

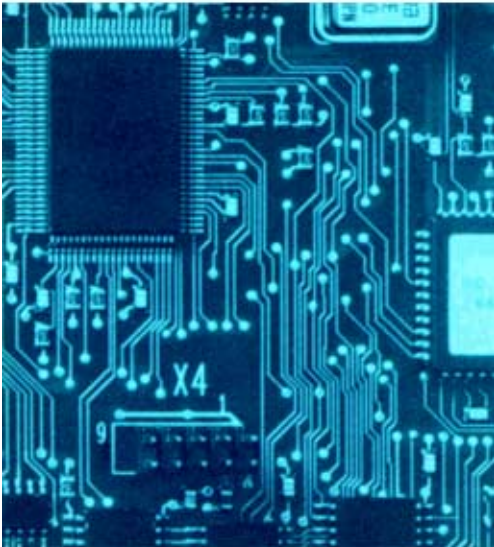


Praxis der Antriebstechnik

Band 7

Servo-Antriebe Grundlagen, Eigenschaften, Projektierung

Ausgabe 04/97



0922 4602 / 0497



SEW EURODRIVE



Getriebe- und Bremsmotoren

- Stirnradgetriebe/ -motoren
- Flachgetriebe/ -motoren
- Kegelradgetriebe/ -motoren
- Schneckengetriebe/ -motoren
- Spiroplan®-Getriebemotoren
- Spielarme Planetengetriebe/ -motoren
- Bremsmotoren
- Explosionsgeschützte Drehstrommotoren



Elektronisch geregelte Antriebe

- Frequenzumrichter MOVITRAC®
- MOVIMOT®-Getriebemotoren
- Antriebsumrichter MOVIDRIVE®
- Servoumrichter MOVIDYN®
- Servomotoren und -Getriebemotoren
- Gleichstrom-Getriebemotoren, -Motoren und -Bremsmotoren



Mechanische Verstellantriebe

- Breitkeilriemen-Verstelltriebemotoren VARIBLOC®
- Reibscheiben-Verstelltriebemotoren VARIMOT®



Dienstleistungen

- Technische Beratung
- Anwender-Software
- Seminare
- Fachdokumentation
- Kundendienst

1	Einleitung	4
1.1	Definition der Servotechnik	4
1.2	Entwicklung der Servoantriebe	5
1.3	Vergleich gebräuchlicher Antriebssysteme	8
1.4	Vor- und Nachteile eines Servoantriebs	12
1.5	Komponenten eines Servosystems	13
1.6	Übersicht gebräuchlicher Servomotoren	13
1.7	Gebersysteme	19
2	Der permanenterregte Synchronmotor	21
2.1	Aufbau und Wirkungsweise	21
2.2	Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie	25
2.3	Elektromechanische Not- und Haltebremse	26
3	Der Resolver	29
3.1	Aufbau und Funktion des Resolvers	29
3.2	Verarbeitung und Auswertung der Resolver signale	31
3.3	Encodernachbildung	33
4	Der Servoumrichter	34
4.1	Grundkomponenten des modularen Systems	35
4.2	Das Netzmodul	36
4.3	Das Achsmodul	40
5	Regelungsstruktur / Betriebsarten	44
5.1	Stromregler	44
5.2	Drehzahlregler	46
5.3	Lageregler	48
5.4	Betriebsarten	49
6	Das Getriebe	52
6.1	Forderungen der Servotechnik an ein Getriebe	52
6.2	Allgemeine Getriebeübersicht	52
6.3	Vergleich der verschiedenen Getriebebauarten für die Servotechnik	53
7	Einsatz in industrieller Umgebung	54
7.1	Netzverhältnisse	54
7.2	Hinweise zum Motor	54
7.3	Leitungsverlegung	54
7.4	Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	54
7.5	Schnittstellen zur Umgebung	56
7.6	Definitionen der Prozeßanbindung	57
7.7	Umgebungsbedingungen	58
7.8	Inbetriebnahme und Regleroptimierung	58
8	Projektierung	61
8.1	Schematischer Ablauf der Projektierung eines Servoantriebs	61
8.2	Projektierungsbeispiel	62
8.3	Berechnung der X-Achse (Fahrwerk)	62
8.4	Berechnung der Y-Achse (Fahrwerk)	71
8.5	Berechnung der Z-Achse (Hubwerk)	77
8.6	Gemeinsame Versorgung der X-, Y- und Z-Achse	84
Anhang		
	Bestimmung der Verlustleistung	88
	Dimensionierung von Bremswiderständen	89

1 Einleitung

Entwicklungen im Bereich der Elektronik und auf dem Gebiet der Werkstoffe haben die Situation in der Antriebstechnik verändert.

