung hat zu einer starken Veränderung in der Antriebstechnik geführt, nämlich hin zu den heute eingesetzten Servoantrieben:

- Synchrone Servomotoren,
- Asynchrone Servomotoren,
- Synchrone Linearmotoren.

In diesem Band werden Antriebssysteme mit den oben angeführten Servomotoren behandelt.

Diese Antriebe werden vor allem in folgenden Branchen eingesetzt:

- Verpackungstechnik,
- Robotertechnik,
- Werkzeugmaschinen,
- Handling-Systeme,
- Blechverarbeitung,
- Papierverarbeitung,
- Fördertechnik.



1.4 Komponenten eines Servosystems

Wegen den immer größer werdenden Anforderungen des Maschinen- und Anlagenbaus bezüglich Takt- und Umrüstzeiten bestehen moderne Servosysteme aus weitaus mehr als nur einem Servomotor und einem zugehörigen Servoverstärker. Diese Tatsache stellt ganz besonders in der Antriebstechnik höhere Anforderungen an die Funktionalität und die Schnittstellen der übergeordneten Steuerungen.

Komponenten am Beispiel der SEW-Servosysteme MOVIDRIVE® und MOVIAXIS®

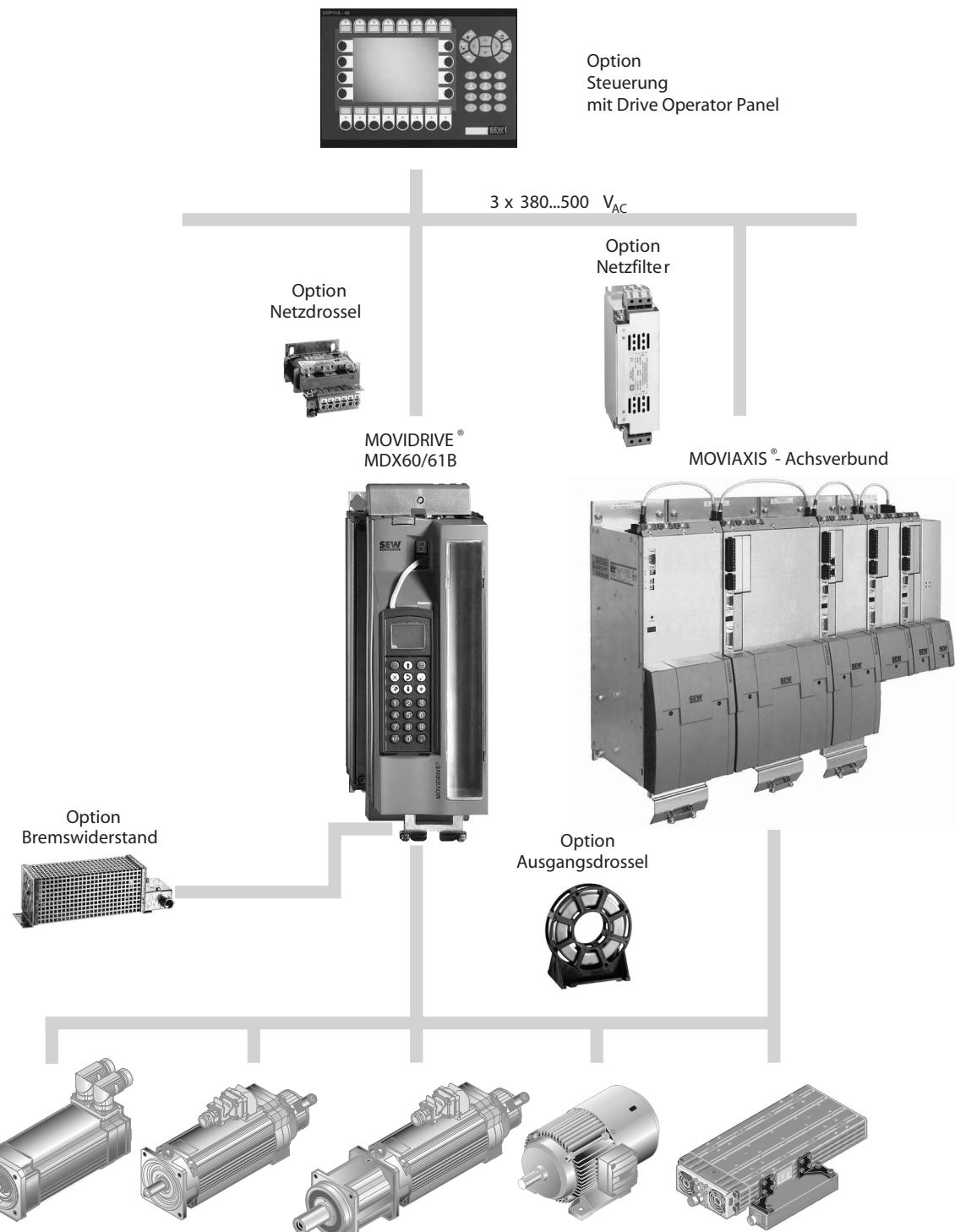


Bild 1: Komponenten eines Servosystems

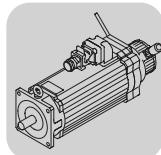


Komponenten eines Servosystems (siehe Bild 1)

1. Steuerung (optional): Moderne und leistungsfähige Servoverstärker wie MOVIDRIVE® und MOVIAXIS® sind programmierbar. Sie sind somit in der Lage, auch anspruchsvolle Technologien wie Winkelsynchronlauf und elektronische Kurvenscheiben zu steuern. Außerdem ist es teilweise auch möglich, eine Steuerungskarte für die Achskoordination und klassische SPS-Funktionalität in einen Servoverstärker zu integrieren.
2. Einachsverstärker MOVIDRIVE®,
3. Mehrachs-Servoverstärker MOVIAXIS®,
4. Synchroner Servomotor Typ CMP,
5. Synchroner Servomotor Typ CM mit Planetengetriebe,
6. Asynchroner Servomotor Typ CT/CV,
7. Synchroner Linearmotor Typ SL2.

Weitere Komponenten eines Servosystems

- Konfektionierte Motor- und Geberkabel,
- Netzdrossel / Netzfilter; abhängig vom Servoverstärker und der EMV-Grenzwertklasse,
- Bremswiderstände,
- Netzrückspeisemodule,
- Feldbus-Schnittstelle; optional, da abhängig von der Applikation und der evtl. vorhandenen übergeordneten Steuerung,
- Schaltnetzteile.



2 Servomotoren

Merkmale eines Servomotors

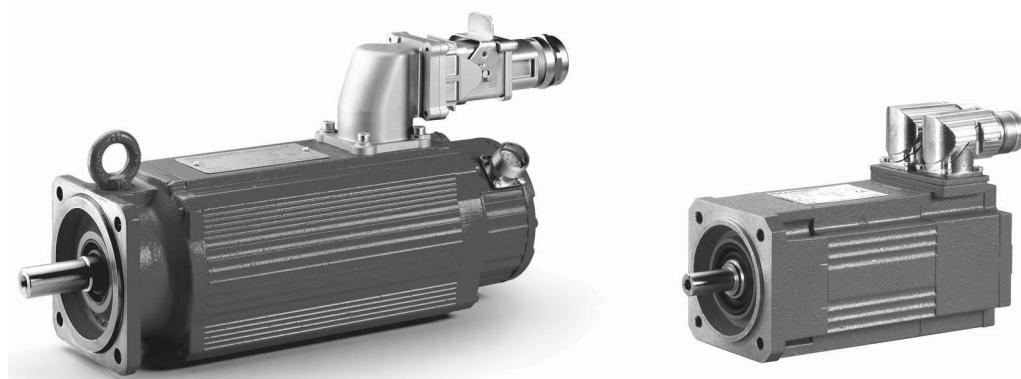
Als Servomotoren bezeichnet man Motoren, die

- eine hohe Dynamik,
- eine hohe Positioniergenauigkeit
- und eine hohe Überlastfähigkeit

in einem großen Drehzahlbereich aufweisen.

Weiter Merkmale eines Servomotors sind:

- hohe Drehzahlgenauigkeit,
- großer Drehzahl-Stellbereich,
- kurze Hochlaufzeit,
- kurze Drehmoment-Anregelzeit,
- hohes Stillstandsmoment,
- kleines Massenträgheitsmoment,
- niedriges Gewicht,
- kompakte Bauweise.



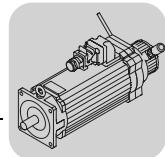
59855axx

Bild 2: Beispiel von SEW-Servomotoren der Baureihe CM.. und CMP..

Prinzipieller Aufbau

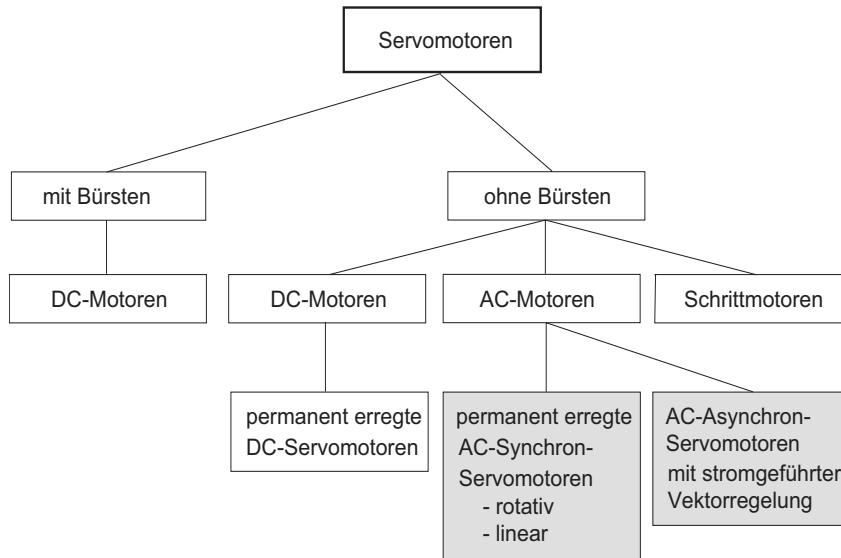
Prinzipiell besteht ein Servomotor aus

- einem Rotor,
- einem Stator,
- dem Leistungsanschluss; ausgeführt als Stecker oder Klemmenkasten,
- einem Feedback-System mit Anschluss.



2.1 Übersicht gängiger Servomotoren

Die Familie der Servomotoren kann in folgende Gruppen eingeteilt werden:



56160axx

Bild 3: Übersicht Servomotoren

Die wichtigsten Unterscheidungsmerkmale liegen

- im Aufbau der Motoren (Stator, Rotor),
- in den notwendigen Reglerstrukturen,
- in den Gebersystemen.

Bis vor wenigen Jahren wurden bürstenlose, permanent erregte Gleichstrommotoren als Servoantriebe eingesetzt. Die Ansteuerung erfolgte über Thyristor- oder Transistorsteller.

Durch den technischen Fortschritt im Bereich der Leistungshalbleiter und Mikrocontroller stieg in den neunziger Jahren der Einsatz von Synchron-Servomotoren stetig an.

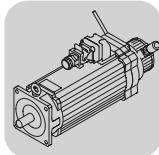
Heute haben permanent erregte AC-Synchron-Servomotoren den größeren Marktanteil als AC-Asynchron-Servomotoren. Dies ist begründet durch die Eigenschaften der Motoren.

Die permanent erregten AC-Synchron-Servomotoren und die AC-Asynchron-Servomotoren werden im Folgenden näher betrachtet.

Begriffsdefinition

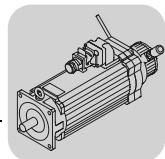
In der vorliegenden Druckschrift werden die Motorbenennungen wie folgt festgelegt:

- **Synchron-Servomotor** \triangleq Permanent erregter AC-Synchron-Servomotor.
- **Asynchron-Servomotor** \triangleq AC-Asynchron-Servomotor.
- **Synchroner Linearmotor** \triangleq Permanent erregter AC-Linear-Synchron-Servomotor.



2.2 Merkmale von Synchron- und Asynchron-Servomotoren

Merkmale Synchron-Servomotor	Merkmale Asynchron-Servomotor
Hohe Dynamik	Mäßige bis hohe Dynamik
Mäßig gute Regeleigenschaften bei großen Massen	Gute Regeleigenschaften bei großen externen Massen
Hohe Überlastfähigkeit, bis zu 6-fach	Hohe Überlastfähigkeit, bis zu 3-fach
Hohe thermische Dauerbelastbarkeit über gesamten Drehzahlbereich	Hohe thermische Dauerbelastbarkeit, drehzahlabhängig
Wärmeabfuhr über Konvektion, Wärmeableitung und -strahlung	Wärmeabfuhr über Lüfter
Hohe Drehzahlgüte	Hohe Drehzahlgüte
Stillstandsmoment dauerhaft verfügbar	Wegen zu hoher thermischer Belastung im unteren Drehzahlbereich ohne Fremdlüfter dauerhaft kein Moment verfügbar
Hoher Drehzahl-Stellbereich, 1:5000	Hoher Drehzahl-Stellbereich, 1:5000
Drehmoment-Welligkeit (Cogging) bei kleinen Drehzahlen. Siehe hierzu Begriffsdefinition Seite 89.	Nahezu keine Drehmoment-Welligkeit (Cogging). Siehe hierzu Begriffsdefinition Seite 89.



2.3 Aufbau von Synchron-Servomotoren

Prinzipieller Aufbau

Prinzipiell besteht ein Synchron-Servomotor aus

- einem Rotor mit Permanentmagneten,
- einem Stator mit entsprechender Wicklung,
- dem Leistungsanschluss; ausgeführt als Stecker oder Klemmenkasten,
- einem Geber.

Unterschiedliche Ausführungen

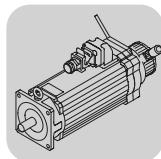
Bei Synchron-Servomotoren wird unterschieden zwischen

- Ausführung mit Gehäuse \triangleq gehäusebehaftet,
- Ausführung ohne Gehäuse \triangleq gehäuselos.

Ausführung ohne Gehäuse bedeutet, dass der Korpus des Motors durch das Blechpaket des Stators gebildet wird. Dies ermöglicht die Ausnutzung des gesamten Eisenquerschnittes.

Im Folgenden werden beide Ausführungen am Beispiel von SEW-Motoren dargestellt:

- Ausführung mit Gehäuse: CMP-Motor.
- Ausführung mit Gehäuse: CM-/DS-Motor.
- Ausführung ohne Gehäuse: CMD-Motor.



2.3.1 Aufbau CMP-Motor

CMP-Servomotoren zeichnen sich aus durch extrem hohe Dynamik, geringe Massenträgheit, Kompaktheit und hohe Leistungsdichte.

CMP-Servomotoren sind gehäusebehaftete Motoren.

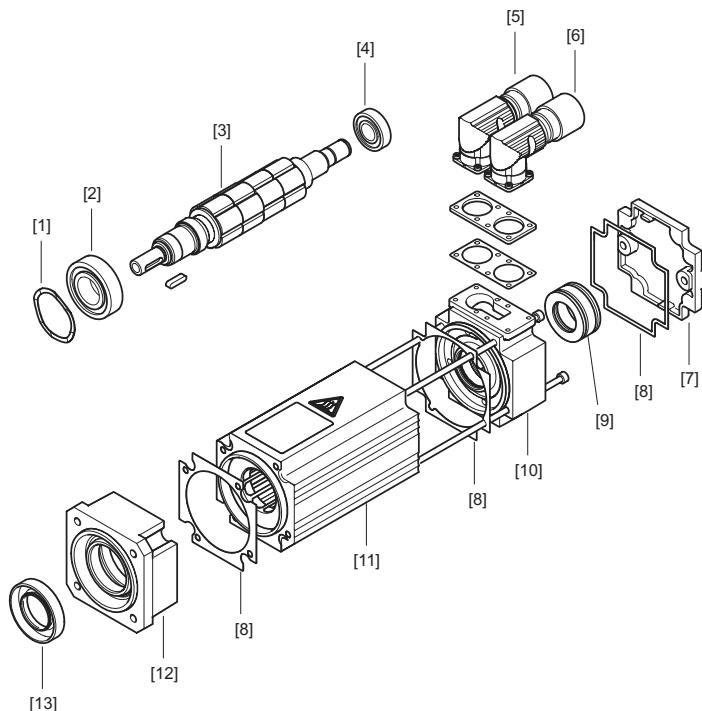


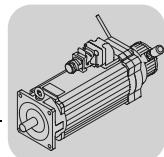
Bild 4: Aufbau Synchroner Servomotor CMP von SEW-EURODRIVE

58993xx

[1]	Ausgleichsscheibe	[8]	Flachdichtung
[2]	Rillenkugellager	[9]	Resolver
[3]	Rotor	[10]	B-Lagerschild
[4]	Rillenkugellager	[11]	Gehäuse mit Stator
[5]	Signalsteckverbinder SM / SB	[12]	Flanschlagerschild
[6]	Leistungssteckverbinder SM / SB	[13]	Wellendichtring
[7]	Gehäusedeckel		

Eigenschaften und Optionen CMP-Motor

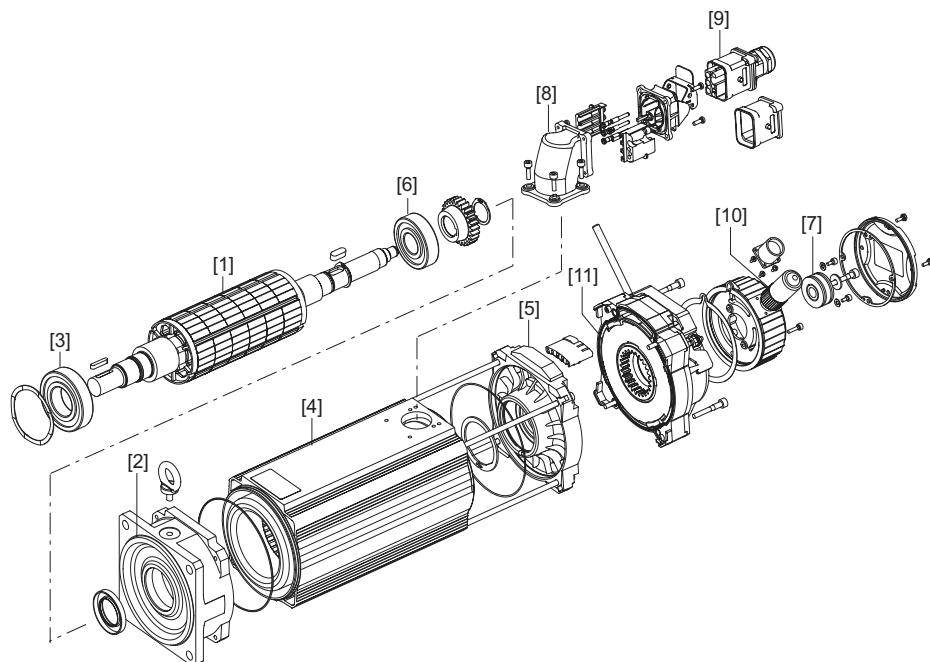
- Bis zu 4,5-fache Überlastfähigkeit,
- Stator mit Zahnwicklung,
- Anbau an Standard- und Servogetriebe möglich,
- Getriebe-Direktanbau möglich,
- Resolver oder hochauflösender Absolutwertgeber möglich,
- Ausrichtbare Steckverbinder,
- Optional Fremdlüfter,
- Optional 24-V-Bremse,
- KTY-Sensor für thermischen Motorschutz.



2.3.2 Aufbau CM-/DS-Motor

CM-/DS-Servomotoren zeichnen sich aus durch ein breites Drehmomentspektrum, gute Regeleigenschaften bei hohen externen Massen, Einsatz von leistungsstarken Arbeitsbremsen und eine große Optionsvielfalt.

CM-/DS-Servomotoren sind gehäusebehaftete Motoren.



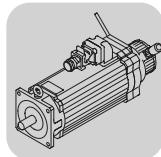
57559axx

Bild 5: Aufbau Synchroner Servomotor CM von SEW-EURODRIVE

[1]	Rotor	[7]	Resolver
[2]	Flanschlagerschild	[8]	Steckergehäuse
[3]	Rillenkugellager	[9]	Leistungsstecker, kpl.
[4]	Gehäuse mit Stator	[10]	Signalstecker, kpl.
[5]	B-Lagerschild	[11]	Bremse, kpl.
[6]	Rillenkugellager		

Eigenschaften und Optionen CM-/DS-Motor

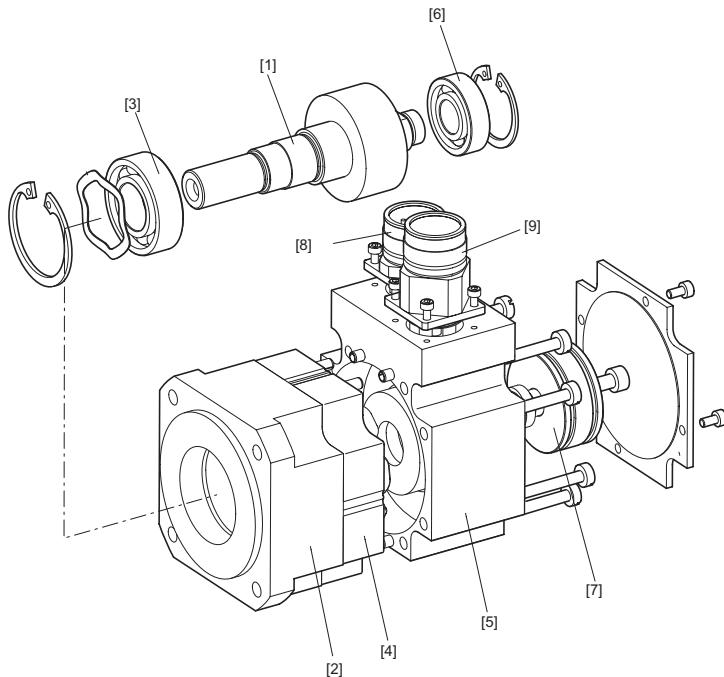
- Bis zu 4-fache Überlastfähigkeit,
- Stator mit Einziehwicklung,
- Anbau an Standard- und Servogetriebe möglich,
- Getriebe-Direktanbau möglich,
- Resolver oder hochauflösender Absolutwertgeber möglich,
- Stecker oder Klemmenkasten,
- Optional Fremdlüfter,
- Optional Bremse mit Arbeitsvermögen,
- TF- oder KTY-Sensor für thermischen Motorschutz,
- Optional 2. Wellenende,
- Optional verstärkte Lagerungen.



2.3.3 Aufbau CMD-Motor

CMD-Servomotoren zeichnen sich aus durch extreme Kompaktheit, optimierte Drehzahlanpassung für Direktantriebstechnik und ein schlankes Variantenkonzept.

CMD-Servomotoren sind gehäuselose Motoren.



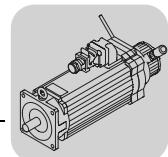
57562axx

Bild 6: Aufbau Synchron-Servomotor CMD von SEW-EURODRIVE

[1]	Rotor	[6]	Rillenkugellager
[2]	Flanschlagerschild	[7]	Resolver
[3]	Rillenkugellager	[8]	Signalsteckverbinder
[4]	Stator	[9]	Leistungssteckverbinder
[5]	B-Lagerschild		

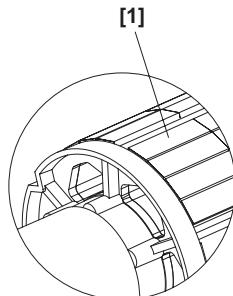
**Eigenschaften
und Optionen
CMD-Motor**

- Bis zu 6-fache Überlastfähigkeit,
- Stator mit Zahnwicklung,
- Optional 24-V-Bremse,
- Resolver oder hochauflösender Absolutwertgeber möglich,
- KTY-Sensor für thermischen Motorschutz.



2.3.4 Aufbau des Rotors

Der Rotor von Synchron-Servomotoren ist mit Permanentmagneten bestückt.

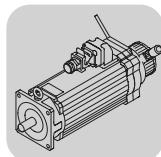


57561axx

Bild 7: Aufgeklebte Magnete am Rotor

[1] Aufgeklebte Magnete

Diese Magnete bestehen in der Regel aus dem gesinterten Seltene-Erden-Material Neodym-Eisen-Bor. Die magnetischen Eigenschaften dieses Materials übertreffen die herkömmlichen Ferrit-Magnete bei weitem. Somit ist eine kompaktere Bauweise bei optimierter Leistungsausbeute möglich.



2.4 Funktionsweise von Synchron-Servomotoren

Durch Anschließen des Motors an einen geeigneten Servoverstärker wird in den Wicklungen des Stators das so genannte Statordrehfeld erzeugt. Dieses Drehfeld übt eine magnetische Kraft auf den Läufer aus. Durch die magnetische Kopplung zwischen Stator und Läufer beschleunigt der Läufer und dreht mit der gleichen Winkelgeschwindigkeit wie das Drehfeld, also synchron.

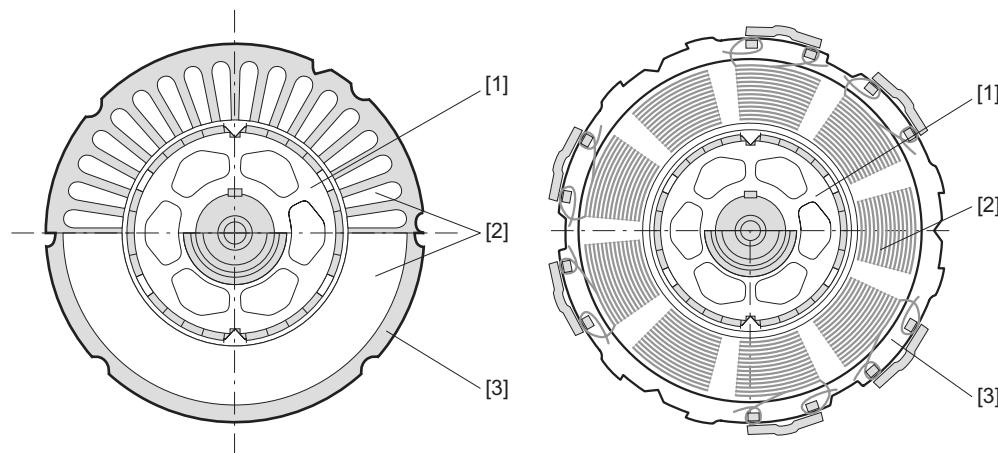


Bild 8: Schematische Darstellung einer Einziehwicklung

57276axx

Bild 9: Schematische Darstellung einer Zahnwicklung

60025axx

- [1] Rotor
- [3] Blechpaket
- [2] Wicklung

Wird der Motor belastet, ergibt sich eine Verschiebung des Läuferdrehfeldes bezogen auf das Statordrehfeld. Die Pole des Läufers eilen denen des Statordrehfeldes um den Polradwinkel α nach. Das Drehmoment steigt an, je größer der Polradwinkel ist. Das maximale Drehmoment ist dann erreicht, wenn der Polradwinkel $\alpha = 90^\circ$ beträgt. In diesem Fall liegen die Pole des Läufers genau zwischen zwei Polen des Stators.

Dies bewirkt, dass der dem Läuferpol vorauselnde Statorpol den Läufer "zieht" und der nacheilende Statorpol den Läufer "schiebt".

Nimmt der Polradwinkel α Werte $> 90^\circ$ an, sinkt das Drehmoment. Der Motor befindet sich in einer instabilen Betriebslage und bleibt unter Umständen stehen. Eine thermische Schädigung ist die Folge.

Es gilt: $M = f(U, I, \sin \alpha)$.

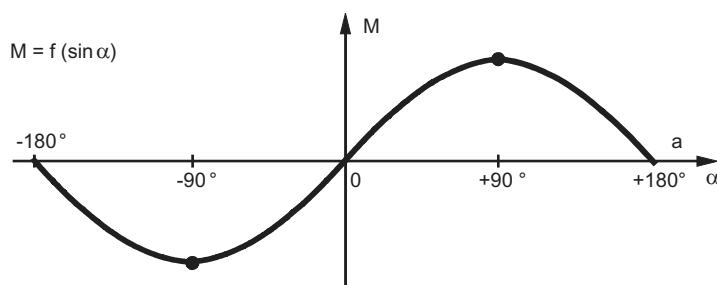
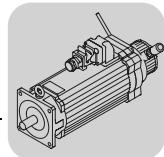


Bild 10: Abhängigkeit Polradwinkel und Drehmoment

56165axx



2.4.1 Optimaler Betriebspunkt

Um den Synchronmotor mit dem maximalen Drehmoment betreiben zu können, muss sichergestellt werden, dass der Polradwinkel $\alpha = 90^\circ$ beträgt. Im motorischen Betrieb muss der Statorpol demnach stets um 90° vorausseilen, im generatorischen Betrieb um 90° nacheilen. Die Motorführung stellt sicher, dass die drei Phasenströme des Motors aus einem vorgegebenen Moment und dem Strom-Sollwert gemäß dem Motormodell berechnet werden, um so im Motor das notwendige resultierende Magnetfeld zu erzeugen.

Dazu muss die Lage des Läufers mit Hilfe eines geeigneten Gebers erfasst werden. Zu dieser Rotor-Istposition werden je nach Drehmomentrichtung 90° addiert oder subtrahiert und die entsprechenden Phasenströme berechnet.

Zur jeweiligen Lage des Läufers wird die entsprechende Lage des Statordrehfeldes ermittelt. Dies erfolgt durch die Bestimmung der Größe und Zuordnung des Statorfeldes durch den Läufer, d. h. der Läufer dreht das Statorfeld.

Der in diesem Zusammenhang erwähnte Polradwinkel α ist ein elektrischer Winkel. Bei einem 6-poligen Motor entsprechen 90° elektrisch 30° mechanisch.

2.4.2 Stromverhältnisse im Stator

Die Stromverhältnisse im Stator sehen wie folgt aus:

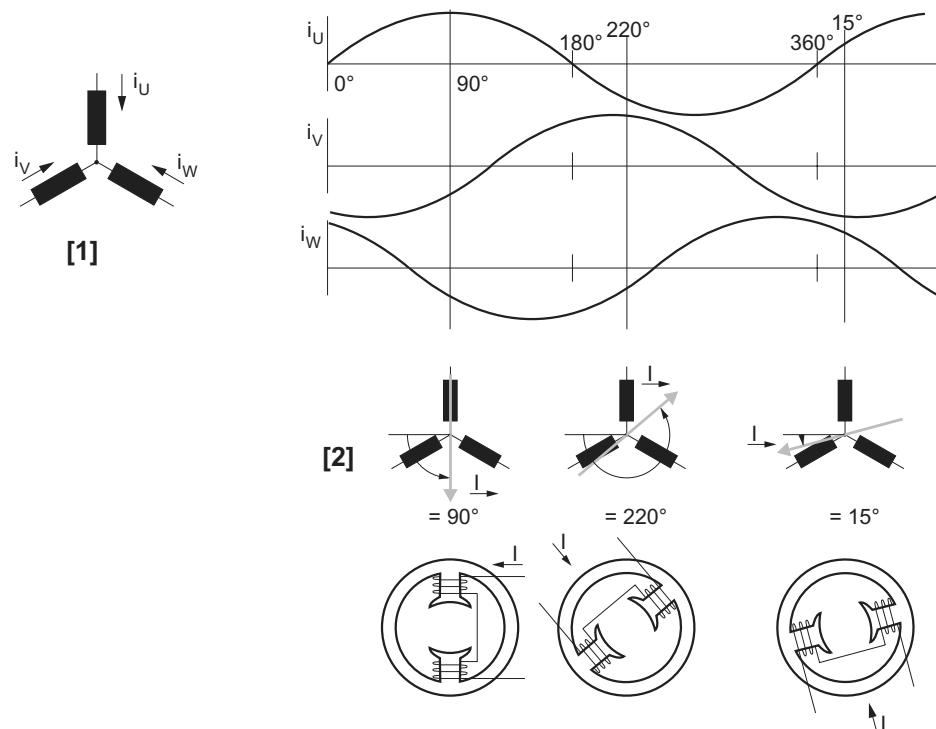
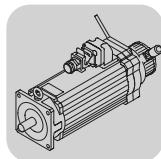


Bild 11: Stromverhältnis im Stator

56166axx

- [1] Stromraumzeiger I = vektorielle Summe der Ströme i_U , i_V , i_W
- [2] Die Abbildung zeigt die Verhältnisse im Stator hinsichtlich der Drehmomentbildung zu unterschiedlichen Zeitpunkten



2.4.3 Sinusförmige Speisung

Die meisten der heute angebotenen Synchron-Servomotoren werden durch einen sinusförmigen Strom gespeist, der von einem entsprechenden Servoverstärker in die Statorwicklung eingeprägt wird. Die drei Motorphasen werden gleichzeitig bestromt.

Bild 12 zeigt die Strom- und Spannungshöhen zu den Zeitpunkten t_n .

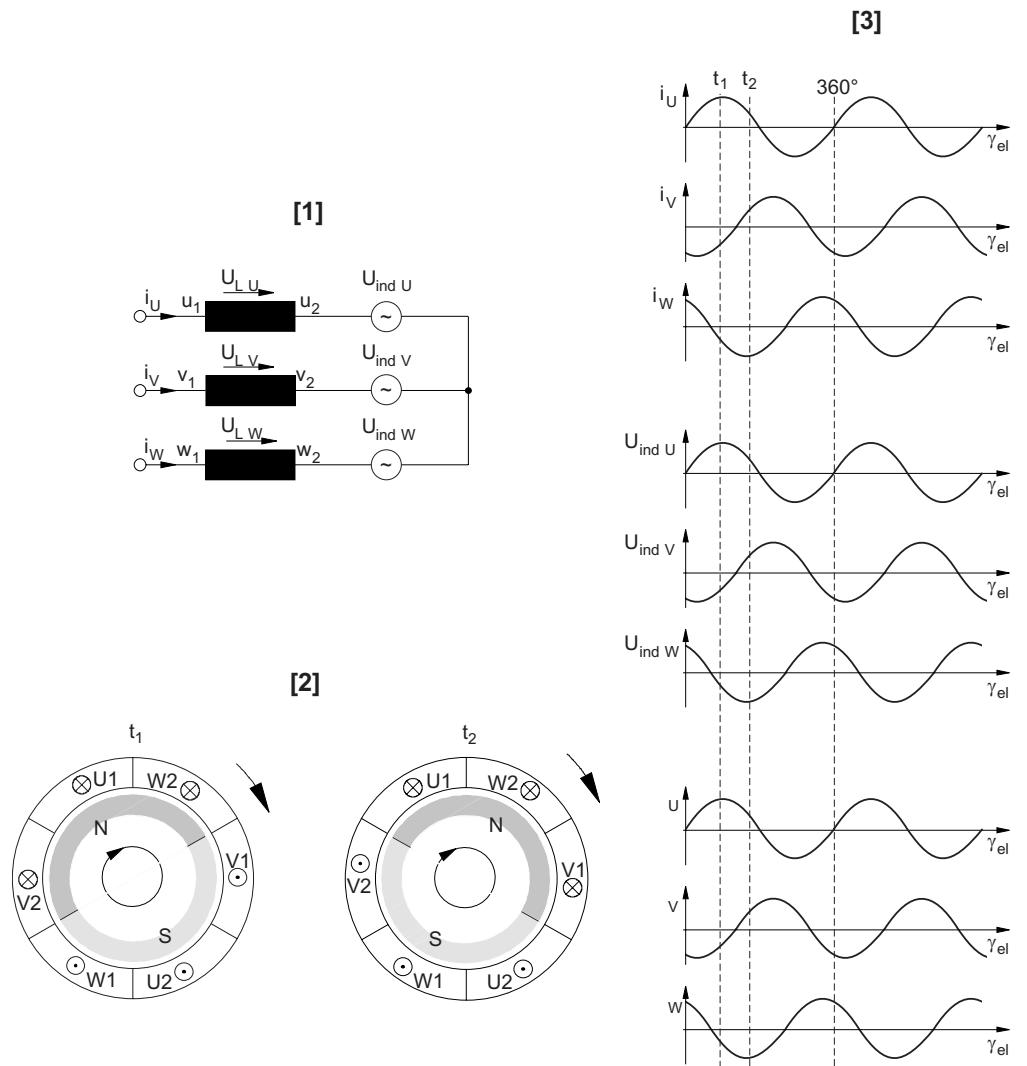
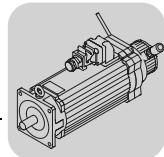


Bild 12: Sinusförmige Speisung

56169axx

- [1] Ersatzschaltbild eines Synchron-Servomotors
- [2] Lage des Rotors zum Zeitpunkt t_n
- [3] Diagramm: Strom, Spannung und Fluss über die Zeit bei konstanter Spannung
- U_{ind} Durch die Drehung des Läufers induzierte Spannung (EMK)
- U_L Spannungsabfall an der Induktivität

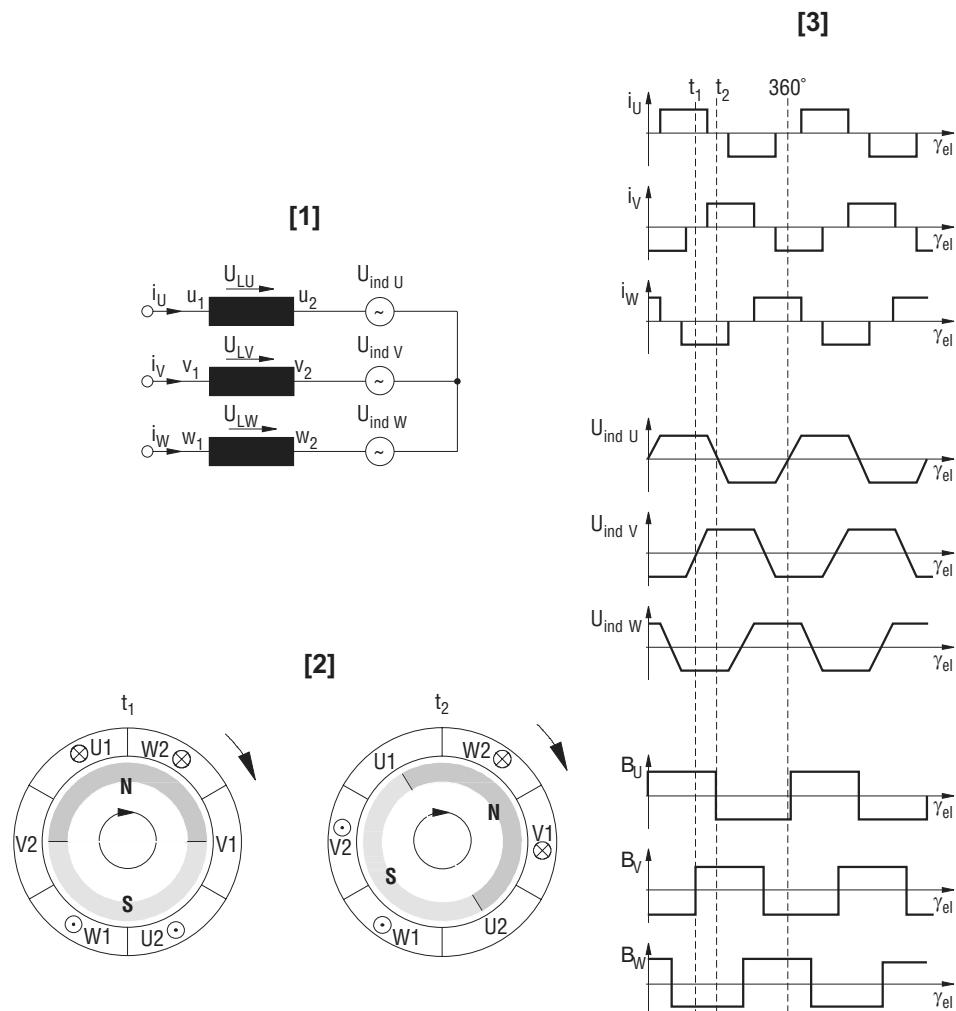
Der Servoverstärker gibt dabei auf jeder Phase eine getaktete Gleichspannung aus dem Spannungs-Zwischenkreis aus. Der Effektivwert der Ausgangsklemmenspannung entspricht dem einer echten sinusförmigen Spannung. Durch diese getaktete Gleichspannung (sinusbewertete Modulation) wird in den Motor ein sinusförmiger Strom eingeprägt, der wiederum einen sinusförmigen magnetischen Fluss anregt. Dies bewirkt eine hohe Drehmoment- und Drehzahlkonstanz, auch bei niedrigen Drehzahlen.



Üblicherweise werden Synchron-Servomotoren mit Resolven oder mit sin/cos-Absolutwertgebern ausgestattet. Anhand der von den Lagegebern ermittelten Daten stellt der Servoverstärker sicher, dass der Polradwinkel 90° beträgt. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass der Lagegeber exakt auf die Pole der Permanentmagnete ausgerichtet ist. Nur dann kann sich das äußere Magnetfeld des Stators um 90° versetzt aufbauen. Dies wird auch als Kommutierung bezeichnet.

2.4.4 Blockförmige Speisung

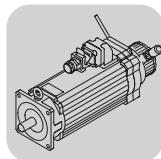
Neben der sinusförmigen Speisung gibt es auch noch die blockförmige Speisung von Motoren, die jedoch heute nur noch eine eher untergeordnete Bedeutung hat. Wie der Name schon sagt, erfolgt hier die Speisung des Motors über blockförmige Spannungen aus dem Gleichspannungs-Zwischenkreis.



56170axx

Bild 13: Blockförmige Speisung

- [1] Ersatzschaltbild eines Synchron-Servomotors
- [2] Lage des Rotors zum Zeitpunkt t_n
- [3] Diagramm: Strom, Spannung und Fluss über die Zeit bei konstanter Spannung
- U_{ind} Durch die Drehung des Läufers induzierte Spannung (EMK)
- U_L Spannungsabfall an der Induktivität



Servomotoren

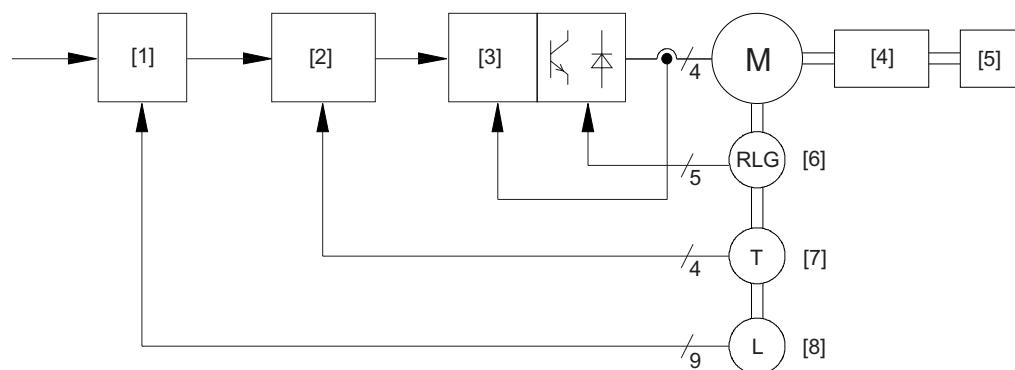
Funktionsweise von Synchron-Servomotoren

In den Motorwicklungen werden blockförmige Ströme eingeprägt. Diese induzieren im Motor trapezförmige Spannungen. Bauartbedingt entsteht eine rechteckförmige Verteilung der Luftspaltinduktion, was eine konstante Drehmomentbildung zur Folge hat.

Die Ansteuerung der Stromregler erfolgt bei der blockförmigen Speisung über einen Rotorlagegeber.

Für die Erfassung der Drehzahl wird ein weiterer Geber, meist ein Tachogenerator, benötigt.

Die absolute Lage des Rotors wird mit Hilfe eines Lagegebers erfasst.



56171axx

Bild 14: Reglerstruktur mit Gebersystemen bei blockförmig gespeistem Motor

[1]	Lage	[5]	Last
[2]	Drehzahl	[6]	Rotorlagegeber
[3]	Strom	[7]	Tachogenerator
[4]	Getriebe	[8]	Lagegeber

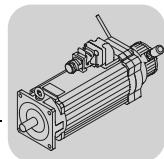
Vor- und Nachteile der blockförmigen Speisung zur sinusförmigen Speisung:

Vorteile der blockförmigen Speisung

- einfache und somit günstigere Gebersysteme wie z. B. Hallsensor, Lichtschranke für die Ermittlung der Rotorlage,
- einfache Erzeugung der Steuersignale für den Strom.

Nachteile der blockförmigen Speisung

- schlechtere Drehzahlkonstanz,
- schlechtere Drehmomentkonstanz, besonders bei niedrigen Drehzahlen,
- zusätzlicher Geber für die Drehzahl notwendig.



2.4.5 Thermische und dynamische Grenzkennlinie

Dynamische Grenzkennlinie

Die dynamische Grenzkennlinie gibt Aufschluss darüber, welches maximale Drehmoment der Motor bei welcher Drehzahl abgeben kann.

Es ist zu beachten, dass der Servoverstärker einen ausreichenden Strom zur Verfügung stellen muss, damit der Motor das maximale Drehmoment erreichen kann.

Bei der Projektierung ist außerdem zu beachten, dass das maximale Drehmoment im oberen Drehzahlbereich abfällt. Dies ist bedingt durch die im Motor erzeugte Gegenspannung, die sich durch das Induktionsgesetz ergibt. Die Permanentmagnete des Rotors erzeugen in den Statorspulen diese Spannung. Durch diese Gegenspannung kann der Servoverstärker nicht mehr den für das maximale Drehmoment erforderlichen Strom einprägen, da der Spannungsabstand zwischen Servoverstärker-Ausgangsspannung und induzierter Gegenspannung zu gering wird.

Bild 15 zeigt die dynamische Grenzkennlinie eines Synchron-Servomotors CM90M für die Drehzahlklassen 2000, 3000, 4500 und 6000.