Bisher wurden in der Servotechnik hauptsächlich permanenterregte Gleichstrommotoren (DC-Motoren) eingesetzt. Der bedeutendste Nachteil der Drehstrommotoren (AC-Motoren) gegenüber den Gleichstrommotoren war die schlechtere Regelbarkeit der Drehstrommotoren. Durch die Weiterentwicklung im Bereich der Elektronik, speziell im Bereich der Mikrocontroller, kann dieser Nachteil jedoch durch eine entsprechende Ansteuerung kompensiert werden.

Diese Entwicklungen haben bei den Antriebssystemen zu einer Verlagerung vom DC-Motor zum AC-Motor geführt. Gerade bei den Servosystemen, die früher fast ausschließlich in DC-Technik ausgeführt wurden, ist eine starke Tendenz hin zum AC-Synchronmotor zu beobachten.

Neue leistungsfähigere Permanentmagnete aus Samarium-Cobalt und Neodym-Eisen-Bor steigern durch ihre höhere Energiedichte die Leistung des Motors bei gleichzeitiger Reduzierung der Masse. Damit erhöht sich die Dynamik der Antriebe und die Baugröße der Motoren wird kleiner.

1.1 Definition der Servotechnik

In der modernen Antriebstechnik werden bei vielen Anwendungen hohe Anforderungen gestellt an:

- Positioniergenauigkeit
- Drehzahlgenauigkeit
- Regelbereich
- Drehmomentkonstanz
- Überlastfähigkeit
- Dynamik

Die Ansprüche an die Dynamik, also das zeitliche Verhalten eines Antriebes, resultiert aus immer schneller werdenden Bearbeitungsvorgängen, einer Erhöhung der Taktzeiten und der damit verbundenen Produktivität einer Maschine.

Die Genauigkeit eines Antriebes bestimmt sehr häufig die Anwendungsmöglichkeiten eines Antriebssystems.

Diesen Ansprüchen muß ein modernes dynamisches Antriebssystem gerecht werden.

Definition Servoantrieb:

Servoantriebe sind Antriebssysteme, die ein dynamisches, genaues und überlastfähiges Verhalten in einem großen Drehzahlstellbereich aufweisen.

Das Wort "servo" ist vom lateinischen "servus" abgeleitet, was mit Diener, Sklave oder Helfer übersetzt wird. In der Werkzeugmaschinenbranche waren die Servoantriebe überwiegend Hilfsantriebe. Dies hat sich jedoch geändert, so daß heute auch Hauptantriebe in Servotechnik realisiert werden.

In diesem Band werden die Begriffe "Servoantrieb" und "dynamischer Antrieb" ebenbürtig verwendet. Sie stehen immer für den permanenterregten AC-Synchronmotor und das dazugehörige Regelsystem.

1.2 Entwicklung der Servoantriebe

Servoantriebe haben einen Namen, der auf "Hilfsantriebseigenschaften" hindeutet. Dies hatte sicher noch vor 40 Jahren im Werkzeugmaschinenbau seine Berechtigung, als vielfach die Vorschübe z.B. der Drehmaschine noch von Hand betätigt wurden. Nur bei großen Drehmomenten wurden Pneumatik, Hydraulik oder unregelmäßige Drehstrommotoren eingesetzt. Es blieb der Fertigkeit des Drehers und seinen manuellen Meß- und Kontrollmethoden überlassen, wie schnell und präzise das Werkstück bearbeitet wurde.

Im Gegensatz dazu stand der Hauptantrieb, der pneumatisch, hydraulisch oder elektrisch für eine mehr oder weniger konstante Drehzahl der Hauptspindel durch gesteuerten Betrieb sorgte.

1.2.1 Technische Entwicklung der Servoantriebe

Zunächst gab es überwiegend hydraulische und pneumatische Servoantriebe.

Mit den Siliziumhalbleitern erlangte in den sechziger Jahren der Gleichstromantrieb erneut große Bedeutung.

Auch Servoantriebe wurden von dieser Entwicklung erfaßt:

Mit Rücksicht auf die Forderung nach großer Dynamik kristallisierten sich zwei Entwicklungsrichtungen heraus.

Die erste sieht die notwendige Minimierung des Massenträgheitsmomentes des Motors in der Ausbildung eines extrem kurzen, scheibenförmigen und eisenlosen Läufers.

Die zweite konzentriert sich auf lange, besonders schlanke Läufer.

In beiden Fällen wurden ab Beginn der siebziger Jahre Permanentmagnete anstelle einer Erregerwicklung eingesetzt. Damit wurden schnellerer Drehmomentaufbau und ein günstigerer Wirkungsgrad möglich.

Als Regelgeräte wurden eingesetzt:

zunächst sogenannte Linearverstärker mit Leistungstransistoren und Ausgangsspannungen bis etwa 100 V, später auch Thyristor-Stromrichter und gegen Ende der siebziger Jahre überwiegend Gleichstromsteller auf der Basis von Schalttransistoren (Transistorsteller) im Leistungsteil.

Damit waren die zunächst schlechten Wirkungsgrade der elektrischen Stellglieder weitgehend optimiert. Die erreichbare Ausgangsspannung lag wegen der noch ungenügenden Sperrspannungen der Transistoren und der begrenzten Lamellenspannungen der Kommutatoren an den Gleichstrommotoren in der Größenordnung von 200 V.

Der Anschluß des Transistorstellers über einen Trenntransformator ans Netz war obligatorisch. Dieser Trafo erfüllte gleichzeitig die Funktion der Netzentkopplung für das Stellglied.

Die Regelung von Drehzahl und Drehmoment erfolgte analog mit all den Problemen der Störempfindlichkeit kleiner Signalspannungen bei den für Servoantriebe charakteristischen großen Drehzahlstellbereichen. Als Istwertgeber für die Drehzahl diente der Gleichstrom-Tachometer.

Die Entwicklung von Frequenzumrichtern zunächst auf Basis von Thyristoren, später mit Leistungstransistoren führte bei den weniger anspruchsvollen geregelten Antrieben zu wachsendem Einsatz von verschleißarmen Kurzschlußläufer- und Normmotoren.

Auch bei den Servoantrieben suchte man seit Mitte der siebziger Jahre nach einem Weg zum bürstenlosen Motor.

Die Umkehrung des Prinzips des konventionellen Gleichstrommotors schien eine aussichtsreiche Lösung: Anker in den Ständer, Erregung in den Läufer.

Der bürstenlose Gleichstrommotor oder elektronisch kommutierte Motor war geboren.

Dieser Motor ist dem Prinzip nach ein permanenterregter Synchronmotor, der zur Erfassung der Rotorlage einen einfachen Positionsgeber mit 6 Positionsmeldungen je Umdrehung benötigt.

Neben der verschleißfreien elektronischen Kommutierung weist der Antrieb weitere Vorteile auf:

- reduziertes Massenträgheitsmoment durch wicklungsfreien Läufer
- einfache Kühlung, da Verlustleistung im Ständer statt im Läufer entsteht
- besserer Wirkungsgrad, da keine Verluste durch Erregerwicklung auftreten

Die elektronische Kommutierung des Stroms der Ständerwicklung erfolgt alle 60° el., gesteuert durch den Positionsgeber. Wegen der Kommutierung von Gleichstromblöcken nennt man das Prinzip auch Blockkommutierung. Zur Drehzahlregelung ist ein zusätzlicher Geber nötig.

Parallel zu diesen Entwicklungen wurde auch der Kurzschlußläufermotor wegen seiner günstigen Fertigungskosten und seines Vorzugs des zusätzlichen Feldschwächbereichs als bürstenloser Servoantrieb weiter entwickelt.

Ein anderer Weg zum bürstenlosen Antrieb war die Entwicklung des sogenannten sinuskommutierten Servoantriebs:

Das Konstruktionsprinzip des Motors ist ebenfalls der permanenterregte Synchronmotor mit den oben erwähnten Vorzügen. Der Rotorlagegeber ist in diesem Falle allerdings ein Resolver, dessen Ausgangssignal den sinusförmigen Ständerstrom steuert.

Alle drei genannten Prinzipien bürstenloser Servoantriebe sind heute im Einsatz und haben bürstenbehaftete Lösungen seit Beginn der neunziger Jahre fast vollständig verdrängt.

Entscheidend für den Erfolg der bürstenlosen Systeme war der Fortschritt auf dem Gebiet der Halbleitertechnik. Die Entwicklung hochintegrierter, schneller Rechnersysteme und nichtflüchtiger Speicherbausteine ermöglichte die Einführung der digitalen Regelung. Nun ist es kostenmäßig nicht mehr entscheidend, ob in den einzelnen Systemen einige Funktionen mehr oder weniger benötigt werden. Mit einmaligem Softwareaufwand statt bisher vielfachem Hardwareinsatz wird jetzt alles realisiert.

Das Leistungsteil des Regelgerätes für alle drei bürstenlosen Systeme ist prinzipiell gleich: es handelt sich um einen Frequenzumrichter, der maschinengeführt arbeitet, im Gegensatz zu den selbstgeführten Umrichtern für den Betrieb von Normmotoren. Die funktionalen Unterschiede finden sich allein im Bereich der Steuerung und Regelung.

Die Fortschritte bei den Leistungstransistoren haben seit Beginn der neunziger Jahre auch den Betrieb der Servoumrichter direkt an der Netzspannung ohne Zwischenschaltung eines Netztransformators ermöglicht.