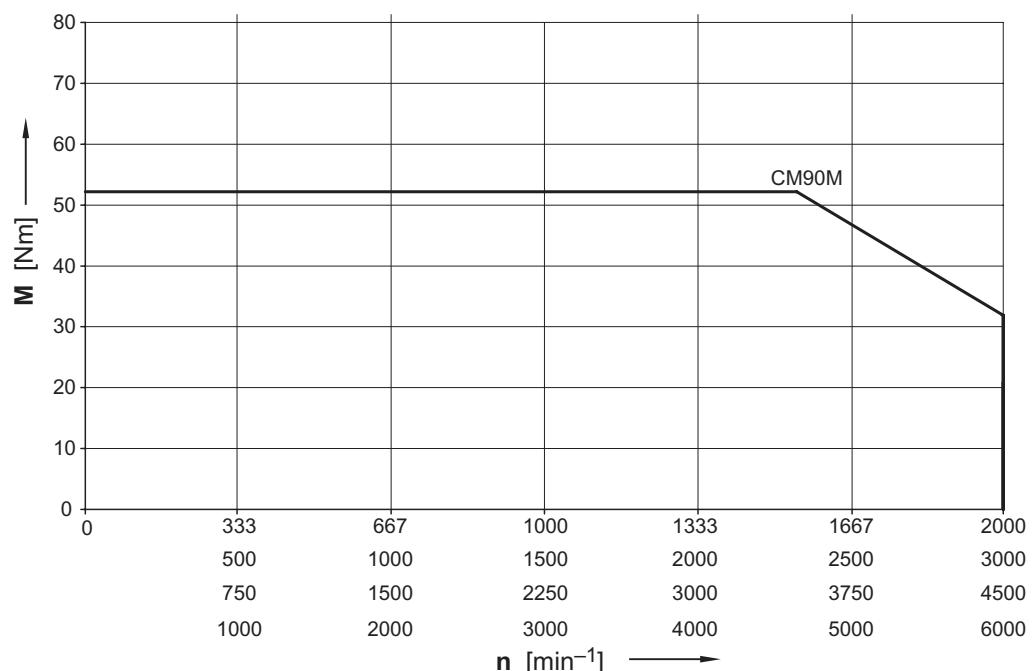
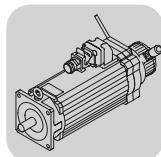


Bild 15: Dynamische Grenzkennlinien CM90M

57563axx

Bei der Projektierung eines Antriebes ist zu beachten, dass das maximale Drehmoment bei zugehöriger Drehzahl unter bzw. maximal auf der dynamischen Grenzlinie des Motors liegen darf, siehe hierzu auch Kapitel 8 "Projektierung".



Thermische Grenzkennlinie

Bei der Projektierung eines Antriebes werden zur Bestimmung der thermischen Auslastung des Motors die mittlere Motordrehzahl und das effektive Drehmoment berechnet. Anhand dieser Daten wird der Arbeitspunkt des Motors ermittelt.

Dieser Arbeitspunkt muss unterhalb der thermischen Grenzkennlinie des Motors liegen, andernfalls wird der Motor thermisch überlastet. Auch hier ist zu beachten, dass die Kennlinie mit steigender Drehzahl abfällt, weshalb bei der Projektierung eine Arbeitspunktbestimmung unverzichtbar ist. Der Arbeitspunkt ergibt sich aus dem quadratischen mittleren Moment M_{eff} und der mittleren Drehzahl n .

Der Abfall der Kennlinie wird hauptsächlich durch Wirbelstrom-, Ummagnetisierungs- und Eisenverluste verursacht.

Bild 16 zeigt die thermische Grenzkennlinie eines Synchron-Servomotors CM90M für die Drehzahlklasse 6000.

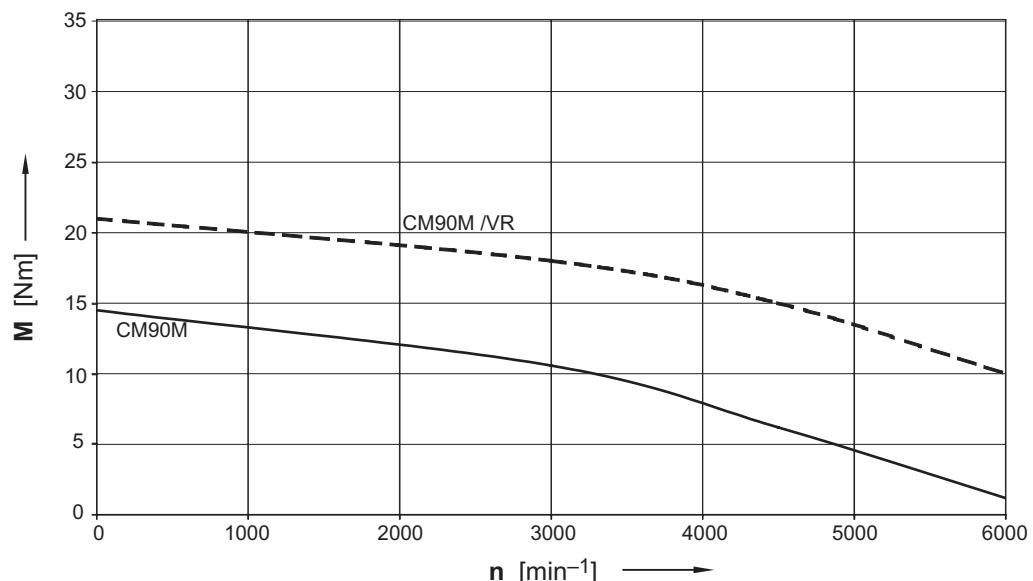
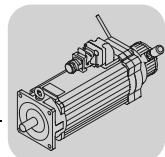


Bild 16: Thermische Grenzkennlinien CM90M

57564axx

Der Zusatz "/VR" hinter der Motorbezeichnung bedeutet, dass der Motor mit einem Fremdlüfter ausgestattet ist.



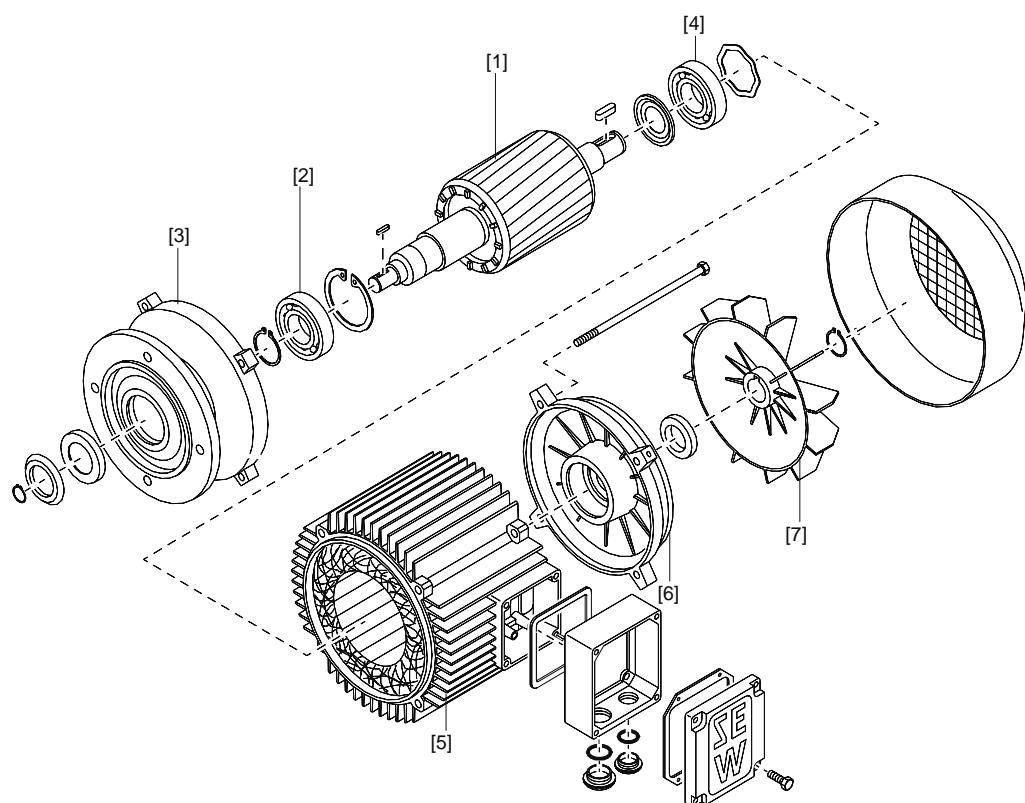
2.5 Aufbau von Asynchron-Servomotoren

Prinzipieller Aufbau

- Prinzipiell besteht ein Asynchron-Servomotor aus
- einem Rotor mit kurzgeschlossener Wicklung,
 - einem Stator mit entsprechender Wicklung,
 - Leistungsanschluss (Klemmenkasten),
 - einem Geber.

Im Folgenden werden die Asynchron-Servomotoren am Beispiel der Motorenreihe CT/CV von SEW-EURODRIVE dargestellt.

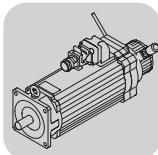
2.5.1 Aufbau CT-/CV-Motor



57572AXX

Bild 17: Aufbau Asynchron-Servomotor CT/CV von SEW-EURODRIVE

- | | |
|------------------------|-------------------|
| [1] Läufer, kpl. | [5] Ständer, kpl. |
| [2] Rillenkugellager | [6] B-Lagerschild |
| [3] Flanschlagerschild | [7] Lüfter |
| [4] Rillenkugellager | |



Die Statoren von Asynchron- und Synchron-Servomotoren sind prinzipiell gleich aufgebaut, die Rotoren dagegen unterscheiden sich grundlegend. Der Asynchron-Servomotor hat einen Kurzschlussläufer, in dem das Magnetfeld durch Induktion erzeugt wird.

Der Stator besteht prinzipiell aus drei Spulen, die auf einen ferromagnetischen Trafoblechkörper mit 120°-Versatz gewickelt sind. Die Spulenenden können in der Schaltungsart Stern oder Dreieck geschaltet sein.

Eigenschaften und Optionen CT-/CV-Motoren

- Drehmomentbereich von 3 - 200 Nm,
- Stator mit Einziehwicklung,
- 3-fache Überlastfähigkeit,
- gute Regeleigenschaften bei großen externen Massen,
- bei dauerhaft niedrigen Drehzahlen ist ein Fremdlüfter erforderlich,
- zur Bestimmung der Rotorlage ist ein Gebersystem erforderlich,
- Bremse möglich.

2.6 Funktionsweise von Asynchron-Servomotoren

Der Rotor eines Asynchron-Servomotors ist als zylindrischer Käfig aufgebaut. Die einzelnen Stäbe des Käfigs sind durch Kurzschlussringe zusammengehalten. Im Betrieb fließt ein Strom über den Kurzschlussring in die Stäbe. Jeder stromdurchflossene Leiter bildet ein Magnetfeld aus. Wenn dieses Magnetfeld versetzt zum Ständermagnetfeld steht, erfährt der Rotor eine Kraft. Diese Kraft ist dann maximal, wenn das Magnetfeld des Rotors senkrecht zum Magnetfeld des Stators steht.

Durch ein feldorientiertes Regelverfahren können die beiden Magnetfelder so ausgerechnet werden, dass der Asynchron-Servomotor wesentlich dynamischer betrieben werden kann als dies üblicherweise der Fall ist.

Feldorientierung bedeutet, dass zwei existierende Magnetfelder gegeneinander orientiert werden. Die Feldorientierung ist bei synchronen und asynchronen Servomotoren gleich. Beim Asynchron-Servomotor muss aufgrund des Läuferaufbaus eine Vielzahl von physikalischen Randparametern beachtet werden, um eine konstante Magnetisierung des Rotors zu erzielen. Da Asynchron-Servomotoren keine Permanentmagnete besitzen, muss der magnetische Fluss im Rotor über das Magnetfeld des Stators gebildet werden. Der Ständerstrom wirkt daher fluss- und drehmomentbildend.

Analog zum Transformator, bei dem die Primärwicklung über den Blechkern mit der Sekundärwicklung verbunden ist und dort eine Spannung induziert, ist beim Asynchron-Servomotor die Statorwicklung mit dem Käfigläufer über den Luftspalt gekoppelt. Gemäß dem Induktionsgesetz gilt:

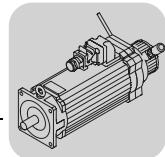
$$U_i = -N \times \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$$

U_i Induzierte Spannung [V]

N Windungszahl

$\Delta \Phi / \Delta t$ Zeitliche Änderung des magnetischen Flusses [Wb/s]

Aus der Gleichung ist ersichtlich, dass eine Flussänderung zur Aufrechterhaltung der sekundärseitigen Spannung und somit auch des sekundärseitigen Stromes notwendig ist. Diese Gesetzmäßigkeit ist analog zum Transformator, mit dem keine Gleichspannung übertragen werden kann.



Durch die Bestromung des Stators entsteht ein magnetischer Fluss, der den Rotor durchflutet. Die lenzsche Regel besagt, dass alle durch eine Änderung des magnetischen Flusses induzierten Spannungen so gerichtet sind, dass die von ihnen hervorgerufenen Ströme die Ursache der Induktion entgegenwirken. Der im Rotor entstehende Strom wirkt also der Flussänderung entgegen. Bedingt durch die ohmschen Verluste im Läufer wird dieser Strom abgebaut, sofern keine Flussänderung seitens des Statorstroms erfolgt. Der Abbau des Läuferstromes erfolgt nach der elektrischen Zeitkonstante T_r des Läufers:

$$T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

T_r Elektrische Zeitkonstante Rotor
 L_r Induktivität Rotor
 R_r Widerstand Rotor

Moderne stromgeführte Regelverfahren, wie das von SEW-EURODRIVE entwickelte CFC-Verfahren (Current Flux Control), sind in der Lage, ein in Ausrichtung und Stärke bekanntes Magnetfeld zu erzeugen und dazu einen Läuferstrom in senkrechter Orientierung einzuprägen. Dieses Regelverfahren ermöglicht es, asynchrone Motoren mit Servoeigenschaften zu betreiben.

Beispiel

Nachstehend ist die prinzipielle Funktionsweise einer stromgeführten Feldregelung am Beispiel eines Asynchronmotors (ASM) erläutert:

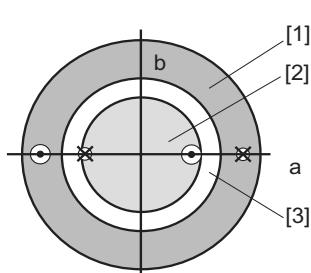


Bild 18: Statorstrom bei t_0

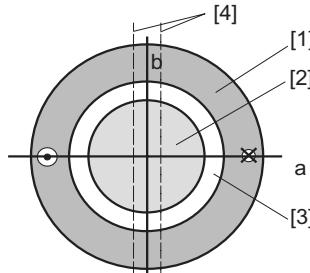


Bild 19: Magnetisierung ASM

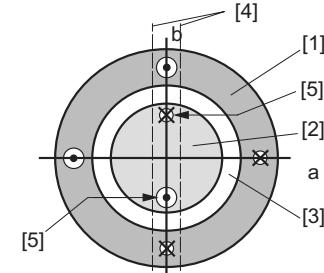
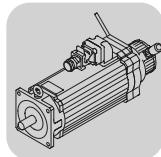


Bild 20: Drehmomentbildung

[1] Stator
 [2] Läufer
 [3] Luftspalt
 [4] Feldlinien
 [5] Stromführender Leiter mit Darstellung der Stromflussrichtung

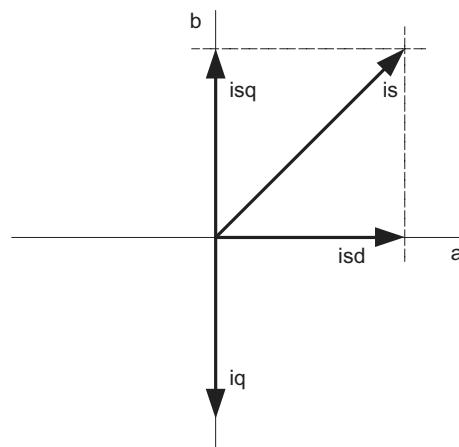
1. Zum Zeitpunkt t_0 wird der Stator bestromt, siehe Bild 18. Die Richtung dieser Erstbestromung ist zunächst willkürlich. Das Magnetfeld des induzierten Stromes wirkt der Änderung des magnetischen Flusses entgegen (lenzsche Regel), d. h. die Ströme von Läufer und Stator sind entgegengesetzt.
2. Es erfolgt eine Magnetisierung des Asynchron-Servomotors, da der Zustand von t_0 so lange aufrecht erhalten wird, bis der Strom im Läufer abgeklungen ist. Der Strom klingt aufgrund des ohmschen Widerstandes im Läufer ab. Die für die Magnetisierung erforderliche Zeit ist durch die elektrische Zeitkonstante T_r des Läufers definiert. Der abgeklungene Zustand kann mit $5 \times T_r$ als erreicht angesehen werden. Der Asynchron-Servomotor kann jetzt als magnetisiert angesehen werden, siehe Bild 19.



3. Das **schlagartige** Einprägen einer zusätzlichen Stromkomponente, die **senkrecht** zur Erstbestromung ausgerichtet ist, hat wiederum einen Strom zur Folge, siehe Bild 20. Dieser Zustand ist vergleichbar mit dem unter Punkt 1. beschriebenen, jedoch
- richtet sich die Bestromung des Stators nach dem Strom von Punkt 1,
 - ist die Verharrung hier wesentlich kürzer als bei Zustand Punkt 1.

Der in den Stator eingeprägte Strom I_{sd} bestimmt die Magnetisierung. Der Rotorstrom I_q wirkt drehmomentbildend, er entspricht der um 180° gedrehten Stromkomponente I_{sq} . Da in der Feldorientierung beide Stromkomponenten bekannt sind, ist das Drehmoment bestimmbar. Gemäß den magnetischen Gesetzen erfährt ein stromdurchflossener Leiter, in diesem Fall der Läufer, im Magnetfeld eine Kraft F , die auf ihn wirkt. Diese Kraft bestimmt das Drehmoment.

Durch die gezielte rechtwinklige Anordnung wird der drehmomentbildende Läuferstrom optimal ausgenutzt. Das resultierende Magnetfeld beginnt sich auf den Winkel des Statorstromes auszurichten. Die Geschwindigkeit der Ausrichtung folgt einer e-Funktion und wird durch die Zeitkonstante T_r des Läufers bestimmt.



56197axx

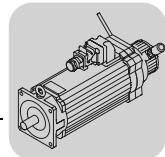
Bild 21: Vereinfachte Darstellung der Ströme in Stator und Rotor zum Zeitpunkt t_1

- | | |
|-----|--|
| isq | 1. Statorstromkomponente (drehmomentbildend, bei t_1) |
| is | Statorstrom bei t_1 |
| isd | 1. Statorstromkomponente (magnetisierend, bei t_1) |
| iq | Rotorstrom bei t_1 |

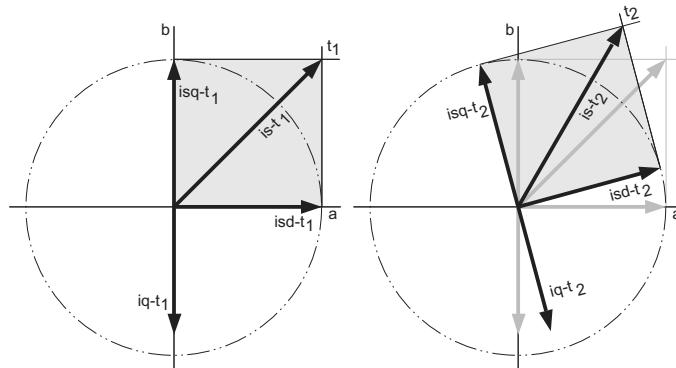
Wenn die Bestromung des Stators auf diese Weise für eine Zeit von $4 \times T_r \dots 5 \times T_r$ beibehalten wird, sinkt der Läuferstrom auf Null ab und das magnetische Feld richtet sich auf den Winkel des Statorstromes aus. In diesem Fall wäre das resultierende Drehmoment gleich Null und die Feldorientierung ginge verloren.

Daher wird die Verharrungszeit t in Bezug auf die Läuferzeitkonstante T_r sehr kurz gewählt:

$$t \ll T_r$$



In diesem Fall erfolgt bei der Bestromung des Stators eine Neuausrichtung der Statorströme:

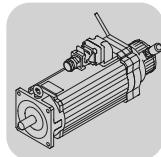


56198axx

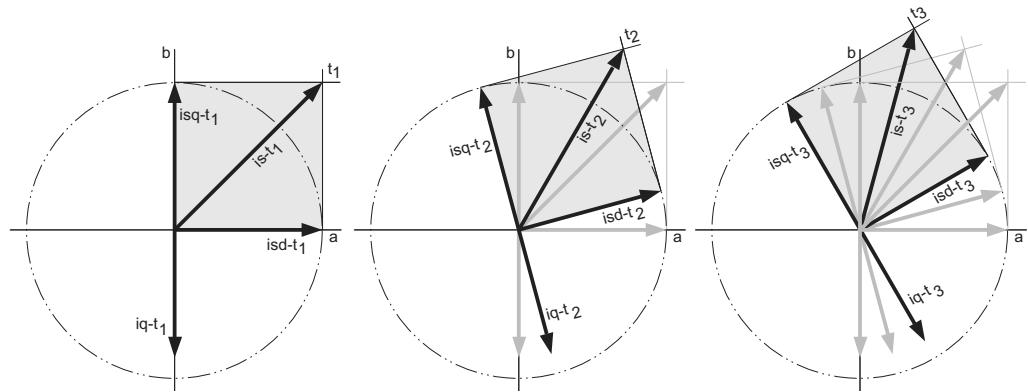
Bild 22: Vereinfachte Darstellung der Stromänderung in Stator und Rotor zum Zeitpunkt t_2

- isd- t_1 1. Statorstromkomponente (magnetisierend, bei t_1)
- is- t_1 Statorstrom bei t_1
- isq- t_1 2. Statorstromkomponente (drehmomentbildend bei t_1)
- iq- t_1 Abklingender Rotorstrom bei t_1
- isd- t_2 Neu ausgerichtete 1. Statorstromkomponente bei t_2
- is- t_2 Statorstrom nach Neuausrichtung bei t_2
- isq- t_2 Neu ausgerichtete 2. Statorstromkomponente bei t_2
- iq- t_2 Rotorstrom nach Neuausrichtung bei t_2

Bei heutigen Servoreglern liegt die Abtastzeit zwischen 62,5 - 250 μ s, abhängig von der Zielapplikation, für die der Regler konzipiert wurde. Nach der Abtastzeit erfolgt die Neuausrichtung des Statorstromes und somit auch des Rotorstromes. Aufgrund der kurzen Abtastzeit ist auch der Winkel von einem Zeitabschnitt zum nächsten sehr gering. Resultierend aus der geringen Winkeländerung ergibt sich auch eine geringe Änderung des magnetischen Flusses und somit des Drehmomentes.



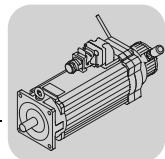
Die Feldorientierung wird wieder hergestellt, indem die Statorstromkomponenten durch neu ausgerichtete Statorströme I_{sd} und I_{sq} ersetzt werden. Somit beschreiben die Vektoren des Statorstromes eine Kreisbahn:



56200axx

Bild 23: Vereinfachte Darstellung der Stromänderung in Stator und Rotor zum Zeitpunkt t_n

- $isd-t_1$ 1. Statorstromkomponente bei t_1
- $is-t_1$ Statorstrom bei t_1
- $isq-t_1$ 2. Statorstromkomponente bei t_1
- $iq-t_1$ Rotorstrom bei t_1
- $isd-t_2$ Neu ausgerichtete 1. Statorstromkomponente bei t_2
- $is-t_2$ Statorstrom nach Neuausrichtung bei t_2
- $isq-t_2$ Neu ausgerichtete 2. Statorstromkomponente bei t_2
- $iq-t_2$ Rotorstrom nach Neuausrichtung bei t_2
- $isd-t_3$ Neu ausgerichtete 1. Statorstromkomponente bei t_3
- $is-t_3$ Statorstrom nach Neuausrichtung bei t_3
- $isq-t_3$ Neu ausgerichtete 2. Statorstromkomponente bei t_3
- $iq-t_3$ Rotorstrom nach Neuausrichtung bei t_3



2.6.1 Motorkennlinie

Am Beispiel des Asynchron-Servomotors CV100M4 von SEW-EURODRIVE sollen die für die Projektierung wichtigen Daten mit zugehöriger Motorkennlinie näher betrachtet werden. Üblicherweise sind die folgenden Motordaten bekannt:

Motortyp	: CV100M4
Nenndrehzahl n_{Nenn}	: 2100 1/min
Nennmoment M_{Nenn}	: 15 Nm
Nennstrom I_{Nenn}	: 8,1 A
Eckdrehzahl n_{Eck}	: 1760 1/min (in Verbindung mit 4-kW-Servoerstärker)

Bei der Projektierung ist der Eckdrehzahl besondere Bedeutung zu schenken. Die Eckdrehzahl ist die Drehzahl, bis zu der das maximale Drehmoment bei Ausnutzung des maximalen Servoverstärker-Spitzenstroms zur Verfügung steht. Wird der Motor oberhalb der Eckdrehzahl betrieben, fällt das verfügbare Moment stark ab. Dieser Verlauf ist in der folgenden Grafik deutlich zu erkennen.

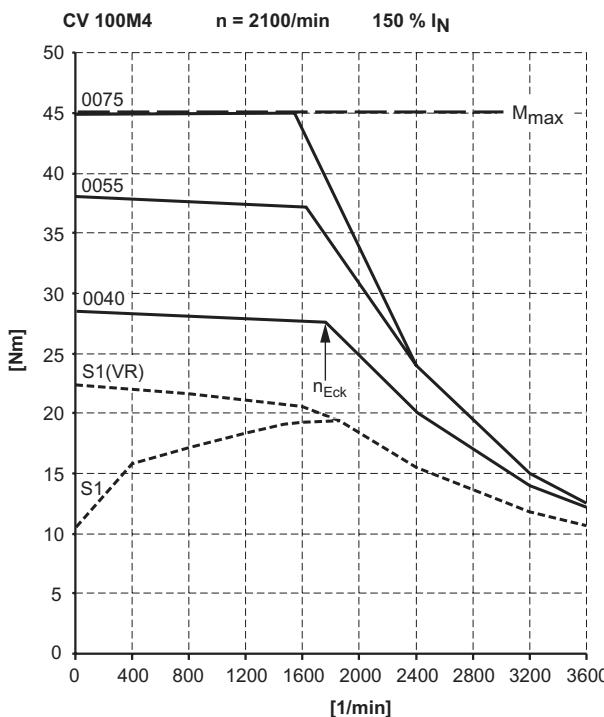


Bild 24: Kennlinien Asynchron-Servomotor CV100M4

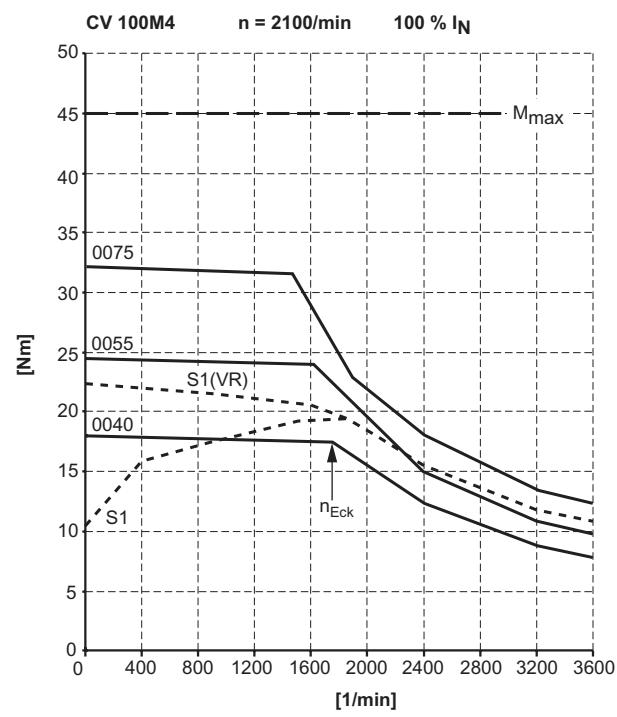
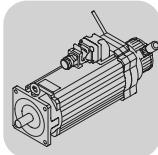


Bild 25: Kennlinien Asynchron-Servomotor CV100M4

- M_{max} : Maximales Drehmoment des Motors
- 0075 : Drehmomentkennlinie mit 7,5-kW-Servoerstärker bei 150 % / 100 % Servoverstärker-Nennstrom
- 0055 : Drehmomentkennlinie mit 5,5-kW-Servoerstärker bei 150 % / 100 % Servoverstärker-Nennstrom
- 0040 : Drehmomentkennlinie mit 4-kW-Servoerstärker bei 150 % / 100 % Servoverstärker-Nennstrom
- S1 (VR): S1-Kennlinie (Dauerbetrieb) mit Fremdlüfter
- S1 : S1-Kennlinie (Dauerbetrieb)
- n_{Eck} : Eckdrehzahl am Beispiel eines 4-kW-Servoerstärkers

Die Servoverstärkerleistung wird nach dem erforderlichen Drehmoment ausgewählt. Aus der zulässigen Kombination eines Motors mit Servoverstärkern unterschiedlicher Leistung ergeben sich verschiedene Drehmomentkennlinien.



Servomotoren

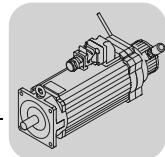
Funktionsweise von Asynchron-Servomotoren

Bei der Projektierung muss darauf geachtet werden, dass das effektive Motordrehmoment bei mittlerer Drehzahl unterhalb bzw. maximal auf der S1-Kennlinie liegen darf. Liegt das effektive Motordrehmoment bei mittlerer Drehzahl oberhalb der S1-Kennlinie, wird der Motor thermisch überlastet.

Die Drehmomentkennlinien mit Angabe der Servoverstärkerleistung geben Auskunft darüber, welche Momente bei welchen Drehzahlen verfügbar sind. Sie sagen jedoch nicht aus, ob dieses Moment auch dauerhaft abgegeben werden kann. Hierfür ist die S1-Kennlinie unentbehrlich.

Bei einem Einsatz des Motors mit niedrigen Drehzahlen kann es unter Umständen erforderlich sein, den Motor mit einem Fremdlüfter auszurüsten, um eine thermische Überlastung zu vermeiden. Die Kennlinie S1 (VR) verdeutlicht, dass der Motor besonders im unteren Drehzahlbereich dauerhaft ein erheblich höheres Drehmoment abgeben kann. Bei der Projektierung des Antriebs kann anhand des effektiven Motordrehmomentes und der mittleren Drehzahl der Arbeitspunkt bestimmt werden. Mit Hilfe des Arbeitspunktes kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob ein Fremdlüfter erforderlich ist.

Aus der Überlastfähigkeit der zulässigen Motor-Servoverstärker-Kombinationen ergeben sich unterschiedliche dynamische Drehmomentkennlinien. Auch hier muss bei der Projektierung beachtet werden, dass die Drehmomente wegen der Gefahr der thermischen Überlastung nicht dauerhaft zur Verfügung stehen, siehe hierzu auch Kapitel 8 "Projektierung".



2.7 Synchroner Linearmotor

Synchrone Linearmotoren entsprechen in der Funktionsweise grundsätzlich den rotierenden Synchron-Servomotoren. Linearmotoren kommen dann zum Einsatz, wenn höchste Anforderungen z. B. an Dynamik und Positioniergenauigkeit gestellt werden. Da ein synchroner Linearmotor aus einer Vielzahl von Komponenten besteht, erfolgt der Zusammenbau erst an der Maschine, in die er eingebaut wird.

Die nachstehende Abbildung zeigt schematisch den Aufbau eines vollständigen linearen Antriebssystems.

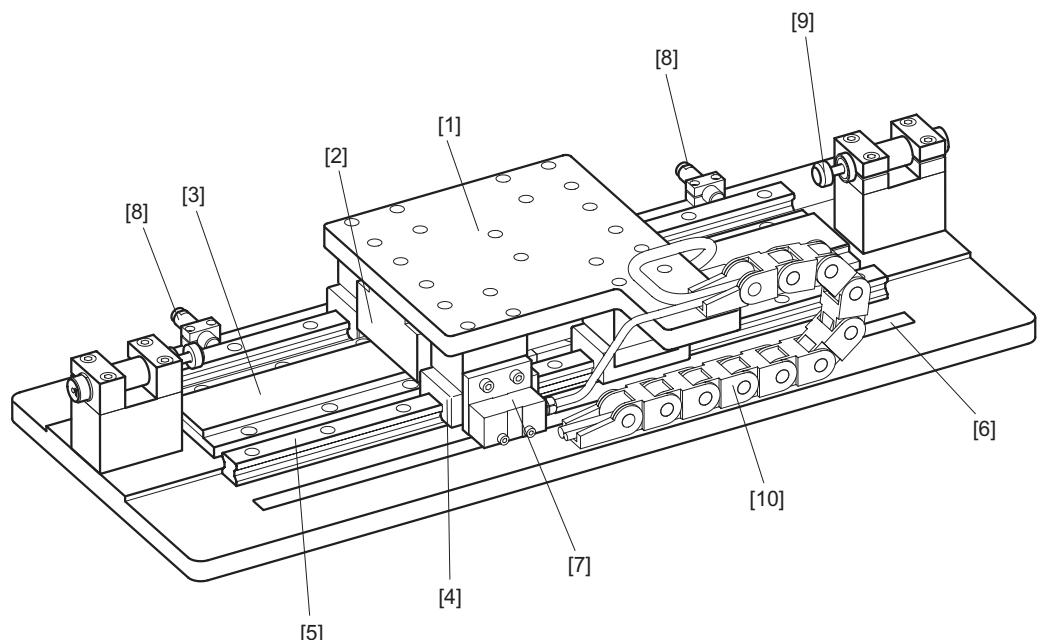


Bild 26: Lineares Antriebssystem

56174axx

[1]	Primärteilträger	[6]	Messlineal
[2]	Primärteil	[7]	Messkopf
[3]	Sekundärteil	[8]	Endschalter
[4]	Führungswagen	[9]	Puffer
[5]	Führungsschiene	[10]	Energiezuführung

Vorteile von synchronen Linearmotoren

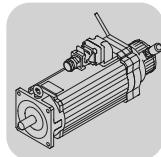
Im Folgenden sind die Vorteile eines synchronen Linearmotors gegenüber einem rotierenden System aufgeführt:

- höhere Geschwindigkeiten,
- höhere Beschleunigungen,
- Direktantrieb (kein Getriebe, Zahnriemen etc. erforderlich), d. h. Spielfreiheit,
- praktisch verschleißfrei,
- höhere Positioniergenauigkeit.

Anwendung

Synchrone Linearmotoren finden hauptsächlich Anwendung in folgenden Branchen:

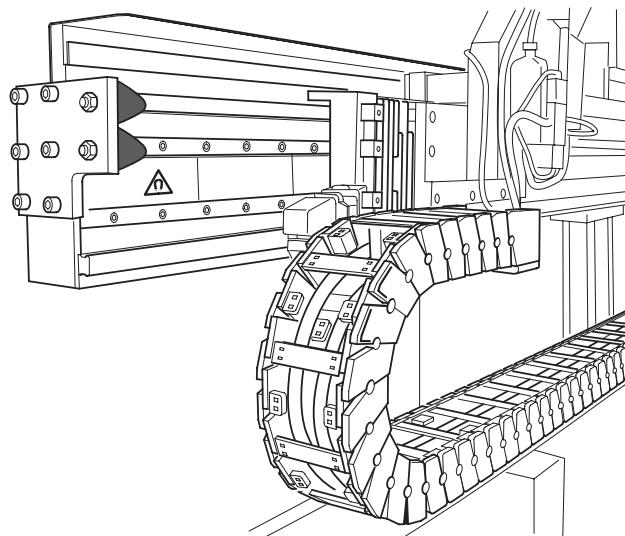
- Handlingssysteme (Transport- und Logistikapplikationen),
- Verpackungstechnik,
- Werkzeugmaschinenbau,
- Montagetechnik,



Servomotoren Synchroner Linearmotor

- Sondermaschinenbau.

In diesen Branchen ersetzen synchrone Linearmotoren traditionelle, nicht direktangetriebene Lösungen wie z. B. Spindel-, Zahnstangen-, Riemen- und Kettenantriebe.



56227axx

Bild 27: Synchroner Linearmotor in einem Handlingssystem

2.7.1 Prinzipien der synchronen Linearmotoren

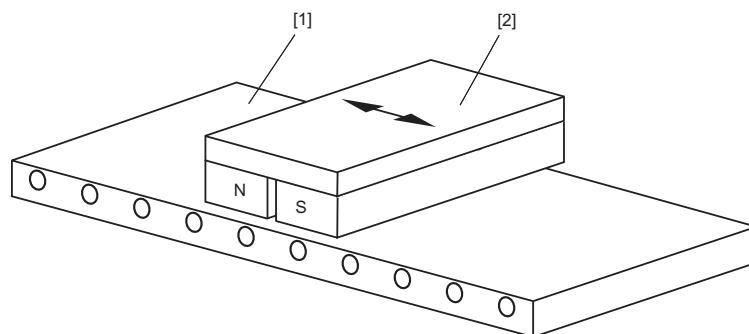
Bei den synchronen Linearmotoren werden zwei Prinzipien unterschieden:

- Langstatorprinzip,
- Kurzstatorprinzip.

Langstatorprinzip

Bei diesem Prinzip wird der Verfahrweg durch ein oder mehrere Primärteile festgelegt, die länger sind als die Magnetleiste. Die Magnetleiste befindet sich am bewegten Fahrschlitten (Sekundärteil), d. h. das Sekundärteil benötigt keine Energiezuführung und ermöglicht somit theoretisch unbegrenzte Verfahrwege.

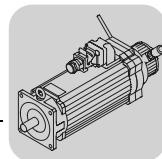
Das Langstatorprinzip ist hauptsächlich bei Transport- und Logistikapplikationen anzutreffen.



56181axx

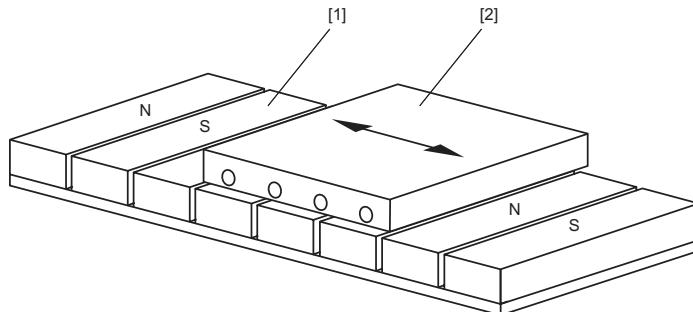
Bild 28: Langstatorprinzip

- [1] Primärteil: Stator mit Windungen
- [2] Sekundärteil: Permanent erregtes Reaktionsteil



Kurzstatorprinzip

Bei diesem Prinzip wird das im Vergleich zur Magnetleiste kurze Primärteil verfahren. Das Kurzstatorprinzip findet hauptsächlich Verwendung bei Servoanwendungen im Maschinenbau.



56175axx

Bild 29: Kurzstatorprinzip

- [1] Sekundärteil: Permanent erregtes Reaktionsteil
- [2] Primärteil: Stator mit Windungen

Aufgrund der großen Verbreitung wird in diesem Band nur das Kurzstatorprinzip näher behandelt.

Aufbau und Wirkungsweise des Kurzstator-prinzips

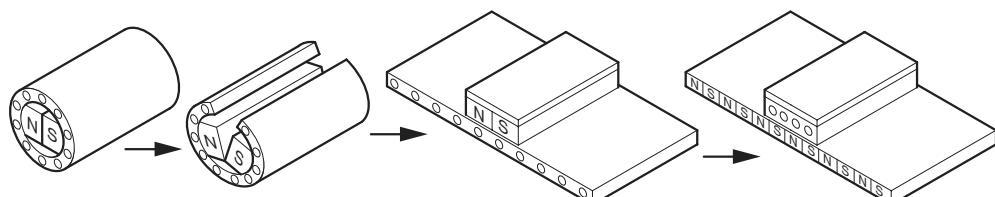
Ähnlich wie bei den rotierenden Antrieben besteht ein synchroner Linearantrieb aus zwei Teilen, dem Primärteil und dem Sekundärteil.

Bezogen auf die Funktionsweise entspricht

- das Primärteil des Linearmotors dem Stator des rotierenden Motors. Das Primärteil enthält das Blechpaket, die Motorwicklung und die Temperaturfühler.
- das Sekundärteil des Linearmotors dem Rotor des rotierenden Motors. Das Sekundärteil besteht aus dem Trägermaterial aus Stahl und den aufgeklebten Permanentmagneten.

Primär- und Sekundärteil sind vergossen.

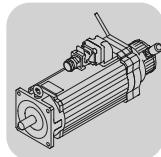
Die prinzipiell gleiche Funktionsweise des linearen und rotativen Motors wird deutlich, wenn der rotative Motor aufgeschnitten und "gerade gebogen" wird, siehe Bild 30.



56184axx

Bild 30: Prinzip des Linearmotors

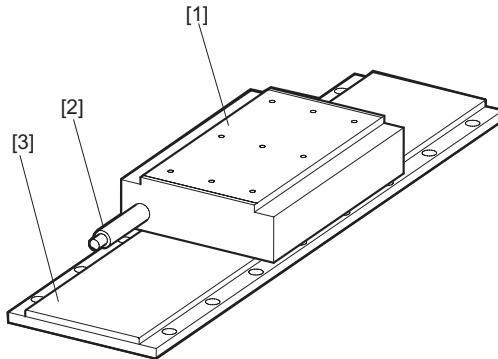
Im Unterschied zum rotativen Motor kann jedoch beim Linearmotor entweder das Primärteil oder das Sekundärteil bewegt werden.



Servomotoren

Synchroner Linearmotor

Um die Leistungsdaten erreichen zu können, ist es beim linearen Servomotor sehr wichtig, dass ein exakter Luftspalt zwischen Primär- und Sekundärteil eingehalten wird. Vergrößert sich der Luftspalt, verringert sich die Leistung des Motors. Ein zu großer Luftspalt führt zum Stillstand des Motors. Somit ist eine exakte Vorbereitung der Montagefläche die Grundvoraussetzung für ein einwandfrei arbeitendes System. Der Luftspalt wird über das Linearführungssystem und die Montageplatte realisiert.

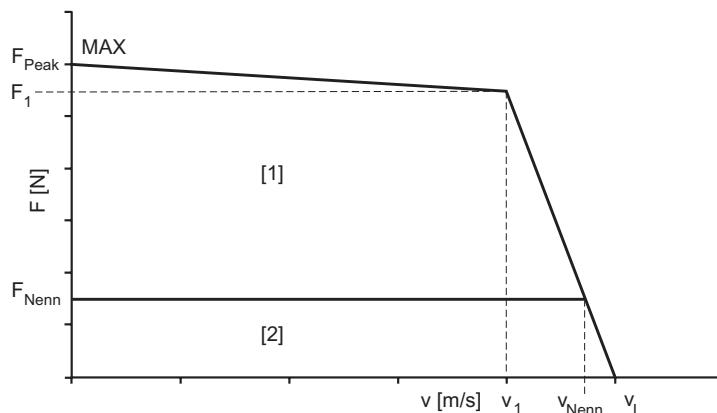


52619axx

Bild 31: Aufbau

- [1] Primärteil
- [2] Elektrischer Anschluss
- [3] Sekundärteil mit Permanentmagneten

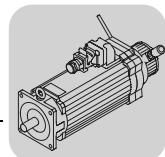
2.7.2 Motorkennlinie



56186axx

Bild 32: Motorkennlinie

- [1] Dynamische Grenzkräfte
- [2] Thermische Grenzkräfte
- F_{Nenn} Dauerkr. [N]
Dauerkr. ist abhängig von:
 - Größe der Flanschfläche Primärteil
 - Stärke der Flanschfläche Primärteil
 - Umgebungstemperatur
 - Aufstellungshöhe
- F_1 Maximalkr. [N], die bis Geschwindigkeit v_1 zur Verfügung steht
- F_{Peak} Maximalkr. [N]
- v_L Theoretische maximale Verfahrgeschwindigkeit [m/s]
- v_1 Geschwindigkeit [m/s], bis zu der die Kraft F_1 zur Verfügung steht
- v_{Nenn} Geschwindigkeit [m/s], bis zu der die Nennkr. zur Verfügung steht



Die Kennlinie gibt Aufschluss darüber, welche Spitzenkräfte F_{Peak} und F_{Nenn} bei den zugehörigen Geschwindigkeiten vom Motor aufgebracht werden können. Hierbei ist zu beachten, dass bei der thermischen Auslastung des Motors auch ein entsprechender Wärmetransport vom Motorkern in die Umgebung vorhanden sein muss, um eine ausreichende Kühlung sicherzustellen. Die Größe der Kühlfläche wird maßgeblich durch die Flanschfläche und die Dicke des Primärteils bestimmt.

Generell können zwei Kühlarten unterschieden werden:

- die Konvektionskühlung,
- die Wasserkühlung.

Je nach Anwendungsfall können zusätzliche Maßnahmen erforderlich werden:

- Fremdlüfter bei Konvektionskühlung,
- Wasserkühlung,
- Wasserkühlung mit zusätzlicher thermischer Kapselung.

Konvektionskühlung

Prinzipiell erfolgt die Kühlung durch Abstrahlung und durch Erwärmung der Umgebungsluft. Durch entsprechende Projektierung der Oberfläche des Motors muss der Wärmetransport gewährleistet werden.

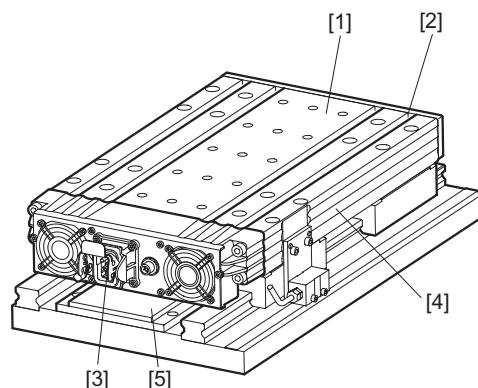
Zusätzlich in den Motor eingebaute Lüfter gewährleisten einen konstanten Luftstrom und transportieren die Wärmeenergie verstärkt ab.

Eigenschaften eines Kühlsystems mit Fremdlüfter sind:

- Hohe Kühlleistung,
- einfaches Prinzip, d. h. geringer technischer und finanzieller Aufwand.

SEW-Lösung: SL2-Advance- und SL2-Power- System

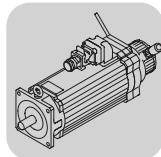
SEW-EURODRIVE bietet mit den synchronen Linearmotoren SL2-Advance- und SL2-Power-System ein vollintegriertes Montage- und Kühlungssystem an. Somit kann die aufwändige und kostenintensive Wasserkühlung durch eine recht einfache Art der Luftkühlung ersetzt werden. Diese Luftkühlung, die nach dem Prinzip der Konvektion arbeitet, ist bei nahezu gleicher Leistungsausbeute eine kostengünstige Variante.



53419AXX

Bild 33: Synchroner Linearmotor SL2- Advance-System und SL2-Power-System

- | | | | |
|-----|---|-----|---|
| [1] | SL2-Advance- / -Power-System | [4] | Primärteil (nicht sichtbar) integriert in Montagekühlbrücke |
| [2] | Vorbereitete Nuten als Befestigungssystem für kundenseitigen Aufbau | [5] | Sekundärteil |
| [3] | Elektrischer Steckverbinder | | |



Dieses Prinzip ermöglicht eine deutlich höhere Ausnutzung der Motornennkraft.