1.2.2 Marktentwicklung der Servoantriebe

War der Servoantrieb zunächst nur im Marktsegment der Werkzeugmaschinen zu Haus, so wurden seine Eigenschaften sehr schnell zu Beginn der siebziger Jahre für das im Zuge der Automatisierung wachsende Gebiet der Handhabungstechnik, der Industrieroboter und der Montageautomaten entdeckt. Im Gegensatz zu den Anwendungen der Werkzeugmaschinen kam es wegen der zum Teil recht unterschiedlichen Anforderungen an die Antriebe zu einem verzögerten Ersatz der hydraulischen und pneumatischen Konkurrenten.

Wegen ihrer geringen Masse fanden in der Handhabungs- und Robotertechnik zunächst überwiegend Gleichstrom-Scheibenläufermotoren oft in Kombination mit spielarmen Planetengetrieben oder sonstigen kompakt bauenden Sondergetrieben Einsatz. Später wurden die Scheibenläufermotoren ebenfalls durch bürstenlose Ausführungen ersetzt.

Nachdem die Automatisierungswelle inzwischen in allen Bereichen des Maschinenbaus rollt, der Elektroantrieb überall dominiert und die Mechanik der Maschinen durch moderne Einzelantriebe anstelle von Zentralantrieben wesentlich vereinfacht wird, ist der Markt für Servoantriebe erweitert worden. Heute gibt es kaum noch einen Maschinenbereich, in dem keine Anwendungen für Servoantriebe zu finden sind. Die wichtigsten sind

- die Papierverarbeitung
- die Blechverarbeitung
- die Verpackungstechnik
- die Fördertechnik
- die Holzverarbeitung
- die Baustofftechnik

Da der Servoantrieb in allen Branchen höchst unterschiedlich genutzt wird, sind längst nicht alle Anwendungen hochdynamisch. Die Eigenschaften der hohen statischen oder dynamischen Regelgenauigkeit, des großen Drehzahlstellbereiches, der hohen Stoßüberlastung oder auch nur des geringen Gewichts, der geringen Abmessungen sind oft auch allein schon für den Einsatz entscheidend.

Dank der modernen Digitaltechnik ist die Anwendung der Servoantriebe wesentlich einfacher als noch vor ein paar Jahren. Die Digitaltechnik bietet eine große Vielfalt an anwendungsbezogenen Optionen, Schnittstellen zu allen Steuerungen (entweder direkt oder über Datenbussysteme) und die Möglichkeit der Inbetriebnahme und Optimierung mit PC und des automatischen Abgleichs.

Die anfangs erwähnten hydraulischen und pneumatischen Lösungen halten sich nur noch in Marktnischen.

1.3 Vergleich gebräuchlicher Antriebssysteme

Werden die von SEW angebotenen Antriebssysteme verglichen, so müssen verschiedene Faktoren herangezogen werden. Die Vergleichskriterien müssen sehr sorgfältig ausgewählt werden, um nicht "Äpfel mit Birnen" zu vergleichen.

Drei Bereiche werden näher untersucht:

- Die Motoreigenschaften
- Die prinzipiellen Antriebseigenschaften
- Die Systemkonfigurationen bei einer Anwendung

1.3.1 Vergleich der Motoreigenschaften

Der erste Vergleich soll dem Motor gelten. Es werden Motoren mit gleicher Drehzahl und gleicher Leistung gegenübergestellt.

Kenngößen	Drehstromasynchronmotor am Netz	Gleichstrommotor	Permanenterregter Synchronmotor
Leistung [kW]	7,5	8,3	7,5
Drehzahl [1/min]	2900	3200	3000
Typ / Baugröße	DFV 132 M2	GFVN 160 M	DFY 112 ML
Schutzart	IP 54	IP 44	IP 65
Kühlung	eigen	eigen	Konvektion
Länge [mm]	400	625	390
Masse gesamt [kg]	66	105	38,6
Masse Rotor [kg]	17	29	8,2
J_{Mot} [10^{-4} kgm ²]	280	496	87,4
Nenn Drehmoment [Nm]	24,7	24,7	24
Max. Drehmoment M_{max}	$2,6 \cdot M_N / 1,8 \cdot M_N$ ¹⁾	$1,6 \cdot M_N$	$3 \cdot M_N$
Max. Winkelbeschleunigung α [1/s ²] ²⁾	1588	797	8238
Max. Dynamik [%] ⁴⁾ (Servomotor = 100 %)	20	10	100
Hochlaufzeit t_H ³⁾ [ms]	191	420	38

1) Angegeben ist hier das Kippmoment und das mittlere Hochlaufmoment M_H , welches in die Rechnungen eingeht.

$$2) \text{ Max. Winkelbeschleunigung } \alpha = \frac{M_{\text{max}}}{J_{\text{Mot}}}$$

$$3) t_H = \frac{J_{\text{Mot}} \cdot n_{\text{Mot}}}{9,55 \cdot M_{\text{max}}}$$

$$4) \frac{\alpha}{\alpha_{\text{Servo}}} \cdot 100 \%$$

Aus der Tabelle werden schon einige Merkmale der Motoren deutlich. Die unterlegten Merkmale werden noch näher erläutert.

Masse der Motoren und Rotoren

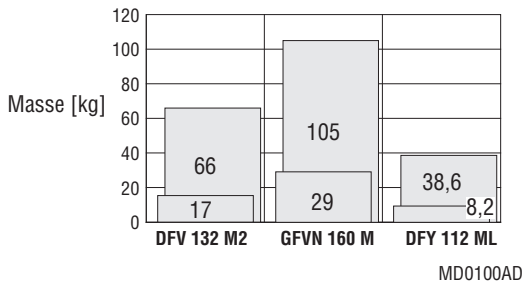


Bild 1: Masse der Motoren und Rotoren

Bild 1 zeigt die Masse der verschiedenen Motoren im Vergleich. Dabei ist zu erkennen, daß der Synchronmotor mit Abstand die geringste Masse hat. Insbesondere bei Anlagen, bei denen der Antrieb mitfährt, hat ein niedriges Eigengewicht große Vorteile.

Anhand dieses Vergleichs ergibt sich für die einzelnen Motoren folgendes Leistungsgewicht:

- Asynchronmotor: 8,8 kg/kW
- Gleichstrommotor: 12,7 kg/kW
- Synchronmotor: 5,2 kg/kW

Motormassenträgheitsmoment

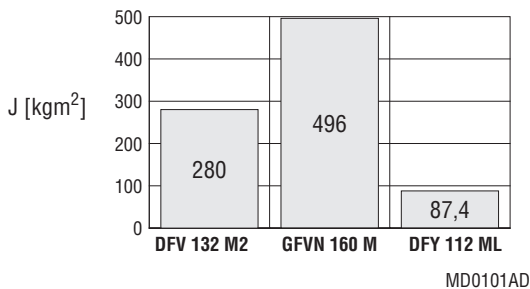


Bild 2: Motormassenträgheitsmoment

Bild 2 zeigt den Vergleich des Massenträgheitsmomentes der Motoren. Deutlich wird auch hier der sehr große Unterschied zwischen Servo- und Gleichstrommotor. Ein geringes Massenträgheitsmoment des Motors wirkt sich speziell in Bezug auf die Dynamik vorteilhaft aus, hat aber Nachteile, wenn große externe Massen bewegt werden müssen.

Dynamik

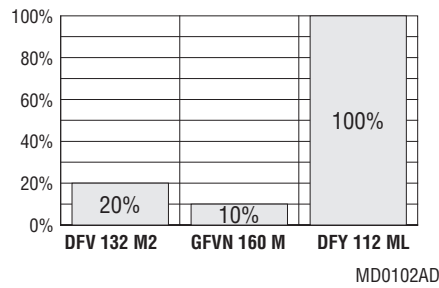


Bild 3: Dynamik

Bild 3 zeigt deutlich den Vorteil des Synchronmotors, der wesentlich dynamischer ist als die anderen Systeme.

Hochlaufzeit ohne Last

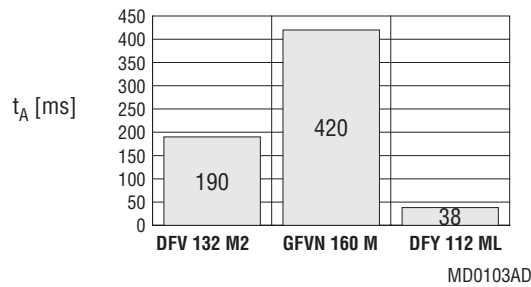


Bild 4: Hochlaufzeit ohne Last

Bedingt durch das maximale Motordrehmoment M_{\max} und das geringe Massenträgheitsmoment J_{mot} weist der Synchronmotor eine sehr kleine Hochlaufzeit ohne Last auf, was ihn für dynamische Anwendungen empfiehlt.

1.3.2 Vergleich prinzipieller Antriebseigenschaften

Bei geregelten Antrieben ergeben sich folgende besondere Kenngrößen, die die Antriebsauswahl beeinflussen:

Kenngrößen	Gleichstrom	Asynchronmotor FU-gesteuert (U/f)	Asynchronmotor FU-geregelt (U/f)	Synchronmotor
Regelbereich R	1:100 (300)	1:10 (20)	1:100	1:300 (10.000)
Überlast [%] von M / M _N	150 ... 200	150	>M _{kipf} ¹⁾	300
t _a [%] geregelt (Synchron =100%)	500	450 ... 500	300 ... 400	100
Fremdlüfter bei großem Re- gelbereich R	ja	ja	ja	nein
Stillstandsmoment	bedingt	nein	bedingt	ja
Wartung (Motor)	aufwendig	gering	gering	gering
Reparatur (Motor)	mittel	einfach	einfach	schwierig
Fremdmotor am Verstärker ²⁾	ja	ja	ja	möglich
Ersatzteilbevorratung	aufwendig	gering	gering (Geber)	aufwendig
Betrieb mit großen ext. Massen	sehr gut	gut	gut	schwierig durch geringes J _{mot}
NOT-AUS über mech. Motor- bremse ³⁾	gut	gut	gut	gut ⁴⁾
4Q- Betrieb über	Netzurückspeisung	Bremschopper / Bremswiderstand	Bremschopper / Bremswiderstand	Netzurückspeisung oder Bremschopper / Bremswiderstand
Positionierverhalten und Wiederholgenauigkeit	abhängig von Geber und Peripherie (zwischen Servo und Asynchronmotor drehzahl-geregelt)	deutlich geringer als beim drehzahl- geregelten Asynchronmotor (abhängig von der Peripherie (SPS, Bremse, etc.))	Positioniergenau- igkeit auf ca. ± 50 Winkelminuten	Positioniergenau- igkeit auf ca. ± 5 Winkelminuten

1) Bei Betrieb mit Frequenzumrichter mit Drehzahlregelung kann durch entsprechende Auswahl des Frequenzumrichters ein Motordrehmoment von 300% M_N und mehr erreicht werden.

2) Fremdmotoren bei geregelten Systemen erfordern Kenntnisse der spezifischen Motorkennndaten. Ebenso müssen Eigenschaften des Geber- und Auswertesystems, das Kommutierungsverfahren etc. bekannt sein. Deshalb ist es, speziell bei der Servotechnik üblich, die Komponenten von einem Hersteller zu beziehen.

3) Bei den SEW-Synchronservomotoren DFY mit Bremse können unter Berücksichtigung der max. Arbeit auch mehrere NOT-AUS Bremsungen bewältigt werden.

4) Beim Synchronmotor dient die mechanische Bremse als reine Not- und Haltebremse.

Generell müssen bei der Auswahl einer Antriebskomponente Schutzart, Wartung/Wartungsintervalle, Umgebungsbedingungen (die für Lüftung, Baugröße, Gewicht, Staubentwicklung etc. entscheidend sind) berücksichtigt werden.

1.3.3 Vergleich von Systemkonfigurationen bei einer Anwendung

Hier sollen Systemkonfigurationen vorgenommen und anhand einer beispielhaften Anwendung verglichen werden. Grundlage zum Vergleich ist gleiche Leistung und gleiche Abtriebsdrehzahl. Lastdaten: $m = 1000 \text{ kg}$; $v_{\max} = 1,5 \text{ m/s}$

Kenngrößen	Asynchronmotor			Gleichstrommotor	Synchronmotor
	ASM am Netz	FU mit U/f	FU mit n-Regler		
Typ	DV 132S4 1400 1/min	DV 132S4 1400 1/min	DV 132S4 1400 1/min	GVN132S 3200 1/min	DFY 112M 3000 1/min
Leistung	5,5 kW	5,5 kW	5,5 kW	5,3 kW	17,5 Nm \triangleq 5,5 kW
Getriebe	R82 $i = 14,69$	R82 $i = 14,69$	R82 $i = 14,69$	R73 $i = 33,87$	R82 $i = 31,78$
Verstärkerleistung/ -strom	entfällt	MC 31B 055 5,5 kW	MC 31B 075 7,5 kW	MR 315 15 A	MAS 51A-030 30 A
Hochlaufmoment M_H	2,4 M_N	1,3 M_N	2,0 M_N	1,5 M_N	3 M_0
max. Beschleunigungszeit	230 ms	450 ms	300 ms	620 ms	200 ms
max. Beschleunigung	6,7 m/s^2	3,5 m/s^2	5,3 m/s^2	2,43 m/s^2	7,45 m/s^2
$J_{\text{ext}}/J_{\text{Mot}}$	5,4	5,4	5,4	1,0	3,4
Bremsen	mech. Bremsen aus voller Drehzahl	elektr. Bremsen, dann mech. Bremse	elektr. Bremsen, dann Halte- regelung / mech. Bremse	elektr. Bremsen, dann mech. Bremse	elektr. Bremsen, dann Halte- regelung / mech. Bremse
ca. Gesamt-Anhalte- weg	150 mm	300 mm	190 mm	380 mm	125 mm
theoretische Haltege- nauigkeit ¹⁾	18 mm	0,4 mm	0,12 mm	0,12 mm	0,05 mm
praktische Haltege- nauigkeit	ca. 25 mm	ca. 3 mm	ca. 1 mm	ca. 1 mm	ca. 0,5 mm

1) Nicht einbezogen sind Reaktionszeiten von SPS, FU und Schütz, Ansprechzeit der Bremse, sowie Getriebeispiel.