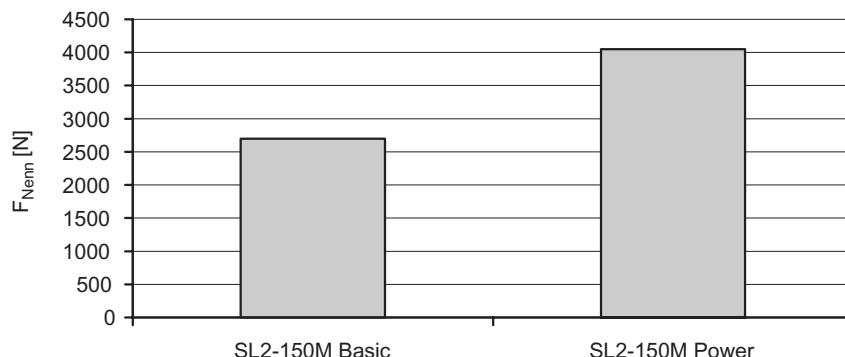


Bild 34: Nennkräfte SL2-150M in Basic- und Power-Ausführung

56188axx

Die SL2-Advance- und SL2-Power-Motoren bieten neben den thermischen Vorteilen auch eine sehr einfache Installation und Montage des Motorsystems in die Maschine. Außerdem vereinfacht dieser Aufbau den kundenseitigen Lastanbau und die Wartung.

Ohne Einsatz der SL2-Advance- und SL2-Power-Motoren muss sich der Anwender für den Aufbau des Linear-Motorsystems ein gewisses Know-how aneignen. Die Nennkraft des Systems kann nur dann erreicht werden, wenn eine ausreichend stabile Konstruktion gewählt wird, die den hohen Beschleunigungen standhält. Die Wärmeabfuhr sowie die Auswirkungen der Wärmeausdehnung sind zu berücksichtigen.

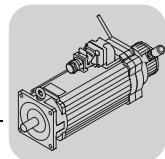
Wasserkühlung

Eine bei Linearmotoren im Maschinenbau verbreitete Art der Kühlung ist die Wasserkühlung.

Im Primärteil des Linearmotors sind Kühlkanäle angebracht, die mit einem Wasserkreislauf verbunden werden.

Eigenschaften dieses Systems sind:

- hohe Kühlleistung,
- der Motor gibt konstruktionsbedingt nur wenig Wärmeenergie an die umgebende Maschinenkonstruktion ab,
- hoher technischer Aufwand:
 - Projektierung,
 - Kühlkanäle im Primärteil,
 - Kühlaggregat erforderlich,
 - Schläuche für die Wasserzuführung.
- betreiben des Linearmotors ohne Wasserkühlung ist mit Leistungseinbußen verbunden,
- kostenintensiv.



**Wasserkühlung
mit thermischer
Kapselung**

Das Primärteil ist in einem Kühlmantel gekapselt und praktisch vollständig von der umgebenden Maschinenkonstruktion getrennt. Die Mantelung ist von Kühlkanälen durchzogen.

Eigenschaften dieses Systems sind:

- sehr hohe Kühlleistung,
- thermische Entkoppelung des Motors von der Maschinenkonstruktion, d. h. keine Wärmeausdehnung,
- sehr hoher technischer Aufwand:
 - Projektierung,
 - Thermische Kapselung des Primärteils,
 - Kühlkanäle in der Kapselung,
 - Kühlaggregat erforderlich,
 - Schläuche für die Wasserzuführung.
- großes Bauvolumen,
- betreiben ohne Wasserkühlung mit Leistungseinbußen,
- sehr kostenintensiv.

2.7.3 Zubehör

Damit die linearen Antriebssysteme ihre Aufgaben optimal ausführen können, werden einige periphere Komponenten benötigt, die im Folgenden aufgeführt sind.

**Linearführungs-
system**

Das Linearführungssystem hat folgende Aufgaben:

- die kundenseitige Last tragen und führen,
- die magnetischen Kräfte zwischen Primär- und Sekundärteil aufnehmen,
- das Mess-System führen,
- Luftspalt sicherstellen.

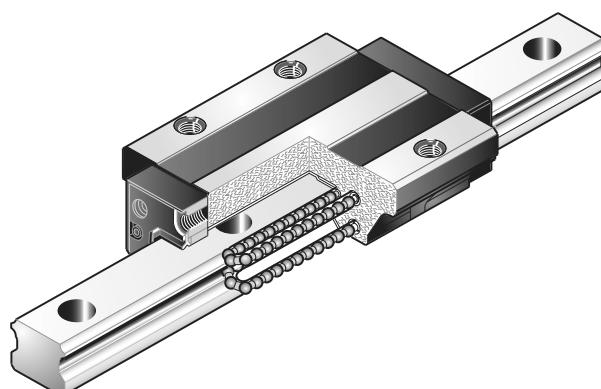
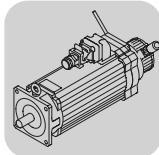


Bild 35: Linearführungssystem

56187axx

Auswahlkriterien an Linearführungssysteme sind:

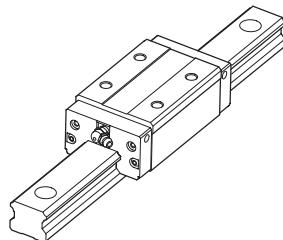
- hohe Beschleunigungen,
- hohe Verfahrgeschwindigkeiten,
- starke Lastwechsel,
- geringe Geräuschentwicklung,
- Aufnahme von Querkräften, die durch Wärmeausdehnung entstehen.



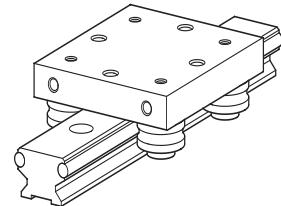
Servomotoren

Synchroner Linearmotor

Je nach Anwendung und Anforderungsschwerpunkt kommen unterschiedliche Führungssysteme zum Einsatz:



52892axx
Bild 36: Führung mit Wälzkörpern

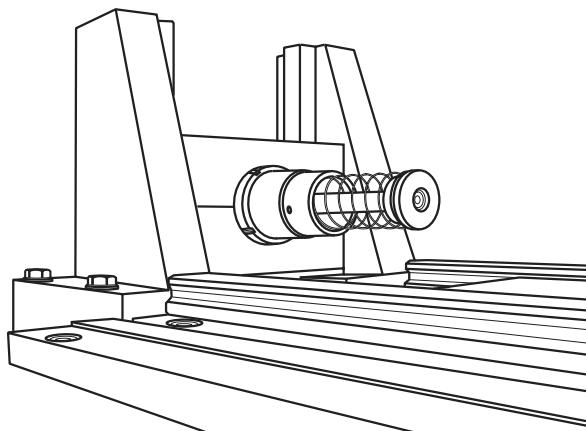


52894axx
Bild 37: Führung mit Laufrollen

Die unterschiedlichen Führungssysteme sind beispielhaft zu verstehen. Je nach Anwendung kann die Ausführung des Führungssystems variieren. In der Regel entscheidet der Kunde, welches Führungssystem zum Einsatz kommt.

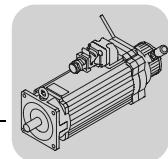
Puffer / Stoßdämpfer

Beim Betrieb von Linear-Motorsystemen treten hohe kinetische Energien auf. Um im Falle einer Störung größere Schäden zu vermeiden, ist der Einsatz von Puffern und Stoßdämpfern als Begrenzung der Verfahrstrecke dringend zu empfehlen. Diese Bauteile bauen die kinetische Energie bei einem Fehlverhalten des Antriebssystems ab und schützen das System vor Schäden.



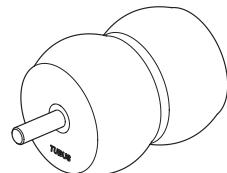
56145axx
Bild 38: Endlagendämpfer

SEW-EURODRIVE kann aufgrund der vielen unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten keine Puffer und Stoßdämpfer anbieten. Das übernehmen die jeweiligen Hersteller der Bauteile.



Im Folgenden sind die Eigenschaften von Puffern und Stoßdämpfern aufgelistet.

Puffer

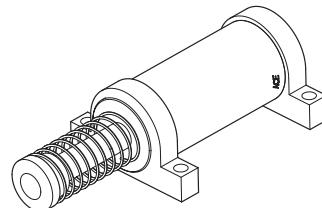


52896axx

Bild 39: Puffer

- einfacher Aufbau,
- kostengünstig,
- teilweise Rückprall der auftreffenden Masse.

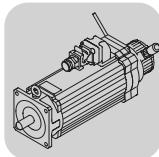
Stoßdämpfer



52893axx

Bild 40: Stoßdämpfer

- hohe Energieaufnahme,
- günstiger Verlauf des Energieabbaus,
- kein Rückprall der auftreffenden Masse,
- geringe Reaktionskräfte auf die bewegte Masse und die umgebende Konstruktion.



Servomotoren

Synchroner Linearmotor

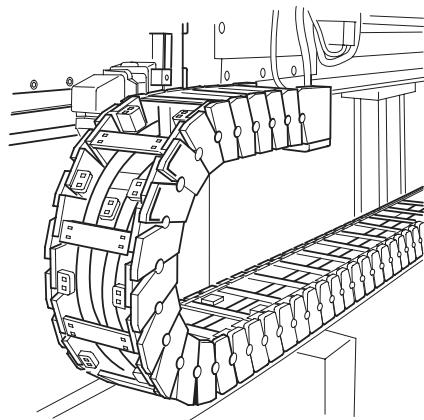
Schleppketten und Leitungen

Die in Schleppketten geführten hochflexiblen Leitungen versorgen ortsveränderliche Verbraucher mit Leistung und Daten. Der Einsatz hochflexibler Leitungen in Schleppketten hat sich bei vielen Anwendungen bewährt und wird auch bei Linearmotoren eingesetzt.

Dort werden aufgrund von

- hohen Beschleunigungen,
- zum Teil langen Verfahrwegen,
- teilweise großen freitragenden Längen

besondere Anforderungen gestellt.



56190axx

Bild 41: Schleppkette

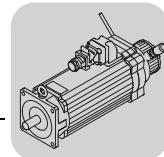
Auswahlkriterien

Bei Anwendungen mit freitragenden Schleppketten, d. h. das Obertrum der Schleppkette berührt über den gesamten Verfahrweg nicht das Untertrum, ist die Beschleunigung die kritische Größe, weniger die Geschwindigkeit. Hohe Beschleunigungen setzen die Schleppkette in Schwingung und verkürzen somit die Lebensdauer.

Bei der Auswahl von Kabeln müssen neben der meist hohen Dynamik noch weitere Kriterien beachtet werden:

- Biegeradien,
- Schleppketten-Tauglichkeit,
- Motorkabel geschirmt mit separater Schirmung für Temperaturfühler → Hybridkabel,
- Geberleitung paarweise verdrillt und geschirmt,
- EMV-gerechte Steckverbindungen,
- überdimensionieren von Leitungen vermeiden → Gewichtsgründe,
- auftretende Ströme → Kabelquerschnitt,
- anlagen- und länderspezifische Vorschriften.

Werden bei einem Linearsystem die Sekundärteile bewegt, ergibt sich daraus ein konstruktiver Vorteil, da in diesem Fall die Kabel nicht bewegen werden.



2.8 Bremsen für rotative Servomotoren

Das vorliegende Kapitel vermittelt einen kurzen Überblick über die Bremssysteme, die in SEW-Servomotoren eingesetzt werden. Diese Informationen ersetzen keinesfalls herstellerspezifische Hinweise oder landes- bzw. anlagenspezifische Sicherheitsvorschriften. Diese sind bei der Projektierung unbedingt zu beachten.

Weiterführende Informationen zu Bremssystemen für Servomotoren von SEW-EURODRIVE können dem Band "SEW-Scheibenbremsen" aus der Reihe Praxis der Antriebstechnik oder den gültigen Servo-Getriebemotorenkatalogen entnommen werden.

Motoren bzw. Getriebemotoren werden auf Wunsch mit einer elektromechanischen Bremse geliefert. Diese besteht zumeist aus einer gleichstromerregten Elektromagnetscheibenbremse, die elektrisch öffnet und durch Federkraft abbremst. Somit fällt die Bremse bei Stromausfall automatisch ein.

Je nach Anwendung muss die Motorbremse unterschiedliche Funktionen ausführen:

- Halten einer Last, z. B. Hubachse,
- Nothalt,
- Halten von Maschineneinheiten, z. B. Vorschubsschlitten,
- Sicherung gegen unbeabsichtigtes Verschieben.

Im Folgenden finden Sie Informationen zu Bremssystemen, wie sie auch von SEW-EURODRIVE eingesetzt werden.

2.8.1 Federdruckbremse als Haltebremse

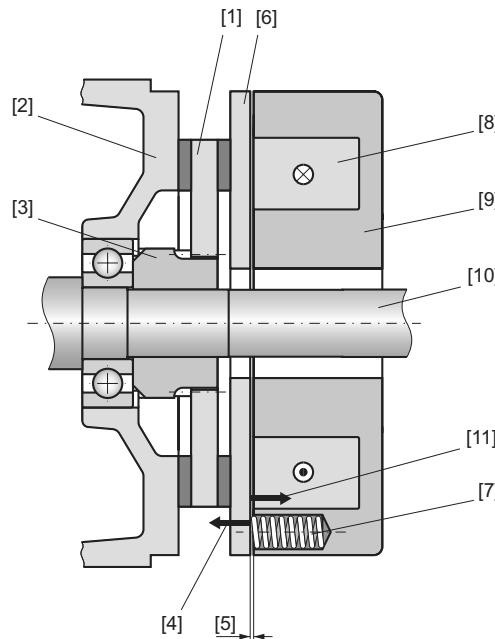
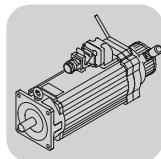


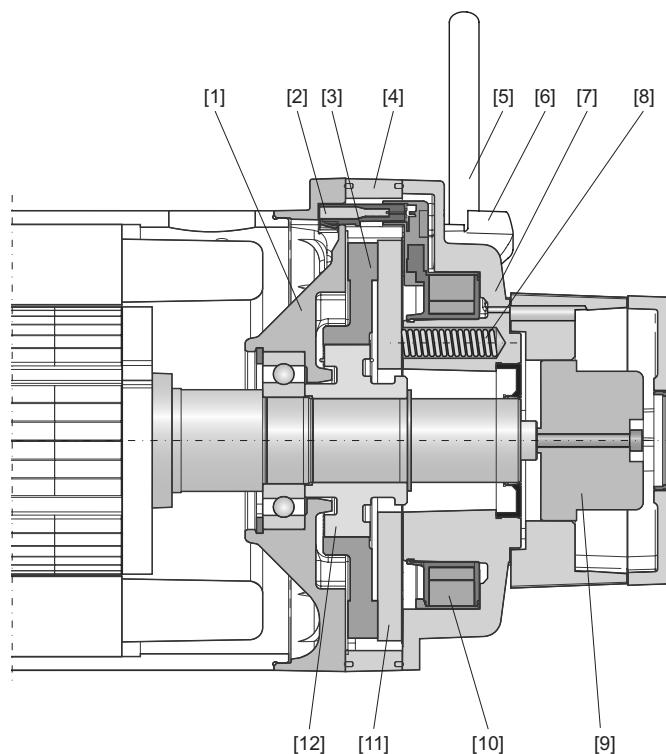
Bild 42: Prinzipieller Aufbau der SEW-Haltebremse

56912axx

[1]	Belagträger	[7]	Bremsfeder
[2]	Bremslagschild	[8]	Bremsspule
[3]	Mitnehmer	[9]	Spulenkörper
[4]	Federkraft	[10]	Motorwelle
[5]	Arbeitsluftspalt	[11]	Elektromagnetische Kraft
[6]	Ankerscheibe		



2.8.2 SEW-Bremse mit Arbeitsvermögen

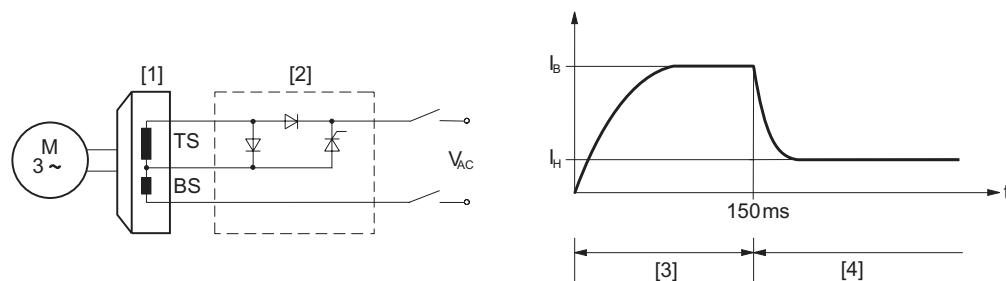


57857axx

Bild 43: Aufbau der Bremse mit Resolver RH1L für CM71 .. 112

- | | | | |
|-----|------------------|------|---------------|
| [1] | Bremslagerschild | [7] | Magnetkörper |
| [2] | Leitungsdose | [8] | Bremsfeder |
| [3] | Belagträger | [9] | Resolver RH1L |
| [4] | Führungsring | [10] | Bremsspule |
| [5] | Handhebel | [11] | Ankerscheibe |
| [6] | Lüftbügel | [12] | Mitnehmer |

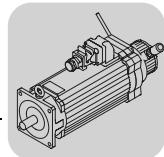
Die Federdruckbremse von SEW-EURODRIVE ist eine gleichstromerregte Elektromagnetscheibenbremse, die elektrisch öffnet und durch Federkraft bremst. Dieses System genügt vielen Sicherheitsanforderungen, da bei Stromausfall die Bremse automatisch einfällt.



56009axx

Bild 44: Schaltprinzip

- | | | | |
|-----|--------------------|-------|----------------------|
| [1] | Bremse | BS | Beschleunigerspule |
| [2] | Bremsenansteuerung | TS | Teilspule |
| [3] | Beschleunigung | BS+TS | Haltespule |
| [4] | Halten | IB | Beschleunigungsstrom |
| | | IH | Haltestrom |



Im Unterschied zu handelsüblichen gleichstromerregten Scheibenbremsen arbeiten die Bremsen von SEW-EURODRIVE mit einem Zweispulen-Bremssystem.

Im stromlosen Zustand wird die Ankerscheibe durch die Federkraft gegen den Belagträger gedrückt, d. h. der Motor wird gebremst. Wird eine entsprechende Spannung an die Bremsspule angelegt, überwindet die Magnetkraft die Federkraft der Bremsfedern und die Ankerscheibe liegt am Spulenkörper an. Der Belagträger wird frei und der Motor kann drehen.

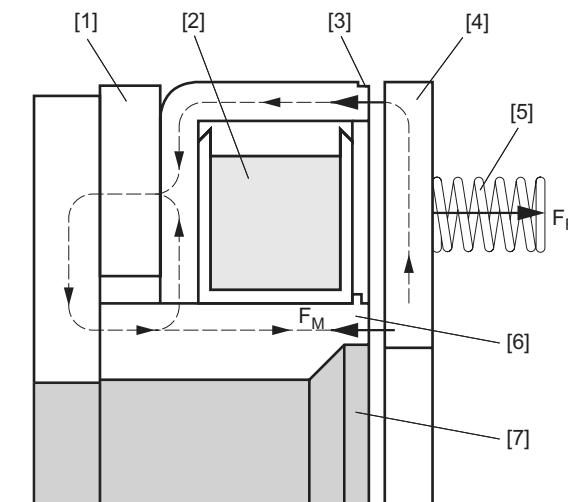
Eine besondere Bremsenansteuerung sorgt dafür, dass zunächst nur die Beschleunigerspule und erst anschließend die Haltespule (Gesamtspule) eingeschaltet wird. Die kräftige Stoßmagnetisierung der Beschleunigerspule, ausgelöst durch einen hohen Beschleunigungsstrom, bewirkt eine besonders kurze Ansprechzeit. Diese ist speziell bei großen Bremsen wichtig, da die Sättigungsgrenze nicht erreicht wird. Der Belagträger kommt sehr schnell frei, der Motor läuft nahezu ohne Bremsverluste an.

Je nach Einsatzzweck und Einbauort bietet SEW-EURODRIVE für nahezu jede Applikation passende Bremsgleichrichter an. Weitere Informationen hierzu können den entsprechenden Produktdokumentationen entnommen werden.

2.8.3 Permanent erregte Haltebremse

Beim Bremsen wird das Magnetfeld des Permanentmagneten über Innen- und Außenpol zum Anker geleitet. Der Anker wird über das Magnetfeld angezogen, da die Kraft F_M des Magnetfeldes größer ist als die Kraft F_F der Feder. Die Reibung zwischen dem rotierenden Anker und den stehenden Polen erzeugt das Bremsmoment.

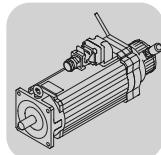
Wird die Bremsspule bestromt, bildet sich ein Magnetfeld, dessen Kraft F_M die Federkraft F_F kompensiert. Der Anker löst sich von den Polen, d. h. die Bremse ist gelüftet.



56206bxx

Bild 45: Funktionsprinzip der Haltebremse

[1]	Dauermagnet	F_M	Kraft des Magnetfeldes
[2]	Bremsspule	F_F	Federkraft
[3]	Außenpol		
[4]	Anker		
[5]	Feder		
[6]	Innenpol		
[7]	Rotor		



2.9 Bremsen für Linearmotoren

Die Ausführung der Bremsen von Linearmotoren variiert je nach Motorsystem oder Applikation und den daraus resultierenden Anforderungen sehr stark.

SEW-EURODRIVE verweist auf die Dokumentation und die Literatur der entsprechenden Anbieter.

Die Bremse bei Linearmotoren hat die Funktion einer Haltebremse. Diese Haltebremse und das Führungssystem müssen zusammenpassen, d. h. es ist eine Abstimmung mit dem Hersteller des Führungssystems notwendig.

Aufgrund der meist hohen Verfahrgeschwindigkeiten werden an die Bremsen von Linearsystemen besondere Anforderungen gestellt:

- leichte, kompakte Ausführung,
- hohe Leistungsdichte,
- schnelles Öffnen und Schließen.

Je nach Applikation kommen Bremssysteme mit unterschiedlichen Eigenschaften zum Einsatz. Die nachstehende Auflistung gibt einen kurzen Überblick über die Eigenschaften der gängigsten Bremssysteme:

Elektromotorisch betätigtes Bremsen

- hohe Haltekräfte,
- sehr kompakt und leicht,
- leicht integrierbar,
- Bremse schließt langsam,
- Bremse muss aktiv mit Strom geschlossen werden.

Elektromagnetisch betätigtes Bremsen

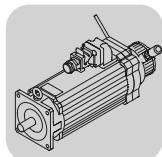
- Bremse öffnet und schließt sehr schnell, d. h. sehr gut geeignet für kurze Taktzeiten,
- hohe Haltekräfte,
- robuste Ausführung,
- mit Federspeicher als Sicherheitsbremse.

Pneumatisch betätigtes Bremsen

- hohe Haltekräfte,
- sehr kompakt, leicht und Platz sparend einbaubar,
- preiswert und in großer Auswahl verfügbar,
- geeignet für mittlere Taktzeiten,
- Anschluss an ein Pneumatiksystem erforderlich.

Pneumatisch betätigtes Bremsen sind in unterschiedlichen Ausführungen verfügbar:

- mit Druck öffnend (pneumatisch mit Federspeicher),
- mit Druck schließend.



**Bremsenanbau
an Linearmotor
SL2-Advance-/
Power-System**

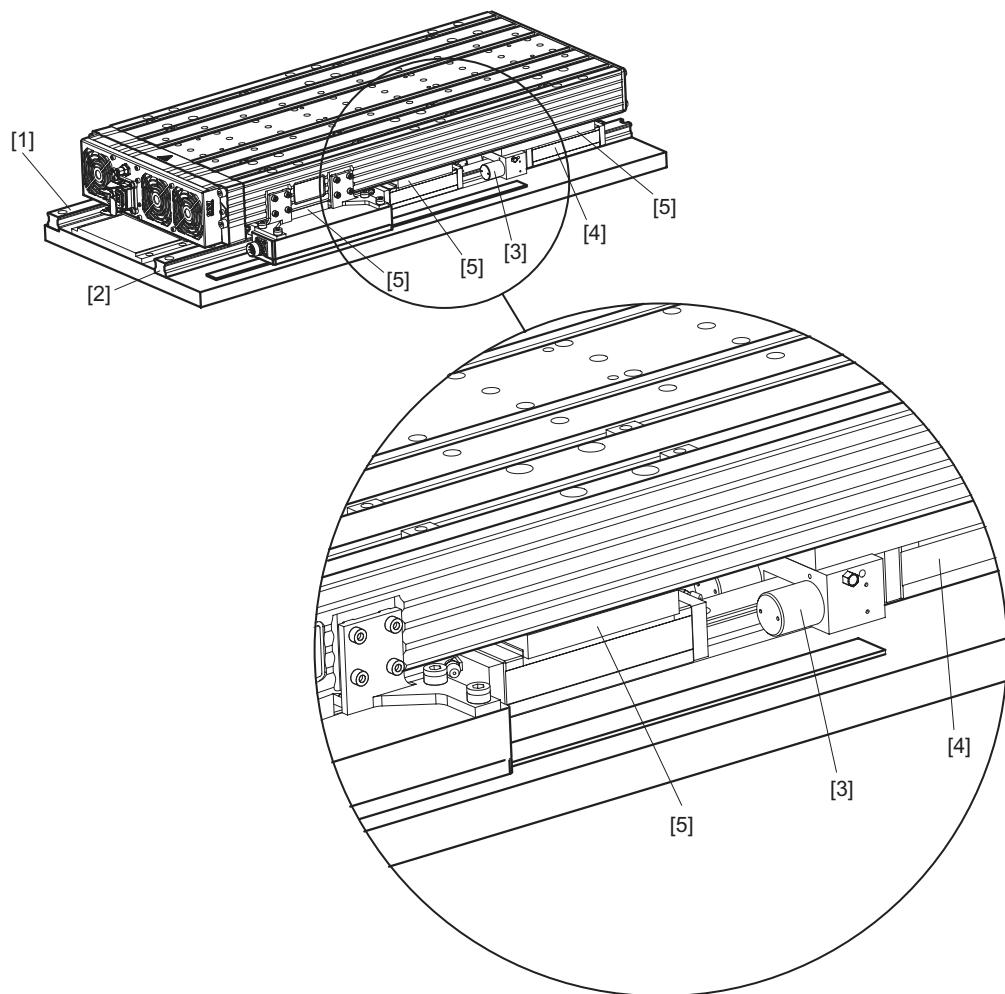
Anhand zweier Beispiele wird die Integration von unterschiedlichen Bremsystemen an SL2-Motoren erläutert.

In die SL2-Advance- und SL2-Power-Ausführungen können Bremsen mit Abmessungen nach DIN 645-1, Serie 1M und 1L für Profilschienen-Wälzführungen, angebaut werden. An den Führungsschienen der Festlagerseite und der Loslagerseite ist der Anbau von Bremsen möglich.

Besonders vorteilhaft ist hierbei, dass die Bremse auf der Loslagerseite zusammen mit dem Führungswagen an die Kühlbrücke angebaut ist und somit nicht thermisch belastet wird.

Kurz bauende Bremsenbauarten wie z. B. die pneumatisch betätigten Bremsen lassen sich Platz sparend zwischen den Führungswagen integrieren.

Für lang bauende Bremsen besteht die Möglichkeit, diese am Ende der Kühlbrücke zu montieren, siehe Bild 46.



55390bxx

Bild 46: Linearmotor SL2-Power von SEW-EURODRIVE mit pneumatischer Bremse

- | | | | |
|-----|---------------------|-----|---------------|
| [1] | Loslagerseite | [4] | Führungswagen |
| [2] | Festlagerseite | [5] | Adapterplatte |
| [3] | Pneumatische Bremse | | |

Weitergehende Informationen zum Anbau von Bremsystemen in die Linearmotorenreihe SL2 von SEW-EURODRIVE entnehmen Sie bitte den produktbezogenen Unterlagen oder kontaktieren Sie SEW-EURODRIVE direkt.



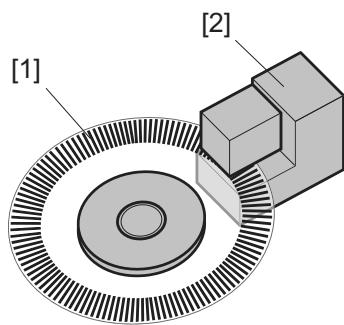
3 Gebersysteme

Wie in den vorangegangenen Kapiteln dargestellt wurde, ist der Betrieb eines Servomotors nur mit einem Gebersystem möglich. Die in der Servotechnik und von SEW-EURODRIVE am häufigsten eingesetzten Gebersysteme werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

3.1 Inkrementalgeber

3.1.1 Inkrementelle Drehgeber mit TTL- und HTL-Signalen

Inkrementelle Drehgeber wandeln die Drehzahl in eine diskrete Anzahl von elektrischen Impulsen um. Dies geschieht mit einer Inkrementalscheibe mit radialen, lichtdurchlässigen Schlitzten, die opto-elektronisch abgetastet wird. Der prinzipielle Aufbau ist in Bild 47 dargestellt. Die Auflösung der Inkrementalscheibe wird durch die Anzahl der Slitze festgelegt.



56223axx

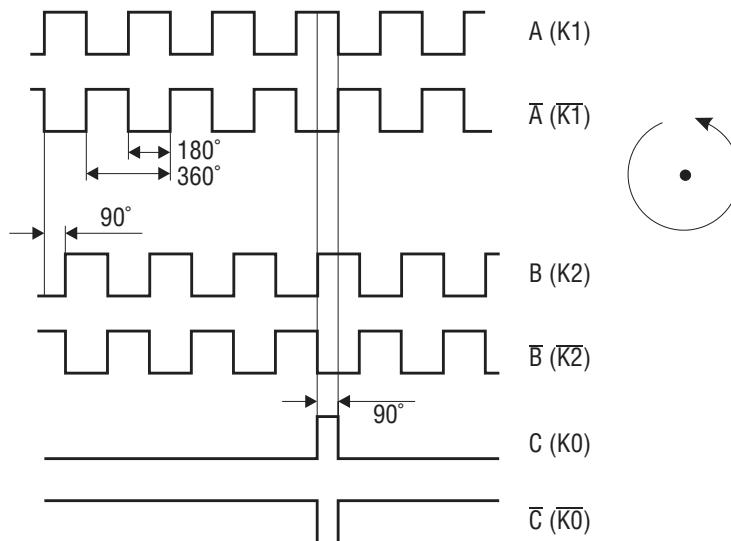
Bild 47: Inkrementeller Drehgeber

- [1] Inkrementalscheibe
- [2] Abtasteinheit

Aufbau und Funktionsweise

Üblicherweise haben diese Geber zwei Spuren und eine Nullimpulsspur. Durch die Invertierung der Signale ergeben sich dann insgesamt 6 Signale. Zwei um 90° versetzte Lichtschranken im Encoder liefern an den Spuren A (K1) und B (K2) zwei Folgen von Impulsen. Spur A (K1) hat bei Rechtsdrehung mit Blick auf die Motorwelle 90° Voreilung gegenüber B (K2). Über diese Phasenverschiebung wird die Drehrichtung des Motors ermittelt. Der Nullimpuls (ein Impuls pro Umdrehung) wird mit einer dritten Lichtschranke erfasst und als Referenzsignal an Spur C (K0) zur Verfügung gestellt.

Bei den TTL-Gebern werden die Spuren A (K1), B (K2) und C (K0) im Geber invertiert und als invertierte Signale an den Spuren \bar{A} (K1), \bar{B} (K2) und \bar{C} (K0) zur Verfügung gestellt.



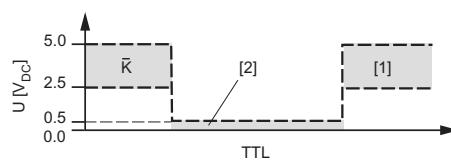
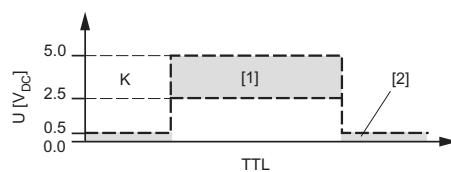
01877axx

Bild 48: TTL-Signale mit Nullspur, mit invertierten Signalen
HTL-Signale mit Nullspur, ohne invertierte Signale

Bei den inkrementellen Gebern werden 2 Signalpegel unterschieden:

- **TTL (Transistor-Transistor-Logik)**

Die Signalpegel betragen $U_{low} \leq 0,5 \text{ V}$ und $U_{high} \geq 2,5 \text{ V}$. Die Signale werden symmetrisch übertragen und differenziell ausgewertet, d. h. für die Unterscheidung zwischen Low-Signal und High-Signal steht dann ein Spannungshub von 5 V zur Verfügung. Deshalb sind sie unempfindlich gegen Gleichtaktstörungen und haben ein gutes EMV-Verhalten. Die Signalübertragung erfolgt nach der Schnittstellennorm RS422. Aufgrund dieser Eigenschaften finden TTL-Geber bei den inkrementellen Gebern die stärkste Verbreitung am Markt.



56229axx

Bild 49: TTL-Signalpegel

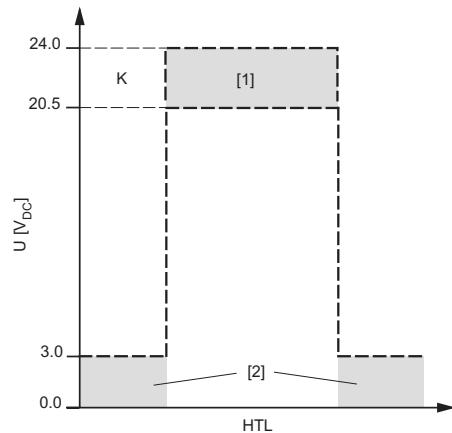
[1] "1"-Bereich

[2] "0"-Bereich



- **HTL (Hochvolt-Transistor-Logik)**

Die Signalpegel betragen $U_{low} \leq 3 \text{ V}$ und $U_{high} \geq U_{Bminus}$ ($= 3,5 \text{ V}$). HTL-Geber werden ohne die invertierten Spuren ausgewertet, es ist keine differenzielle Signal- auswertung möglich. Die HTL-Signale sind daher anfällig für Gleichtaktstörungen, was sich ungünstig auf das EMV-Verhalten auswirken kann.



56231axx

Bild 50: HTL-Signalpegel

[1] "1"-Bereich

[2] "0"-Bereich

Invertierte HTL-Signale dürfen am Gebereingang des Servoverstärkers in der Regel nicht angeschlossen werden, da die Eingangsstufen überlastet und dadurch zerstört werden können.



3.1.2 Inkrementalgeber mit sin/cos-Spuren

Aufbau und Funktionsweise

Sin/cos-Geber, auch Sinusgeber genannt, liefern zwei um 90° versetzte Sinus-Signale. Dabei wird die Anzahl der Sinuskurven (entspricht der Impulszahl), der Nulldurchgänge und der Amplituden (Arcustangens) ausgewertet. Mit Hilfe dieser Werte kann die Drehzahl mit hoher Auflösung ermittelt werden. Dies ist besonders dann vorteilhaft, wenn große Stellbereiche und kleine Drehzahlen genau eingehalten werden müssen.

Üblicherweise haben sin/cos-Geber zwei Spuren und eine Nullimpulsspur. Durch die Invertierung der Signale ergeben sich dann insgesamt 6 Signale. Die zwei um 90° versetzten Sinus-Signale liegen auf Spur A (K1) und B (K2). Als Nullimpuls wird eine Sinus-Halbwelle pro Umdrehung an Spur C (K0) zur Verfügung gestellt. Die Spuren A (K1), B (K2) und C (K0) werden im Geber invertiert und als invertierte Signale auf den Spuren A* (K1*), B* (K2*) und C* (K0*) zur Verfügung gestellt.

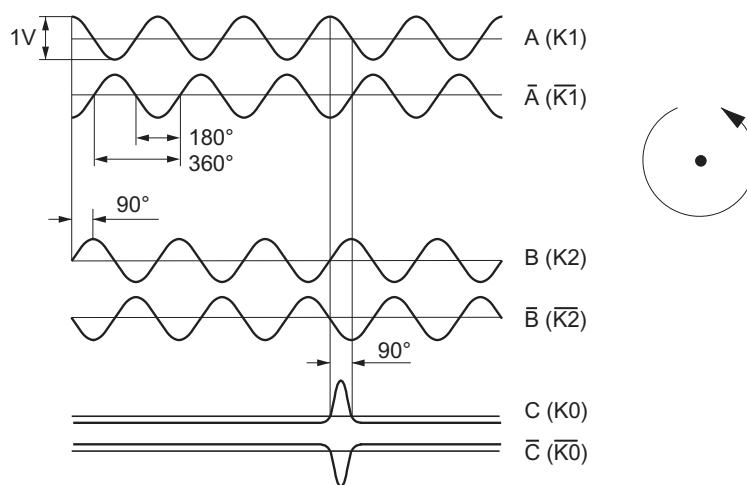


Bild 51: sin/cos-Signale mit Nullspur und invertiertem Signal

56211axx

Sin/cos-Signale werden üblicherweise mit einer Gleichspannung von 2,5 V überlagert. Die Spitzen-Spitzen-Spannung beträgt $U_{SS} = 1$ V. Damit werden Nulldurchgänge bei der Signalübertragung vermieden. Da die sin/cos-Signale symmetrisch übertragen und differenziell ausgewertet werden, sind sie unempfindlich gegen asymmetrische Störungen und haben ein gutes EMV-Verhalten.

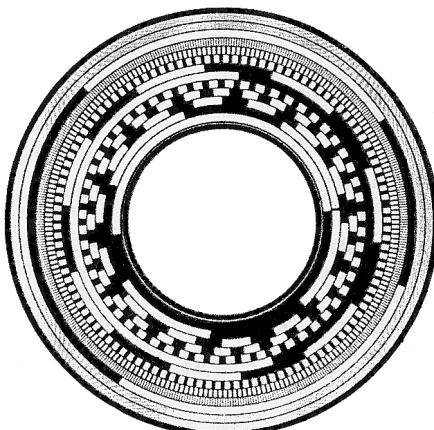


3.2 **Absolutwertgeber**

Neben den Resolven haben sich in den letzten Jahren auch so genannte Kombigeben am Markt etabliert. Solche Geber sind die sin/cos-Geber mit Absolutwert-Information. Diese liefern neben der aktuellen Drehzahl des Motors auch Absolutwert-Informationen und bieten somit technische und finanzielle Vorteile, wenn ein Absolutwertgeber erforderlich ist.

3.2.1 **Absolutwertgeber mit SSI-Schnittstelle und sin-/cos-Signalen**

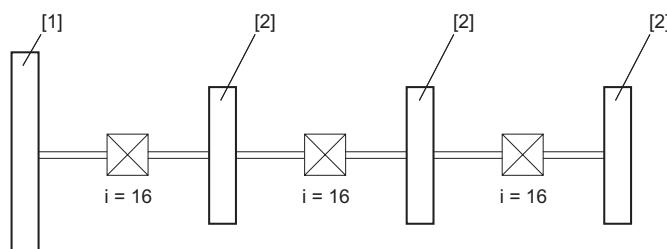
Die Absolutwert-Information wird durch eine Code-Scheibe mit Gray Code erzeugt, die in der Regel optisch abgetastet wird. Dabei ist jeder Winkelposition ein eindeutiges Code-Muster zugeordnet. Somit kann die absolute Position der Motorwelle bestimmt werden. Die Besonderheit beim Gray Code ist, dass sich beim Übergang zum nächsten Winkelschritt nur ein Bit ändert, d. h. der mögliche Ablesefehler beträgt deshalb nur 1 Bit.



Dezimal	Gray Code
0	0000
1	0001
2	0011
3	0010
4	0110
5	0111
6	0101
7	0100
8	1100
9	1101
10	1111
11	1110
usw.	usw.

Bild 52: Codescheibe mit Gray Code

Ein Geber dieser Ausführung ist ein so genannter Single-Turn-Geber, da die absolute Position der Motorwelle nur über eine Umdrehung bestimmt werden kann. Neben der Single-Turn-Ausführung gibt es auch Multi-Turn-Geber, bei denen die absolute Position über mehrere Umdrehungen bestimmt wird.



56213axx

Bild 53: Aufbau Multi-Turn-Geber

- [1] Code-Scheibe zur Erfassung der Wickelposition
- [2] Code-Scheibe zur Erfassung der Anzahl von Umdrehungen



Multi-Turn-Geber haben zusätzlich zur Code-Scheibe für die Erfassung der Winkelposition weitere Code-Scheiben, um die Anzahl der Umdrehungen absolut erfassen zu können. Diese Code-Scheiben sind z. B. jeweils durch eine Getriebestufe mit der Untersetzung $i = 16$ miteinander gekoppelt. Bei 3 zusätzlichen Code-Scheiben (üblicher Wert) können somit $16 \times 16 \times 16 = 4096$ Umdrehungen absolut aufgelöst werden. Die Zahl 16 ergibt sich aus dem binären Format 16-Bit (Wort).

3.2.2 Absolutwertgeber mit HIPERFACE®-Schnittstelle

Aufbau und Funktionsweise von HIPERFACE®-Gebern

Der HIPERFACE^{®1)}-Geber ist ein typischer Kombigeber, der auch von SEW-EURODRIVE eingesetzt wird. Neben einem sin/cos-Signal für die Drehzahlerfassung und einer Absolutwert-Information besitzt dieser Geber auch ein elektronisches Typenschild, in dem unter anderem Antriebsdaten abgelegt werden können. Dies erleichtert die Inbetriebnahme und reduziert mögliche Eingabefehler des Anwenders, da dieser keine Antriebsdaten eingeben muss.

HIPERFACE®-Geber gibt es in 2 unterschiedlichen Ausführungen:

1. HIPERFACE®-Geber in Single-Turn-Ausführung,
2. HIPERFACE®-Geber in Multi-Turn-Ausführung: Mit Hilfe der Code-Scheibe mit Gray Code, die an ein kleines, mehrstufiges Getriebe gekoppelt ist, kann die Absolutposition über 4096 Motorumdrehungen ausgegeben werden.

Eigenschaften des HIPERFACE®-Gebers:

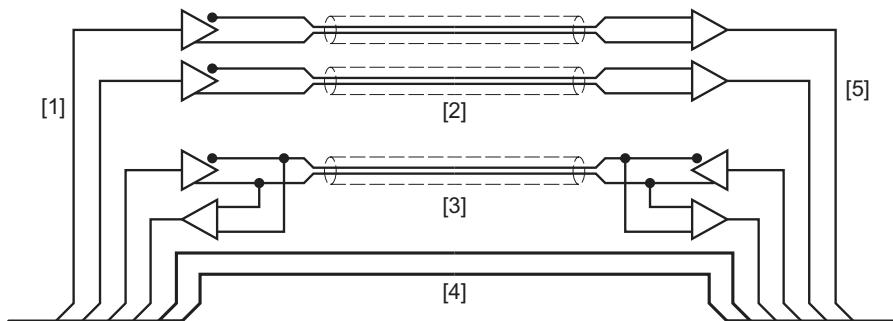
- Betriebsspannung 7-12 V,
- Betriebstemperatur bis zu maximal 115 °C,
- maximale Kabellänge 100 m,
- 10-adriges Kabel,
- interner Speicher bietet Option "elektronisches Typenschild",
- sowohl Single- als auch Multi-Turn-Version verfügbar,
- optische Auswertung des Absolutwertes (Single-Turn-Teil),
- keine Referenzfahrt bei Wiedereinschalten mehr nötig (bei Multi-Turn),
- sowohl Absolutwert als auch sin/cos-Spuren (1024 sin- und cos-Perioden / Umdrehung) integriert,
- analoge Signalübertragung, die Auflösung der 1024 sin-/cos-Perioden erfolgt im Regler,
- hohe Störfestigkeit gegenüber elektromagnetischer Einstrahlung,
- Anbaugeber als Stand-alone-Lösung (Streckengeber),
- elektronische Kommutierungs-Justage,
- Prozessdatenkanal bearbeitet die Daten in Echtzeit,
- kleine Abmessungen.



1) HIPERFACE steht für High Performance Interface und ist eine von der Firma Sick Stegmann GmbH entwickelte Schnittstelle.



Zu Beginn des Einschaltvorganges erfasst die Baugruppe des Absolutwertgebers optisch die absolute Lage des Rotors. Der Servoverstärker liest diese Lageinformation über eine RS485-Verbindung (Parameterkanal) aus und setzt einen Zählerstand. Ausgehend von diesem absoluten Wert werden die Positionsänderungen über die Spuren des sin/cos-Gebers erfasst und analog über den Prozessdatenkanal an den Servoverstärker übertragen. Weitere Abfragen der Absolutposition erfolgen dann nur noch zyklisch zur Plausibilitätskontrolle.



56217axx

Bild 54: Informationsfluss

- [1] Motor-Rückführung
- [2] Prozessdatenkanal
- [3] Parameterkanal RS485
- [4] Versorgungsspannung
- [5] Servoverstärker

Der Servoverstärker ist in diesem Fall ein MOVIDRIVE® MDX61B mit entsprechender Geberoption. Der Servoverstärker mit Hipface-Schnittstelle erhält über den Parameterkanal sowohl die Lageinformation als auch den Zeitpunkt, für den diese Position gilt. Parallel dazu werden ständig die einlaufenden Analogsignale (sin-/cos-Signale) auf dem Prozessdatenkanal empfangen und gezählt.

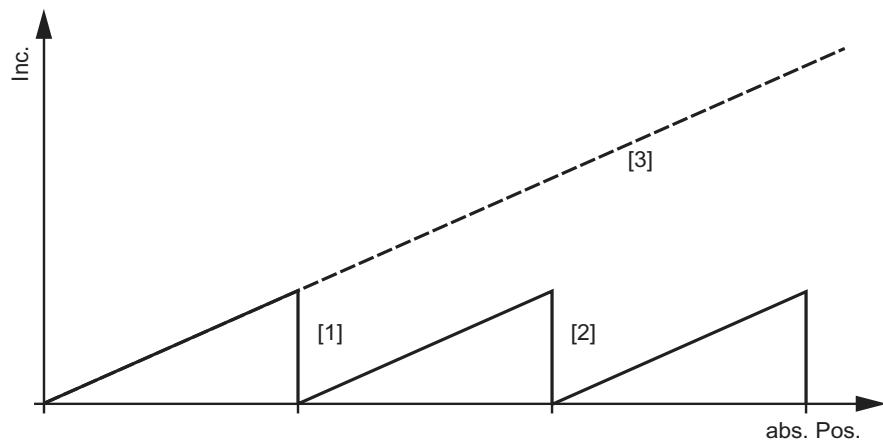
Der Geber ist wahlweise als Single- oder Multi-Turn-Variante ausgeführt. Single-Turn bedeutet, dass die Information der Absolutposition sich immer nur auf eine Umdrehung bezieht. Die Multi-Turn-Variante des Gebers kann über nachgeschaltete, untergesetzte Code-Scheiben zusätzlich noch Auskunft über die verstrichenen Umdrehungen (bis zu 4096) zur absoluten Nullposition geben. Somit erfolgt nach 4096 Geberumdrehungen ein Geberüberlauf, der jedoch im Non-Volatile-RAM des MOVIDRIVE® mitgezählt wird. Bis zu 256 Geberüberläufe werden gespeichert. Fällt die Spannung (z. B. bei einem Netzausfall, an den Versorgungs-Pins unter einen Grenzwert ab, wird dies vom NVSRAM erkannt und die Daten werden nullspannungssicher gespeichert.

Im Moment des Wiedereinschaltens wird aus dem NVRAM im Servoverstärker Folgendes ausgegeben:

- der absolute Wert innerhalb eines Überlaufs, er beträgt max 4096×4096 ,
- die Anzahl der Überläufe, sie betragen 0...255.



Wird nach Wegnahme der Versorgungsspannung der Antrieb, der sich kurz vor einem Überlauf befindet, über den Geberüberlaufpunkt verschoben, besteht beim Wiedereinschalten eine Diskrepanz zwischen den erfassten und den abgelegten absoluten Werten. Die Geberelektronik korrigiert daraufhin automatisch die gespeicherten Werte mit den erfassten.



56222axx

Bild 55: Geberüberlauf

- [1] 1. Geberüberlauf
- [2] 2. Geberüberlauf
- [3] vom Anwender gesehene, absolute Position

Die Geberüberläufe werden im Servoverstärker mitgezählt, wodurch die absolute Position bestimmt werden kann.

Der Anwender bekommt die eigentlichen Geberüberläufe nicht zu sehen, diese werden im Servoverstärker gespeichert. Somit ist der HIPERFACE®-Geber ein echter Absolutwertgeber.



3.2.3 Resolver

Bei synchronen Servomotoren ist das am häufigsten eingesetzte Gebersystem der Resolver. Ein 2-poliger Resolver kann innerhalb einer Motorumdrehung die absolute Lage der Motorwelle ermitteln. Aus dem Resolversignal werden die Drehzahl und die absolute Position je Umdrehung abgeleitet.

Aufbau und Funktionsweise Der Resolver besteht aus 2 Funktionsbaugruppen, dem Transformator (Stator) und dem Drehtransformator (Rotor).

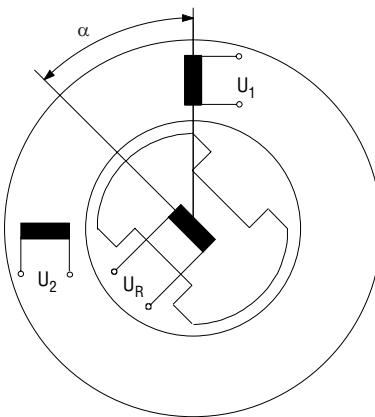


Bild 56: Schematischer Aufbau des Resolvers

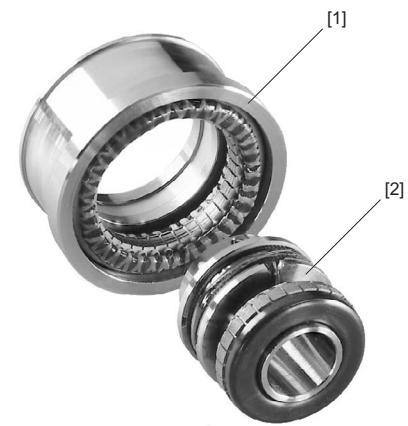


Bild 57: Resolver

- [1] Stator des Resolvers (Transformator)
- [2] Rotor des Resolvers (Drehtransformator)

Der Servoverstärker liefert ein hochfrequentes Signal mit konstanter Amplitude und konstanter Frequenz. Dieses hochfrequente Signal wird über den Transformator auf den Rotor des Drehtransformators übertragen.

Durch die Drehung des Resolver-Rotors werden in der Statorwicklung des Drehtransformators rotorlageabhängige Spannungen induziert.

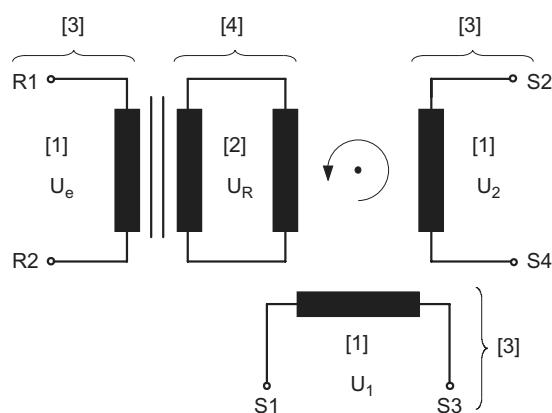
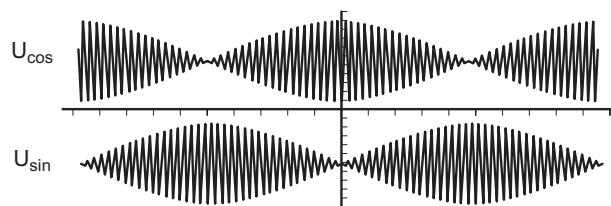


Bild 58: Ersatzschaltbild eines Resolvers

56238axx

- | | | | |
|-----|--------|-----|-----------|
| [1] | Stator | [3] | fest |
| [2] | Rotor | [4] | rotierend |



56239axx

Bild 59: Ausgangsspannung U_{\cos} und U_{\sin} des Resolvers

Der Verlauf der Signale errechnet sich wie folgt:

$$U_{\text{ref}} = A \times \sin(\omega_{\text{Erreger}} \times t)$$

$$U_{\cos}(t) = A \times \dot{u} \times \sin(\omega_{\text{Erreger}} \times t) \times \cos(p \times \alpha)$$

$$U_{\sin}(t) = A \times \dot{u} \times \sin(\omega_{\text{Erreger}} \times t) \times \sin(p \times \alpha)$$

$$p \times \alpha = \arctan(U_{\sin} / U_{\cos})$$

U_{ref}	Referenzspannung
U_{\cos}	Ausgangsspannung 1 des Stators
U_{\sin}	Ausgangsspannung 2 des Stators
A	Scheitelwert der Eingangsspannung
ω_{Erreger}	Winkelgeschwindigkeit von U_e
α	Rotorwinkel
\dot{u}	Übersetzungsverhältnis
p	Anzahl der Polpaare des Resolvers

Durch den technischen Fortschritt im Bereich der Halbleitertechnik sind heutzutage hochwertige Analog-/Digitalwandler preisgünstig verfügbar. Diese Analog-/Digitalwandler ermöglichen es, sehr gute Resolverauswertungen diskret aufzubauen und dabei eine noch höhere Auflösung des gemessenen Signals zu erzielen, als die in der Vergangenheit eingesetzten integrierten Resolver-Auswertebausteine.

Moderne Resolverauswertungen arbeiten nicht mehr mit dem sogenannten Nachlaufverfahren, sondern mit abtastenden Messverfahren. Dabei wird ein von einem DSP erzeugtes Rechtecksignal mit Hilfe einer Erregerschaltung in eine sinusförmige Referenzspannung umgewandelt, die den Resolver versorgt, siehe Bild 60.

Abhängig von der Lage des Rotors ändern sich die Amplituden der Spannungen U_{\sin} und U_{\cos} und werden über jeweils einen Differenzverstärker dem A/D-Wandler zugeführt. Die Differenzverstärker filtern hochfrequente Einkopplungen auf den potenzialfreien Spursignalen U_{\sin} und U_{\cos} aus und geben auf die Eingänge des A/D-Wandlers jeweils eine Spannung mit Massebezug.

Der A/D-Wandler tastet die beiden Hüllkurven synchron zur Erregerspannung im Maximalwert ab, wandelt diese analogen Signale in digitale Informationen um und übergibt sie an den DSP, siehe hierzu Bild 59. Dieser ermittelt die aktuelle Lage aus den abgetasteten Spursignalen U_{\cos} und U_{\sin} .

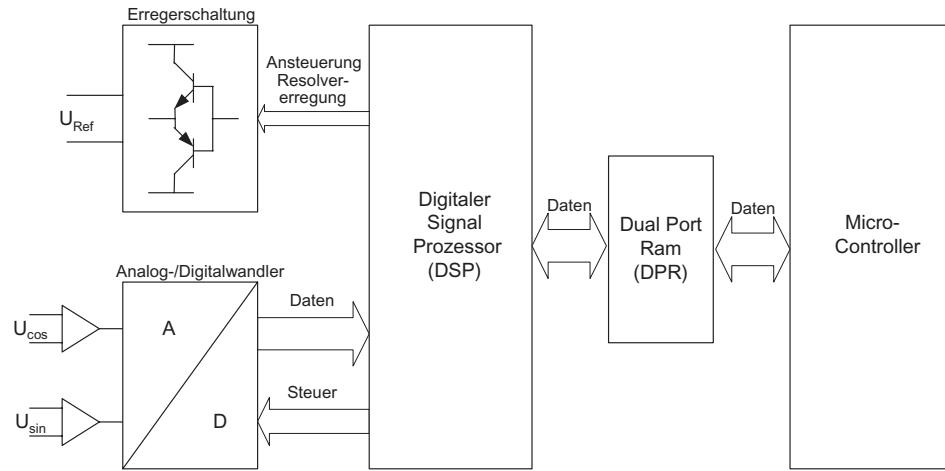
Die aktuelle mechanische Lage kann aus den abgetasteten Spursignalen leicht ermittelt werden:

$$p \times \alpha = \arctan(U_{\sin} / U_{\cos})$$



Somit wird bei jeder Periode des Erregersignals ein neuer Lagewert ermittelt. Die so errechneten Daten werden über eine DPR-Schnittstelle an den Micro-Controller des Achsreglers übergeben, der diese Informationen für die Regelung der Achse benötigt.

Die nachstehende Grafik gibt einen Überblick über die prinzipielle Hardwarestruktur einer Resolverauswertung, die nach dem abtastenden Verfahren arbeitet.



55839axx

Bild 60: Hardware Resolverauswertung (vereinfachte Darstellung)



3.3 Gegenüberstellung / Auswahlhilfe für Resolver, sin-/cos-Geber, TTL-Geber

Die nachstehende Tabelle stellt die wichtigsten Eigenschaften der bereits vorgestellten Gebersysteme für rotative Servomotoren dar und bietet für die Projektierung eine Auswahlhilfe bei der Wahl des Gebersystems. Exemplarisch wurden dafür Gebersysteme gewählt, wie sie auch von SEW-EURODRIVE eingesetzt werden.

Gebersystem [SEW-Typ]	Resolver [RH1M, RH1L]	HIPERFACE®-Geber (sin-/cos-Geber mit Absolutwert) [AS1H, ES1H, AS3H, AS4H, AV1H]	sin-/cos-Geber [ES1S, ES2S, EV1S]	Inkrementalgeber [ES1R, ES2R, EV1R]
Eigenschaften				
Auflösung	Wird durch die Resolverauswertung bestimmt: bis zu 16 Bit/Umdrehung	<ul style="list-style-type: none"> – 1024 sin-/cos-Perioden (für Drehzahlregelung) – 32768 Schritte/Umdrehung (für Positionierung) 	1024 sin-/cos-Perioden	1024 Impulse/Umdrehung
Zulässiger Temperaturbereich	ca. -55 °C bis +150 °C	<ul style="list-style-type: none"> – -20 °C bis +115 °C (AS1H, ES1H) – -20 °C bis +85 °C (AS3H, AS4H, AV1H) 	-20 °C bis +85 °C	-20 °C bis +85 °C
Mechanische Einflüsse	<ul style="list-style-type: none"> – Schock 100 g / 11 ms – Vibration 20 g / 10 - 50 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> – Schock 100 g / 10 ms – Vibration 20 g / 10 - 2000 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> – Schock 300 g / 1 ms – Vibration 10 g / 10 - 2000 Hz 	<ul style="list-style-type: none"> – Schock 100 g / 6 ms – Vibration 10 g / 10 - 2000 Hz
Einsatz	Für Drehzahlregelung und Bestimmung der Rotorlage innerhalb einer Motorumdrehung sowie "inkrementelle" Positionierung	Für Drehzahlregelung, Bestimmung der Rotorlage und Absolutposition	Für Drehzahlregelung und "inkrementelle" Positionierung	Für Drehzahlregelung und "inkrementelle" Positionierung
Geeignet für	<ul style="list-style-type: none"> – Synchrone Servomotoren – Asynchrone Servomotoren (auf Anfrage) 	<ul style="list-style-type: none"> – Synchrone Servomotoren – Asynchrone Servomotoren 	Asynchrone Servomotoren	Asynchrone Servomotoren
Anbaubedingungen	Einbaugeber	<ul style="list-style-type: none"> – AS1H, ES1H: Einbaugeber (synchrone Servomotoren) – AS3H, AS4H, AV1H: Anbaugeber (asynchrone Servomotoren) 	Anbaugeber	Anbaugeber
Weitere Eigenschaften	Mechanisch sehr robust	<ul style="list-style-type: none"> – Durch Interpolation des sin-/cos-Signales Hochauflösung der Drehzahlinformation möglich – einfache Inbetriebnahme durch elektrisches Typenschild 	Durch Interpolation des sin-/cos-Signales Hochauflösung der Drehzahlinformation möglich	Einfaches Gebersystem für Standardanwendungen



3.3.1 Technische Daten der von SEW-EURODRIVE eingesetzten Geber

Gebertyp	Montage	Zum Anbau an	Signal	Versorgung [V]
Inkrementalgeber				
ES1H	Einbaugeber, im synchronen Servomotor integriert	Synchrone Servomotoren DS/CM	1-V-sin/cos HIPERFACE® S Single-Turn mit eingebautem EEPROM zur Speicherung des elektronischen Typenschildes	7 .. 12
ES1T ES2T	Spreizwelle	<ul style="list-style-type: none"> Drehstrommotoren DT/DV Asynchrone Servomotoren CT/CV 	5-V-TTL	5
ES1S ES2S			1-V-sin/cos	
ES1R ES2R			5-V-TTL	10 .. 30
ES1C ES2C			24-V-HTL	
EV1T	Kupplung mit Vollwelle	<ul style="list-style-type: none"> Drehstrommotoren DT/DV Asynchrone Servomotoren CT/CV 	5-V-TTL	5
EV1S			1-V-sin/cos	
EV1R			5-V-TTL	10 .. 30
EV1C			24-V-HTL	
RH1M	Hohlwelle	Synchrone Servomotoren CM	Resolver-Signale 2-polig	7
Absolutwertgeber				
AV1H	Kupplung mit Vollwelle	<ul style="list-style-type: none"> Drehstrommotoren DT/DV Synchrone Servomotoren DS Asynchrone Servomotoren CT/CV 	1-V-sin/cos HIPERFACE® S Multi-Turn mit eingebautem EEPROM zur Speicherung des elektronischen Typenschildes	7 .. 12
AV1Y			M SSI 1-V-sin/cos	10 .. 30
AS1H	Einbaugeber, im synchronen Servomotor integriert	Synchrone Servomotoren DS/CM	1-V-sin/cos HIPERFACE® S Multi-Turn mit eingebautem EEPROM zur Speicherung des elektronischen Typenschildes	7 .. 12
AS2H	Spreizwelle	<ul style="list-style-type: none"> Drehstrommotoren DT/DV Asynchrone Servomotoren CT/CV 	1-V-sin/cos HIPERFACE® S Multi-Turn mit eingebautem EEPROM zur Speicherung des elektronischen Typenschildes	7 .. 12
AS3H			1-V-sin/cos HIPERFACE® S Multi-Turn mit eingebautem EEPROM zur Speicherung des elektronischen Typenschildes	
Resolver				
RH1M	Hohlwelle	Synchrone Servomotoren CM	Resolversignale 2-polig	7
RH1L		Synchrone Servomotoren mit Bremse		



3.4 Direkte Wegmess-Systeme für lineare Servomotoren

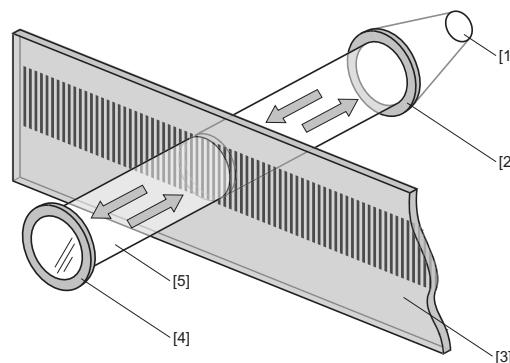
Wie bereits im Kap. 2.7 dargestellt, wird für den Betrieb eines synchronen Linearmotors ein Mess-System benötigt, um die Lage des Primärteils zu erkennen. Daraus wird im zugehörigen Servoverstärker die Geschwindigkeit abgeleitet und die Positionierung ausgeführt.

Je nach Applikation gibt es für die Wahl des geeigneten Gebersystems verschiedene Auswahlkriterien:

- maximale Geschwindigkeit,
- maximaler Verfahrtsweg,
- Auflösung gemäß Anforderung an die Genauigkeit,
- Schmutzbelastung,
- EMV-Bedingungen.

3.4.1 Aufbau und Funktionsweise optischer Wegmess-Systemen

Ein optisches Wegmess-System besteht aus einem an der Strecke montiertem Maßkörper aus Glas oder Stahl und einem Abtastkopf der über dieser Strecke verfährt. Im Abtastkopf sind eine Lichtquelle, Foto-Elemente und optische Filter zur besseren Erfassung. Das von der Lichtquelle ausgesendete Licht trifft auf den Maßkörper und wird entsprechend der aufgebrachten Teilung reflektiert und von den Foto-Elementen detektiert. Eine Auswertelektronik generiert daraus ein inkrementelles Signal.



56284axx

Bild 61: Schematische Darstellung eines optischen Maß-Systems

- 1 Lichtquelle und Foto-Element
- 2 Linse
- 3 Abtastplatte
- 4 Reflektor
- 5 Lichtwellen

Je nach Auflösung unterscheidet sich das Arbeitsprinzip des optischen Wegmess-Systems in

- abbildendes Prinzip mit einer Stricheinteilung von 20-100 μm ,
- interferenzielles Prinzip mit einer Stricheinteilung von 4-8 μm .



Geschlossene Systeme

Abhängig von den Einsatzbedingungen und Umwelteinflüssen kommen bei den optischen Systemen unterschiedliche Ausführungen zum Einsatz.

- maximale Verfahrgeschwindigkeit ca. 2 m/s,
- guter Schutz vor Umwelteinflüssen,
- mit mechanischer Führung.

Offene Systeme

Das System arbeitet ohne mechanische Führung.

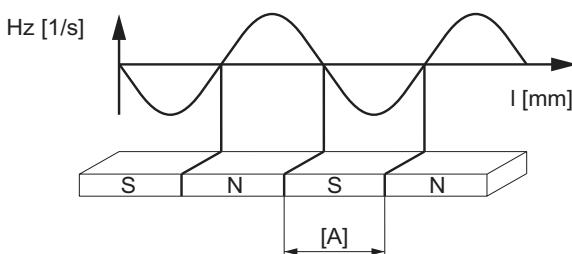
- der Abtastkopf ist am beweglichen Teil montiert und "schwebt" quasi über der Strecke (Maßverkörperung), daher maximale Verfahrgeschwindigkeit ca. 8 m/s
- kaum Schutz vor Umwelteinflüssen.

3.4.2 Aufbau und Funktionsweise magnetischer Wegmess-Systeme

Magnetische Wegmess-Systeme bestehen aus:

- einem Magnetband,
- einem Sensor.

Das Magnetband ist als Maßband an der Strecke montiert. Der Sensor, der am Primärteil befestigt ist, verfährt über diesem Maßband.



56237axx

Bild 62: Magnetisches Wegmess-System

[A] Auflösung

Durch eine Verfahrbewegung misst der Sensor die Änderungen der magnetischen Feldstärke, woraus eine Auswertelektronik ein Sinussignal erzeugt. Durch die phasenversetzte Anordnung von 2 Abtasteinheiten innerhalb eines Sensors werden Sinus- bzw. Cosinussignale erzeugt.

Die Sinussignale der Abtastelemente können mit Hilfe von Interpolation höher aufgelöst werden. Diese Sinussignale werden durch optionale, in den Geber integrierte elektronische Schaltungen in marktübliche Schnittstellensignale wie z. B. RS422 umgewandelt.

Optional sind solche Maßbänder noch mit einem aufmagnetisierten Code für den Absolutwert verfügbar. Bei Gebersystemen mit Absolutwertinformationen muss nach dem Einschalten keine Referenzfahrt durchgeführt werden. Bei Absolutwertgebern wird das Signal in ein SSI-Protokoll umgewandelt.

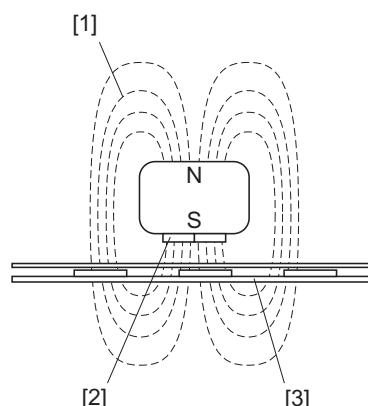


Bei der Projektierung sind die nachstehenden Eigenschaften von magnetischen Wegmess-Systemen zu berücksichtigen:

- Auflösung: meist 5000 µm/Sinusperiode,
- Genauigkeit ca. 300 µm/m,
- Verfahrgeschwindigkeiten bis ca. 6 m/s möglich,
- unempfindlich gegen Verschmutzung,
- mechanisch unempfindlich,
- Schnittstelle: SSI, HIPERFACE®.

3.4.3 Aufbau und Funktionsweise induktiver Wegmess-Systeme

Induktive Wegmess-Systeme arbeiten nach dem Prinzip der variablen Reluktanz. Markierungen auf einem metallischen Maßband lenken dabei ein von einem Lesekopf erzeugtes Magnetfeld ab. Diese Feldänderungen werden von einer Auswerte-Elektronik erkannt und in Sinussignale umgewandelt. Durch die phasenversetzte Anordnung von zwei Abtasteinheiten innerhalb eines Sensors werden Sinus- bzw. Cosinus-Signale erzeugt.



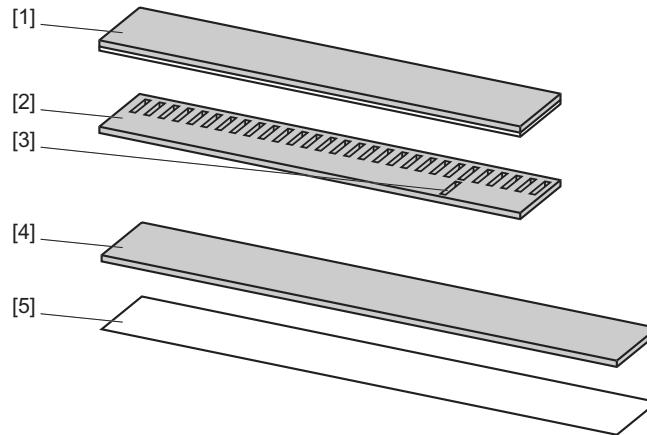
56232axx

Bild 63: Schematische Darstellung eines induktiven Wegmess-Systems

- [1] Magnetische Feldlinien
- [2] Magnetische Sensoren
- [3] Maßband im Querschnitt



Das Maßband an der Strecke ist ausschlaggebend für die Genauigkeit der Messung. Es besteht aus mehreren Schichten. Der Kern ist ein Metallband, in das Markierungen sehr präzise eingeätzt sind. Optional sind diese Maßbänder noch mit einer Referenzmarke verfügbar. Je nach Ausführung des Längenmess-Systems wird das Referenzsignal teilweise durch einen eigenen Sensor erfasst. Dieses Metallband ist zwischen einem Träger- und einem Abdeckband eingebettet.



56233axx

Bild 64: Schichtweiser Aufbau eines Maßbandes

- | | | | |
|-----|----------------|-----|-----------------|
| [1] | Abdeckband | [4] | Stahlträgerband |
| [2] | Teilung | [5] | Klebeschicht |
| [3] | Referenzmarken | | |

Optional wird für induktive Mess-Systeme eine Auswerte-Elektronik angeboten, die die Sinus- und Cosinus-Signale in ein TTL-Signal umwandelt.

Induktive Wegmess-Systeme haben folgende Eigenschaften, die bei der Projektierung zu berücksichtigen sind:

- Verfahrgeschwindigkeiten bis ca. 20 m/s,
- Auflösung: 1000 µm / Sinusperiode (sin-/cos-Signal)
5 - 50 µm (TTL-Signal),
- Genauigkeit: ca. 10 µm/m,
- Ausführung meistens in IP66,
- unempfindlich gegenüber Verschmutzung.



3.5 Begriffsdefinitionen

Begriff / Abkürzung	Definition / Erklärung
HIPERFACE®	High Performance Interface. Eingetragenes Warenzeichen der Firma Sick Stegmann GmbH
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
TTL	Transistor-Transistor-Logik
HTL	Hochvolt-Transistor-Logik
SSI-Schnittstelle	Serial Synchronous Interface
Single-Turn-Geber	Ermittlung der absoluten Position über 1 Umdrehung
Multi-Turn-Geber	Ermittlung der absoluten Position über mehrere Umdrehungen
A/D-Wandler	Analog/Digital-Wandler
SRAM	Static Random Access Memory , statisches RAM
NVSRAM	Non-Volatile Static Random Access Memory , nicht-flüchtiges statisches RAM
EEPROM	Electrically Eraseable Programmable Read Only Memory
DSP	Digitaler Signal Prozessor
DPR-Schnittstelle	Dual Port RAM-Schnittstelle
Reluktanz	Magnetischer Widerstand



4 Servoverstärker

4.1 Allgemeine Informationen zu Servoverstärkern

Bedingt durch den deutlich gestiegenen Rationalisierungs- und Automatisierungsbedarf bei modernen Produktionsmaschinen und -anlagen sind auch die Anforderungen an leistungsfähige Servoverstärker entsprechend gestiegen.

Demzufolge arbeiten Servoantriebe nicht mehr als einfache Hilfs- oder Stellantriebe, sondern führen mit Hilfe von komplexen Technologiefunktionen wie z. B. Winkelsynchronlauf, elektronische Kurvenscheibe, Touch-Probe-Verarbeitung, Momentenregelung wichtige Maschinenfunktionen aus, die in der Vergangenheit mechanischen Lösungen vorbehalten waren.

Leistungsfähige Servoverstärker zeichnen sich aus durch:

- hohe Regelgüte:
 - Rundlaufgenauigkeit,
 - geringe Drehzahlabweichung,
 - geringe Positionsabweichung.
- hohe Dynamik:
 - kurze Ausregelzeiten für Sollwert- und Lastsprünge.
- Überlastfähigkeit:

Bei Verfahrzyklen mit kurzen Taktzeiten und hohen Beschleunigungen muss der Servoverstärker in der Lage sein, den entsprechenden Strom bereitzustellen. Aufgrund der kurzen Beschleunigungszeiten müssen Servoverstärker mit geringer Überlastfähigkeit größer gewählt werden, was höhere Systemkosten zur Folge hat.
- leistungsfähigen Micro-Controller, der eine freie Programmierung / Parametrierung ermöglicht,
- komplexe Technologiefunktionen wie z. B.:
 - elektronische Kurvenscheibe,
 - Winkelsynchronlauf,
 - Touch-Probe-Verarbeitung,
 - Momentenregelung.
- vielseitige Schnittstellen:
 - galvanisch getrennte binäre Ein- und Ausgänge,
 - analoge Ein- und Ausgänge,
 - mehrere Geberschnittstellen für unterschiedliche Gebersysteme, für Motor- und Streckengeber,
 - Optionskarten-Steckplatz, z. B. für Feldbus-Schnittstellen und Steuerungskarten.
- zusätzliche Busschnittstelle für die Kommunikation mit anderen Servoverstärkern,
- gängige Schnittstelle / Anschlussmöglichkeit für Bedienteil und PC, z. B. USB, Ethernet,
- zusätzliche Sicherheitsmerkmale wie z. B. Anschlussklemmen für den "Sicheren Halt" gemäß EN 954-1, Kategorie 3,
- großen Spannungsbereich der zulässigen Netzspannung, $3 \times 380 \text{ V} (-10 \%) \dots 500 \text{ V} (+10 \%)$,
- Einhaltung der EMV-Grenzwertklassen A und B gemäß EN 5011,
- Anschlussmöglichkeit für einen Bremswiderstand.



4.1.1 Der Zwischenkreis

Üblicherweise basiert das Leistungsteil eines Servoverstärkers auf dem Prinzip des Spannungs-Zwischenkreisverstärkers. Das drehmomentbildende Drehfeld wird aus diesem Gleichstromzwischenkreis, im Folgenden Zwischenkreis genannt, über eine Wechselrichterbrücke erzeugt. Der Zwischenkreis wird z. B. über eine B6-Diodenbrücke meist direkt, also ohne Transformator, aus dem 3-phasigen Versorgungsnetz generiert.

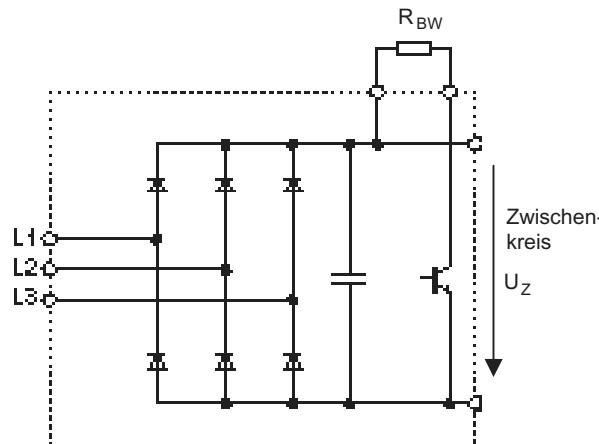


Bild 65: Blockschaltbild Zwischenkreis mit B6-Diodenbrücke

57301ade

- R_{BW} Bremswiderstand
 U_Z DC Zwischenkreis-Spannung

Der Zwischenkreiskondensator hat die Aufgabe, die gleichgerichtete Wechselspannung als Energiepuffer zu speichern. Die beim Abbremsen eines Antriebs entstehende kinetische Energie wird in elektrische Energie umgewandelt und in den Zwischenkreis zurückgespeist. Die Energiemenge, die er dabei aufnehmen kann, hängt von der Kapazität des Zwischenkreises ab.

Zur Gestaltung des Zwischenkreises werden u. a. Kondensatoren eingesetzt. Die Summe der im Zwischenkreis verwendeten Kapazitäten der Kondensatoren bestimmen die Ausführungsart des Zwischenkreises, die deutlich über den genannten Werten der Gesamtkapazität liegt. Im Fachjargon spricht man bei geringen Kapazitäten von einem "dünnen" Zwischenkreis, bei hohen Kapazitäten von einem "dicken" Zwischenkreis.

SEW-EURODRIVE kombiniert bei ihren Servoverstärker-Systemen beide Ausführungsarten des Zwischenkreises.

	Dünner Zwischenkreis	Dicker Zwischenkreis
Prinzip	Verwendung von <ul style="list-style-type: none"> • Metallschicht-Kondensatoren (MKS). • Metallisierten Kunststoff-Folien-Kondensatoren (MKP) 	Verwendung von <ul style="list-style-type: none"> • Elektrolyt-Kondensatoren
Vorteil	Keine Ladeschaltung notwendig.	Höhere Energiespeichermöglichkeit, besonders bei dynamischen Anwendungen von Vorteil.
	Weniger Netzrückwirkungen.	Kleinere Auslegung des Bremswiderstandes.
	Kostenersparnis durch weniger Bauteile.	Effizienterer Energieaustausch zwischen den Achsmodulen
	Platzersparnis durch geringeres Volumen der Geräte.	
	Längere Lebensdauer der Folienkondensatoren.	



4.1.2 Der Wechselrichter

Der Wechselrichter wird über die Zwischenkreis-Spannung U_Z versorgt. Die IGBTs werden von der zugehörigen Ansteuerung so getaktet, dass am Ausgang des Achsmoduls und somit am Motor eine pulsweitenmodulierte Spannung anliegt. Die Steuerung des Servoverstärkers erzeugt ein Drehfeld, das z. B. sinusförmig ist. Die Pulsweite wird dabei von der Stellgröße des Stromreglers bestimmt. Diese pulsweitenmodulierte Spannung erzeugt im Motor einen Strom, der durch die Motor- und Leitungsinduktivitäten annähernd sinusförmig ist.

Antiparallel zu jedem IGBT ist eine Diode geschaltet. Diese Freilaufdioden verhindern bei induktiver Ausgangslast, dass die im Umschaltmoment auftretenden Selbstinduktions-Spannungen den Wechselrichter beschädigen. Sie leiten die gespeicherte Energie an den Eingang des Wechselrichters zurück. Ebenso werden die Freilaufdioden für den Austausch von Blindenergie zwischen Motor und Servoverstärker benutzt.

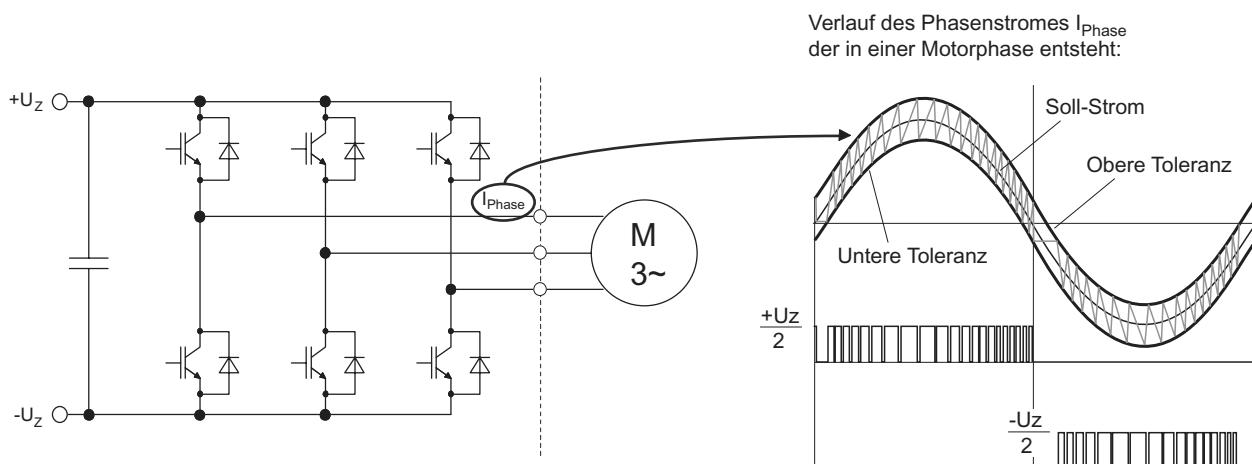


Bild 66: Blockschaltbild des Wechselrichters, getaktete Zwischenkreis-Spannung und Stromverlauf im Motor

57304ade

4.1.3 Überlastüberwachung

Die Überlastphilosophie eines Servoverstärkers ist maßgeblich durch die Anforderung an hohe Dynamik, d. h. insbesondere sehr kurze Leistungsspitzen, so genannte "Leistungs-Peaks", geprägt. Diese können im Millisekundenbereich auftreten, wobei darauf längere "Ruhephasen" im Sekundenbereich folgen können.

Eine typische Überlastfähigkeit ist z. B. zwischen 200 % und 300 % der Nennlast für den Bereich von einer Sekunde. Im Mittel darf die Auslastung 100 % nicht übersteigen.

Aufgrund der rasanten Elektronikentwicklung, insbesondere im Prozessorbereich, stehen mittlerweile ausreichend Rechen-Ressourcen in den Achssteuereinheiten zur Verfügung. So kann die Geräteauslastung im Gerät elektronisch nachgebildet und somit rechtzeitig Warnmeldungen oder Abschaltungen ausgelöst werden.



Das Beispieldiagramm in Bild 67 zeigt die Auslastung eines Achsmoduls aus dem kalten Gerätzustand heraus. Es ist ein Belastungsprofil gewählt, welches das Gerät bis an die Auslastungsgrenze von 100 % belastet.

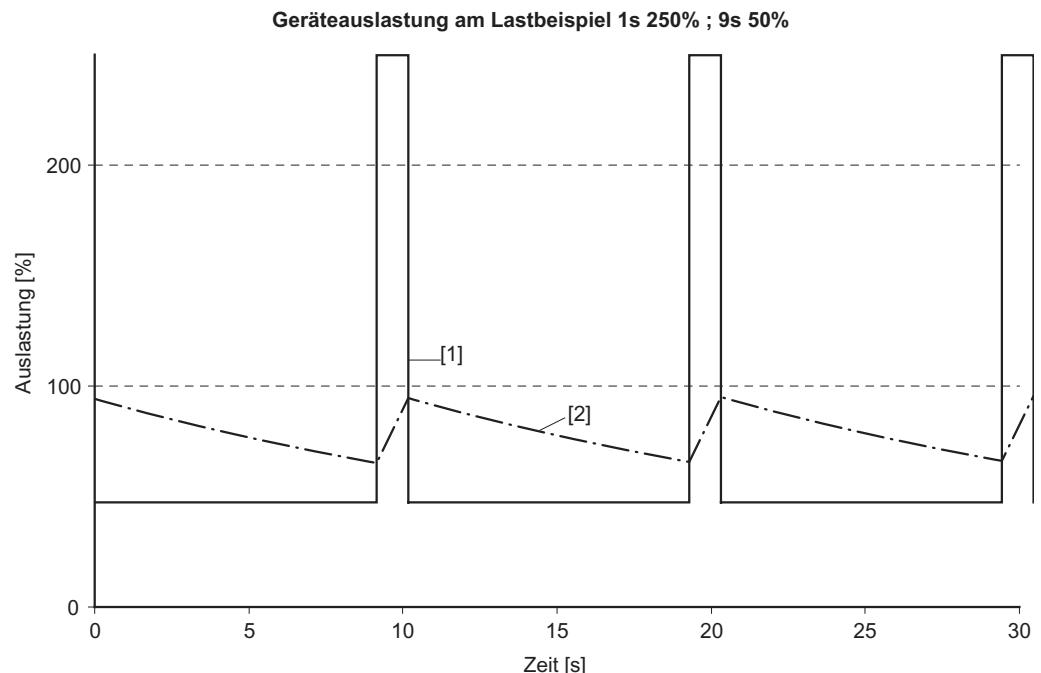


Bild 67: Beispiel einer im Servoverstärker nachgebildeten elektromechanischen Auslastung

57831bxx

- [1] Motorstrom
- [2] Auslastung

Die Kurve [1] im obigen Diagramm zeigt den Verlauf des Stromes, der kurzzeitig und zyklisch 250 % des Nennstromes beträgt. Anhand der 100 %-Linie ist deutlich zu erkennen, wie sich besonders die Auslastung tendenziell bei 100 % der Auslastungsgrenze nähert.



4.1.4 EMV-Betrachtung

Von modernen Antriebssystemen wird erwartet, dass sie eine Störfestigkeitsklasse wie z. B. die EN 61800-3 erfüllen. Das Erreichen einer Störfestigkeitsklasse ist stark vom Aufbau und dem Einhalten bestimmter Maßnahmen abhängig.

Dazu gehören z. B.:

- Netzseitig:
 - Verwendung eines Netzfilters zwischen Versorgungsmodul und Netz,
 - Verwendung von kurzen abgeschirmten Leitungen zwischen Netzfilter und Versorgungsmodul.
- Motorseitig:
 - Verwendung einer Ausgangsdrossel,
 - Verwendung von abgeschirmten Motorkabeln,
 - Einhalten maximaler Motorkabellängen, typisch sind ca. 100 m, da sonst die kapazitiven Ableitströme zu hoch werden.
- Installation:
 - großflächig aufgelegte Abschirmungen, um hochfrequente Ableitströme abzuschirmen,
 - Leistungskabel und Signalleitungen sind getrennt zu führen.

Für weiterführende Informationen wird auf Kap. 6.5 "Elektromagnetische Störung / Elektromagnetische Verträglichkeit" verwiesen.

4.1.5 Optionskarten

Optionskarten machen ein modernes Servosystem erst skalierbar. Durch die Skalierbarkeit in horizontaler und vertikaler Ebene können kostenoptimale Lösungen für nahezu jede Applikation gefunden werden.

Gängige Optionskarten sind z. B.:

- Feldbus-Schnittstellen wie z. B. Profibus, ProfiNet, EtherCAT, DeviceNet ermöglichen die Anbindung der Achse an eine übergeordnete Steuerung. Die Steuerung sendet Steuerbefehle und Sollwerte wie z. B. Position, Geschwindigkeit an die Achse und erhält von der Achse Informationen über deren Status sowie Prozesswerte wie z. B. Ist-Drehzahl, Ist-Position.
- zusätzliche E/A-Karten sind z. B. erforderlich, wenn eine Vielzahl von Endschaltern oder anderen Sensoren von der Achse verarbeitet werden. Ebenso gibt es Optionskarten mit analoger Schnittstelle, mit der beispielsweise analoge Sollwertsignale durch die Achse verarbeitet werden können.
- Geberkarten ermöglichen u. a. die Anbindung von Streckengebern z. B. bei schlupfhaften Strecken oder aber auch den wechselweisen Betrieb von mehreren Motoren an einem Achsmodul.

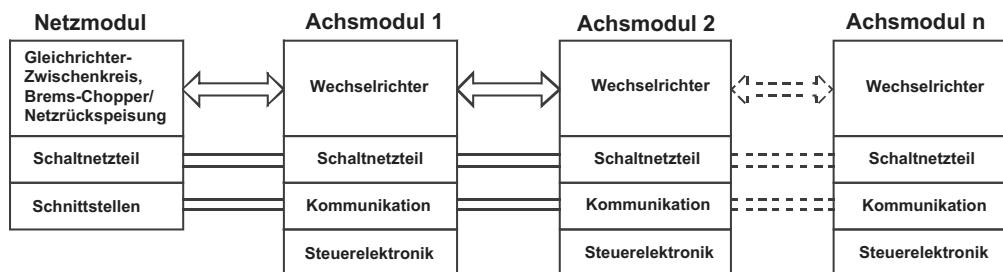


4.2 Das modulare Mehrachs-Servoverstärkersystem

Ein modulares Servosystem besteht aus folgenden Grundkomponenten:

- zentrales Versorgungsmodul,
- Achsmodul(e).

Über ein gemeinsames Versorgungsmodul werden mehrere Achsen direkt über den Zwischenkreis versorgt. Somit wird für mehrere Achsen nur eine Netzversorgung und nur ein gemeinsamer Bremswiderstand benötigt. Der Bremswiderstand entfällt beim Einsatz einer Rückspeiseeinheit.



57306ade

Bild 68: Prinzipieller Aufbau eines modularen Servoverstärkersystems

Die Vorteile des modular aufgebauten Servoverstärkersystems liegen im Bereich der Mehrachsanwendungen. Je nach Applikation und Betriebszustand erfolgt über die gemeinsame Zwischenkreisverbindung ein Energieaustausch zwischen den Achsen. Der Energieaustausch beginnt, wenn eine oder mehrere Achsen motorisch arbeiten, während andere generatorisch arbeiten und somit Energie zurückspeisen.

Ein weiterer Vorteil bei Mehrachsapplikationen ist der reduzierte Installationsaufwand. Dieser ergibt sich, da nur eine Netzversorgung und ein Bremswiderstand an das zentrale Versorgungsmodul installiert werden müssen.

4.2.1 Das Versorgungsmodul

Das Versorgungsmodul dient der Leistungsversorgung der angeschlossenen Achsmodulen über den Zwischenkreis. Der Anschluss erfolgt meist direkt am Drehstromnetz, typische Anschlusswerte sind AC 380 - 500 V, 50 - 60 Hz.

Ein Versorgungsmodul enthält im Wesentlichen:

- den Gleichrichter,
- den Brems-Chopper und die Anschlussklemmen des Bremswiderstandes¹⁾ oder alternativ eine Rückspeiseeinheit,
- den Überspannungsschutz,
- den Anschluss einer zentralen Kommunikation,
- einen Kommunikationsbus zu den Achsmodulen,
- einen 24-V-Anschluss zur Elektronikversorgung,
- verschiedene Überwaltungsfunktionen wie Netzausfallüberwachung oder Messung der Zwischenkreis-Spannung.

1) Kommt ein Bremswiderstand zum Einsatz, ist dieser geräteextern zu montieren und anzuschließen. Bei kleinen anfallenden Energien kann auch ein Versorgungsmodul mit integriertem Bremswiderstand verwendet werden.

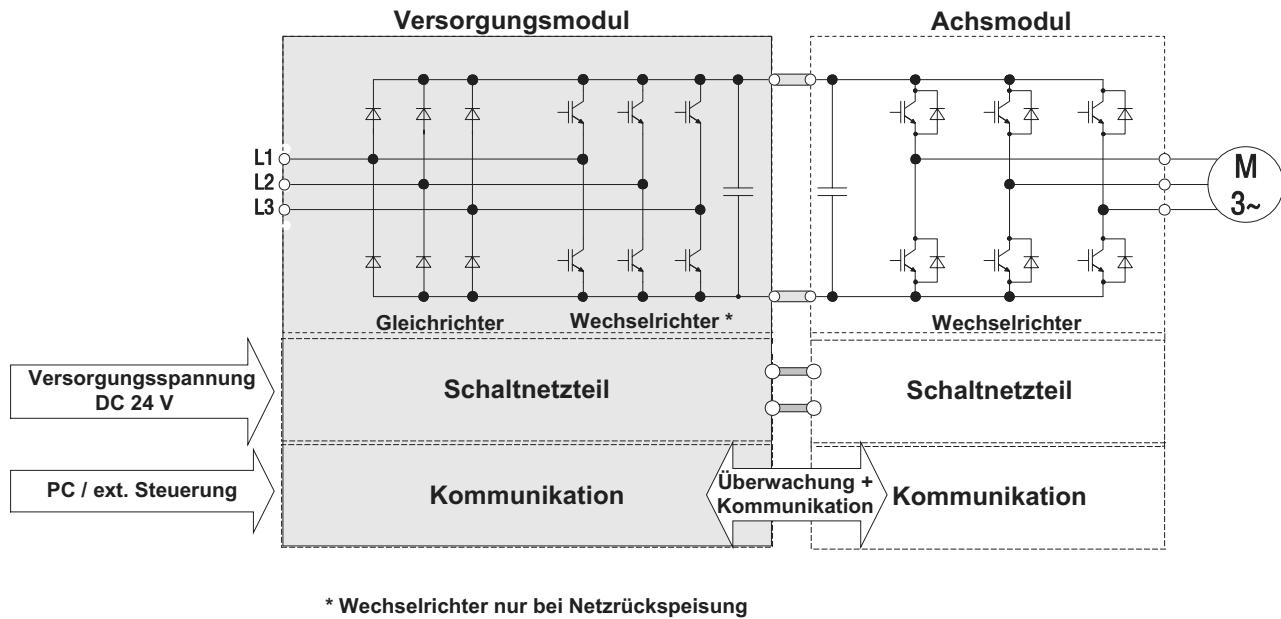


Bild 69: Prinzipieller Aufbau eines Versorgungsmoduls, Darstellung mit Achsmodul

57307ade

Bei einem modularen Servoverstärkersystem wird der Zwischenkreis im Versorgungsmodul erzeugt. Er wird elektrisch über eine mechanische Zwischenkreisverbindung, z. B. einem Schienensystem, mit den Achsmodulen verbunden.