Die Bremseneinfallzeit für gleich- und wechselstromseitige Abschaltung ist berücksichtigt.

1.4 Vor- und Nachteile eines Servoantriebs

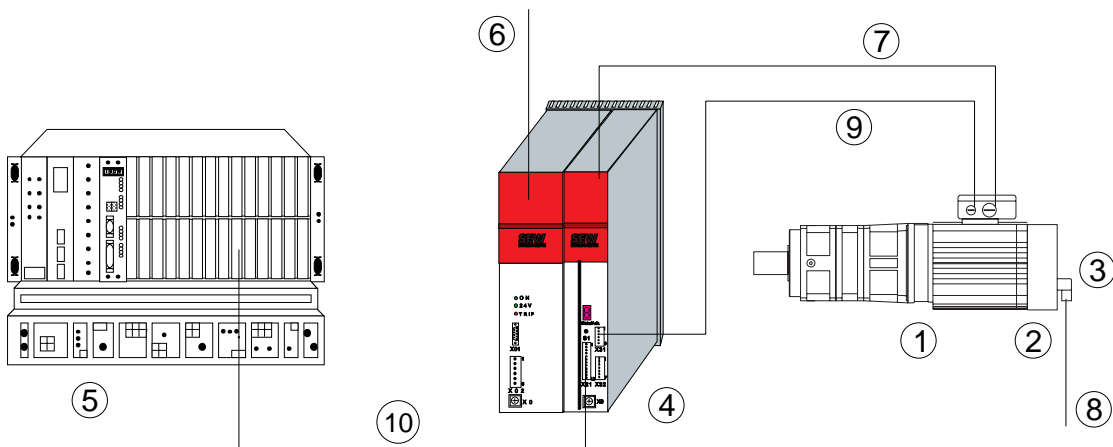
Vorteile:

- hohe Drehzahlgüte
- hohe Dynamik
- großer Drehzahlstellbereich
- hohe Positioniergenauigkeit
- Stillstandsmoment (Drehzahl Null)
- hohe Überlastfähigkeit ($3 \cdot M_0$)

Nachteile:

- relativ hohe Systemkosten

1.5 Komponenten eines Servosystems



MD0079AX

Bild 5: Komponenten eines dynamischen Antriebs

In Bild 5 werden die Komponenten eines Servosystemes gezeigt. Im wesentlichen werden folgende Komponenten benötigt:

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| 1 Motor mit/ohne Getriebe | 6 Netzzuleitung |
| 2 Gebersystem | 7 Motorzuleitung |
| 3 Bremse (optional) | 8 Zuleitung für Bremse |
| 4 Servoumrichter | 9 Resolverleitungen |
| 5 Steuerung mit Sollwertvorgabe | 10 Steuerleitungen |

In den nachfolgenden Kapiteln werden die einzelnen Komponenten genauer beschrieben.

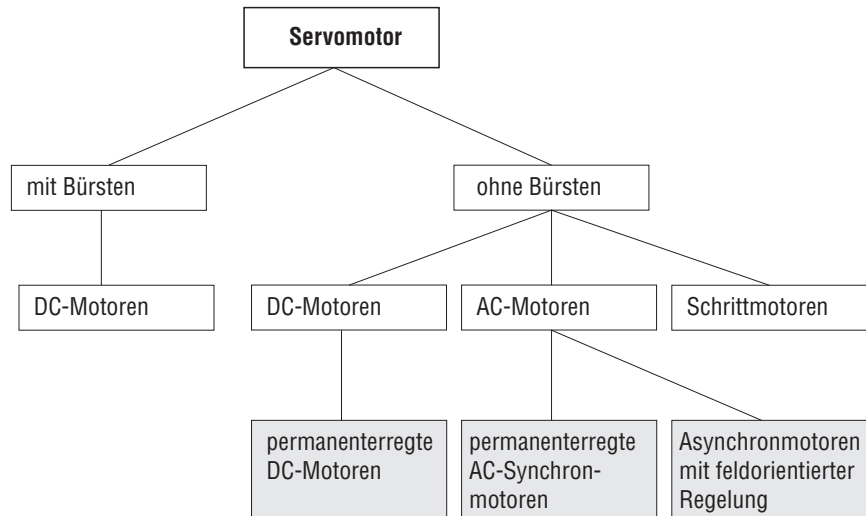
1.6 Übersicht gebräuchlicher Servomotoren

Bis vor wenigen Jahren wurden die Servoantriebe in Gleichstromtechnik mit bürstenlosen permanenterregten DC-Motoren ausgeführt. Die Ansteuerung erfolgte über Thyristor- oder Transistorsteller.