Zwischenkreis und Energie-Rückspeisung

Beim Abbremsen eines Antriebs wird kinetische Energie in elektrische Energie umgewandelt und in den Zwischenkreis zurückgespeist. Gemäß unten stehender Formel muss bei konstanter Zwischenkreis-Kapazität die Spannung ansteigen, um die eingespeiste Energie im Zwischenkreis aufnehmen zu können.

$$E = \frac{1}{2} \times J_{Mot} \times \omega_{Mot}^2 = \frac{1}{2} \times C_{ZK} \times U_{ZK}^2$$

J_{MOT}	Massenträgheitsmoment des Motors	C_{ZK}	Kapazität des Zwischenkreises, konstant
ω_{MOT}	Winkelgeschwindigkeit des Motors	U_{ZK}	Zwischenkreis-Spannung

Wenn der Antrieb nun abgebremst wird, muss die überschüssige Energie abgeführt werden.

Hierfür gibt es prinzipiell 4 Möglichkeiten:

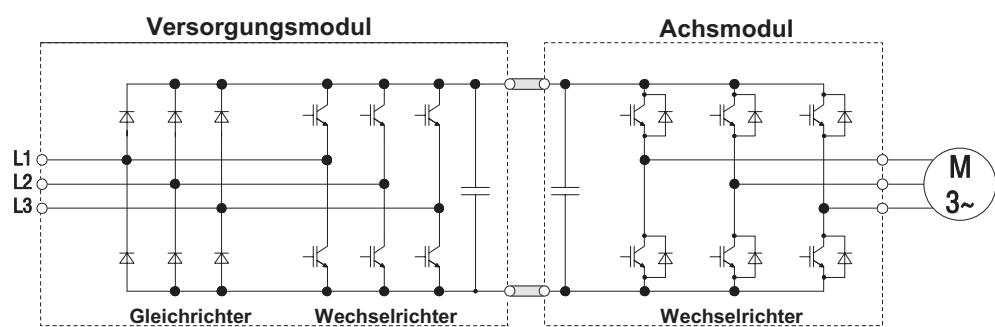
- Netzrückspeisung, d. h. die Energie kann durch andere Verbraucher genutzt werden,
- Brems-Chopper und Bremswiderstand wandeln elektrische Energie in Wärmeenergie,
- Energieaustausch bei Mehrachsanwendungen durch Nutzung der elektrischen Energie von anderen angeschlossenen Motoren,
- Kapazitätsmodul (Kondensatormodul) zur Erhöhung der Zwischenkreis-Kapazität.



4.2.2 Netzrückspeisung

Die Netzrückspeisung hat den Vorteil, dass die Bremsenergie als elektrische Energie für andere Anwender im Netz zur Verfügung steht.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, eine Netzrückspeisung zu realisieren, z. B. die der antiparallelen Brücke. Bei dieser Form der Netzrückspeisung wird der Netzgleichrichter durch einen Wechselrichter, der netzsynchron angesteuert wird, ergänzt. Übersteigt die Zwischenkreis-Spannung den Gleichrichterwert, wird die überschüssige Energie ins Netz zurückgespeist.

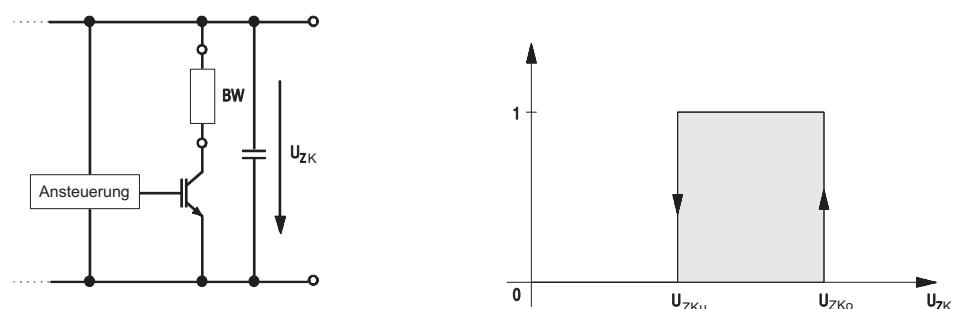


57308ade

Bild 70: Prinzipieller Aufbau eines Versorgungsmoduls mit Netzrückspeisung

4.2.3 Brems-Chopper und Bremswiderstand

Im Gegensatz zur Netzrückspeisung wird beim Brems-Chopper die überschüssige Energie nicht ins Netz zurückgespeist, sondern über einen Bremswiderstand in Wärme umgewandelt. Wenn nur wenig Bremsarbeit zu verrichten ist, stellt die Ausführung mit Brems-Chopper und zugehörigem Bremswiderstand die im Vergleich zur Netzrückspeisung kostengünstigere Alternative dar.



57310ade

Bild 71: Ansteuerung Brems-Chopper, Schaltverhalten eines Brems-Choppers

U_{ZKu} Untergrenze Zwischenkreis-Spannung
 U_{ZKo} Obergrenze Zwischenkreis-Spannung



4.2.4 Vergleich zwischen Netzrückspeisung und Brems-Chopper-Betrieb

Je nach Applikation muss bei der Projektierung entschieden werden, welches Verfahren am Besten geeignet ist.

Kriterium	Netzrückspeisung	Brems-Chopper und Bremswiderstand
Unterbringung	Vollständig im Versorgungsmodul integriert.	Brems-Chopper im Versorgungsmodul. Bremswiderstand außerhalb des Schaltschrankes.
Auswirkung auf Umgebungstemperatur	Sehr gering.	Wärmeentwicklung am Bremswiderstand.
Zusätzliche Verdrahtung	---	Anschluss des Bremswiderstandes.
Energiebilanz	Elektrische Energie bleibt erhalten.	Elektrische Energie wird in Wärmeenergie umgewandelt.
Kosten	Netzrückspeisung ist teurer als Bremswiderstand.	Bremswiderstand ist relativ günstig.
EMV	Netzrückwirkung auf andere Verbraucher ist möglich.	Geringere Netzrückwirkung wie bei Netzrückspeisung.



4.2.5 Das Achsmodul

Das Achsmodul dient zur Ansteuerung eines Servomotors mit einem frequenzveränderlichen 3-phasigen Drehfeld.

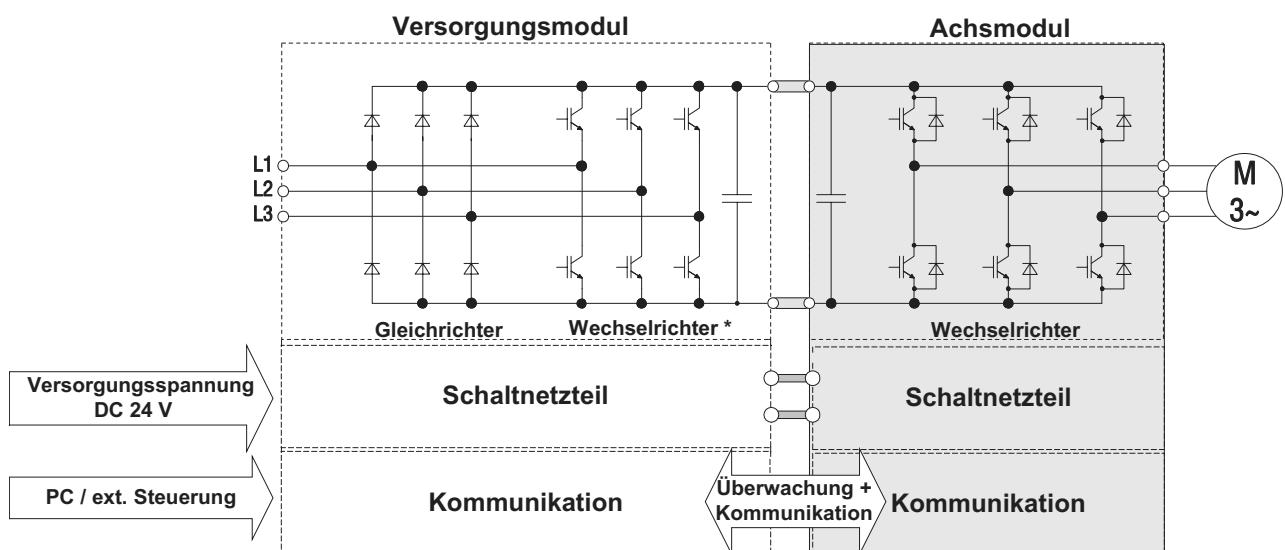
Ein Achsmodul enthält im Wesentlichen:

- eine Wechselrichter-IGBT-Brücke als Leistungs-Endstufe,
- Kommunikations-Schnittstelle und binäre Ein- / Ausgänge als Grundfunktion der Steuerungstechnik,
- Motor-Geberschnittstellen,
- Einschübe für Optionen wie Geber, Feldbusse, weitere binäre Ein- / Ausgänge,
- Einschübe für Steuerungskarten,
- eine Ansteuerung für die Motorbremse,
- eine Auswertung des Motor-Temperaturfühlers,
- eine Ausstattung zur Realisierung der Sicherheitstechnik "Sicherer Halt" gemäß EN 60204-1,
- eine Anzeige zur Darstellung des Betriebszustandes,
- interne Betriebsüberwachungs-Funktionen.

Die IGBTs haben sich für diese Anwendung als robuste Leistungstransistoren durchgesetzt.

Die Hauptvorteile der IGBTs sind:

- geringe Schaltverluste,
- einfache Ansteuerung,
- hohe Schaltfrequenzen,
- hohe Spannungsfestigkeit.



* Wechselrichter nur bei Netzrückspeisung

Bild 72: Prinzipieller Aufbau eines Achsmoduls, Darstellung mit Versorgungsmodul

57312ade



Die Anzahl der an ein Versorgungsmodul anschließbaren Achsen ist begrenzt.

Die Begrenzung ist bestimmt durch:

- die Leistung des Versorgungsmoduls,
- die Summen- bzw. Spitzenleistung der Achsmodule,
- die Anzahl der maximal adressierbaren Achsen,
- den mechanischen Aufbau,
- die Auslegung der Zwischenkreis-Verschienung.

4.2.6 24-V-Versorgung

Zur Spannungsversorgung des Steuerteils der Servoverstärker hat sich die vom Drehstromnetz unabhängige Versorgung durchgesetzt. Die Geräte sind getrennt von der Leistungsversorgung mit einem DC 24-V-Anschluss versehen.

Zur Versorgung von industriellen Niederspannungsverbrauchern wie z. B. SPS und Steuerteilen von Servoverstärkern wird die 24-V-Spannungsversorgung nach EN 61131 verwendet. In einigen Fällen wird allerdings eine eng tolerierte Spannung, z. B. zur Bremsenversorgung, notwendig. In diesem Fall reicht die konventionelle Netzeiltechnik mit B4-Diodenbrücke nicht mehr aus und ein Schaltnetzteil wird eingesetzt.

Prinzipiell hat die vom Zwischenkreis unabhängige Spannungsversorgung den Vorteil, dass die Geräte parametrierbar und Feldbussysteme funktionsfähig bleiben, auch wenn das Versorgungsnetz abgeschaltet wird. Dies ist z. B. dann wichtig, wenn die Geräte in ein Feldbussystem eingebunden sind. Versorgt man die Geräte unabhängig mit 24 V, spricht man auch von einem Stützbetrieb, der den Betrieb des Bussystems ohne Netzanschluss ermöglicht.

Wie in Bild 73 gezeigt wird, genügt es bei modularen Systemen, die 24-V-Versorgung extern zur Verfügung zu stellen und sie dann von Gerät zu Gerät weiterzuleiten.

Die 24-V-Versorgung für die Motorbremsenansteuerung und die Elektronik sind getrennt ausgeführt. Um einen sicheren Betrieb zu realisieren, werden die zwei Spannungen in den Geräten auf notwendige Toleranzen überwacht.

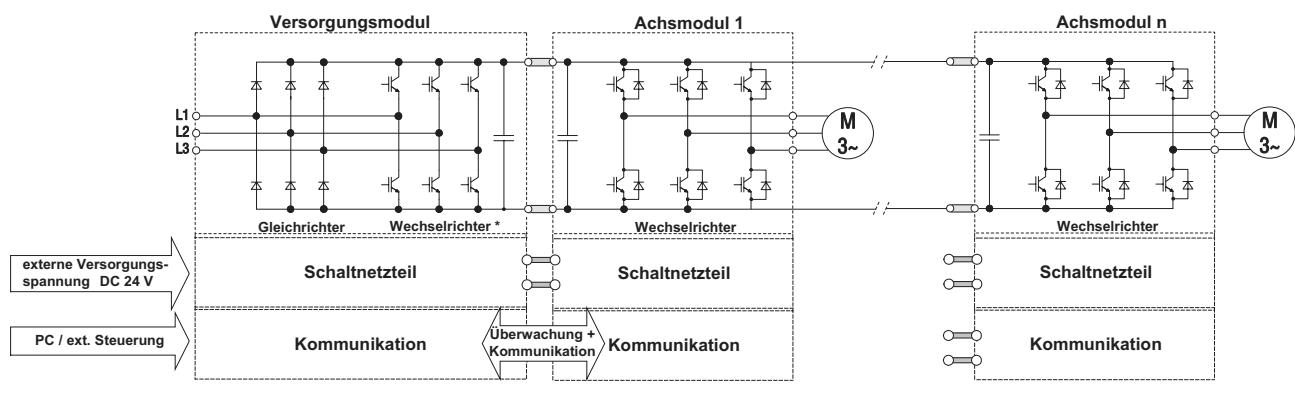


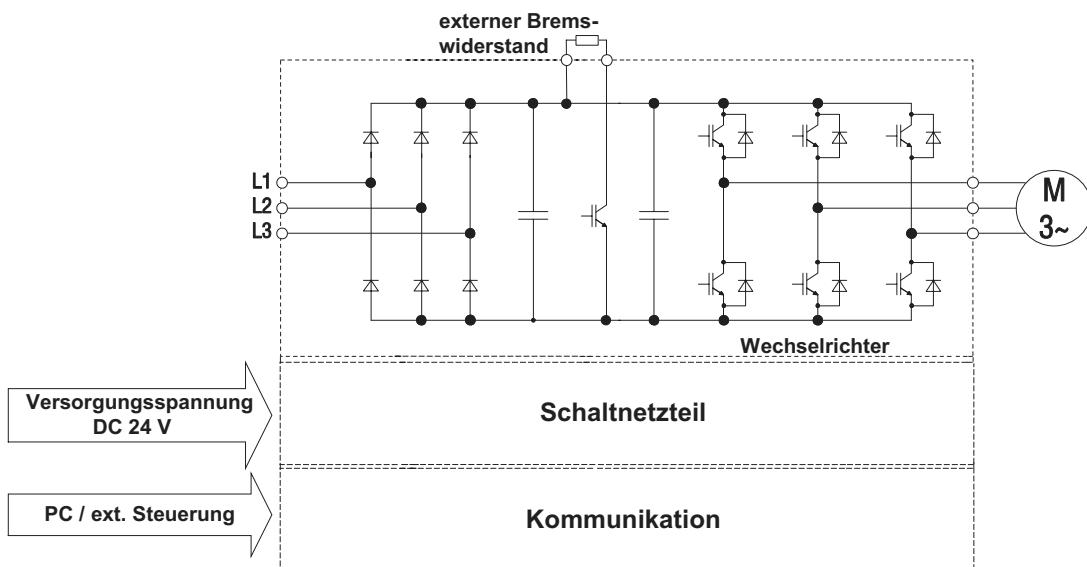
Bild 73: Prinzipieller Aufbau eines modularen Mehrachssystems mit externer 24-V-Versorgung

57314ade



4.3 Der Einachsverstärker

Einachsverstärker, auch Kompaktverstärker genannt, haben den Vorteil, dass sie als kompakte Einheit zur Verfügung stehen. Sie beinhalten in einem Gehäuse den Zwi-schenkreis mit Brems-Chopper, Wechselrichter, Gleichrichter, Schaltnetzteil, Options-Steckplätzen, Kommunikations-Interfaces und CPU-Baugruppe(n) für Kommunikation und Regelungsvorgänge. Somit entfällt die zusätzliche Verbindung einzelner Gerätekomponenten, wie sie beim modularen System notwendig ist.



57316bde

Bild 74: Prinzipieller Aufbau eines Einachsverstärkers

Die Funktionen des Leistungsteils, d. h. des Netzmoduls und des Wechselrichters, entsprechen den Funktionen der in Kap. 4.2 beschriebenen modularen Servo-Verstärker-systeme.



4.4 Gegenüberstellung modulares Mehrachssystem / Einachssystem

Die nachstehend aufgeführten Vorteile der beiden Systeme geben eine Entscheidungshilfe, ob eine Applikation mit einem modularen Mehrachssystem oder mit einem Einachssystem optimal zu lösen ist.

Vorteile des modularen Mehrachssystems

- nur eine Netzeinspeisung, d. h. geringer Installationsaufwand,
- nur ein Bremswiderstand, sofern keine Netzrückspeisung vorhanden, d. h. geringer Installationsaufwand,
- ab ca. 3 Achsen geringerer Platzbedarf im Schaltschrank (im Vergleich zu Einachssystemen) aufgrund des reduzierten Installationsaufwandes,
- Energieaustausch zwischen den Achsmodulen über die Zwischenkreisverbindung,
- einfacher Informationsaustausch zwischen den einzelnen Achsmodulen über gemeinsamen System- und Meldebus.

Vorteile des Einachssystems

- eine dezentrale Platzierung ist möglich, um große Motorleitungslängen zu vermeiden,
- bei Anwendungen bis ca. 2 - 3 Achsen ist der Einachsverstärker meist die preislich günstigere Lösung,
- bei kleiner Leistung und geringer Achsenanzahl ist der Einachsverstärker meist die preislich günstigere Lösung.

4.5 Begriffsdefinitionen

Begriff / Abkürzung	Definition / Erklärung
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, Leistungshalbleiter
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
E/A-Karten	Eingangs-/Ausgangskarten
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
CPU	Central Processing Unit, Hauptprozessor



5 Regelstruktur und Betriebsarten

In diesem Kapitel wird die Regelstruktur mit sinusförmiger Speisung behandelt. Mehr Informationen hierzu und zur blockförmigen Speisung finden Sie in Kapitel 2.4 "Funktionsweise von Synchron-Servomotoren".

5.1 Übersicht

Bei vielen Anwendungen werden Servoantriebe zur Lageregelung oder Drehzahlregelung eingesetzt. Der Regelkreis wird meist kaskadenförmig aufgebaut, d. h. die Regelkreise überlagern sich.

- Der innerste Regelkreis regelt den Strom. Mit diesem Regler alleine ist die Momentenregelung möglich.
 - Die Überlagerung des Stromreglers mit einem Drehzahlregler ermöglicht die Regelung der Drehzahl.
 - Die weitere Überlagerung mit einem Lageregler ermöglicht die Regelung der Lage.

In Bild 75 ist der prinzipielle Aufbau der Regelstruktur eines Servoreglers dargestellt. Üblicherweise sind in heutigen Servoverstärkern die Regler voll digital ausgeführt.

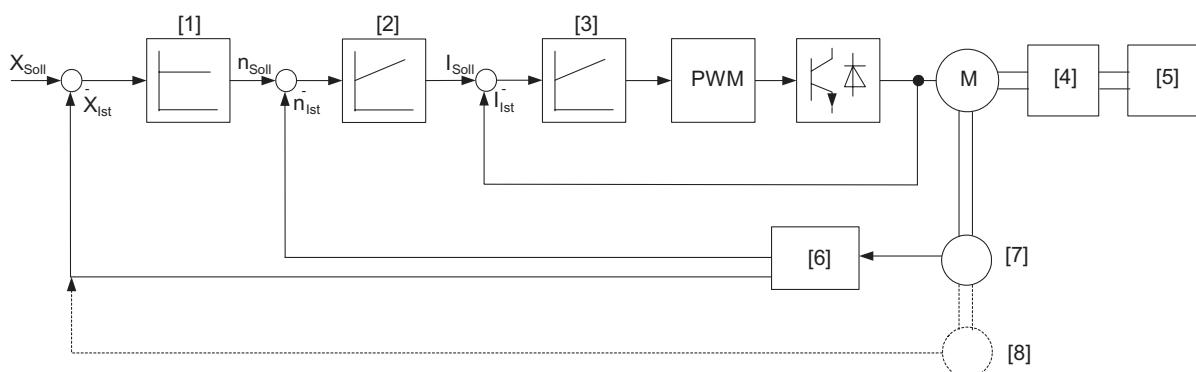


Bild 75: Prinzipieller Aufbau der Regelstruktur eines Servoreglers.

55701axx

[1]	Lageregler K_p_x	[5]	Last
[2]	Drehzahlregler K_p_n	[6]	Signalverarbeitung
[3]	Stromregler	[7]	Geber
[4]	Getriebe (optional)	[8]	Absolutwertgeber

In den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Reglertypen näher betrachtet.

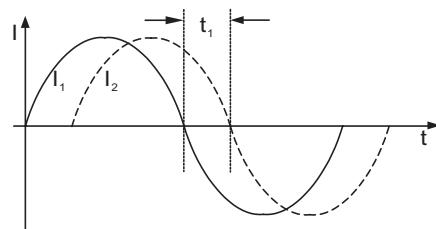


5.2 Die Stromregelung

Das Bewegungsverhalten eines Servoantriebes wird unmittelbar durch das Drehmoment des Motors bestimmt. Das Drehmoment selbst ist durch die Ströme im Motor bestimmt. Um einen Drehmoment-Sollwert an der Motorwelle möglichst dynamisch umsetzen zu können, ist es notwendig, nicht nur eine gesteuerte Spannung an den Motor anzulegen (U/f-Verfahren), sondern die Ströme zu regeln.

Regelbare Drehstrommotoren (Synchron- und Asynchronmotoren) werden mit 3-phasigem Wechselstrom betrieben. Die 3 Ströme in den Phasen U, V, W sind aber nicht von einander unabhängig. Es gilt die Regel, dass die Summe der 3 Ströme immer 0 ergibt. Dies bedeutet, dass sich eine Stromkomponente, z. B. Strom in Phase W, immer durch die 2 anderen Komponenten, hier Phase U und V, berechnen lässt. Zur Regelung der Motorströme genügen also zwei voneinander unabhängige Regler. Werden z. B. die Ströme der Phasen U und V geregelt, ist damit auch der Strom in Phase W bestimmt.

Die direkte Regelung der Phasenströme hat jedoch einen Nachteil. Mit zunehmender Motordrehzahl sind dabei sinusförmige Ströme mit zunehmender Frequenz zu regeln. Da die Regler prinzipbedingt eine Sollwertänderung nicht unendlich schnell ausregeln können, bedeutet dies eine Phasenverschiebung zwischen den Strom-Sollwerten und den Strom-Istwerten. Die zeitliche Verzögerung der Ist-Größe gegenüber der Soll-Größe des Reglers ist als konstant anzusehen, wodurch sich die Phasenverschiebung zwischen Soll-Strom und Ist-Strom vergrößert, je höher die Drehzahl ist.



55703axx

Bild 76: Differenz der Stromamplituden Soll-/Ist-Strom

- I_1 Soll-Strom
- I_2 Ist-Strom
- t_1 Totzeit des Reglers

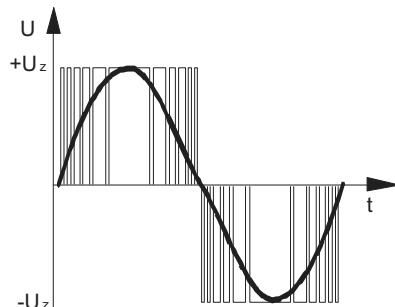
Es liegt also auch im eingeschwungenen Zustand, d. h. bei keiner Änderung der Stromamplitude, eine Differenz zwischen den Soll- und Istwerten vor. Die Rechenleistung heutiger Prozessoren erlaubt es, die gemessenen Ist-Ströme durch eine Koordinatentransformation in ein System von Gleichgrößen zu wandeln. Danach erfolgt die Regelung dieser Gleichgrößen. Anschließend werden die Motorspannungen als die Stellgrößen des Reglers wieder zurücktransformiert.

Als Soll-Größen für den Stromregler kommen die drehmomentbildende Komponente I_{sq} und die magnetfeldbildende Komponente I_{sd} zur Anwendung. Für weitergehende Informationen empfehlen wir Literatur zum Thema "Feldorientierte Regelung von Drehstrommotoren".



Die Stellgröße des Stromreglers ist die Motorspannung. Die Motorspannung wird durch eine Pulsweiten-Modulation in zeitdiskreter Form vorgegeben. Die Spannung zwischen zwei Phasen des Servoverstärker-Ausgangs kann dabei nur drei Spannungspotenziale annehmen.

Die gewünschte Grundwelle der Spannung ergibt sich durch schnelles Schalten zwischen $+U_z$ und $-U_z$. Übliche Frequenzen für die Pulsweiten-Modulation sind dabei z. B. 4 kHz, 8 kHz, 16 kHz.



55704axx

Bild 77: Pulsweiten-Modulation PWM

Da eine Spannungsänderung nur im Raster des PWM-Intervalls erfolgen kann, arbeiten üblicherweise auch die Stromregler mit den Frequenzen der PWM. Intelligente digitale Verfahren für die Stromregelung erlauben inzwischen eine Strom-Sollwertänderung in nahezu einem Abtastschritt auszuregeln. Bei einer Stromregelfrequenz von z. B. 8 kHz bedeutet dies eine Stromanregelzeit von 125 μ s.

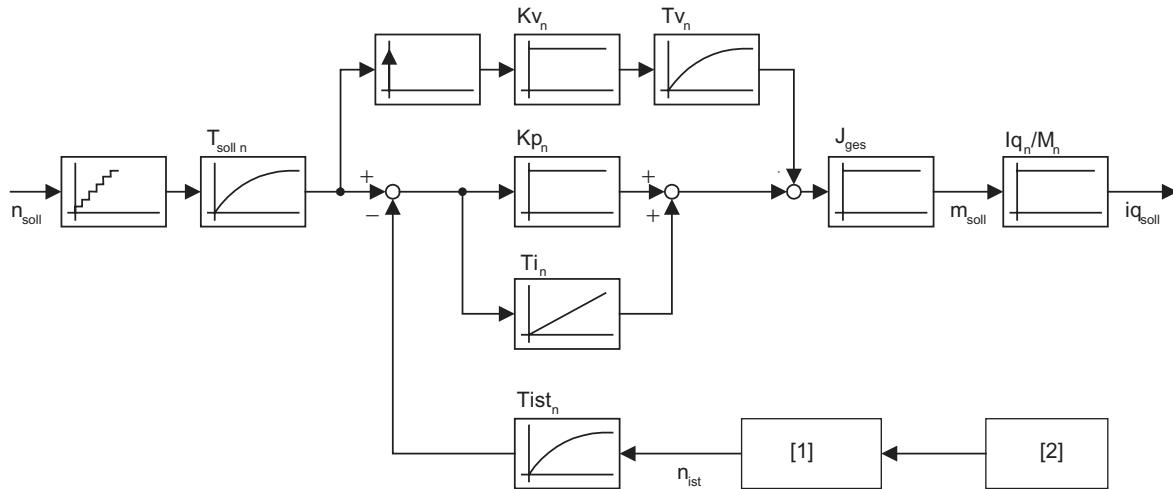
Für die Parametereinstellung des Stromreglers sind die Parameter der Regelstrecke entscheidend. Diese sind alleine durch den am Servoverstärker angeschlossenen Motor bestimmt. Bei Servoverstärkern von SEW-EURODRIVE wird deshalb der Stromregler bei der Motorinbetriebnahme optimal parametert.



5.3 Die Drehzahlregelung

5.3.1 Struktur der Drehzahlregelung

Das Bild zeigt die prinzipielle Struktur des Drehzahl-Regelkreises.



55705axx

Bild 78: Struktur der Drehzahlregelung

[1]	Drehzahlberechnung	T_{in}	Nachstellzeit
[2]	Motorgeber	$T_{ist\ n}$	Drehzahlnachstellfilter
n_{soll}	Soll-Drehzahl	Tv_n	Beschleunigungs-Vorsteuerfilter
n_{ist}	Ist-Drehzahl	J_{ges}	Gesamte Massenträgheit
$T_{soll\ n}$	Zeitkonstante des Drehzahlreglers	Iq_n/M_n	Motorkonstante
KV_n	Verstärkung Beschleunigungs-Vorsteuerung	m_{soll}	Sollmoment
Kp_n	Lageregler	iq_{soll}	Sollwert drehmomentbildender Strom

Nach der Aufbereitung

- des Drehzahl-Sollwerts, siehe Seite 85,
- der Erfassung des Drehzahl-Istwerts, siehe Seite 83
- und des Drehzahl-Istwerts, siehe Seite 85,

wird die Differenz dieser Signale an einen PI-Regler gegeben. Dessen Stellgröße ist verantwortlich für die Beschleunigung des Antriebs. Daraus lässt sich über die Massenträgheit des Antriebsstrangs das erforderliche Drehmoment berechnen.

Über den Kehrwert der Motorkonstante $k_T = M_n/I_{qn}$ ergibt sich der drehmomentbildende Strom, der dem Stromregler zugeführt wird.

Um die Dynamik des Führungsverhaltens zu verbessern, ist eine Beschleunigungs-Vorsteuerung implementiert, siehe hierzu auch Seite 87.



5.3.2 Lage- und Drehzahlerfassung

Zur Lage- und Drehzahlerfassung kommen verschiedene Gebersysteme zum Einsatz. Zunächst kann man die Geber nach folgenden Kriterien unterscheiden:

- Geber mit Absolutinformation über die Lage,
z. B. Resolver, Hiperface (Gebersystem der Fa. Sick / Stegmann), EnDat (Gebersystem der Fa. Heidenhain)
- Geber mit rein inkrementeller Information über die Lage,
z. B. TTL-Geber, sin-/cos-Geber.

Permanent erregte Synchronmotoren benötigen für die Motorführung eine absolute Lageinformation. Deshalb werden für diesen Motortyp üblicherweise Absolutwertgeber eingesetzt.

Wenn die Forderung besteht, dass nach dem Einschalten des Antriebs die Lage sofort ohne Referenzierung bekannt sein soll, ist ebenfalls der Einsatz eines Absolutwertgebers sinnvoll. Der Resolver ist für diese Art des Einsatzes weniger geeignet, da er die absolute Lageinformation nur innerhalb einer Motorumdrehung liefert.

Sowohl Geber mit Absolutinformation als auch Geber mit rein inkrementeller Information haben die Eigenschaft, dass sie nur eine Information über die Lage zur Verfügung stellen. Aus dieser einen Information wird im Servoverstärker die Drehzahl ermittelt, indem die Lage in gleichen Zeitabständen abgetastet wird. Die Drehzahl entsteht durch die Bildung der Lagedifferenz aus zwei abgetasteten Lagewerten und deren Umrechnung über die bekannte Zeitdifferenz. Daran kann man erkennen, dass die Drehzahl nicht als Momentanwert zu einem bestimmten Zeitpunkt zur Verfügung steht, sondern vielmehr den Mittelwert über ein Abtastintervall darstellt.

Die Drehzahlregelung erfordert für eine hohe Dynamik einen möglichst aktuellen Drehzahl-Istwert. Aus diesem Grund muss das Abtastintervall kurz gewählt sein. Die Auflösung der Gebersysteme spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Oben genannte Gebersysteme bieten dabei die folgenden Auflösungen pro Motorumdrehung:

- Resolver: Mit neuesten Auswerteverfahren kann das Resolversignal mit 15 Bit ausgewertet werden, somit ergibt sich eine Auflösung von $2^{15} = 32768$ Inkrementen / Umdrehung.
- TTL-Geber: Bei einer Auflösung von 1024 Impulsen / Umdrehung ergibt sich aufgrund der beiden um 90° versetzten Geberspuren im Servoverstärker eine Auflösung von $4 \times$ Geberstrichzahl, d. h. $4 \times 1024 = 4096$ Inkrementen / Umdrehung. So mit ist es bei diesem Gebersystem völlig ausreichend, wenn im Servoverstärker mit 12 Bit ausgewertet wird ($2^{12} = 4096$).

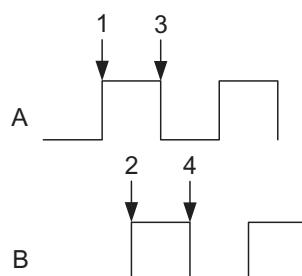


Bild 79: Signale TTL-Geber

55706axx

- sin-/cos-Geber, Hiperface, EnDat: Die Auflösung beträgt $2^{10} \times$ Geberstrichzahl. Ausgewertet wird mit $2^{10} \times 1024 = 1048576$.



Wird nun die Drehzahl über ein Zeitintervall von z. B. 500 µs gebildet, so ergeben sich aufgrund der Lageauflösung der verschiedenen Geber die folgenden Auflösungen für die Drehzahl:

Resolver

$$\frac{1 \text{ Umdrehung}}{2^{15}} = 3,05175 \times 10^{-5} \text{ Umdrehungen}$$

$$\frac{3,05175 \times 10^{-5} \text{ Umdrehungen}}{500 \mu\text{s}} = 0,061 \frac{1}{\text{s}} = 3,66 \frac{1}{\text{min}}$$

TTL-Geber (1024 Striche)

$$\frac{1 \text{ Umdrehung}}{4096} = 2,44 \times 10^{-4} \text{ Umdrehungen}$$

$$\frac{2,44 \times 10^{-4} \text{ Umdrehungen}}{500 \mu\text{s}} = 0,48828 \frac{1}{\text{s}} = 29,3 \frac{1}{\text{min}}$$

sin-/cos-Geber

$$\frac{1 \text{ Umdrehung}}{1024 \times 2^{10}} = 9,5367 \times 10^{-7} \text{ Umdrehungen}$$

$$\frac{9,5367 \times 10^{-7} \text{ Umdrehungen}}{500 \mu\text{s}} = 1,907348 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{s}} = 0,114 \frac{1}{\text{min}}$$

Deutlich zu erkennen sind bei den verschiedenen Gebersystemen die Unterschiede in der Quantisierung des Drehzahlwerts. Durch diese Quantisierung ergibt sich ein sogenannter "Drehzahl-Ripple". Die folgende Grafik zeigt den entstehenden Ripple bei einem marktüblichen TTL-Geber mit einer Auflösung von 1024 Strichen in Verbindung mit einer Drehzahlregler-Abtastzeit von 500 µs.

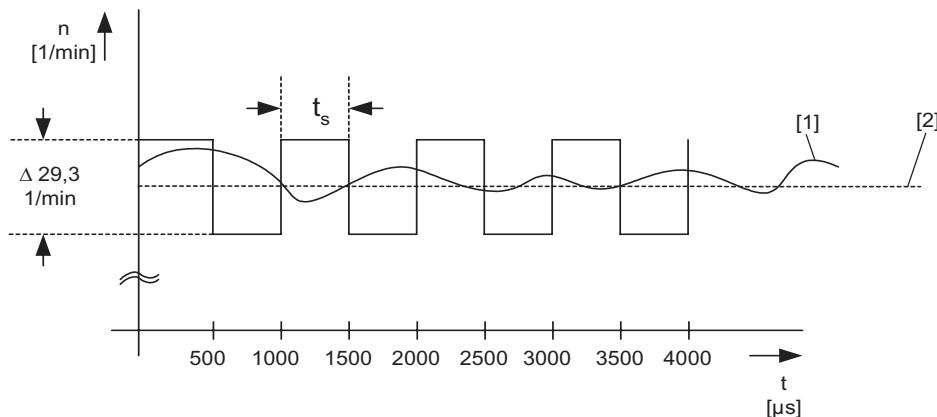


Bild 80: Darstellung des Drehzahl-Ripple

55710axx

t_s Abtastschritt n-Regler

[1] Ist-Drehzahl

[2] Solldrehzahl



Dieser "Ripple" des Drehzahl-Istwerts wird über den Drehzahlregler auf den Drehmoment-Sollwert übertragen. Hier können so große Werte auftreten, dass diese nicht mehr toleriert werden können. Eine Welligkeit von 10 % des Motormennmoments darf im Allgemeinen nicht überschritten werden.

5.3.3 Drehzahl-Istwertfilter

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, muss die Welligkeit des Motordrehmoments limitiert werden. Da die Welligkeit vom Drehzahl-Istwert herrührt, ist es notwendig, diesen Wert entsprechend zu filtern. Die erforderliche Zeitkonstante ist dabei abhängig von

- dem verwendeten Gebertyp,
- der Verstärkung der Drehzahlreglers,
- der Massenträgheit.

Nachteilig wirkt sich ein Filter durch eine zeitliche Verzögerung des Drehzahl-Istwerts aus. Diese Verzögerung limitiert wiederum die Dynamik des Drehzahl-Regelkreises.

Daher darf nur so viel wie unbedingt erforderlich gefiltert werden. Es stehen hier mehrere Größen in Wechselwirkung zueinander:

- Auflösung des Gebersystems,
- maximaler Drehmoment-Ripple,
- gewünschte Dynamik im Drehzahl-Regelkreis,
- Massenträgheit,
- Filterzeitkonstante des Drehzahl-Istwertfilters.

Es ist offensichtlich, dass die Berücksichtigung all dieser Zusammenhänge und somit auch die korrekte Einstellung aller Parameter des Regelkreises schwierig sein kann. Moderne Inbetriebnahme-Tools können durch eine automatische Verarbeitung dieser Zusammenhänge eine wertvolle Unterstützung liefern, siehe hierzu auch Seite 89 "Steifigkeit".

5.3.4 Aufbereitung des Drehzahl-Sollwertes

Unter bestimmten Umständen ist erforderlich, den von außen zugeführten Drehzahl-Sollwert aufzubereiten, bevor er auf den Regler gegeben wird. Dies ist z. B. der Fall, wenn der Sollwert in analoger Form vorliegt und so stark rauscht, dass eine Filterung notwendig wird. Diese Filterung vermindert, wie beim Drehzahl-Istwert, den entstehenden Drehmoment-Ripple.

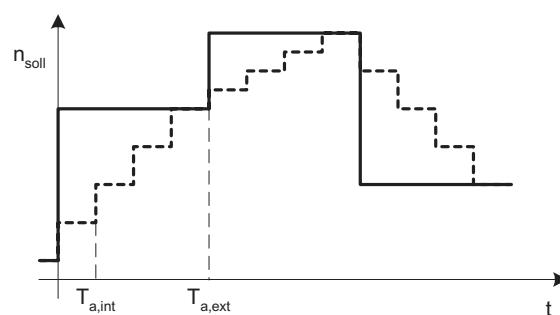


Bild 81: Fein-Interpolator

55711axx

- $T_{a, int}$ Abtastzeit des Drehzahlreglers
 $T_{a, ext}$ Abtastzeit der externen Sollwertquelle



Der Sollwert liegt jedoch meist in digitaler Form vor. Arbeitet die Sollwertquelle mit einem langsameren Raster als der interne Regler, ist es sinnvoll, den Sollwert über einen "Fein-Interpolator" zu führen. Der Fein-Interpolator reduziert die grobe Quantisierung des Signals. Diese Maßnahme vermindert ebenfalls den Drehmoment-Ripple.

Bild 81 erläutert den oben beschriebenen Sachverhalt.

Die durchgezogene Linie zeigt den Eingang, die gestrichelte Linie den Ausgang des Fein-Interpolators.

5.3.5 Drehzahlregler

Mit zulässigen Näherungen, die hier nicht genauer erläutert werden, lässt sich das Übertragungsverhalten des Drehzahlreglers als ein Filter 1. Ordnung beschreiben.

Die Zeitkonstante beschreibt dabei die Dynamik des Regelkreises, sie berechnet sich wie folgt:

$$T_n = \frac{1}{K_{p_n}}$$

T_n Zeitkonstante des Drehzahlreglers
 K_{p_n} P-Anteil des Drehzahlreglers

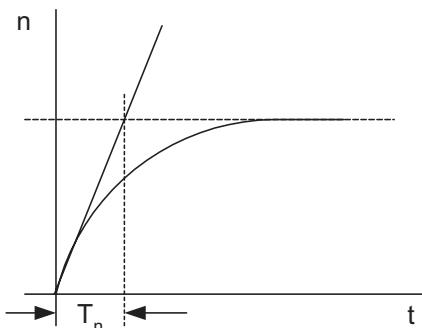


Bild 82: Sprungantwort P_{t1} -Glied

55713axx

Es gibt eine minimale Zeitkonstante, bei der der Regelkreis gerade noch stabil arbeitet. Unterschreitet die Zeitkonstante durch Erhöhung von K_{p_n} diesen Grenzwert, beginnt der Drehzahl-Regelkreis zu schwingen. Der kleinste erreichbare Wert T_n hängt dabei von den folgenden Einflussfaktoren ab:

- Dynamik des Stromreglers,
- Zeitverhalten der Drehzahl-Istwerterfassung (Abtastintervall für die Lageerfassung),
- Rechenzeit des digitalen Drehzahlreglers,
- Abtastfrequenz des Drehzahlreglers.

Der Integrator (I-Anteil) im Drehzahlregler hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Zeitkonstante T_n . Seine Aufgabe ist es, bleibende Regelabweichungen zwischen Drehzahl-Sollwert und Drehzahl-Istwert bei auftretenden Lastmomenten zu vermeiden. Die Parametrierung des Integrierers beeinflusst das Einschwingverhalten des Drehzahl-Istwerts. Normalerweise erfolgt dabei eine Einstellung für ein "aperiodisches Einschwingen".

Die beiden nächsten Abschnitte zeigen, dass auch die Massenträgheit einen wesentlichen Einfluss auf die Dynamik des Drehzahlreglers hat.



5.3.6 Beschleunigungs-Vorsteuerung

Die Beschleunigungs-Vorsteuerung bewirkt eine Erhöhung der Dynamik des Regelkreis-Führungsverhaltens. Diese Erhöhung der Dynamik ist unabhängig von der Zeitkonstante des Regelkreises.

Zu beachten ist, dass die Beschleunigungs-Vorsteuerung nicht die Dynamik der Störgrößen-Ausregelung wie z. B. Lastsprung beeinflusst. Diese wird ausschließlich von der Zeitkonstante des Drehzahl-Regelkreises bestimmt.

Für die Beschleunigungs-Vorsteuerung wird aus dem zeitlichen Verlauf des Drehzahl-Sollwerts ein Beschleunigungswert ermittelt und zur Stellgröße des Drehzahlreglers addiert. So kann ein Drehmoment an der Motorwelle schon zu einem Zeitpunkt entstehen, bevor der Regler eine Abweichung zwischen dem Drehzahl-Sollwert und dem Drehzahl-Istwert erkennt.

Falls der Drehzahl-Sollwert mit hochfrequenten Störungen behaftet ist, also stark "rauscht", muss dieser gefiltert werden, um das Drehmoment-Ripple klein zu halten. Auch hier hat das Filtern eine verzögernde Wirkung auf das Beschleunigungssignal und reduziert damit die Dynamik im Führungsverhalten. Zusätzlich kann der Vorsteuerwert noch gewichtet werden, in der Regel wird dieser Parameter jedoch auf 100 % eingestellt.

5.3.7 Spielfreie Lastankopplung

Das Ankoppeln einer Masse an einen Servomotor kann spielfrei oder spielbehaftet sein. In diesem Abschnitt wird die "spielfreie Lastankopplung" beschrieben.

Unter "spielfreier Lastankopplung" ist zu verstehen, dass die Last jeder Bewegung des Motors unmittelbar folgt, auch wenn es sich um kleinste Lageänderungen handelt. Häufig werden solche Antriebe auch mit "Direktantrieb" bezeichnet.

Durch die Ankopplung einer Masse erhöht sich das Massenträgheitsmoment J_{ges} gegenüber dem leer laufenden Motor. Bleibt der Drehmoment-Ripple trotz der höheren Trägheit innerhalb des zulässigen Bereiches, kann auch ein Antrieb mit spielfrei angekoppelter Last mit der gleichen Dynamik wie ein leer laufender Motor betrieben werden.

Erhöht sich jedoch die Massenträgheit J_{ges} soweit, dass das Drehmoment-Ripple den zulässigen Bereich verlässt, muss die Zeitkonstante des Filters für den Drehzahl-Istwert erhöht werden. Da, wie oben beschrieben, das Istwertfilter die Dynamik des Reglers einschränkt, ist es erforderlich, die Zeitkonstante des Regelkreises durch Verminderung von K_{p_n} zu erhöhen. Hier wird deutlich, dass Gebersysteme mit einer hohen Auflösung, die den Drehmoment-Ripple ohne hohes Istwertfilter klein halten, Vorteile für die Dynamik des Regelkreises bieten.

$$J_{\text{ges}} = J_{\text{Mot}} + J_{\text{ext}}$$

J_{ges} Gesamte Massenträgheit

J_{Mot} Massenträgheit des Motors

J_{ext} Massenträgheit der Last, reduziert auf die Motorwelle



5.3.8 Spielbehaftete Lastankopplung

Unter einer "spielbehafteten Lastankopplung" ist zu verstehen, dass die Last nicht jeder Bewegung des Motors unmittelbar folgt, d. h. der drehzahlgeregelte Motor bewegt sich, ohne dass sich die Last mitbewegt. Typischerweise ist das beim Anbau eines Getriebes an einen Motor der Fall.

Wird der Drehzahlregler auf die minimal mögliche Zeitkonstante parametriert und der Parameter J_{ges} auf die gesamte Massenträgheit $J_{\text{Mot}} + J_{\text{ext}}$, funktioniert das nur so lange, wie sich Motor und Last gemeinsam bewegen.

Wenn sich der Motor innerhalb des Spiels bewegt, gibt der Drehzahlregler zu hohe Drehmomente vor, da diesem das "Fehlen" der Last nicht bekannt ist. Als Folge der zu hohen Drehmomente wird die minimale Zeitkonstante des Regelkreises unterschritten und damit der Regler instabil. Damit dies nicht eintritt, muss die Verstärkung K_p des Reglers um den Faktor $J_{\text{Mot}} / (J_{\text{Mot}} + J_{\text{ext}})$ reduziert werden. Daraus ergibt sich dann die minimale Zeitkonstante des Drehzahlreglers mit spielbehafteter Lastankopplung:

$$T_{n, \text{Spiel}} = T_{n, \text{Motor}} \times \frac{J_{\text{Mot}} + J_{\text{ext}}}{J_{\text{Mot}}}$$

$T_{n, \text{Spiel}}$ Zeitkonstante des gesamten Antriebes

$T_{n, \text{Motor}}$ Zeitkonstante des leer laufenden Motors

J_{ext} Massenträgheit der Last, reduziert auf die Motorwelle

J_{Mot} Massenträgheit des Motors

Ein spielbehafteter Antrieb ist also grundsätzlich um das so genannte Massenträgheitsverhältnis langsamer als die minimal mögliche Zeitkonstante des Drehzahlreglers nach Abschnitt "Steifigkeit", siehe hierzu auch Seite 89. Wird z. B. eine Last mit der 100-fachen Motormassenträgheit angekoppelt und hat der Drehzahlregler eine minimal erreichbare Zeitkonstante T_n von 2 ms, dann ergibt sich für diesen Antrieb eine minimal mögliche Zeitkonstante von 202 ms.



5.4 Lageregelung

Der Lageregler wird im allgemeinen als P-Regler ausgeführt. Der Integrierer im unterlagerten Drehzahl-Regelkreis gewährleistet auch für den Lageregelkreis bei einer Störgröße in Form eines Lastmoments, dass keine Regelabweichung bestehen bleibt.

Berücksichtigt man das Übertragungsverhalten des unterlagerten Drehzahlreglers nach Abschnitt "Drehzahlregler" auf Seite 86 mit einem Filter 1. Ordnung, dann ergibt sich für den Lageregler ein System 2. Ordnung. In den allermeisten Anwendungsfällen ist ein Einschwingen des Lage-Istwerts ohne Überschwingen gefordert, d. h. "kritische Dämpfung" und kein Überfahren der Zielposition. Dies erreicht man mit der höchstmöglichen Dynamik durch die folgende Parametrierung des P-Lagereglers:

$$K_{p_x} = \frac{K_{p_n}}{2}$$

K_{p_x} P-Anteil des Lagereglers

K_{p_n} P-Anteil des Drehzahlreglers

Steifigkeit

Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass für die Einstellung der Parameter des Lage- und Drehzahl-Regelkreises vielfältige Zusammenhänge bestehen. Um den Inbetriebnahme-Vorgang zu erleichtern, hat SEW-EURODRIVE die Größe "Steifigkeit" eingeführt. Mit diesem Wert kann die gewünschte Dynamik des Antriebsstrangs gewählt werden. Bei der Inbetriebnahme kann man sich damit sukzessive an die Stabilitätsgrenze des Regelkreises herantasten. Dabei hat man die Gewähr, dass die Randbedingungen, z. B. kleinstmöglicher Drehzahl-Istwertfilter unter Einhaltung des maximal zulässigen Drehmoment-Ripples bei einer gegebenen Lageauflösung des Gebers, eingehalten werden.

5.5 Begriffsdefinitionen

Begriff / Abkürzung	Definition / Erklärung
HIPERFACE® (Hiperface)	High Performance Interface. Eingetragenes Warenzeichen der Firma Sick Stegmann GmbH
Integrierer	Erzeugt eine Stellgröße, die stetig größer wird, je länger die Abweichung ansteht.
Kp	Proportionalverstärkung des Reglers
Kv	Gewichtungsfaktor der Vorsteuerung
P-Glied	Proportionalverstärker
PWM	Pulsweiten-Modulation
Regelkreis	Besteht aus: Soll-/Istwert-Vergleich, Regler, Reglerstrecke
Ripple / Welligkeit / Rauschen / Cogging	Schwingungen einer Größe um ihren Mittelwert
Ti _h	Nachstellzeit des Integrierers
Zeitkonstante / Dynamik eines Regelkreises	Reaktionsgeschwindigkeit eines Regelkreises
Totzeit	Verzugszeit eines Regelkreises, bis eine Änderung erfolgt
U/f-Verfahren	Spannung/Frequenz-Regelverfahren



6 Industrieller Einsatz

6.1 Netzverhältnisse

Heutige Industrienetze werden mit einer sinusförmigen Spannung und einer Nennfrequenz im Bereich von 50 - 60 Hz betrieben. Servoverstärker können mit den meisten Netzformen wie z. B. TN- und TT-Netzen betrieben werden.

Spannungsschwankungen im Netz haben Einfluss auf das Betriebsverhalten des Antriebes. Bei Überschreiten des Nennspannungs-Bereiches schaltet der Verstärker ab, um Schäden zu vermeiden. Bei Unterschreiten des Nennspannungs-Bereich liefert der Motor nicht mehr die in den technischen Daten angegebenen Nennwerte.

Durch Netzdrosseln und einen eingebauten Überspannungsschutz sind Servoverstärker gegen Spannungsspitzen, die durch andere Verbraucher oder Kompensationsanlagen ohne Drosseln ins Netz gelangen, unempfindlicher.

6.2 Umgebungsbedingungen

Die für die Servoverstärker als zulässig definierten Umgebungsbedingungen sind bei der Projektierung besonders zu beachten.

Wichtige Umgebungsbedingungen sind:

- Aufstellungshöhe
Moderne Servoverstärker sind meist so bemessen, dass sie bis zu einer Aufstellungshöhe von 1000 m ohne Einschränkungen betrieben werden können. Werden die Geräte in größeren Höhen betrieben, so ist ein Derating, d. h. eine Leistungsreduzierung, zu beachten. Diese Leistungsreduzierung wird verursacht durch die verminderte Wärmeabfuhr aufgrund des geringeren Luftdrucks und der geringeren Überschlagsfestigkeit in dieser Umgebung.
- Umgebungstemperatur
Temperaturbereiche von ca. 0 °C - 45 °C sind marktüblich. Bei höheren Temperaturen muss aufgrund verminderter Wärmeabfuhr unbedingt ein Derating beachtet werden.
- Temperatur bei Lagerung
Für die Lagertemperatur wird normalerweise ein größerer Temperaturbereich zugelassen als für den Betrieb, da im Gerät keine abzuführende Wärme entsteht. Es ist jedoch zu beachten, dass die niedrigste zulässige Temperatur nicht unterschritten wird, da sonst die Kondensatoren im Zwischenkreis tiefentladen werden. Nach längerer Lagerung und nach einer Tiefentladung müssen die Kondensatoren vor Anschluss an die Netzspannung formiert werden.
- Verschmutzungsklasse nach IEC 60664-1; VDE 0110-1.
- Störfestigkeit.

6.3 Hinweise zum Motor

Servoverstärker arbeiten mit vektororientierten Regelverfahren. Um dieses Verfahren zu ermöglichen und um optimale Regelergebnisse zu erzielen, sind genaue Daten des angeschlossenen Motors erforderlich. Daher ist es herstellerseitig meist nur erlaubt, solche Motoren an den Servoverstärker anzuschließen und zu betreiben, deren Daten dem Servoverstärker bzw. dem Inbetriebnahme-Tool bekannt sind. Wenn so genannte "Fremdmotoren" in Betrieb genommen werden, sind diese zuerst auszumessen, um den Regler mit genauen Daten abzustimmen zu können.

Außerdem müssen Motoren und Servoverstärker bei der Projektierung hinsichtlich der Leistung aufeinander abgestimmt werden. Es muss sichergestellt sein, dass der Servoverstärker die für die Spitzenmomente erforderlichen Ströme bereitstellen kann, siehe hierzu auch Kapitel 8 "Projektierung".



6.3.1 Synchrone Motoren

Synchrone permanent erregte Servomotoren sind meist unbelüftet. Da die Wärmeabfuhr über Konvektion erfolgt, spielen die Lackierung und die Verschmutzung des Motors eine wesentliche Rolle. Die Schutzart dieser Motoren ist meist IP65, dies muss bei der Projektierung anhand des Motor-Datenblattes überprüft werden.

Optional kann in vielen Fällen das thermische Grenzmoment mit Hilfe eines Fremdlüfters erhöht werden. Hierzu geben die Motorkennlinien weiteren Aufschluss.

6.3.2 Asynchrone Motoren

Asynchrone Servomotoren sind meist eigenbelüftet, weshalb bei dauerhaften Belastungen im unteren Drehzahlbereich der thermischen Auslastung besondere Aufmerksamkeit zu schenken ist. Der Arbeitspunkt, d. h. das effektive Drehmoment bei mittlerer Drehzahl, muss unterhalb bzw. darf maximal auf der thermischen Grenzkennlinie liegen. Aufgrund der reduzierten Kühlleistung bei niedrigen Drehzahlen weist demzufolge diese Kennlinie in diesem Bereich auch kleinere Werte auf, siehe auch Kapitel 2.6.1 "Motorkennlinie".

6.4 Leitungsverlegung

Die Beschaffung und Verlegung der Leitungen spielt eine große Rolle beim Einsatz von Servoantrieben. Die Dimensionierung muss auf den fließenden Strom ausgerichtet sein, um den Spannungsfall auf den zulässigen Wert zu begrenzen. Weitere Kriterien zur Dimensionierung sind den geltenden Vorschriften zu entnehmen.

Die Verlegung der Leitungen, speziell im Kabelkanal oder auf Kabelpritschen, erfordert größte Sorgfalt. Eine räumliche Trennung zwischen leistungsführenden Leitungen und Elektronikleitungen reduziert elektromagnetische Störeinflüsse. Geschirmte Leitungen eignen sich ebenfalls sehr gut, um elektromagnetische Störungen in der Anlage zu vermindern. Weitere Informationen sind den anlagen-, landes- und herstellerspezifischen Vorschriften zu entnehmen.

6.5 Elektromagnetische Störung / Elektromagnetische Verträglichkeit

Dieses Kapitel erläutert in Kürze die wichtigsten Begriffe zum Thema "Elektromagnetische Verträglichkeit".

Weiterführende Literatur

Dem Leser wird für weitergehende Informationen die SEW-EURODRIVE-Druckschrift "Praxis der Antriebstechnik: EMV in der Antriebstechnik" empfohlen.

Dort werden die Themen

- Störmechanismus,
- EMV-Planung,
- EMV-Maßnahmen,
- Normen und Gesetze,
- EMV-Begriffe,
- Wirkungsweise von so genannten EMV-Komponenten wie Netzfilter, Drossel, etc. ausführlich behandelt.



Begriffserklärung Elektromagnetische Störungen werden in den entsprechenden Gesetzen als elektromagnetische Erscheinung definiert, die die Funktion eines Gerätes beeinträchtigen können. Ursachen elektromagnetischer Störungen können sein:

- ESD = Entladung statischer Elektrizität,
- Surge = Stoßspannung wie Gewitterauswirkungen oder Schaltvorgänge in einem Netz,
- Leitungsgebundene und gestrahlte HF-Einkopplung,
- Burst = schnelle (transiente) Störgrößen durch öffnende Kontakte induktiver Stromkreise.

Auf dem Gebiet der elektromagnetischen Störungen werden folgende Begriffe unterschieden:

- Störfestigkeit: Die Fähigkeit eines Gerätes, während einer elektromagnetischen Störung ohne Funktionsbeeinträchtigung zu arbeiten (EMB = elektromagnetische Beeinflussbarkeit, Immissionsverhalten). Die Störfestigkeit ist ein Qualitätsmerkmal der Störsenke.
- Störaussendung: Die Fähigkeit eines Gerätes, elektromagnetische Signale zu erzeugen, die bei anderen Geräten Funktionsbeeinträchtigungen verursachen können (EMA = elektromagnetische Aussendung, Emissionsverhalten). Störaussendung ist ein Qualitätsmerkmal der Störquelle.

Normen und Richtlinien

Servoerstärker und Zubehör sind Komponenten, die für den Einbau in Maschinen und Anlagen gedacht sind und daher die EMV-Produktnorm EN 61800-3 "Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe" erfüllen müssen. Darüberhinaus sind noch anlagen- und länderspezifische Vorschriften zu beachten.

Die elektromagnetische Verträglichkeit der Komponenten einer Anlage und der Gesamtanlage ist von großer Wichtigkeit. EMV-Richtlinien definieren die zulässigen Verhältnisse.

Dabei werden folgende Normen angewandt:

EMV-Produktnorm für drehzahlabhängige Antriebssysteme	
EN 61800-3	
Störaussendung	Störfestigkeit
EN 550xx	EN 61000-4 .. x

Bei der Störaussendung wird unterschieden zwischen

- Grenzwertklasse A (EN 55011): Das Gerät ist vorgesehen für den Einsatz in Wohngebieten, vorausgesetzt die Anlagenprojektierung und Installation wird von Elektrofachkräften (Grundwissen bezüglich Maßnahmen zur Einhaltung der EMV kann vorausgesetzt werden) durchgeführt. Häufig in Industriegebieten anzutreffen, da dort meist höhere Störpegel zugelassen werden.
- Grenzwertklasse B (EN 55011): In Wohngebieten müssen üblicherweise niedrigere Störpegel eingehalten werden, um z. B. keine Rundfunkempfänger zu stören.

Bei der Projektierung einer Servoapplikation ist es wichtig zu wissen, welcher Grenzwert eingehalten werden muss und welche Maßnahmen dafür notwendig sind. Ein Servoverstärker alleine kann nicht die Einhaltung einer Grenzwertklasse garantieren, dies wird noch maßgeblich bestimmt durch

- evtl. notwendige Zusatzkomponenten wie z. B. Netzfilter, Drosseln, geschirmte Motorleitungen etc.
- eine EMV-gerechte Installation.



Umsetzung der EMV-Maßnahmen

Es liegt in der Verantwortung des Geräteherstellers, konkrete Vorschläge zu machen, wie die EMV-gerechte Installation seines Servoverstärkers durchzuführen ist. Die Verantwortung für die Umsetzung trägt jedoch der Anlagenbauer, bzw. Anlagenbetreiber. Dieses Kapitel kann nur allgemeine Hinweise geben und ersetzt keinesfalls hersteller-, anlagen- oder landesspezifische Vorschriften oder gesetzliche Regelungen.

Servoverstärker sind teilweise schon werkseitig mit einem Netzfilter ausgerüstet, wodurch die netzseitige Störaussendung bereits minimiert wird, ohne dass der Anwender hierfür noch weitere Maßnahmen ergreifen muss. Für die motorseitige Einhaltung von Grenzwertklassen werden häufig geschirmte Motorkabel oder Ausgangsdrosseln verwendet. Da die zur Einhaltung von EMV-Grenzwertklassen erforderlichen Maßnahmen von Gerät zu Gerät sehr unterschiedlich sein können, muss die jeweilige Produktdokumentation herangezogen werden.

An dieser Stelle wird nochmals auf die Druckschrift "Praxis der Antriebstechnik: EMV in der Antriebstechnik" von SEW-EURODRIVE verwiesen, die wissenswertes zum Thema EMV behandelt.

6.6 Geräteschnittstellen

Eine Vielzahl der Geräteschnittstellen ermöglicht unterschiedliche Vernetzungsmöglichkeiten.

Die nachstehenden Kapitel geben einen Überblick über die wichtigsten und am häufigsten anzutreffenden Vernetzungsmöglichkeiten industrieller Geräteschnittstellen.

6.6.1 Feldbussysteme: Anbindung an übergeordnete Steuerung

Feldbussysteme bieten eine digitale Verknüpfung von Komponenten der industriellen Automatisierungstechnik.

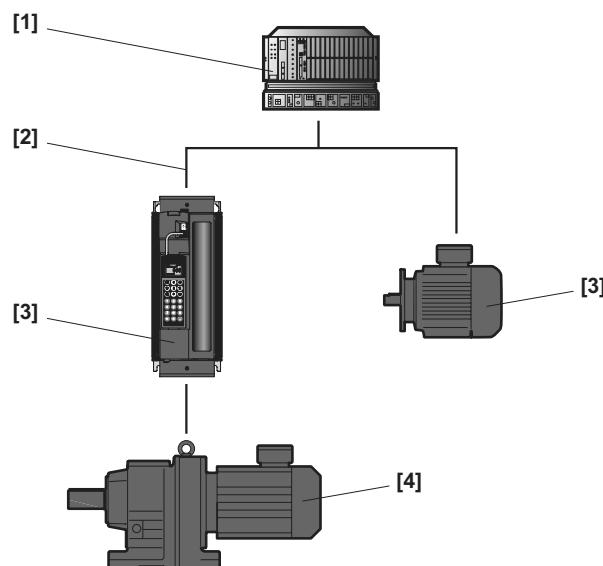


Bild 83: SPS-Steuerung mit Feldbus-Master und Feldbus-Slave

56324axx

- [1] Feldbus-Master (Steuerung)
- [2] Feldbus
- [3] Feldbus-Slaves
- [4] Getriebemotor



Der Feldbus-Master hat die Aufgabe, den Datenverkehr auf dem Feldbus zu koordinieren. Üblicherweise wird eine **speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)** oder ein Industrie-PC verwendet. Als unterlagerte **Slaves** kommen Antriebssysteme sowie intelligente Sensoren und Aktoren zum Einsatz.

Zyklischer Datenverkehr

Der Datenverkehr kann zyklische und azyklische Daten beinhalten. Unter dem Begriff Prozessdaten versteht man die zyklischen Daten, die zeitkritisch sind und schnell bearbeitet und transferiert werden müssen. Die Prozessdaten unterteilen sich in Prozess-Ausgangsdaten und Prozess-Eingangsdaten. Prozess-Ausgangsdaten sind Sollwerte, die vom Master an einen Slave gesendet werden. Prozess-Eingangsdaten sind Istwerte, die ein Slave an den Master zurückmeldet.

Azyklischer Datenverkehr

Neben den Prozessdaten stellen die meisten Feldbussysteme einen Parameterkanal zur Verfügung, der zumeist azyklisch arbeitet und somit den zyklischen Datenverkehr nicht oder nur geringfügig beeinflusst. Mit Hilfe von Lese- und Schreibdiensten hat der Master die Möglichkeit, neben den fest definierten Soll- und Istwerten auf weitere Geräteinformationen zuzugreifen.

Sehr häufig handelt es sich dabei um

- das Auslesen einzelner Geräteinformationen wie z. B. eines Fehlerspeichers,
- das Lesen und Schreiben ganzer Datensätze wie z. B. Parametersätze, Messaufzeichnungen, Kurvenscheiben-Stützpunkte usw.

Verbreitete Feldbussysteme sind z. B.:

- PROFIBUS DP,
- DeviceNet,
- INTERBUS-S.

Beispielhaft werden im Folgenden Eigenschaften der Bussysteme PROFIBUS DP und INTERBUS-S aufgeführt.

6.6.2 Feldbussystem Profibus DP

Eigenschaften

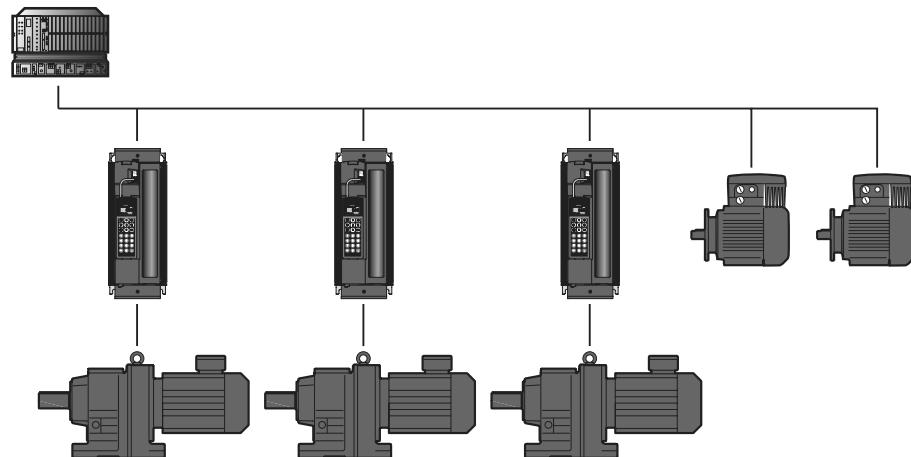
- Profibus steht für **"Process Field Bus"** und wurde von der **SIEMENS AG** entwickelt.
- In der PROFIBUS-Nutzerorganisation haben sich die Weltmarktführer der Automatisierungstechnik zusammengeschlossen. Gemeinsam mit den Mitgliedern wird die internationale Durchsetzung von PROFIBUS gefördert. Hauptaufgaben der Organisation sind:
 - gemeinsame Marketing-Aktivitäten,
 - Verbreitung von Informationen,
 - Weiterentwicklung der Technologie,
 - Vergabe und Verwaltung von PROFIBUS-Identnummern.
- Üblicherweise wird das Protokoll "PROFIBUS DP" ("Dezentrale Peripherie") genutzt:
 - Protokollerweiterung "DP-V1" (Version 1: azyklische Parameterdienste),
 - Protokollerweiterung "DP-V2" (Version 2: Takt-Synchronisierung).
- Linien-Topologie auf Basis RS485:
 - 12 MBit/s bis 100 m Leitungslänge,
 - 9,6 kBit/s bis 1,5 km Leitungslänge.



- Übertragungsmedium ist meist Kupfer, Lichtwellenleiter sind äußerst selten.
- Bis zu 126 Teilnehmer möglich, in dieser Anzahl jedoch mit entsprechend geringer Performance. Der Buszugriff erfolgt über Polling.
- Der Master benötigt eine **Gerätestammdatei** (GSD) von jedem Slave (Teilnehmer-typ).

Beispiel

Nachstehend das Beispiel eines Profibus-Aufbaus mit zentral im Schaltschrank platzierten Busteilnehmern, hier MOVIDRIVE®-Servoverstärker von SEW-EURODRIVE, und dezentral angeordneten Busteilnehmern, hier MOVIMOT® von SEW-EURODRIVE.



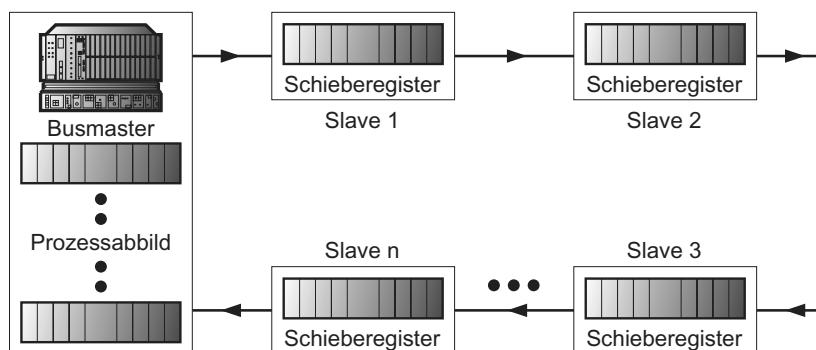
56325axx

Bild 84: Beispiel einer Profibus-Topologie

6.6.3 Feldbussystem INTERBUS-S

Eigenschaften

- INTERBUS-S wurde von der Fa. Phoenix Contact GmbH & Co entwickelt.
- Der INTERBUS-Club e.V. ist eine internationale Vereinigung von Unternehmen mit dem gemeinsamen Ziel, INTERBUS technologisch und in seiner Verbreitung voranzutreiben, sowie Automatisierungslösungen mit INTERBUS und komplementären Technologien zu fördern.
- Ring-Topologie auf Basis RS485:
 - Jeder Teilnehmer wirkt als Verstärker / Repeater.
 - Bis 2 MBit/s Übertragungsgeschwindigkeit.
 - Sehr niedrige Zykluszeit aufgrund hoher Dateneffizienz.
- Summenrahmenprotokoll: An Stelle von einzelnen Telegrammen an jeden Teilnehmer sendet der Master ein Summentelegramm, in dem die Einzeltelegramme an jeden Teilnehmer aneinander gereiht sind. Hierdurch wird die Zykluszeit beträchtlich reduziert.
- Daten werden auf ein Register geschoben, siehe Bild 85.
- Einfach auf Lichtwellenleiter-Technik umrüstbar.
- Einfache Fehlerlokalisierung.
- Gerätetausch im Betrieb aufgrund der Ringstruktur nicht möglich.


Beispiel


56326axx

Bild 85: Blockdarstellung eines Interbus-S-Feldbusaufbaus

6.6.4 Ethernet in Feldbus-Anwendungen

Die amerikanische Firma XEROX brachte Mitte der 70er Jahre ein lokales Netzwerk mit der Bezeichnung ETHERNET auf den Markt, das sich in der PC-Welt etabliert hat.

Ursprünglich war Ethernet jedoch nicht echtzeitfähig und konnte nicht für Feldbusanwendungen genutzt werden. In den letzten Jahren haben eine Vielzahl von Unternehmen mit der Entwicklung von echtzeitfähigen Profilen die Basis für den Einsatz in der industriellen Automatisierungstechnik geschaffen.

Solche Anwendungen sind beispielhaft:

PROFINET	: SIEMENS AG
MODBUS TCP	: AEG Schneider
Powerlink	: B&R
EtherCAT	: Beckhoff
EtherNet / IP	: Rockwell Automation / Allen Bradley

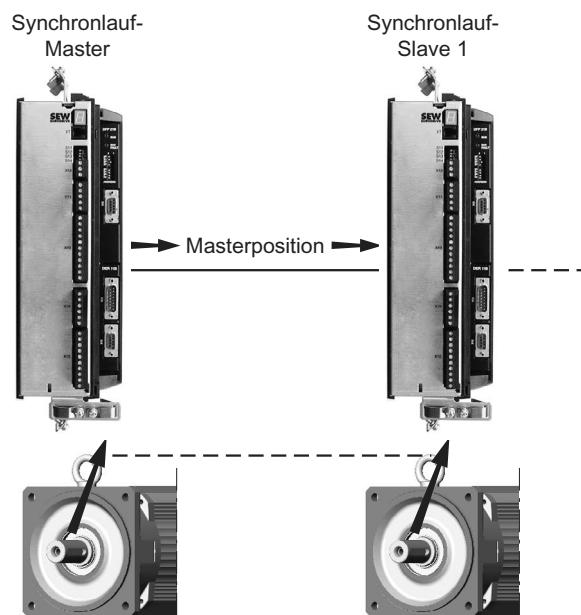


6.6.5 Achs-zu-Achs-Kommunikation

Werden mehrere Achsen direkt miteinander vernetzt, können diese Achsen untereinander sowohl zeitkritische und zyklische Daten als auch azyklische Parameterinformationen austauschen.

Ein Beispiel für eine solche Anwendung ist der Winkelsynchronlauf, bei dem die Position des Masters synchronisiert an den Slave übertragen wird. Auf diese Weise kann z. B. eine "elektronische Welle" realisiert werden.

Für eine Achs-zu-Achs-Kommunikation kommen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Datenübertragung CAN- oder serielle Schnittstellen in Frage.



56332axx

Bild 86: Prinzipieller Aufbau einer elektronischen Welle mit synchronisiertem Slave (Winkelsynchronlauf)

Die Achsen können zusätzlich über einen Feldbus vernetzt sein, um mit einer übergeordneten Steuerung, z. B. einer SPS, zu kommunizieren. Der Feldbus und die Achs-zu-Achs-Kommunikation beeinflussen sich dabei nicht.

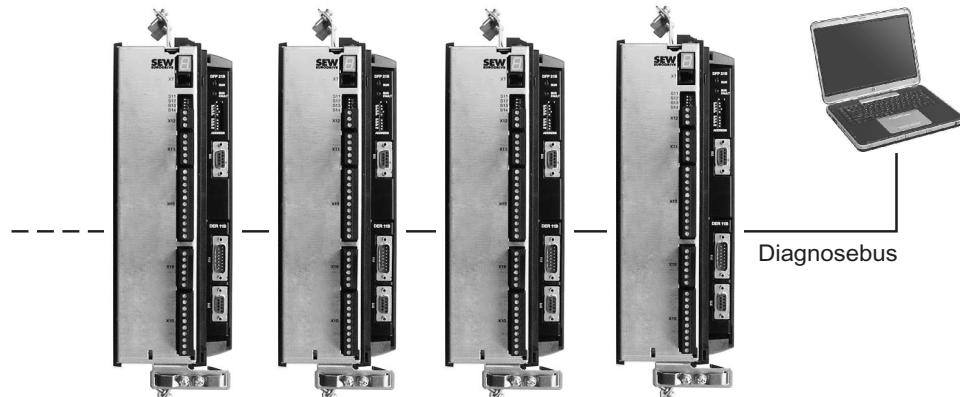


6.6.6 Diagnosebus

Wird in die serielle Verbindung von Achse zu Achse zusätzlich ein PC eingebunden, besteht die Möglichkeit, das Netzwerk auch als Diagnosebus zu nutzen. Der PC tauscht hierbei Parameterdaten über den Parameterkanal mit den Achsen aus und visualisiert diese Daten auf dem PC.

Der Anwender kann mit Hilfe eines Diagnose-Tools folgende Aktionen durchführen:

- die Inbetriebnahme der Achsen,
- die Diagnose der Achsen,
- die Geräteparameter aus den Achsen herauslesen und im PC abspeichern.



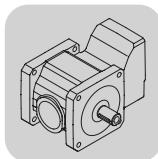
56333axx

Bild 87: Diagnosebus

Neben seriellen Schnittstellen werden immer häufiger CAN- oder Ethernet-basierende Systeme als Diagnosebus eingesetzt.

6.7 Begriffsdefinitionen

Begriff / Abkürzung	Definition / Erklärung
Derating	Leistungsreduzierung durch thermische Belastung
ESD	Entladung statischer Energie
Surge	Stoßspannung
Burst	Schnelle, transiente Störgrößen
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EMB	Elektromagnetische Beeinflussbarkeit
EMA	Elektromagnetische Aussendung
Polling	Sendeauftrag zur Synchronisation bei der Datenübertragung



7 Servogetriebe

In seiner Funktion als Wandler von Drehmoment und Drehzahl ist das Getriebe der zentrale Baustein eines Servo-Getriebemotors.

7.1 Anforderungen an ein Servogetriebe

Aufgrund der meist kurzen Taktzeiten und der daraus resultierenden hohen Beschleunigungen bei heutigen Servo-Anwendungen werden an die Servogetriebe besondere Anforderungen gestellt:

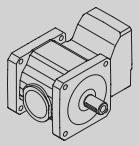
- niedriges Massenträgheitsmoment,
- geringes Verdrehspiel,
- hohe Verdrehsteifigkeit,
- hoher Wirkungsgrad,
- Übertragung von sehr hohen Drehmomenten aufgrund hoher Beschleunigungswerte,
- schwungssarm,
- idealerweise ganzzahlige Übersetzungen,
- langlebig und wartungsarm,
- kompakt und leicht.

In der folgenden Tabelle werden Anforderungen an Servogetriebe in Abhängigkeit von der Anwendung gezeigt.

Anwendung	mittlere Abtriebsdrehzahl	Max. Querkraft	Max. Beschleunigungs-moment	Bremsmoment	Massenträgheit	Steifigkeit	Gleichförmigkeit der Bewegung	Lebensmittelverträgliche Antriebe	Explosionsgeschützte Ausführung
Holzbearbeitung		x	x	x	x	x			x
Druckmaschinen	x				x	x	x		x
Werkzeugmaschinen									
Werkzeugwechsler			x	x	x	x			
Drehtische					x	x	x		
Getränkeindustrie									
Füller			x	x				x	
Transferachsen		x		x		x			
CD-Industrie			x		x	x	x		
Verpackung	x		x		x	x	x	x	

Ein niedriges Massenträgheitsmoment des Getriebes ist Voraussetzung für die Realisierung eines hochdynamischen Antriebs. Besonders bei Antrieben, die schnell beschleunigen, ist ein dynamisches Getriebe mit hohem Wirkungsgrad unumgänglich.

Für den Positionierbetrieb werden ein möglichst geringes Verdrehspiel und eine hohe Verdrehsteifigkeit gefordert. Speziell für die Anforderungen der Servotechnik wurden Getriebe entwickelt, deren Verdrehspiel im Bereich von nur 3 - 6 Winkelminuten liegt.



7.2 Allgemeine Getriebeübersicht

Abhängig von der Richtung des Kraftflusses wird zwischen folgenden Getriebetypen unterschieden:

- Koaxialgetriebe,
- Parallelwellengetriebe,
- Winkelgetriebe.

Bei Koaxial- und Parallelwellengetrieben liegen die eintreibende und die abtriebende Welle in einer Ebene. Somit ist der Kraftfluss geradlinig. Bei Winkelgetrieben stehen die eintreibende und die abtriebende Welle senkrecht zueinander, der Kraftfluss wird rechtwinklig umgelenkt.

Getriebearten		
Rädergetriebe	Riemengetriebe	Kettengetriebe
Stirnrad	Zahnriemen	Rollenkette
Planeten	Flachriemen	Zahnkette
Kegelrad	Keilriemen	

In den folgenden Abschnitten werden die in der Servotechnik am häufigsten eingesetzten Getriebearten kurz beschrieben.

7.2.1 Servo-Planetengerüste

Bei Servo-Applikationen werden besonders häufig Planetengerüste eingesetzt.

Die Lastverteilung auf mehrere Planetenräder führt gegenüber Stirnradgetrieben zu einer deutlich höheren Leistungsdichte und somit zu einem kleinerem Bauvolumen. Durch eine optimierte Verzahnungsgeometrie sowie engste Fertigungstoleranzen gewährleisten Planetengerüste Verdrehwinkel im Bereich von 3 - 6 Winkelminuten, in besonderen Fällen sogar von nur einer Winkelminute. Großzügig bemessene Wellendurchmesser garantieren eine hohe Verdrehsteifigkeit und damit eine hohe Positioniergenauigkeit. Außerdem haben Planetengerüste einen hohen Wirkungsgrad und sind geräusch- und wartungsarm.

Besonders kompakte Abmessungen können durch einen Motordirektanbau erzielt werden. Die neuen Servo-Getriebemotoren von SEW-EURODRIVE bieten erstmals die Möglichkeit, Servogetriebe ohne Verwendung eines Adapters direkt an synchronen Servomotoren zu montieren. Bei diesen integrierten Servo-Getriebemotoren sind alle Welle-Nabe-Verbindungen formschlüssig und spielfrei ausgeführt.

Die wichtigsten Eigenschaften der spielarmen Planetengerüste von SEW-EURODRIVE sind:

- hohe zulässige Momente,
- hohe Wirkungsgrade,
- hohe Verdrehsteifigkeit,
- zuverlässig und langlebig,
- fein abgestufte Übersetzungen bis 1:100,
- geringe Betriebstemperatur,
- konstant geringe Verdrehspiele,
- hohe zulässige Querkräfte.

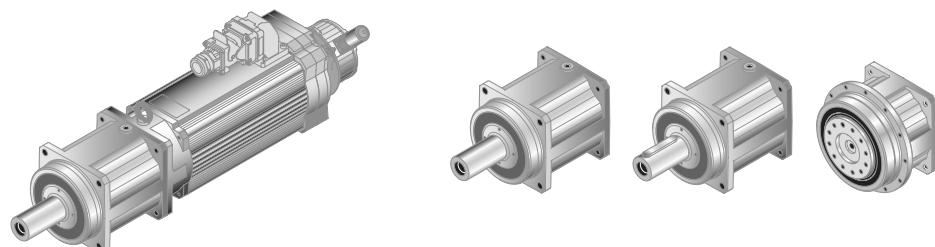
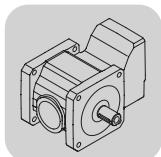
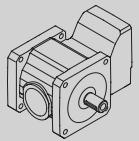


Bild 88: Beispiel Servo-Planetengetriebe

Servo-Planetengetriebe PSF. mit B5-Abtriebsflansch zur Befestigung		
Typ		Bedeutung
	PSF..	Servo-Planetengetriebe mit Vollwelle.
	PSKF..	Servo-Planetengetriebe mit Vollwelle und Passfeder.
	PSBF..	Servo-Planetengetriebe mit Flanschblockwelle nach EN ISO 9409.



7.2.2 Servo-Kegelradgetriebe

Servo-Kegelradgetriebe der Serie BSF.. von SEW-EURODRIVE sind zweistufige Getriebe für Anwendungen in der Servotechnik. Sie haben eine schrägverzahnte Stirnradstufe am Eintrieb und eine achsversetzte Kegelradstufe am Abtrieb. Die Gehäuse sind einteilig aufgebaut. Auch bei den Servo-Kegelradgetrieben werden durch den von SEW-EURODRIVE realisierten Motordirektanbau besonders kompakte Abmessungen erzielt.

Die wichtigsten Eigenschaften der Servo-Kegelradgetriebe von SEW-EURODRIVE sind:

- hohe zulässige Momente,
- hohe zulässige Querkräfte,
- zuverlässig und langlebig,
- fein abgestufte Übersetzungen bis 1:40,
- verschleißfrei laufende Verzahnung,
- Höchstmaß an Variabilität,
- kompakte und leichte Bauweise,
- konstant geringe Verdrehspiele.

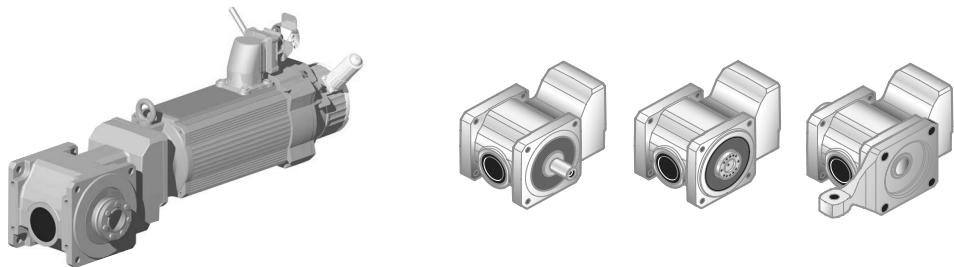
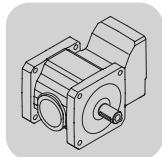


Bild 89: Beispiel Servo-Kegelradgetriebe

Ausführungs-arten spielarmer Kegelradgetriebe

Servo-Kegelradgetriebe BSF.. mit B5-Abtriebsflansch zur Befestigung		
Typ		Bedeutung
	BSF..	Servo-Kegelradgetriebe mit Vollwelle.
	BSKF..	Servo-Kegelradgetriebe mit Vollwelle und Passfeder.
	BSBF..	Servo-Kegelradgetriebe mit Flanschblockwelle nach EN ISO 9409.
	BSHF..	Servo-Kegelradgetriebe mit Hohlwelle und Schrumpfseite gegenüber der Abtriebsseite.



7.2.3 Stirnradgetriebe

Da Stirnradgetriebe kostengünstig herstellbar sind und mit ihrer einfachen und robusten Bauweise einer Vielzahl von Anforderungen genügen, werden sie bei vielen Anwendungen eingesetzt.

Bei Stirnrad-Flachgetrieben verlaufen eintreibende und abtriebende Welle parallel zueinander. Deshalb ist der Gesamtantrieb kurz und schmal, was sich besonders bei begrenzten Platzverhältnissen als vorteilhaft erweist.

Stirnradgetriebe werden in der Servotechnik üblicherweise in spielermer Ausführung eingesetzt.

Die wichtigsten Eigenschaften von Stirnradgetrieben sind:

- günstiger Preis,
- viele Kombinationsmöglichkeiten,
- großer Übersetzungs- und Drehmomentbereich; Getriebeaufbau: ein-, zwei-, dreistufig; Doppelgetriebe,
- hoher Wirkungsgrad,
- optional mit reduziertem Verdrehflankenspiel.

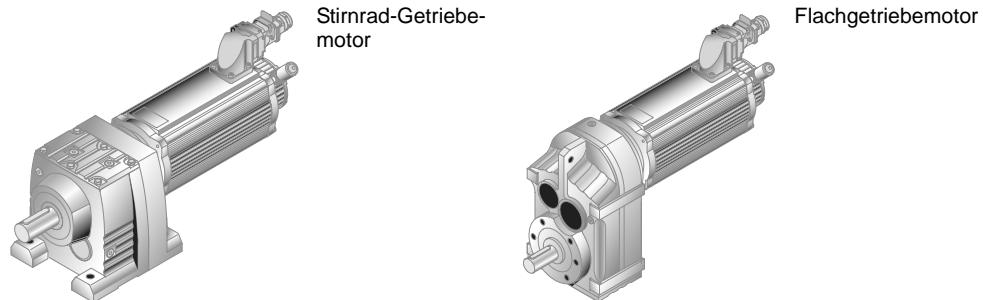
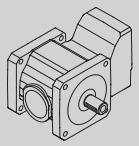


Bild 90: Beispiel Stirnrad-Getriebemotoren



7.2.4 Kegelradgetriebe

Bei beengtem Einbauraum kommen häufig Kegelradgetriebe zum Einsatz, da sie aufgrund des Winkelabtriebes sehr kompakt bauen.

Kegelradgetriebe sind verfügbar mit

- Hohlwelle mit Passfeder,
- Hohlwelle mit Schrumpfscheibe,
- Vollwelle,
- Vielkeilausführung.

Außerdem bieten die beiden Ausführungsarten, Befestigungsflansch oder Aufsteckausführung, viele Möglichkeiten, sie in die unterschiedlichsten Anlagen zu integrieren. Für Servo-Applikationen eignen sich aufgrund der hohen Beschleunigungen und häufigen Lastwechsel Kegelradgetriebe in spielarmer Ausführung.

Die wichtigsten Eigenschaften von Kegelradgetrieben sind:

- geringer Platzbedarf durch Winkelabtrieb, kurze Baulänge in Achsrichtung,
- optimal in die Anlage integrierbar,
- umfassende Palette an Bauformen und Ausführungsarten,
- viele Kombinationsmöglichkeiten,
- großer Übersetzungs- und Drehmomentbereich; Getriebeaufbau: dreistufig; Doppelgetriebe,
- hoher Wirkungsgrad,
- hohes Anlaufmoment.

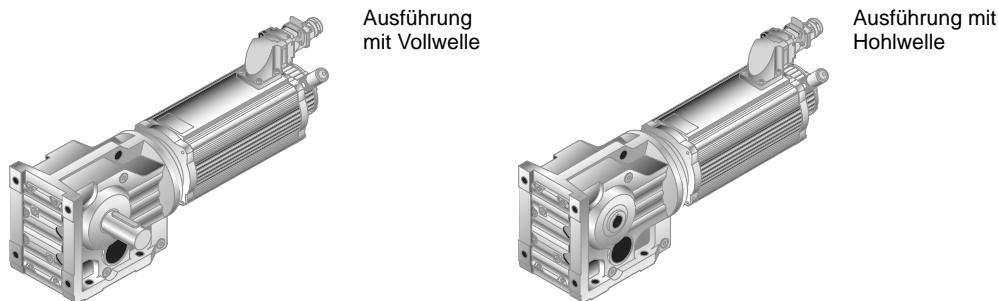


Bild 91: Beispiel Kegelrad-Getriebemotoren



8 Projektierung

8.1 Allgemeine Hinweise

Für die Projektierung eines Servoantriebes müssen neben einem Fahrdiagramm, das den genauen Fahrzyklus beschreibt, noch eine Vielzahl weiterer Angaben über die Einsatz- und Umgebungsbedingungen gemacht werden. Zur Auslegung des Antriebes werden zunächst Daten wie Masse, Stellbereich, Informationen zum mechanischen Aufbau usw. der anzutreibenden Maschine benötigt.

Mit den berechneten Drehmomenten und Drehzahlen des Antriebes lässt sich unter Berücksichtigung sonstiger mechanischer Forderungen sowie Umgebungs- und Einsatzbedingungen der passende Servoantrieb bestimmen.

Die Projektierung eines Servoantriebes und eines linearen Servomotors wird nachfolgend anhand je eines praktischen Beispiels veranschaulicht.



8.2 Daten zur Antriebs- und Getriebeauslegung

Damit die Komponenten für einen Antrieb eindeutig festgelegt werden können, müssen bestimmte Daten bekannt sein bzw. bestimmt werden. Diese sind:

Daten für die Auslegung eines Servo-Getriebemotors

Daten für die Auslegung eines Servo-Getriebemotors	
ΔS	Positioniergenauigkeit [mm]
ED	Relative Einschaltdauer %
H	Aufstellungshöhe [m ü. NN]
$\eta_{Getriebe}$	Wirkungsgrad des Getriebes -
η_L	Last-Wirkungsgrad -
i	Getriebeübersetzung -
I_0	Nennstrom [A]
I_{eff_Motor}	effektiver Motorstrom [A]
$I_{N_Inverter}$	Nennstrom des Servoverstärkers [A]
$IP..$	Geforderte Schutzart -
ϕ	Verdrehspiel [']
ϑ_{Umg}	Umgebungstemperatur [°C]
J_{ext}	Massenträgheitsmoment (extern) reduziert auf die Motorwelle [kgm ²]
$J_{Getriebe}$	Massenträgheitsmoment des Getriebes [kgm ²]
J_{Mot}	Massenträgheitsmoment des Motors [kgm ²]
k	Massenträgheitsverhältnis J_{ext} / J_{Mot} -
M_0	Nennmoment [Nm]
$M1 - M6$	Bauform -
$M_1...M_n$	Abtriebsmoment im Zeitabschnitt t_1 bis t_n [Nm]
$M_{a kub}$	Kubisches Abtriebsmoment [Nm]
$M_{a max}$	Maximales Abtriebs-Drehmoment [Nm]
M_B	Bemessungs-Drehmoment [Nm]
M_{Br_Motor}	Bremsmoment des Motors [Nm]
M_{DYN}	Dynamisches Grenzmoment des Servomotors [Nm]
$M_{e max}$	Maximales Eintriebs-Drehmoment [Nm]
M_{eff}	Effektiver Drehmomentbedarf (bezogen auf den Motor) [Nm]
M_{eff_Motor}	Effektives Motordrehmoment [Nm]
$M_{Getriebe}$	Getriebemoment [Nm]
M_{max}	Maximales Abtriebs-Drehmoment des zu projektierenden Antriebs [Nm]
M_{Motor}	Motormoment [Nm]
M_{NOTAUS}	Zulässiges NOT-AUS-Moment [Nm]
M_{NOTAUS_Appl}	NOT-AUS-Moment der Applikation [Nm]
M_{stat}	Statisches Moment des Motors [Nm]
M_{stat_Motor}	Motormoment während Konstantfahrt [Nm]
M_{tn}	Moment im Abschnitt n [Nm]
M_{THeff}	Effektives Moment bezüglich Getriebe-Erwärmung [Nm]
M_{THERM}	Thermisches Moment [Nm]
$n_{a max}$	Maximale Abtriebsdrehzahl [min ⁻¹]
n_{am}	Mittlere Abtriebsdrehzahl des Getriebes [min ⁻¹]
n_e	Eintriebsdrehzahl [min ⁻¹]
$n_{e max}$	Maximale Eintriebsdrehzahl [min ⁻¹]
n_k	Drehzahlkonstante [min ⁻¹]



Daten für die Auslegung eines Servo-Getriebemotors	
n_{\max}	Maximale Drehzahl
n_{Mot}	Motordrehzahl
n_N	Nenndrehzahl
n_x	Mittlere Drehzahl im Abschnitt x
P_{Br}	Bremsleistung
$P_{\text{Br_peak}}$	Spitzenbremsleistung
$S..$	Betriebsart
$t_1 \dots t_n$	Zeitabschnitt 1 bis n
t_{Brn}	Bremszeit im Abschnitt n
t_{Zyklus}	Zykluszeit

Daten für die Auslegung eines linearen Servoantriebs

Daten für die Auslegung eines linearen Servoantriebs	
μ	Reibungs-Koeffizient
α	Steigungswinkel des Verfahrweges
a_{\max}	Maximale Beschleunigung
ED	Relative Einschaltdauer
F_A	Maximal benötigte Vorschubkraft
F_D	Magnetische Anziehungskraft
F_E	Effektivkraft außerhalb des Gesamtzyklus
F_G	Gewichtskraft
F_i	Auftretende Kraft innerhalb eines Teilzyklus
F_{\max}	Maximale Kraft
F_{mM}	Maximale Schubkraft des Motors
F_{Nenn}	Nennkraft
F_R	Maximale Reibkraft
F_{Tabelle}	Kraft aus Umrichtertabelle
F_v	Vorschubkraft
$F_{v\max}$	maximale Vorschubkraft
F_z	Zusätzliche Prozesskraft
g	Erdbeschleunigung
I_{Nenn}	Nennstrom
k_N	Kraftkonstante
L_p	Länge des projektierten Primärteiles
m_L	Zu bewegende Masse einer Achse
m_P	Masse des Primärteils
m_z	Zusatzmasse
P_{\max}	Maximale Leistung des Bremswiderstandes
P_n	Mittlere Leistung des Bremswiderstandes
s	Verfahrweg
S	Länge des projektierten Verfahrweges
S_e	Endschalterbereich
s_s	Sekundärteillänge



Daten für die Auslegung eines linearen Servoantriebs		
t	Gesamtzyklusdauer einschließlich Pausenzeit	[s]
t_i	Zyklusdauer (zu F_i)	[s]
t_n	Zeit im Abschnitt n	[s]
v_{max}	Maximale Geschwindigkeit einer Achse	[ms ⁻¹]



8.3 Projektierungsablauf eines Servo-Getriebemotors

Der Projektierungsablauf ist wie folgt gegliedert.

- Getriebeauslegung, siehe auch Bild 92:
 - [1] Verzahnung,
 - [2] Lager,
 - [3] Thermik.

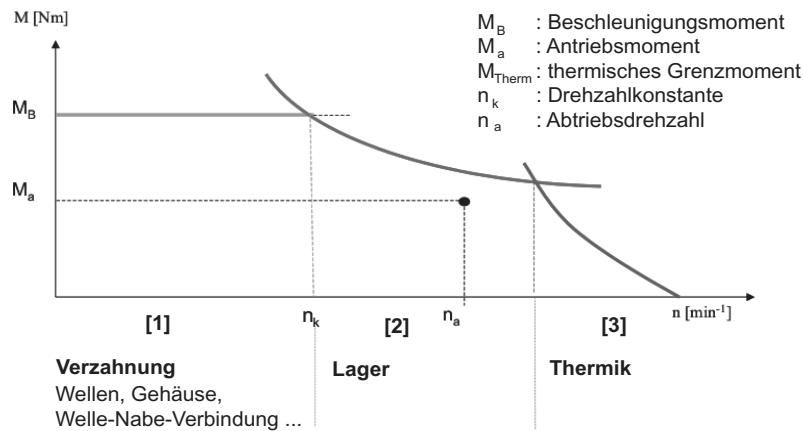


Bild 92: 3-stufiger Projektierungsablauf

56614axx

- Motorenauslegung,
- Servoverstärker-Auslegung,
- Auslegung des Bremswiderstandes.

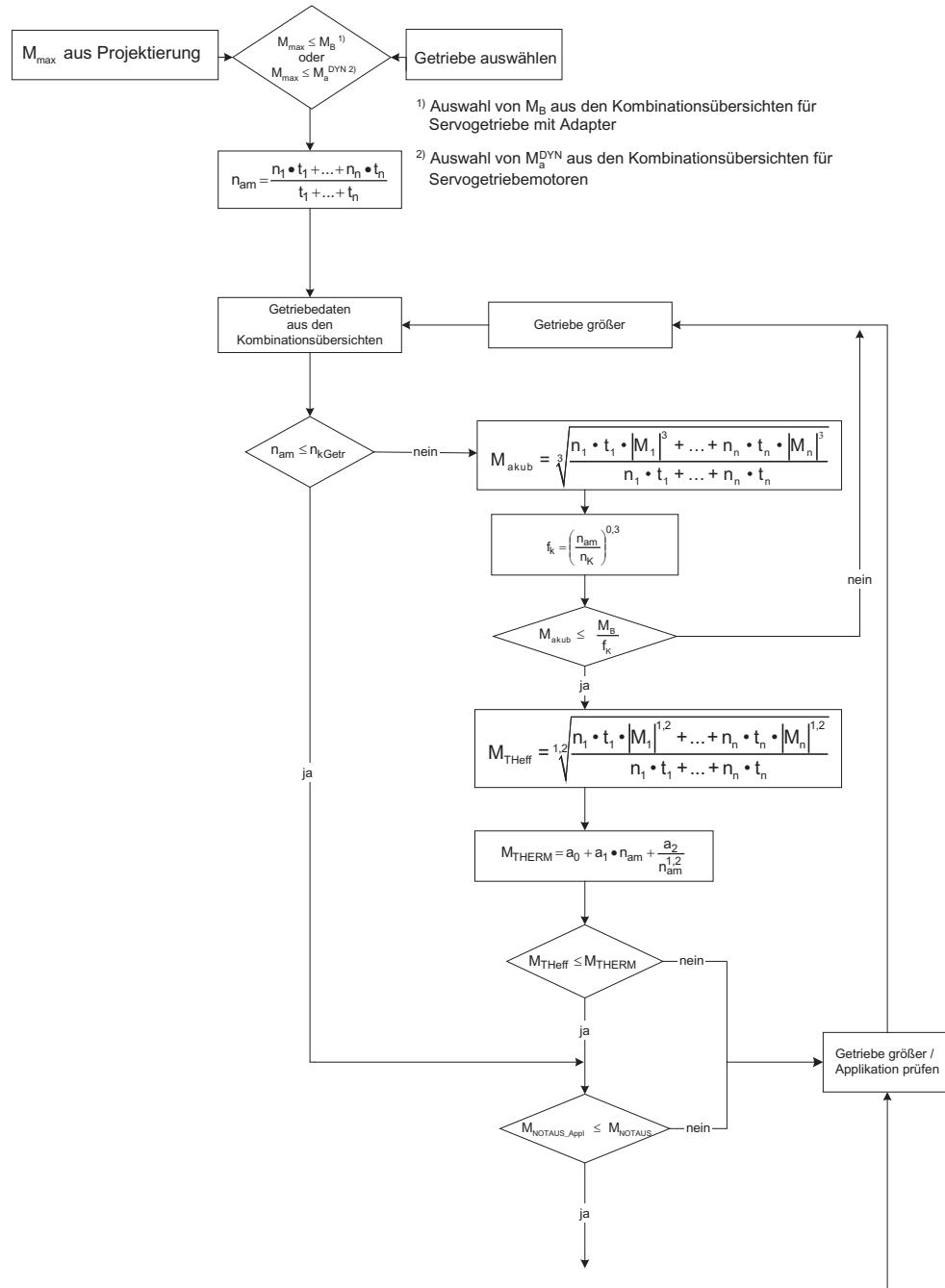


Projektierung

Projektierungsablauf eines Servo-Getriebemotors

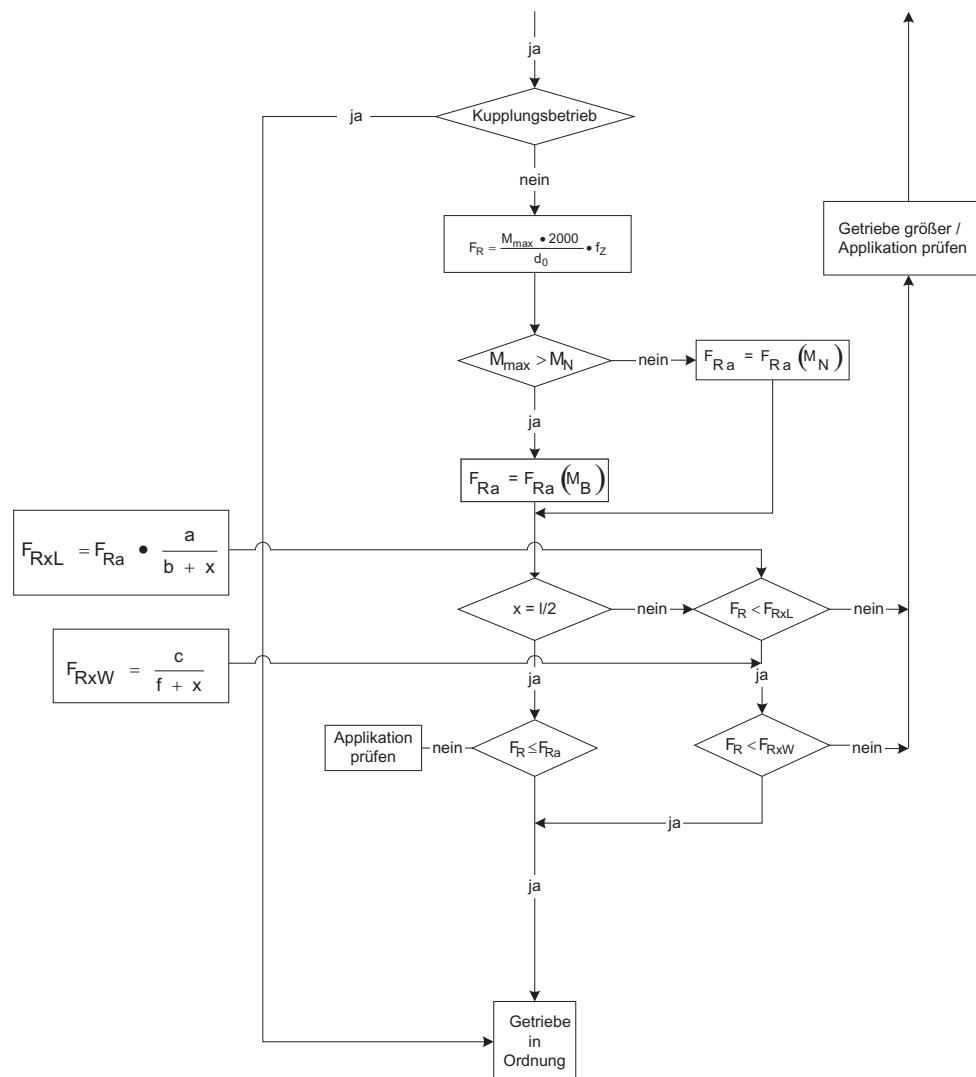
Die folgenden Ablaufdiagramme zeigen schematisch die Vorgehensweise bei der Projektierung eines Servo-Kegelradgetriebes für einen Positionierantrieb im S3-Betrieb.

Projektierungsablauf Teil 1, Servogetriebe



54397ADE

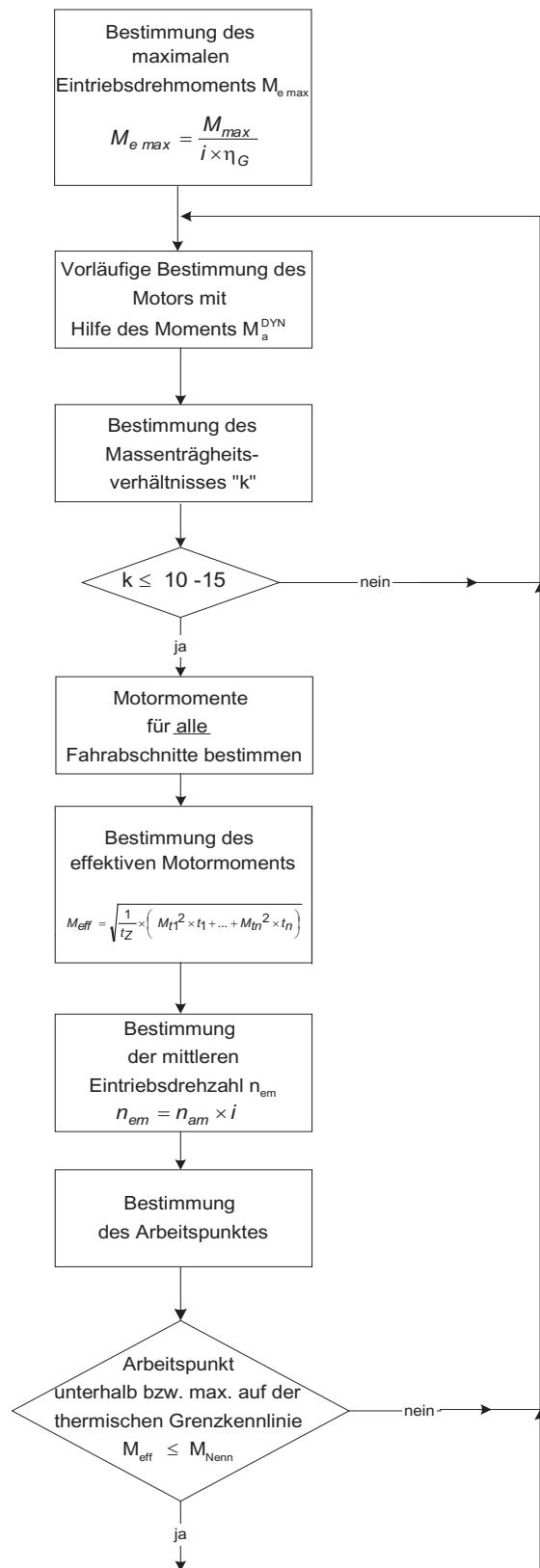
Projektierungsablauf Teil 2, Servogetriebe



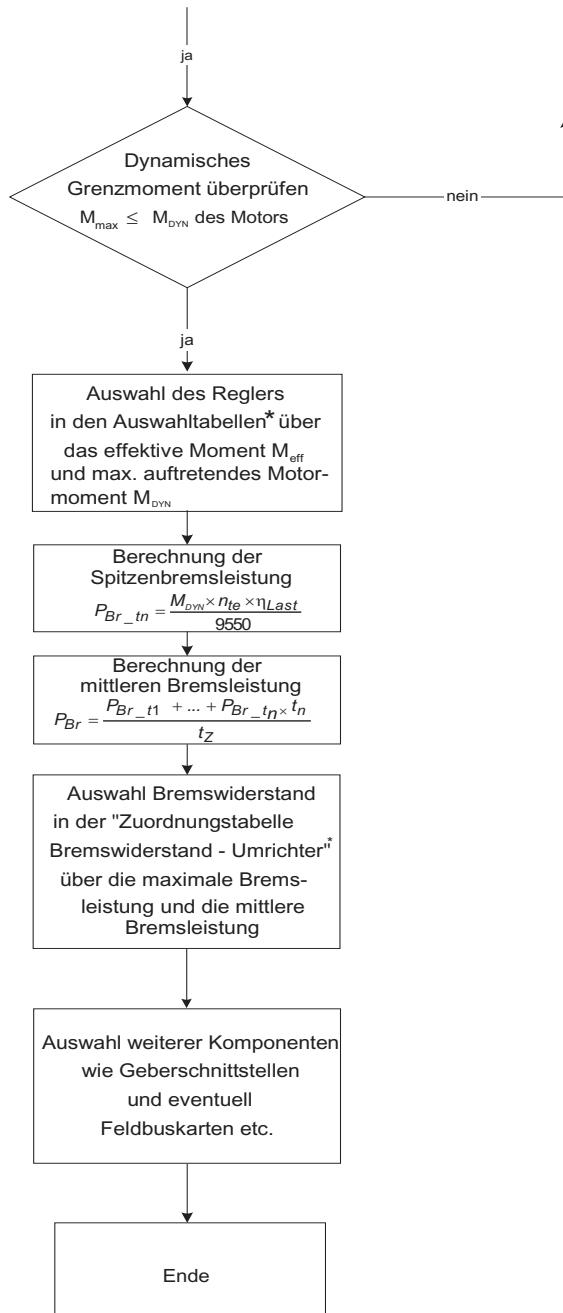
53642ADE



Projektierungsablauf Teil 3, Servomotoren



Projektierungsablauf Teil 4, Servomotoren



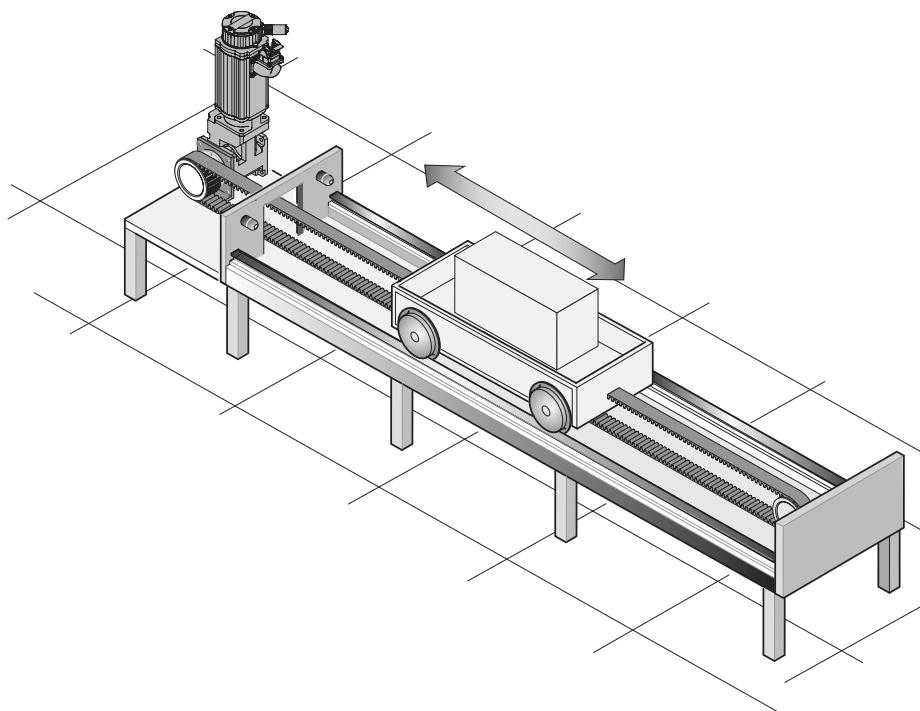
54516ADE

* MOVIDRIVE®-Systemhandbuch



8.4 Projektierungsbeispiel eines Servo-Getriebemotors

Zur Auslegung des Antriebs werden zunächst die Daten der anzutreibenden Maschine (Masse, Drehzahl, Stellbereich usw.) benötigt. Mit diesen Daten werden die erforderliche Leistung, das Drehmoment und die Drehzahl bestimmt. Das nachfolgende Projektierungsbeispiel eines Servo-Getriebemotors mit zugehörigem Servoverstärker veranschaulicht die Vorgehensweise ausführlich.



54518BXX

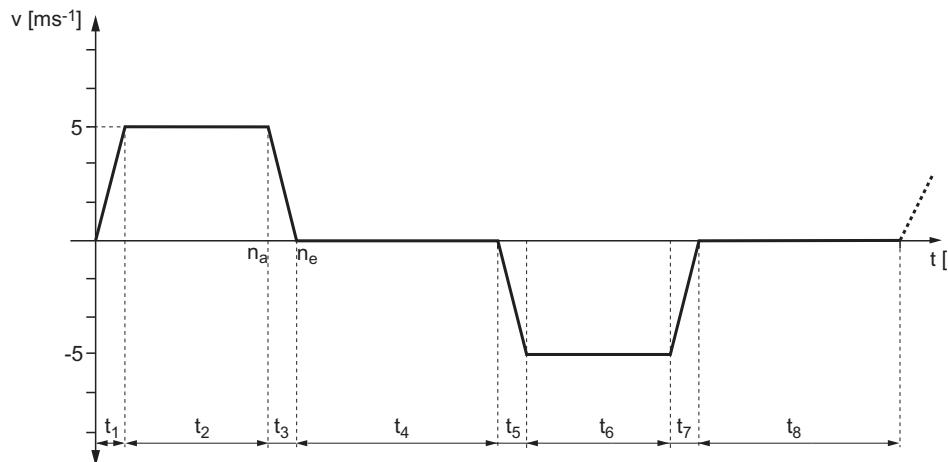
Bild 93: Projektierungsbeispiel: Auslegung eines BSF.. Getriebes mit Motordirektanbau

Folgende Daten sind gegeben:

Masse der Last:	$m_{\text{Last}} = 150 \text{ kg}$
Masse des Verfahrwagens:	$m_{\text{Wagen}} = 100 \text{ kg}$
Verfahrgeschwindigkeit:	$v = 5 \text{ ms}^{-1}$
Beschleunigung:	$a = 10 \text{ ms}^{-2}$
Verzögerung:	$-a = 10 \text{ ms}^{-2}$
Verzögerung bei NOT-AUS:	$-a = 16,8 \text{ ms}^{-2}$
Durchmesser des Laufrades:	$D_L = 250 \text{ mm}$
Fahrwiderstand:	$F_F = 100 \text{ N/t}$
Lastwirkungsgrad:	$\eta_L = 0,9$
Umgebungstemperatur:	$\vartheta = 20^\circ\text{C}$
Geforderte Positioniergenauigkeit:	0,7 mm
Positioniergenauigkeit der Mechanik:	0,3 mm
Geforderte EMV-Grenzklasse:	A
Motortyp:	Synchroner Servomotor
Getriebetyp:	BSF..
Getriebebauform:	M4
Gebertyp:	Absolutwertgeber
Anbindung an ein Feldbussystem vom Typ:	Profibus DPV1
Zuschlagsfaktor:	$f_z = 2,5$



Fahrdiagramm



50795AXX

Zeitabschnitte

Aus dem Fahrdiagramm ergeben sich folgende Zeitabschnitte:

$$t_1 = t_3 = t_5 = 0,5 \text{ s}$$

$$t_2 = t_6 = 2,0 \text{ s}$$

$$t_4 = t_8 = 1,5 \text{ s}$$

Mittlere Drehzahl

Die mittlere Drehzahl im Abschnitt x berechnet sich:

$$n_x = \frac{n_a + n_e}{2}$$

Auswahl des Servogetriebes

Schritt 1:

Vorläufige Bestimmung der Getriebeübersetzung

$$n_{a \max} = \frac{v_{\max}}{D_L \times \pi}$$

$$n_{a \max} = \frac{5 \text{ m/s}}{0,25 \text{ m} \times \pi} = 6,366 \text{ 1/s} = 382 \text{ 1/min}$$

Mit Hilfe der maximalen Abtriebsdrehzahl und einer zunächst angenommenen Motorndrehzahl $n_N = 4500 \text{ 1/min}$ wird die Getriebeübersetzung näherungsweise bestimmt. Es hat sich dabei als vorteilhaft erwiesen, eine Drehzahlreserve von ca. 10 % zu berücksichtigen.

$$i_{\text{vorläufig}} = \frac{n_N - 10 \%}{n_{a \max}}$$

$$i_{\text{vorläufig}} = \frac{4050 \text{ 1/min}}{382 \text{ 1/min}} = 10,6$$

Die gewählte Getriebeübersetzung ist: $i = 10$.



Aufgrund der gewählten Getriebeübersetzung ergibt sich die maximal eintreibende Drehzahl $n_{e\ max}$:

$$n_{e\ max} = i \times n_{a\ max}$$

$$n_{e\ max} = 10 \times 382 \text{ 1/min} = 3820 \text{ 1/min}$$

Schritt 2:
Bestimmung der statischen und dynamischen Drehmomente

Dynamisches Moment im Abschnitt t_1 :

$$M_{DYN1} = \frac{m \times a \times D_L}{\eta_L \times 2}$$

$$M_{DYN1} = \frac{(150 \text{ kg} + 100 \text{ kg}) \times 10 \text{ m/s}^2 \times 0,25 \text{ m}}{0,9 \times 2} = 347 \text{ Nm}$$

Dynamisches Moment im Abschnitt t_3 :

Dem dynamischen Moment im Abschnitt t_3 kommt der Wirkungsgrad zugute, da verzögert wird.

$$M_{DYN3} = \frac{m \times (-a) \times \eta_L \times D_L}{2}$$

$$M_{DYN3} = \frac{(150 \text{ kg} + 100 \text{ kg}) \times (-10 \text{ m/s}^2) \times 0,9 \times 0,25 \text{ m}}{2} = -281 \text{ Nm}$$

Statisches Moment:

Das statische Moment errechnet sich anhand des Fahrwiderstandes und muss in jedem Fahrabschnitt berücksichtigt werden.

Beim Beschleunigen:

$$M_{stat1} = \frac{F_F \times D_L \times m}{\eta_L \times 2}$$

$$M_{stat1} = \frac{100 \text{ N/t} \times 0,25 \text{ m} \times (0,15 \text{ t} + 0,1 \text{ t})}{0,9 \times 2} = 3,5 \text{ Nm}$$

Beim Verzögern:

$$M_{stat3} = \frac{F_F \times D_L \times m \times \eta_L}{2}$$

$$M_{stat3} = \frac{100 \text{ N/t} \times \frac{0,25 \text{ m}}{2} \times (0,15 \text{ t} + 0,1 \text{ t}) \times 0,9}{2} = 2,8 \text{ Nm}$$



Schritt 3:
Bestimmung des maximalen Abtriebsmoments $M_{a \max}$

Beim Beschleunigen:

$$M_{a \max 1} = M_{\text{stat1}} + M_{\text{dyn1}}$$

$$M_{a \max 1} = 3,5 \text{ Nm} + 347 \text{ Nm} = 351 \text{ Nm}$$

Beim Verzögern:

$$M_{a \max 3} = M_{\text{stat3}} + (-M_{\text{dyn1}})$$

$$M_{a \max 3} = 2,8 \text{ Nm} - 281 \text{ Nm} = -278 \text{ Nm}$$

Schritt 4:
Auswahl der Getriebegröße

Die vorläufige Auswahl des Servogetriebes erfolgt anhand der Kombinationstabellen des Kataloges "Spielarme Servo-Getriebemotoren (BSF.., PSF..)".

Vorläufige Getriebeauswahl: **BSF 502**

Auswahlkriterium: $M_{a \max} = 351 \text{ Nm}$

Forderung: $M_B \geq M_{a \max}$

$375 \text{ Nm} \geq 351 \text{ Nm} \rightarrow \text{Forderung erfüllt.}$

Schritt 5:
Bestimmung der mittleren Abtriebsdrehzahl

$$n_{am} = \frac{n_1 \times t_1 + \dots + n_n \times t_n}{t_1 + \dots + t_n}$$

$$n_{am} = \frac{\frac{382 \text{ min}^{-1}}{2} \times 0,5 \text{ s} + 382 \text{ min}^{-1} \times 2 \text{ s} + \frac{382 \text{ min}^{-1}}{2} \times 0,5 \text{ s}}{0,5 \text{ s} + 2 \text{ s} + 0,5 \text{ s} + 1,5 \text{ s}} = 212 \text{ min}^{-1}$$

Forderung: $n_{am} \leq n_k$

$212 \text{ min}^{-1} \leq 130 \text{ min}^{-1} \rightarrow \text{Forderung ist nicht erfüllt.}$

Um sicherzustellen, dass das Getriebe hinsichtlich der Belastung optimal gewählt ist, muss die mittlere Abtriebsdrehzahl kleiner bzw. darf maximal so groß sein wie die Drehzahlkonstante n_k des Getriebes. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, dann muss die Belastung anhand des kubischen Moments überprüft werden, siehe Schritt 6.

Schritt 6:
Bestimmung des kubischen Abtriebsmoments $M_{a \text{ kub}}$

$$M_{a \text{ kub}} = \sqrt[3]{\frac{n_1 \times t_1 \times |M_1|^3 + \dots + n_n \times t_n \times |M_n|^3}{n_1 \times t_1 + \dots + n_n \times t_n}}$$

$$M_{a \text{ kub}} = \sqrt[3]{\frac{0,5 \text{ s} \times 191 \text{ min}^{-1} \times |351 \text{ Nm}|^3 + 2 \text{ s} \times 382 \text{ min}^{-1} \times |3,5 \text{ Nm}|^3 + 0,5 \text{ s} \times 191 \text{ min}^{-1} \times |278 \text{ Nm}|^3}{0,5 \text{ s} \times 191 \text{ min}^{-1} + 2 \text{ s} \times 382 \text{ min}^{-1} + 0,5 \text{ s} \times 191 \text{ min}^{-1}}} = 186,4 \text{ Nm}$$



Schritt 7:
Bestimmung des Drehzahlfaktors f_k

Der Quotient aus der mittleren Abtriebsdrehzahl und der Drehzahlkonstanten n_k ergibt den Drehzahlfaktor f_k . Der Drehzahlfaktor wird zur Überprüfung des kubischen Abtriebsmomentes benötigt. Dieses muss kleiner bzw. maximal so groß sein, wie das Bemessungs-Drehmoment des Getriebes.

$$f_k = \left(\frac{n_{am}}{n_k} \right)^{0,3}$$

$$f_k = \left(\frac{212 \text{ min}^{-1}}{130 \text{ min}^{-1}} \right)^{0,3} = 1,16$$

Forderung:

$$M_{a \text{ kub}} \leq \frac{M_B}{f_k} \leq \frac{375 \text{ Nm}}{1,16} \leq 323 \text{ Nm}$$

$186 \text{ Nm} \leq 323 \text{ Nm} \rightarrow \text{Forderung ist erfüllt.}$

Schritt 8:
Bestimmung des effektiven Moments zur Überprüfung der zulässigen Getriebeerwärmung

$$M_{T_{\text{Heff}}} = \sqrt[1,2]{ \frac{n_1 \times t_1 \times |M_1|^{1,2} + \dots + n_n \times t_n \times |M_n|^{1,2}}{n_1 \times t_1 + \dots + n_n \times t_n} }$$

$$M_{T_{\text{Heff}}} = \sqrt[1,2]{ \frac{0,5 \text{ s} \times 191 \text{ min}^{-1} \times |351 \text{ Nm}|^{1,2} + 2 \text{ s} \times 382 \text{ min}^{-1} \times |3,5 \text{ Nm}|^{1,2} + 0,5 \text{ s} \times 191 \text{ min}^{-1} \times |278 \text{ Nm}|^{1,2}}{0,5 \text{ s} \times 191 \text{ min}^{-1} + 2 \text{ s} \times 382 \text{ min}^{-1} + 0,5 \text{ s} \times 191 \text{ min}^{-1}} } = 83,6 \text{ Nm}$$

Schritt 9:
Bestimmung des zulässigen thermischen Momentes wegen Getriebeerwärmung

$$M_{T_{\text{HERM}}} = a_0 + a_1 \times n_{am} + \frac{a_2}{n_{am}^{1,2}}$$

$$M_{T_{\text{HERM}}} = 17,47 + (-0,316 \times 212) + \frac{119454}{212^{1,2}} = 108,6 \text{ Nm}$$

Forderung: $M_{T_{\text{Heff}}} \leq M_{T_{\text{HERM}}}$

$83,6 \text{ Nm} \leq 108,6 \text{ Nm} \rightarrow \text{Forderung ist erfüllt.}$



Schritt 10:
Vergleich des NOT-AUS-Momentes mit dem NOT-AUS-Moment des Getriebes

Im Fall eines Not-Aus kommt es aufgrund von kürzeren Verzögerungszeiten zu höheren Momenten. Daher muss überprüft werden, ob das sogenannte Not-Aus-Moment der Applikation (M_{NOTAUS_Appl}) kleiner ist als das zulässige Not-Aus-Moment (M_{NOTAUS}) des Getriebes.

Gemäß Applikationsdaten wird im Falle eines Not-Aus mit $16,8 \text{ m/s}^2$ verzögert:

$$M_{NOTAUS_Appl} = m \times a \times \frac{D}{2}$$

$$M_{NOTAUS_Appl} = (150 \text{ kg} + 100 \text{ kg}) \times 16,8 \text{ m/s}^2 \times \frac{0,25 \text{ m}}{2} = 525 \text{ Nm}$$

Forderung: $M_{NOTAUS_Appl} \leq M_{NOTAUS}$

$525 \text{ Nm} \leq 560 \text{ Nm} \rightarrow \text{Forderung ist erfüllt.}$

Schritt 11:
Bestimmung der Querkraft

Der Angriffspunkt für die Querkraft ist die Wellenmitte. Aufgrund der Vorspannkraft des Zahnriemens wird ein Zuschlagsfaktor von 2,5 für die Querkraft zu Grunde gelegt.

$$F_R = \frac{M_{max} \times 2000}{d_0} \times f_z = \frac{347 \times 2000}{250} \times 2,5 = 6940 \text{ N}$$

Forderung: $M_N < M_{max} < M_B \Rightarrow F_R \leq F_{Ra} (M_B)$.

$\Rightarrow 6940 \text{ N} \leq 12000 \text{ N} \rightarrow \text{Forderung ist erfüllt.}$

Auswahl des Servomotors

Schritt 12:
Umrechnung des Beschleunigungsmomentes am Antrieb auf die Motorseite

$$M_{e\ max} = \frac{M_{a\ max}}{i \times \eta \text{ Getriebe}}$$

$$M_{e\ max} = \frac{351 \text{ Nm}}{10 \times 0,91} = 38,6 \text{ Nm}$$

Anhand dieses maximalen eintreibenden Moments wird eine vorläufige Motorauswahl getroffen, die jedoch noch überprüft werden muss:

\Rightarrow CM90L/BR

- $J_{Mot} = 35,9 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$.
- $M_0 = 21,0 \text{ Nm}$.
- $n_N = 4500 \text{ 1/min.}$

Schritt 13:
Überprüfung des zusätzlichen Motordrehmomentes für die Beschleunigung

Für die Beschleunigung muss der Motor noch ein bestimmtes Moment aufbringen, um sich selbst zu beschleunigen.

$$M_{Motor} = \frac{J_{Motor} \times n_{max} \times 2 \times \pi}{t_a}$$

$$M_{Motor} = \frac{35,9 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2 \times 3820 \text{ min}^{-1} \times 2 \times \pi}{0,5 \text{ s}} = 2,9 \text{ Nm}$$



Schritt 14:

Bestimmung des Motor-Gesamt-momentes bei der Beschleunigung

$$M_{max} = M_{e\ max} + M_{Motor}$$

$$M_{max} = 38,6 \text{ Nm} + 2,9 \text{ Nm} = 41,5 \text{ Nm}$$

Schritt 15:

Bestimmung des Motor-Gesamt-momentes bei der Verzögerung

$$M_{Br_Motor} = M_{3\ max} \times \eta_{Getriebe} \times \frac{1}{i} + M_{Motor}$$

$$M_{Br_Motor} = -278 \text{ Nm} \times 0,91 \times \frac{1}{10} + (-2,9) \text{ Nm} = -28,2 \text{ Nm}$$

Schritt 16:

Bestimmung des Motordrehmomentes während Konstantfahrt

$$M_{stat_Motor} = M_{stat} \times \frac{1}{i \times \eta_{Getriebe}}$$

$$M_{stat_Motor} = \frac{3,5 \text{ Nm}}{10 \times 0,91} = 0,39 \text{ Nm}$$

Schritt 17:

Bestimmung des effektiven Motordrehmomentes

Wenn die Motordrehmomente für jeden Fahrabschnitt bestimmt sind, kann das effektive Motordrehmoment berechnet werden. Dies ist für die Ermittlung des Arbeitspunktes unerlässlich (siehe Schritt 18).

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{1}{t_{Zyklus}} \times (M_{t1}^2 \times t_1 + M_{t2}^2 \times t_2 + \dots + M_{tn}^2 \times t_n)}$$

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{(41,5 \text{ Nm})^2 \times 0,5 \text{ s} + (0,39 \text{ Nm})^2 \times 2 \text{ s} + (-28,2 \text{ Nm})^2 \times 0,5 \text{ s}}{0,5 \text{ s} + 2 \text{ s} + 0,5 \text{ s} + 1,5 \text{ s}}} = 16,7 \text{ Nm}$$

Schritt 18:

Bestimmung der mittleren Drehzahl

Wenn das effektive Motordrehmoment bestimmt ist, kann die mittlere Drehzahl berechnet werden. Dies ist für die Ermittlung des Arbeitspunktes unerlässlich (siehe Schritt 19).

$$n = n_{am} \times i$$

$$n = 212 \text{ min}^{-1} \times 10 = 2120 \text{ min}^{-1}$$

Schritt 19:
Bestimmung des
Arbeitspunktes

Anhand des Arbeitspunktes kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob der Motor entsprechend dem Fahrdiagramm thermisch überlastet wird. Hierzu werden die mittlere Motordrehzahl und das effektive Motordrehmoment in das Diagramm "Thermische Grenzkennlinie" eingetragen, siehe Bild 94. Der Schnittpunkt ergibt den genauen Arbeitspunkt. Dieser muss unterhalb bzw. darf maximal auf der thermischen Grenzkennlinie liegen.

Aus Gründen der Betriebssicherheit empfiehlt es sich, einen gewissen Abstand des Arbeitspunktes zur thermischen Grenzkennlinie einzuhalten. Dies sichert bei evtl. notwendigen Änderungen wie z. B. höhere Beschleunigungswerte, höhere Last etc. noch eine gewisse Reserve.

Daher wird der Motor CM90L mit einem Fremdlüfter VR ausgerüstet: CM90L/VR.

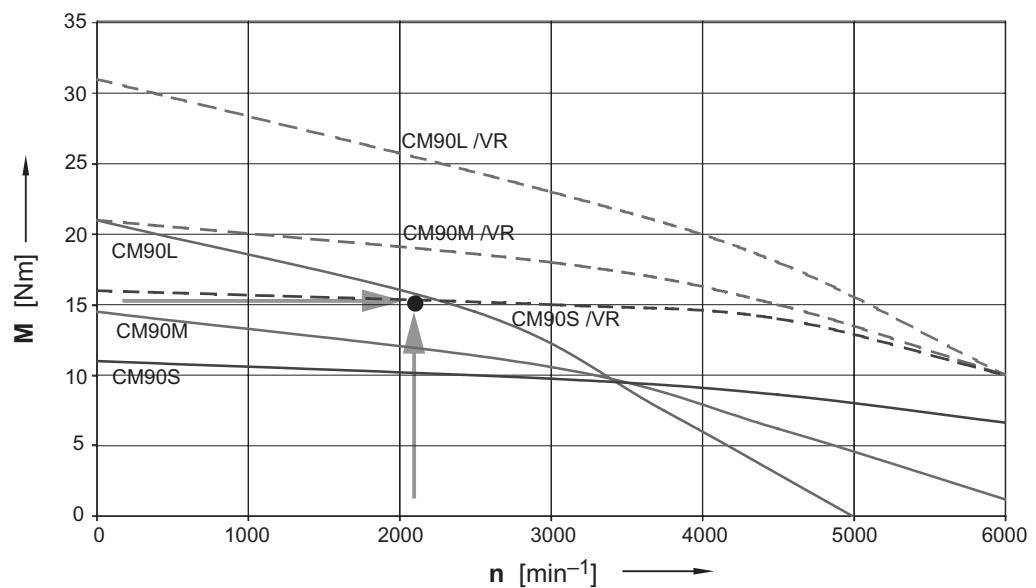


Bild 94: Thermische Grenzkennlinie CM90L/VR mit Arbeitspunkt der Beispielapplikation

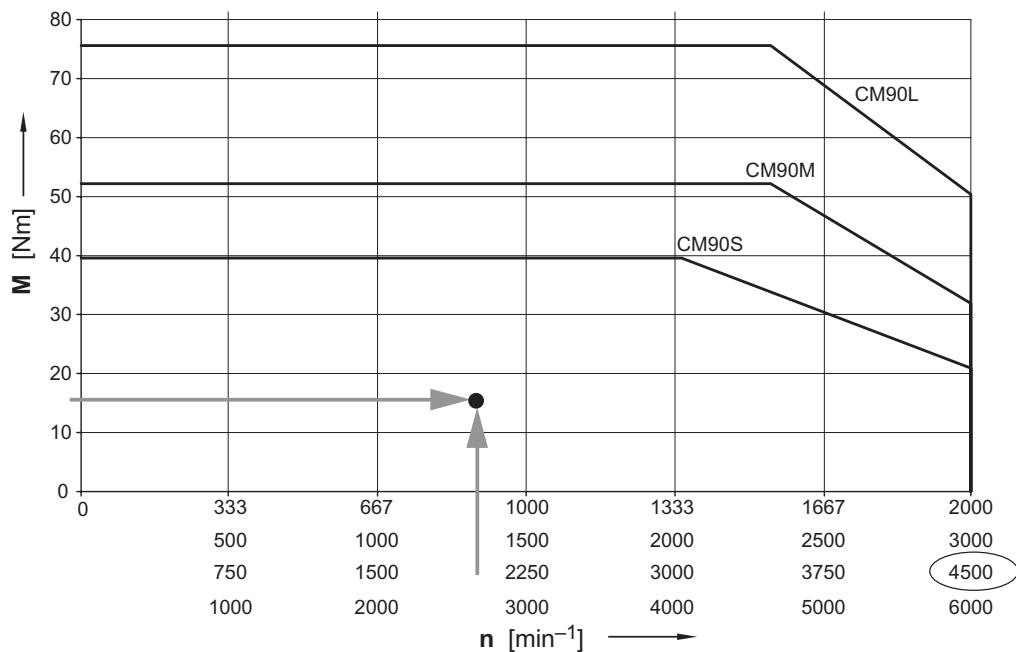
54496axx



Schritt 20: Bestimmung des maximalen Arbeitspunktes

Anhand des maximalen Momentes und der zugehörigen Drehzahl in jedem Fahrschnitt wird der bzw. die maximalen Arbeitspunkte in das Diagramm "Dynamische Grenzkennlinie" eingetragen, siehe Bild 95. Dabei ist zu beachten, dass der oder die maximalen Arbeitspunkte unterhalb bzw. maximal auf der dynamischen Grenzkennlinie liegen.

Aus Gründen der Betriebssicherheit empfiehlt es sich, einen gewissen Abstand des Arbeitspunktes zur dynamischen Grenzkennlinie einzuhalten. Dies sichert bei evtl. notwendigen Änderungen wie z. B. Änderungen des Fahrdiagrammes, höhere Last etc. noch eine gewisse Reserve.



56312axx

Bild 95: Dynamische Grenzkennlinie CM90L mit max. Arbeitspunkt der Beispielapplikation



Besonders im oberen Drehzahlbereich ist zu beachten, dass das maximal verfügbare Drehmoment abfällt.

Schritt 21:
Überprüfung des Massenträgheits-Verhältnisses "k"

Das Verhältnis von externer zu interner Massenträgheit hat entscheidenden Einfluss auf das Regelergebnis und darf daher nicht vernachlässigt werden. Die Massenträgheits-Verhältnisse gemäß nachstehender Tabelle dürfen nicht überschritten werden.

Antriebsstrang	Reglereigenschaft	Massenträgheits-Verhältnis J_{ext} / J_{Mot}
Geschmiedete Zahnstange, spielreduziertes Getriebe	Spiel- und elastizitätsarmer Antrieb	$J_{ext} / J_{Mot} < 15$
Zahnriemen, spielreduziertes Getriebe	Übliche Servoanwendungen	$J_{ext} / J_{Mot} < 15$
Zahnriemen, Standardgetriebe	Standardanwendungen, Kupplungen mit Drehmomentpuffer	$J_{ext} / J_{Mot} < 10$

Die Reduzierung des Massenträgheits-Verhältnisses durch die Motordrehzahl bzw. der Getriebeübersetzung bringt ab dem Wert $J_{ext} / J_{Mot} < 8$ kaum mehr einen regelungstechnischen Vorteil.

$$J_{ext} = 91,2 \times m \times \left(\frac{v}{n_{Mot}} \right)^2$$

$$J_{ext} = 91,2 \times 250 \text{ kg} \times \left(\frac{5 \text{ m/s}}{3820 \text{ min}^{-1}} \right)^2 = 390 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2$$

$$k = \frac{J_{ext}}{J_{Mot}}$$

$$k = \frac{390 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2}{35,9 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2} = 10,9$$

Forderung: $J_{ext} / J_{Mot} < 15$
 $10,9 < 15 \rightarrow \text{Forderung ist erfüllt.}$

Schritt 22:
Bestimmung des Beschleunigungsmomentes wegen Massenträgheit des Getriebes

$$M_{Getriebe} = \frac{J_{Getriebe} \times n_{max} \times 2 \times \pi}{t_a}$$

$$M_{Getriebe} = \frac{4 \times 10^{-4} \text{ kgm}^2 \times 3820 \text{ min}^{-1} \times 2 \times \pi}{0,5 \text{ s}} = 0,9 \text{ Nm}$$



Schritt 23: Auswahl des Servoverstärkers

Anhand des effektiven und des maximalen Motordrehmomentes kann nun gemäß der Motor-Servo-Verstärker-Zuordnungstabelle ein Servoverstärker ausgewählt werden:

$$I_{\text{eff_Motor}} = \frac{I_0 \times M_{\text{eff_Motor}}}{M_0}$$

$$I_{\text{eff_Motor}} = \frac{21,6 \text{ A} \times 16,7 \text{ Nm}}{21 \text{ Nm}} = 17,2 \text{ A}$$

Forderung: $I_{\text{eff_Motor}} \leq I_{\text{N_Inverter}}$
 $17,2 \text{ A} \leq 32 \text{ A} \rightarrow \text{Forderung ist erfüllt.}$

n_N [min ⁻¹]	Motor	M_{max} [Nm]	MOVIDRIVE®									
			0110	0150	0220	0300	0370	0450	0550	0750	0900	1100
			24 [A]	32 [A]	46 [A]	60 [A]	73 [A]	89 [A]	105 [A]	130 [A]	170 [A]	200 [A]
2000	CFM71S	M_{max}										
	CFM71M											
	CFM71L											
	CFM90S											
	CFM90M		52.5									
	CFM90L		70.3	75.8								
	CFM112S		76.2	81.9								
	CFM112M		79.3	99.6	108.0							
	CFM112L		80.3	104.9	141.5	156.8						
	CFM112H		80.1	106.5	150.3	189.2	220.1	237.0				
3000	DFS56M	M_{max}										
	DFS56L											
	DFS56H											
	CFM71S											
	CFM71M											
	CFM71L		31.5									
	CFM90S		39.2									
	CFM90M		47.8	51.6								
	CFM90L		51.1	65.6	75.6							
	CFM112S		54.8	69.8	81.9							
	CFM112M		54.0	70.7	95.7	108.0						
	CFM112L		53.9	71.6	101.0	126.9	147.4	156.8				
	CFM112H		56.6	75.7	108.6	139.9	167.0	197.1	223.2	237.0		
4500	DFS56M	M_{max}										
	DFS56L											
	DFS56H											
	CFM71S											
	CFM71M											
	CFM71L		21.3									
	CFM90S		30.3	31.2								
	CFM90M		33.6	39.2								
	CFM90L		34.6	44.5	52.1							
	CFM112S		34.7	45.8	63.4	75.0						
	CFM112M		37.4	49.2	67.5	81.9						
	CFM112L		37.1	49.4	69.6	87.4	101.5	108.0				
	CFM112H		35.0	46.8	67.2	86.9	104.1	123.5	140.7	156.8		



**Schritt 24:
Auswahl der
Komponenten**

Je nach einzuhaltender EMV-Grenzwertklasse sind neben der EMV-gerechten Installation noch weitere Maßnahmen erforderlich. So gibt es je nach Grenzwertklasse motor- bzw. netzseitig die folgenden Lösungsmöglichkeiten.

Da in unserem Projektierungsbeispiel die Grenzwertklasse A eingehalten werden muss, wird motorseitig eine Ausgangsdrossel und netzseitig ein Netzfilter gewählt (siehe nachstehende Tabelle).

**Ausgangs-
drossel:**

Grenzwertklasse A

Für die EMV-gerechte Installation nach EN 55011, **Grenzwertklasse A**, stehen je nach Anlagenkonfiguration 3 Lösungsmöglichkeiten zur Verfügung:

Grenzwertklasse A	motorseitig	netzseitig	
	Baugrößen 0 bis 6	Baugrößen 0 bis 2	Baugrößen 3 bis 6
1. Möglichkeit	Ausgangsdrossel HD...	keine Maßnahme notwendig	Netzfilter NF...-...
2. Möglichkeit	geschirmte Motorleitung	keine Maßnahme notwendig	Netzfilter NF...-...
3. Möglichkeit	Ausgangsfilter HF...	keine Maßnahme notwendig	Netzfilter NF...-...

Grenzwertklasse B

Für die EMV-gerechte Installation nach EN 55011, **Grenzwertklasse B**, stehen je nach Anlagenkonfiguration 3 Lösungsmöglichkeiten zur Verfügung:

Grenzwertklasse B	motorseitig	netzseitig	
	Baugrößen 0 bis 5	Baugrößen 0 bis 5	Baugrößen 0 bis 5
1. Möglichkeit	Ausgangsdrossel HD...	Netzfilter NF...-...	
2. Möglichkeit	geschirmte Motorleitung	Netzfilter NF...-...	
3. Möglichkeit	Ausgangsfilter HF...	Netzfilter NF...-...	

Die Ausgangsdrossel kann aus der entsprechenden Übersichtstabelle im MOVIDRIVE®-Systemhandbuch gewählt werden:

Ausgangsdrossel-Typ	HD001	HD002	HD003	HD004
Sachnummer	813 325 5	813 557 6	813 558 4	816 885 7
max. Verlustleistung P_{Vmax}	15 W	8 W	30 W	100 W
für Kabelquerschnitte/Anschlüsse	1.5...16 mm ²	$\leq 1.5 \text{ mm}^2$	$\geq 16 \text{ mm}^2$	Anschlussbolzen M12

Die Ausgangsdrossel wird entsprechend dem Kabelquerschnitt der Motorleitung gewählt, somit ergibt sich: Ausgangsdrossel-Typ HD001.



Netzfilter

Die Auswahl des Netzfilters erfolgt ebenfalls anhand der Auswahltafel im MOVIDRIVE®- Systemhandbuch:

Bei der Auswahl muss darauf geachtet werden, dass Netzspannung und Auslastung auf die Anforderung der Applikation passen.

Netzfilter-Typ	NF009-503	NF014-503	NF018-503	NF035-503	NF048-503
Sachnummer	827 412 6	827 116 X	827 413 4	827 128 3	827 117 8
Nennspannung U_N		$3 \times 500 \text{ V}_{\text{AC}} +10\%, 50/60 \text{ Hz}$			
Nennstrom I_N	9 A _{AC}	14 A _{AC}	18 A _{AC}	35 A _{AC}	48 A _{AC}
Verlustleistung bei I_N P_V	6 W	9 W	12 W	15 W	22 W
Ableitstrom bei U_N	< 25 mA	< 25 mA	< 25 mA	< 25 mA	< 40 mA
Umgebungstemperatur ϑ_U	-25 ... +40 °C				
Schutzart	IP 20 (EN 60529)				
Anschlüsse L1-L3/L1'-L3' PE	4 mm ² Bolzen M5			10 mm ² Bolzen M5/M6	
Zuordnung 400/500-V-Geräte (MDX60/61B...-5_3)					
Nennbetrieb (100 %)	0005...0040	0055/0075	-	0110/0150	0220
erhöhte Leistung (VFC, 125 %)	0005...0030	0040/0055	0075	0110	0150
Zuordnung 230-V-Geräte (MDX61B...-2_3)					
Nennbetrieb (100 %)	0015/0022	0037	-	0055/0075	0110
erhöhte Leistung (VFC, 125 %)	0015	0022	0037	0055/0075	-

Für das Projektierungsbeispiel wurde ausgewählt: Netzfilter-Typ NF048-503.

Schritt 25:

Auswahl weiterer Systemkomponenten:

Geber (Geberkarte)

Gemäß den Applikationsdaten wird ein Absolutwertgeber benötigt. Hierfür wird ein Hiperface-Geber in Multi-Turn-Ausführung gewählt. Demzufolge ist eine entsprechende Geberkarte für den Servoverstärker erforderlich.

Für das Projektierungsbeispiel wurde daher gewählt: Geberkarte DEH11B.

Feldbus

Für die Anbindung an das Feldbussystem wird folgende Feldbus-Schnittstelle ausgewählt: Profibus-Schnittstelle DFP21B.

Schritt 26:

Bestimmung der Spitzentremsleistung im Abschnitt t_3

$$P_{Br_peak} = \frac{M_{Br_Motor} \times n_{max}}{9550}$$

$$P_{Br_peak} = \frac{-28,2 \text{ Nm} \times 3820 \text{ min}^{-1}}{9550} = 11,28 \text{ kW}$$

**Schritt 27:**

Bestimmung der mittleren Bremsleistung im Abschnitt t_3

$$P_{Br_peak} = \frac{M_{Br_Motor} \times \frac{n_{max}}{2}}{9550}$$

$$P_{Br_peak} = \frac{-28,2 \text{ Nm} \times \frac{3820 \text{ min}^{-1}}{2}}{9550} = 5,64 \text{ kW}$$

Schritt 28:

Bestimmung der Einschaltzeit ED des Bremswiderstandes

$$ED = \frac{t_{Br1} + \dots + t_{Brn}}{t_1 + \dots + t_n} \times 100 \%$$

$$ED = \frac{0,5 \text{ s}}{0,5 \text{ s} + 2 \text{ s} + 0,5 \text{ s} + 1,5 \text{ s}} \times 100 \% = 11,1 \%$$

Schritt 29:

Auswahl und Überprüfung des Bremswiderstandes

Auswahl des Bremswiderstandes mit Hilfe des "Systemhandbuchs MOVIDRIVE® MDX60B/61B": BW018-015

Forderung: $5,64 \text{ kW}_{ED} 11\% < 6,7 \text{ kW}$ und $11,4 \text{ kW}_{ED} 6\% > 11,3 \text{ kW}$
→ Forderung ist erfüllt.

Schritt 30:

Überprüfung der Positioniergenauigkeit

$$\Delta S = \Delta S_{Getriebe} + \Delta S_{Geber} + \Delta S_{Mechanik}$$

$$\Delta S_{Getriebe} = \frac{D \times \pi \times \alpha_{Getriebe}}{360^\circ}$$

$$\Delta S_{Getriebe} = \frac{0,25 \text{ m} \times \pi}{360^\circ} \times \frac{6'}{2} = 0,218 \text{ mm}$$

$$\Delta S_{Geber} = \frac{D \times \pi \times 5 \text{ inc}}{4096 \text{ inc} \times i}$$

$$\Delta S_{Geber} = \frac{0,25 \text{ m} \times \pi \times 5 \text{ inc}}{4096 \text{ inc} \times 10} = 0,095 \text{ mm}$$

$$\Delta S_{Mechanik} = 0,3 \text{ mm}$$

$$\Delta S = 0,218 \text{ mm} + 0,095 \text{ mm} + 0,3 \text{ mm} = 0,613 \text{ mm}$$

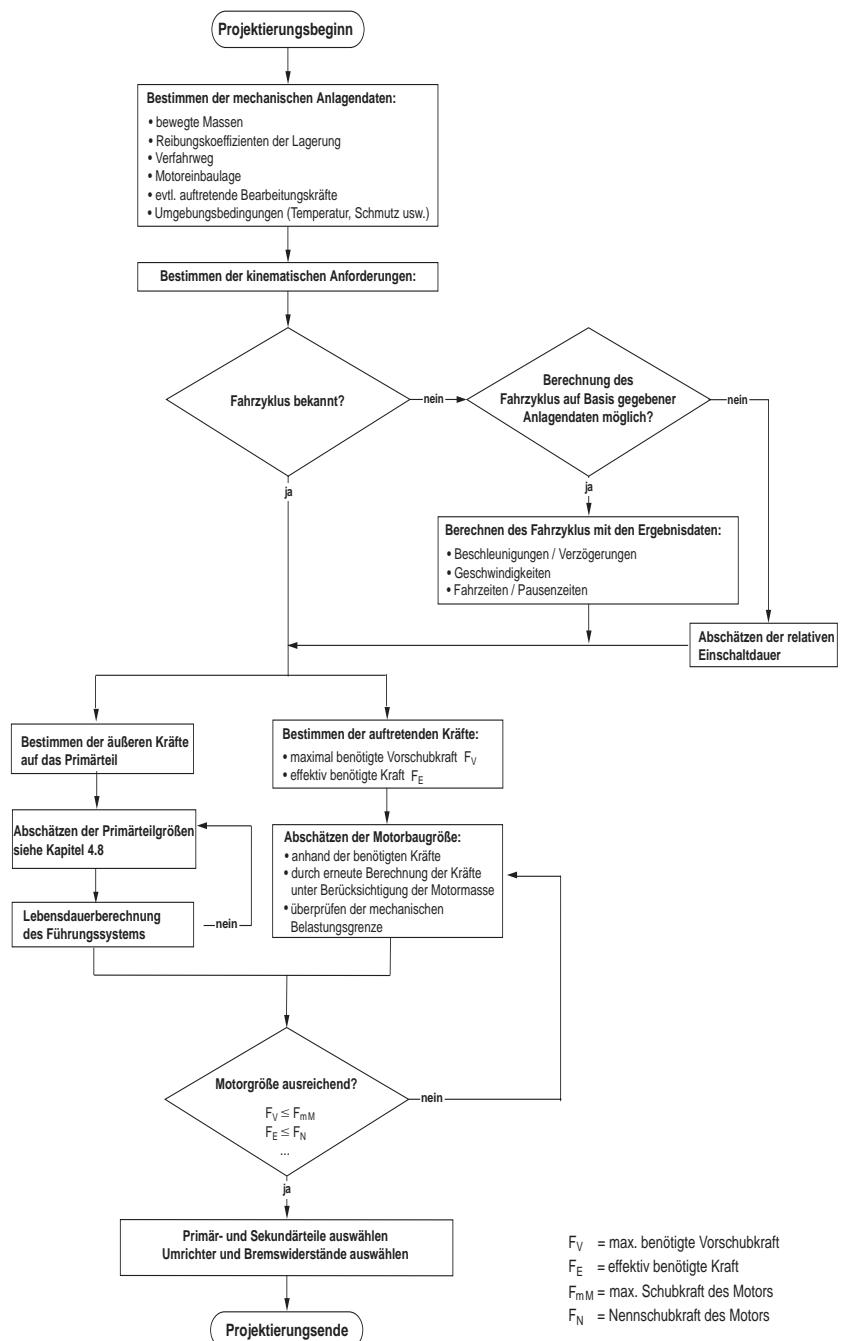
Forderung: $\Delta S < 0,7 \text{ mm}$

→ Forderung ist erfüllt.



8.5 Projektierungsablauf eines linearen Servoantriebs

Das folgende Ablaufdiagramm zeigt schematisch die Vorgehensweise bei der Projektierung eines SEW-Linearantriebes SL2.

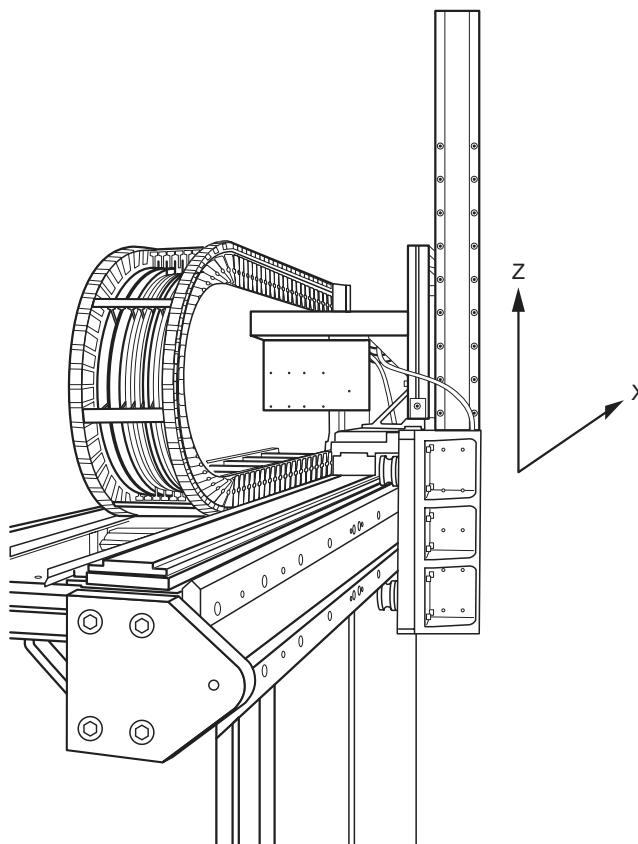


56417bde



8.6 Projektierungsbeispiel eines linearen Servoantriebs SL2

Projektierungsbeispiel



56350AXX

Bild 96: High-Speed-Ladeportal

Ein High-Speed-Ladeportal soll mit synchronen Linearmotoren SL2 ausgerüstet werden.

Folgende Daten sind gegeben:

Horizontalachse (x-Achse):

Masse	$m_L = 50 \text{ kg} + \text{Masse der Vertikalachse}$
Max. Geschwindigkeit	$v_{\max} = 6 \text{ m/s}$
Verfahrweg	$s = 2 \text{ m}$

Vertikalachse (z-Achse):

Masse	$m_L = 25 \text{ kg}$
Max. Geschwindigkeit	$v_{\max} = 6 \text{ m/s}$
Verfahrweg	$s = 0,8 \text{ m}$

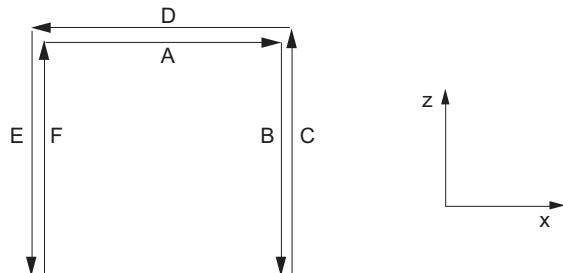


Projektierung

Projektierungsbeispiel eines linearen Servoantriebs SL2

Die Zykluszeit für ein Produkt soll minimal sein. Es wird daher in der z-Achse ein Dreiecksbetrieb angestrebt, solange die maximale Geschwindigkeit von 6 m/s dadurch nicht überschritten wird.

vorfahren [A]	absenken [B]	anheben [C]	rückfahren [D]	absenken [E]	anheben [F]
ca. 0.5 s	ca. 0.5 s	ca. 0.5 s	ca. 0.5 s	ca. 0.5 s	ca. 0.5 s

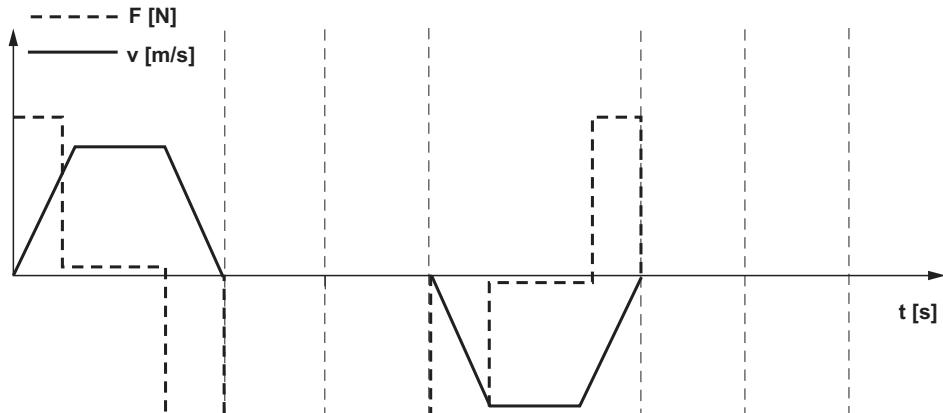


52981AXX

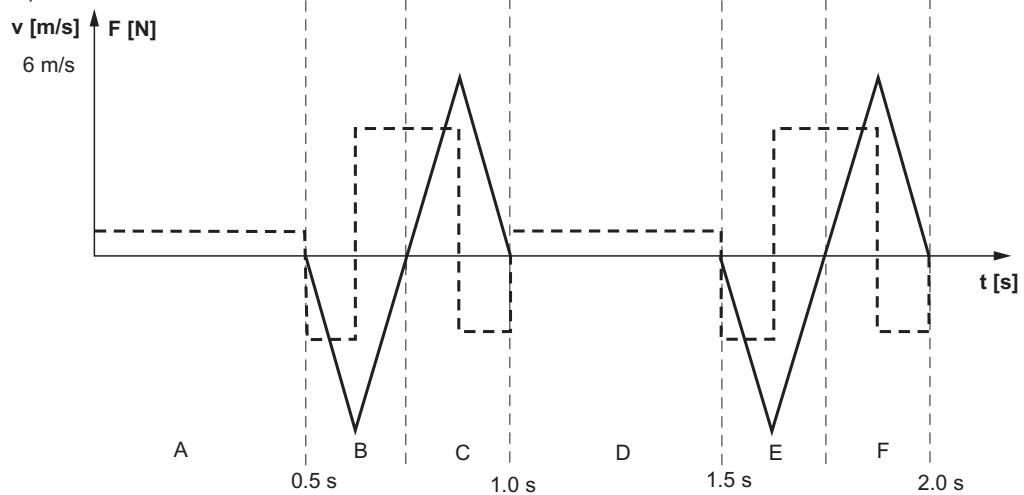
Bild 97: Verfahrzyklus

Dadurch ergeben sich folgende Fahrdiagramme:

Horizontalachse (x-Achse)



Vertikalachse (z-Achse)



52997AXX

Bild 98: Fahrdiagramme

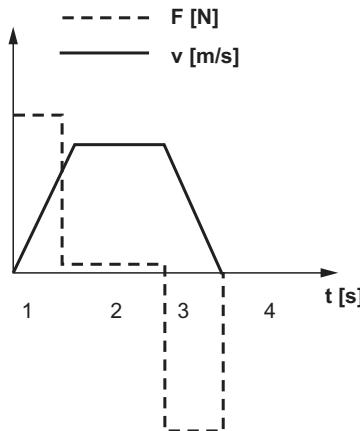
Im nachfolgenden Projektierungsbeispiel wird zuerst die x-Achse und dann die z-Achse berechnet.



Projektierungsbeispiel 1A Fahrwerk (x-Achse)

Schritt 1:
Verfahrzyklus
ermitteln

(Maschinen-Nullpunkt = linke Ruheposition, positive Verfahrrichtung: nach rechts)



53000AXX

Bild 99: Abschnitte n des Verfahrzyklus

1, 2, 3, 4 = Abschnitte des Verfahrzyklus

Aus den Fahrdiagrammen ergibt sich, dass der Antrieb 2 m in 0,5 s zurücklegen soll. Bei Dreiecksbetrieb ergibt sich eine maximal geforderte Geschwindigkeit v_{max} von:

$$v_{max} = \frac{2 \times s}{t} = \frac{2 \times 1 \text{ m}}{0,25 \text{ s}} = 8 \text{ m/s}$$

Da $v_{max} > v_{maxMotor}$, ist für die x-Achse nur ein Trapezbetrieb möglich.

Berechnung der geforderten Beschleunigung unter der Annahme eines Trapezbetriebs 1/3 Beschleunigung, 1/3 Konstantfahrt, 1/3 Verzögerung:

$$a_{max} = \frac{v_{max}}{\frac{1}{3} \times t} = \frac{6 \text{ m/s}}{0,1667 \text{ s}} = 36 \text{ m/s}^2$$

Schritt 2:
Motogröße
abschätzen

Zur Abschätzung der Motorbaugröße wird die Gesamtlast der Hubachse mit 60 kg angenommen.

Üblicherweise wird zuerst die Hubachse projektiert und danach die Fahrachse. Da jedoch die Projektierung einer Hubachse auf der Projektierung einer Fahrachse aufbaut, wurde hier die Reihenfolge getauscht und für das Gewicht der Hubachse eine Annahme getroffen.

Damit ergibt sich für das Fahrwerk:

$$m_L = 50 \text{ kg} + 60 \text{ kg} = 110 \text{ kg}$$

$$F_{mM} = m_L \times [a_{max} + (g \times \sin \alpha)] \times 1,5$$

$$F_{mM} = 110 \text{ kg} \times 36 \text{ m/s}^2 \times 1,5 = 5940 \text{ N}$$



Aus der Motortabelle wird ein SL2-P-150ML-060 ausgewählt mit:

- $F_1 = 6000 \text{ N}$,
- $v_1 = 6 \text{ m/s}$,
- $FD = 17000 \text{ N}$,
- $m_P = 36 \text{ kg}$.

Forderung: $F_{mM} \leq F_1$

$5940 \text{ N} \leq 6000 \text{ N} \rightarrow \text{Forderung ist erfüllt.}$

Schritt 3: Berechnung der Kräfte in den einzelnen Bewegungsabschnitten und Prüfung der dynamischen Auslastung:

$$F_R = (F_G + F_D) \times \mu$$

$$F_R = [(m_L + m_P) \times g \times \cos \alpha + F_D] \times \mu$$

$$F_R = [(110 \text{ kg} + 36 \text{ kg}) \times 9,81 \text{ m/s}^2 + 17000 \text{ N}] \times 0,01 = 184,3 \text{ N}$$

zusätzliche Prozesskraft F_Z : keine

dynamische Beschleunigungskraft:

$$F_A = (m_L + m_P) \times a_{max}$$

$$F_A = (110 \text{ kg} + 36 \text{ kg}) \times 36 \text{ m/s}^2 = 5256 \text{ N}$$

Mit den Formeln zur Berechnung der gleichförmig beschleunigten Bewegung ergeben sich für die einzelne Bewegungsabschnitte:

Abschnitt	1	2	3	4
Weg [m]	0.5	1	0,5	0
Zeit [s]	0.167	0.167	0.167	0.5
Endgeschwindigkeit [m/s]	6	6	0	0
Beschleunigung [m/s ²]	36	0	-36	0
Vorschubkraft [N]	$F_A + F_R$	F_R	$-F_A + F_R$	0
	5440,3	184,3	5071,7	0

Damit liegen alle Betriebspunkte innerhalb der dynamischen Grenzkraftkennlinie und die maximale Vorschubkraft ist

$$F_{vmax} = F_A + F_R = 2765,7 \text{ N}$$

Forderung: $F_{vmax} \leq F_1$

$5440,3 \text{ N} \leq 6000 \text{ N} \rightarrow \text{Forderung ist erfüllt.}$



Schritt 4: Berechnung der Effektivkraft, der mittleren Geschwindigkeit und Prüfung der thermischen Auslastung

Um die thermische Belastung des Motors zu ermitteln, werden die Effektivkraft und die mittlere Geschwindigkeit ermittelt.

$$F_E = \sqrt{\frac{\sum(F_i^2 \times t_i)}{t}}$$

$$F_E = \sqrt{\frac{(5440,3 \text{ N})^2 \times 0,167 \text{ s} + (184,3 \text{ N})^2 \times 0,167 \text{ s} - (5071,7 \text{ N})^2 \times 0,167 \text{ s}}{1 \text{ s}}}$$

$$F_E = 3040,4 \text{ N}$$

Da im gesamten Verfahrzyklus v_{\max} immer $\leq v_1$, ist damit automatisch die mittlere Geschwindigkeit auch $< v_{\text{Nenn}}$.

Forderung: $F_E \leq F_{\text{Nenn}}$

$3040 \text{ N} \leq 3600 \text{ N} \rightarrow \text{Forderung ist erfüllt}$, da der thermische Betriebspunkt innerhalb der Kennlinie für den S1-Betrieb liegt.

**Schritt 5:
Auswahl des Servoverstärkers
MDx_B**

Auswahl des Servoverstärkers mit Hilfe der "Betriebsanleitung Synchrone Linearmotoren SL2".

Mit Nenngeschwindigkeit 6 m/s und $F_{\max} = 5440,3 \text{ N}$ ergibt sich ein MDX61B0300.

**Schritt 6:
Auswahl des Bremswiderstandes**

Zur Auswahl des Bremswiderstandes werden die maximal geforderte und die mittlere Leistung, wenn der Bremswiderstand eingeschaltet ist, ermittelt. Der Bremswiderstand ist aktiv in Abschnitt 3, siehe Bild 99.

Maximale Leistung des Bremswiderstandes am Beginn von Abschnitt 3:

$$P_{\max} = F_{\max} \times v_{\max} \times \eta$$

$$P_{\max} = 5071,7 \text{ N} \times 6 \text{ m/s} \times 0,9 = 27,4 \text{ kW}$$

Verfahrzyklus Abschnitt 3:

Mittlere Bremsleistung:

$$P_3 = \frac{P_{\max}}{2} = 13,7 \text{ kW}$$

Bei einer Einschaltzeit ED von

$$ED = \frac{t_3}{t} = \frac{0,167 \text{ s}}{1 \text{ s}} = 17 \%$$

Mit Hilfe des Systemhandbuchs MOVIDRIVE® wird ein Bremswiderstand BW012-050 gewählt.



Projektierung

Projektierungsbeispiel eines linearen Servoantriebs SL2

Schritt 7:
Bestimmung der Sekundärteile für den Verfahrweg

Die erforderliche Länge eines Sekundärteils errechnet sich aus:

$$s_s \geq s + L_p + (2 \times s_e)$$

$$s_s \geq 2,0 \text{ m} + 0,72 \text{ m} \geq 2,72 \text{ m}$$

Für den Endschalterbereich S_e wurden 10 mm je Seite vorgesehen.

Überfährt der Antrieb die Endschalter, wird er zusätzlich durch die Endlagendämpfer abgebremst. In diesem Fall muss das Primärteil das Sekundärteil nicht mehr vollständig überdecken.

Es werden

5 x 512 mm-Stücke SL2-S-150-512

und

3 x 64 mm-Stücke SL2-S-150-064

ausgewählt.

Schritt 8:
Auswahl der Zusatzkomponenten

Zur Projektierung des Gesamtantriebs benötigen Sie weitere Komponenten, die nicht zum Lieferumfang von SEW gehören.

Im Falle der Fahrachse sind dies:

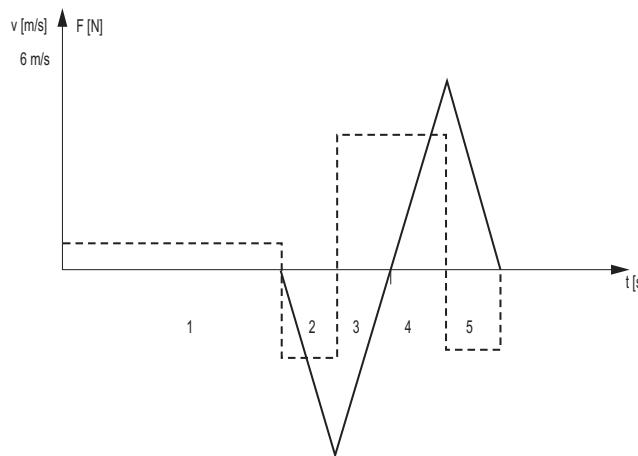
1. Hiperface-Absolutgeber (Stegmann Lincoder) oder Inkrementalgeber,
2. Linearführungen,
3. Schleppkette,
4. Motor- und Geberkabel schleppkettentauglich,
5. Endlagendämpfer,
6. eventuell externe Notbremse.



Projektierungsbeispiel 1B Hubwerk (z-Achse)

Schritt 1:
Verfahrzyklus
ermitteln

(Maschinen-Nullpunkt = obere Ruheposition, positive Verfahrrichtung: nach oben)



52629AXX

Bild 100: Abschnitte n des Verfahrzyklus

1, 2, 3, 4, 5 = Abschnitte des Verfahrzyklus

Berechnung der geforderten Beschleunigung unter der Annahme Dreiecksbetrieb:

$$a_{max} = \frac{v_{max}^2}{2 \times \frac{s}{2}} = \frac{(6 \text{ m/s})^2}{0,8 \text{ m}} = 45 \text{ m/s}^2$$

$$t = \frac{v_{max}}{a_{max}} = \frac{6 \text{ m/s}}{45 \text{ m/s}^2} = 0,133 \text{ m/s}$$

Schritt 2:
Motorbaugröße
abschätzen

$$F_{mN} \leq F_1$$

$$F_{mN} = m_L \times [a_{max} + (g \times \sin 90^\circ)] \times 1,5$$

$$F_{mN} = 25 \text{ kg} \times (45 \text{ m/s}^2 + 9,81 \text{ m/s}^2) \times 1,5 = 2055 \text{ N}$$

Aus der Motortabelle wird ein SL2-P-100M-060 ausgewählt mit:

- $F_1 = 3000 \text{ N}$,
- $v_1 = 6 \text{ m/s}$,
- $F_D = 8570 \text{ N}$,
- $m_P = 18,9 \text{ kg}$.



Schritt 3:

Berechnung der Kräfte / Prüfung der dynamischen Auslastung

Reibkraft:

$$F_R = (F_G + F_D) \times \mu$$

$$F_R = [(m_L + m_P) \times g \times \cos 90^\circ + F_D] \times \mu$$

$$F_R = 8570 \text{ N} \times 0,01 = 85,7 \text{ N}$$

Gewichtskraft zuzüglich Prozesskraft (Gewichtskraft + Zusatzmasse)

$$F_Z = (m_L + m_P + m_Z) \times g$$

$$F_Z = (25 \text{ kg} + 18,9 \text{ kg} + 5 \text{ kg}) \times 9,81 \text{ m/s}^2 = 480 \text{ N}$$

Die Haltebremse des Hubwerks und die Schleppkette mit Kabel und Geber werden zusammen mit 5 kg berücksichtigt.

Dynamische Beschleunigungskraft:

$$F_A = (m_L + m_P + m_Z) \times a_{max}$$

$$F_A = (25 \text{ kg} + 18,9 \text{ kg} + 5 \text{ kg}) \times 45 \text{ m/s}^2 = 2200 \text{ N}$$

Damit ergibt sich für die einzelnen Bewegungsabschnitte:

Abschnitt	1	2	3	4	5
Weg [m]	0	- 0.4	- 0.4	0.4	0.4
Zeit [s]	0.5	0.133	0.133	0.133	0.133
Endgeschwindigkeit [m/s]	0	- 6.0	0	6	0
Beschleunigung [m/s ²]	0	- 45.0	45.0	45.0	- 45.0
Vorschubkraft [N]	$F_Z - F_R$	$-F_A + F_Z - F_R$	$F_A + F_Z - F_R$	$F_A + F_Z + F_R$	$-F_A + F_Z + F_R$
	394.3	-1805.7	2594.3	2765.7	-1634.3

Damit liegen alle Betriebspunkte innerhalb der dynamischen Grenzkraftkennlinie und die maximale Vorschubkraft ist

$$F_{vmax} = F_A + F_Z + F_R = 2765,7 \text{ N}$$

Forderung: $F_{vmax} \leq F_1$

2765,7 N \leq 3700 N \rightarrow **Forderung ist erfüllt.**



Schritt 4:
Berechnung der Effektivkraft / mittleren Geschwindigkeit / Prüfung der thermischen Auslastung

Um die thermische Belastung des Motors zu ermitteln, werden die Effektivkraft und die mittlere Geschwindigkeit ermittelt.

$$F_E = \sqrt{\frac{\sum(F_i^2 \times t_i)}{t}}$$

$$F_E = \sqrt{\frac{[(394,3\text{N})^2 \times 0,5\text{s} + (1805,7\text{N})^2 \times 0,133\text{s} + (2594,3\text{N})^2 \times 0,133\text{s} + (2765,7\text{N})^2 \times 0,133\text{s} + (1634,3\text{N})^2 \times 0,133\text{s}]}{1\text{ s}}}$$

$$F_E = 1667\text{ N}$$

Da im gesamten Verfahrzyklus v_{\max} immer $\leq v_1$, ist damit automatisch die mittlere Geschwindigkeit auch $< v_{\text{Nenn}}$.

Forderung: $F_E \leq F_{\text{Nenn}} = 1800\text{ N}$

$1667\text{ N} \leq 1800\text{ N} \rightarrow \text{Forderung ist erfüllt}$, da der thermische Betriebspunkt innerhalb der Kennlinie für den S1-Betrieb liegt.

Schritt 5:
Auswahl des Servoverstärkers MDx_B

Auswahl des Servoverstärkers mit Hilfe der "Betriebsanleitung Synchrone Linearmotoren SL2".

Forderung: $F_{v\max} \leq F_{\text{Tabelle}}$

Bei MDX61B0220 gilt

$2765,7\text{ N} < 3300\text{ N} \rightarrow \text{Forderung ist erfüllt.}$



Bei elektrisch haltenden Hubwerken muss geprüft werden, ob der Servoverstärker dauerhaft den Strom für die Haltekraft aufbringen kann. Dies gilt auch, wenn der gesamte Strom durch eine IGBT-Brücke fließt.

Kraftkonstante / Nennpunkt

$$k_N = \frac{F_{\text{Nenn}}}{I_{\text{Nenn}}} = \frac{1800\text{ N}}{23,3\text{ A}} = 77,3\text{ N/A}$$

Ermitteln der zulässigen Dauerkraft:

$$F_{\text{Dauer}} \leq \frac{I_{\text{Nenn_Verstärker}}}{\sqrt{2}} \times k_N$$

$$F_{\text{Dauer}} \leq \frac{46\text{ A}}{\sqrt{2}} \times 77,3\text{ N/A}$$

$$F_{\text{Dauer}} \leq 2514\text{ N}$$

Forderung: $F_{\text{Dauer}} > F_V$ Abschnitt 1

$2514\text{ N} > 394,3\text{ N} \rightarrow \text{Forderung ist erfüllt.}$



**Schritt 6:
Auswahl des
Bremswiderstan-
des**

Zur Auswahl des Bremswiderstandes werden die maximal geforderte und die mittlere Leistung ermittelt, wenn der Bremswiderstand eingeschaltet ist. Der Bremswiderstand ist aktiv in Abschnitt 3 und 5.

Maximale Leistung des Bremswiderstandes am Beginn von Abschnitt 3 des Verfahrzyklus:

$$P_{max} = F_{max} \times v_{max} \times \eta$$

$$P_{max} = 2594,3 \text{ N} \times 6 \text{ m/s} \times 0,9 = 14 \text{ kW}$$

Verfahrzyklus Abschnitt 3:

Mittlere Bremsleistung:

$$P_3 = \frac{P_{max}}{2} = 7 \text{ kW}$$

Einschaltdauer: $t_3 = 0,133 \text{ s}$

Verfahrzyklus Abschnitt 5:

Mittlere Bremsleistung:

$$P_5 = \frac{1}{2} \times F_{max} \times v_{max} \times \eta = 0,5 \times 1634,3 \text{ N} \times 6 \text{ m/s} \times 0,9 = 4,4 \text{ kW}$$

Einschaltdauer: $t_5 = 0,133 \text{ s}$

Verfahrzyklus Abschnitt 3 und 5:

Mittlere Leistung:

$$P_{\emptyset} = \frac{(P_3 \times t_3) + (P_5 \times t_5)}{t_3 + t_5} = \frac{(7 \text{ kW} \times 0,133 \text{ s}) + (4,4 \text{ kW} \times 0,133 \text{ s})}{0,266 \text{ s}} = 5,7 \text{ kW}$$

Bei einer Einschaltdauer von:

$$ED = \frac{t_3 + t_5}{t} = \frac{0,266 \text{ s}}{1 \text{ s}} = 27 \%$$

Mit Hilfe des Systemhandbuchs MOVIDRIVE® B wird ein Bremswiderstand BW018-035 gewählt.



Schritt 7:
Bestimmung der Sekundärteile für den Verfahrweg

Die erforderliche Länge eines Sekundärteils errechnet sich aus:

$$s_s \geq s + L_P + (2 \times s_E)$$

$$s_s \geq 0,8 \text{ m} + 0,544 \text{ m} + 0,02 \text{ m} \geq 1,346 \text{ m}$$

Für den Endschalterbereich wurden 10 mm je Seite vorgesehen.

Überfahrt der Antrieb die Endschalter, wird er zusätzlich durch die Endlagendämpfer abgebremst. In diesem Fall muss das Primärteil das Sekundärteil nicht mehr vollständig überdecken.

Es werden

2 x 512 mm-Stücke SL2-S-100-512,

1 x 256 mm-Stücke SL2-S-100-256,

1 x 128 mm-Stücke SL2-S-100-128

ausgewählt.

Schritt 8:
Auswahl der Zusatzkomponenten

Zur Projektierung des Gesamtantriebs benötigen Sie weitere Komponenten, die nicht im Lieferumfang von SEW gehören.

Im Falle der Hubachse sind dies:

1. Hiperface-Absolutgeber (Stegmann Lincoder),
2. Linearführungen,
3. Schleppkette,
4. Motor- und Geberkabel schleppkettentauglich,
5. Endlagendämpfer,
6. externe Betriebs- und Haltebremse.



9 Index

A

Achs-zu-Achs-Kommunikation	97
Asynchrone Motoren	91
Aufbau und Funktionsweise	56
Aufbau und Funktionsweise induktiver Wegmess-Systeme	63
Aufbau und Funktionsweise magnetischer Wegmess-Systeme	62
Aufbau und Funktionsweise optischer Wegmess-Systemen	61
Aufbau und Funktionsweise von HIPERFACE®-Geben	53
Aufbau und Wirkungsweise des Kurzstator-prinzips	35
Aufbereitung des Drehzahl-Sollwertes	85
Azyklischer Datenverkehr	94

B

Beschleunigungs-Vorsteuerung	87
Blockförmige Speisung	21
Bremsen für Linearmotoren	46
Bremsenanbau an Linearmotor SL2-Advance/-Power-System	47

D

Diagnosebus	98
Drehzahl-Istwertfilter	85
Drehzahlregler	86
Dynamische Motorkennlinie	23

E

Elektromagnetisch betätigte Bremse	46
Elektromotorisch betätigte Bremse	46
Ethernet in Feldbus-Anwendungen	96

F

Federdruckbremse	43
Feldbussystem INTERBUS-S	95
Feldbussystem Profibus DP	94

G

Geschlossene Systeme	62
----------------------------	----

H

Haltebremse	45
-------------------	----

K

Kegelradgetriebe	104
Kurzstatorprinzip	35

L

Lage- und Drehzahlerfassung	83
Langstatorprinzip	34
Linearführungssystem	39

M

Motorkennlinie	31, 36
----------------------	--------

N

Nachteil der blockförmigen Speisung	22
---	----

O

Offene Systeme	62
Optimaler Betriebspunkt	19

P

Pneumatisch betätigte Bremse	46
Prinzipien der synchronen Linearmotoren	34
Projektierungsablauf Teil 1, Servogetriebe	110
Projektierungsablauf Teil 2, Servogetriebe	111
Projektierungsablauf Teil 3, Servomotoren	112
Projektierungsablauf Teil 4, Servomotoren	113
Puffer	41
Puffer / Stoßdämpfer	40

R

Resolver	84
----------------	----

S

Schleppketten und Leitungen	42
Servo-Kegelradgetriebe	102
Servo-Planetengetriebe	100
SEW-Lösung	
<i>Montagekühlbrücken</i>	37
sin-/cos-Geber	84
Sinusförmige Speisung	20
Spielbehaftete Lastankoppelung	88
Spielfreie Lastankoppelung	87
Steifigkeit	89
Stirnradgetriebe	103
Stoßdämpfer	41
Stromverhältnisse im Stator	19
Struktur der Drehzahlregelung	82
Synchrone Motoren	91

T

Thermische Motorkennlinie	24
TTL-Geber (1024 Striche)	84

V

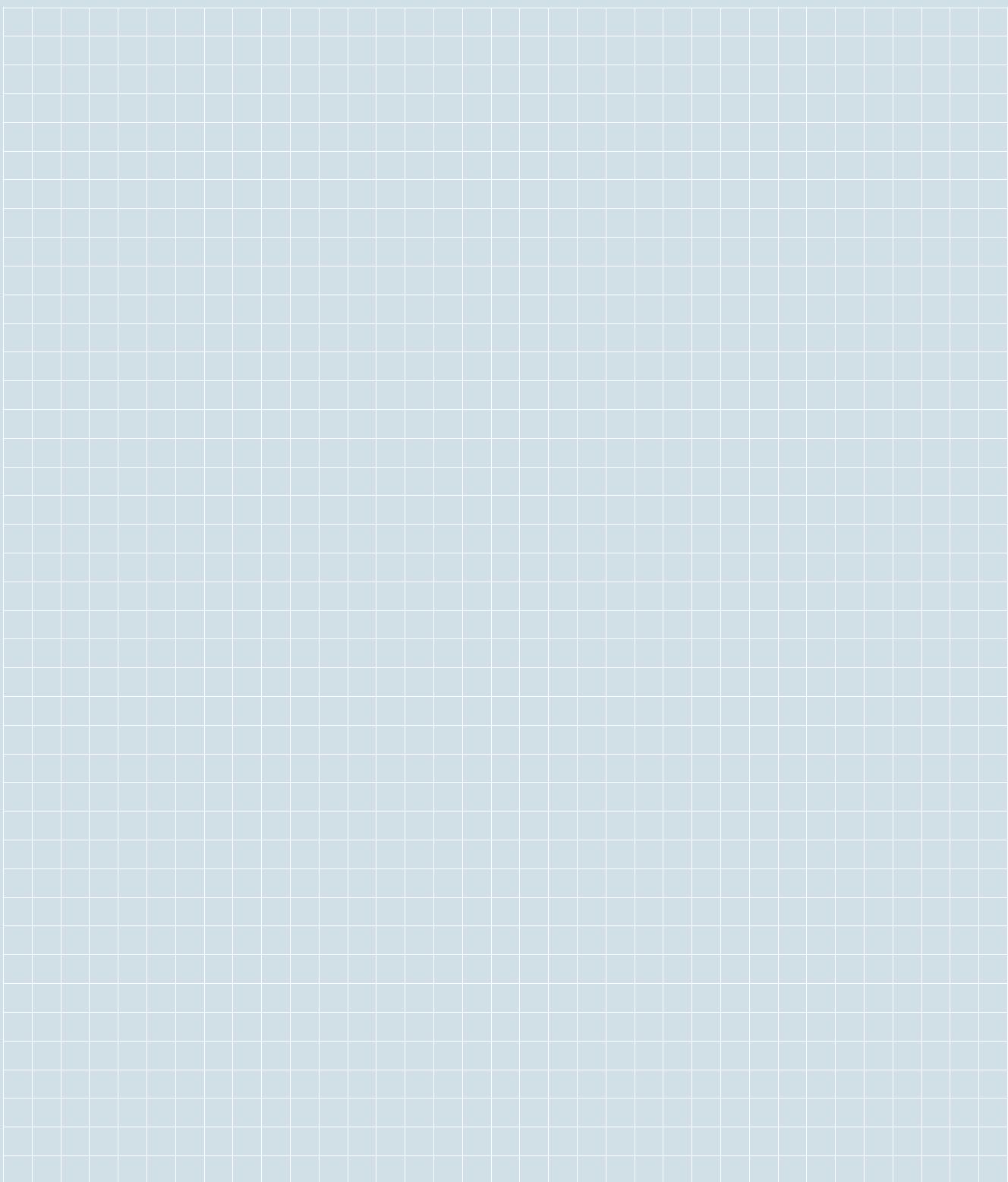
Vorteile der blockförmigen Speisung	22
Vorteile von synchronen Linearmotoren	33

W

Wasserkühlung	38
Wasserkühlung mit thermischer Kapselung	39
Weitere Komponenten eines Servosystems	9

Z

Zyklischer Datenverkehr	94
-------------------------------	----



Wie man die Welt bewegt

Mit Menschen, die schneller richtig denken und mit Ihnen gemeinsam die Zukunft entwickeln.

Mit einem Service, der auf der ganzen Welt zum Greifen nahe ist.

Mit Antrieben und Steuerungen, die Ihre Arbeitsleistung automatisch verbessern.

Mit einem umfassenden Know-how in den wichtigsten Branchen unserer Zeit.

Mit kompromissloser Qualität, deren hohe Standards die tägliche Arbeit ein Stück einfacher machen.



Mit einer globalen Präsenz für schnelle und überzeugende Lösungen. An jedem Ort.

Mit innovativen Ideen, in denen morgen schon die Lösung für übermorgen steckt.

Mit einem Auftritt im Internet, der 24 Stunden Zugang zu Informationen und Software-Updates bietet.



**SEW
EURODRIVE**

SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG
P.O. Box 3023 · D-76642 Bruchsal / Germany
Phone +49 7251 75-0 · Fax +49 7251 75-1970
sew@sew-eurodrive.com

→ www.sew-eurodrive.com