Heute werden mehr und mehr bürstenlose permanenterregte AC-Synchronmotoren verwendet, wie sie auch von SEW produziert werden. Die Vorteile gegenüber den DC-Antrieben sind:

- besseres Preis-/Leistungsverhältnis
- besseres Leistungs-/Masseverhältnis
- längere Lebensdauer
- hohe thermische Belastbarkeit

Servomotoren können in mehrere Gruppen eingeteilt werden:



MD0080AD

Bild 6: Einteilung der Servomotoren

Die Unterscheidungsmerkmale liegen im Aufbau des Motors, sowie in den für die Regelung notwendigen Reglerstrukturen und den Istwertmeldesystemen.

Die drei wichtigsten Systeme sollen hier kurz aufgezeigt werden:

- Asynchronmotor mit Kurzschlußläufer und feldorientierter Regelung (Kap. 1.6.1)
- Permanentenerregter Synchronmotor (mit blockförmiger Speisung) / Brushless DC (Kap. 1.6.2.1)
- Permanentenerregter Synchronmotor (mit sinusförmiger Speisung) / Brushless AC (Kap. 1.6.2.2)

1.6.1 Asynchronmotor mit Kurzschlußläufer und feldorientierter Regelung

Als AC-Servomotor wird auch der Asynchronmotor mit Käfigläufer und feldorientierter Regelung bezeichnet. Im prinzipiellen Aufbau und in der Wirkungsweise entspricht dieser Motor dem bekannten Drehstromasynchronmotor mit Kurzschlußläufer.

Als Servomotoren sind die Asynchronmotoren mit trägheits-, streuungs- und schlupfarmen Rotoren ausgeführt und werden mit einer speziellen Regelung betrieben, die dafür sorgt, daß Ständer- und Läuferfluß immer senkrecht aufeinander stehen. Damit kann der Asynchronmotor bei dynamischen Vorgängen nahezu mit Kippmoment betrieben werden und eignet sich dadurch hervorragend für hochdynamische Anwendungen.

Nachteilig bei diesem Motor (im Vergleich zum permanentenerregten Motor) ist der schlechtere Wirkungsgrad und ein etwas größeres Volumen, bezogen auf das Drehmoment. Im Läufer treten stromabhängige Verluste auf, die bei einem permanentenerregten Läufer nicht entstehen. Infolge der höheren Verluste (Wirkungsgrad η) und des Magnetisierungsbedarfs (Leistungsfaktor $\cos \varphi$) verlangt der Asynchronmotor eine um

$\frac{1}{\eta \cdot \cos \varphi}$ größere Umrichterleistung.

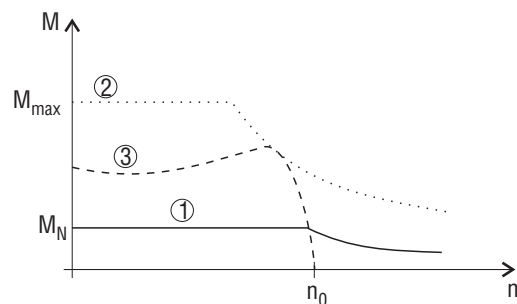
Im Bereich der Wärmeabfuhr sind weitere Maßnahmen zu treffen, die speziell im Bereich kleiner Drehzahlen ihre Wirkung zeigen. In vielen Fällen werden die Motoren dann als fremdbelüftete Motoren gebaut oder der Regelbereich oder das Drehmoment wird reduziert.

Durch die Komplexität der Signalverarbeitung bei hohen dynamischen Anwendungen erhöht sich der Aufwand gegenüber anderen Systemen. Hauptsächlich der hochauflösende Geber und die notwendigen schnellen und leistungsfähigen Mikroprozessoren fallen hier ins Gewicht. Der Prozessor muß ständig die Statorströme aus der gewünschten Drehmoment- und Magnetisierungskomponente und der Rotorlage berechnen.

Bisher wurden solche Antriebe meist als Hauptantriebe größerer Leistung im Bereich der Werkzeugmaschinen eingesetzt. Mit einer Verbreitung dieser Antriebe ist aber zu rechnen, da die Elektronik preisgünstiger wird und der Motor kostengünstig hergestellt werden kann.

Die Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie zeigt den Verlauf mit

- 1 Dauerdrehmoment
- 2 Max. Drehmoment
- 3 Kennlinie des Standard-Asynchronmotors als Vergleich



MD0081AX

Bild 7: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie

Kennlinie **2** zeigt die Hüllkurve, die abhängig ist von der Zwischenkreisspannung des Umrichters bzw. dessen Strom.

1.6.2 Permanenterregter Synchronmotor

Der permanenterregte Synchronmotor, teilweise auch elektronisch kommutierter Motor oder bürstenloser DC-Motor genannt, ist der Motor, der die Anforderungen an ein Servosystem am besten erfüllt. Der Ständer läßt sich direkt mit dem des Asynchronmotors vergleichen. Der geblechte Läufer hat aufgeklebte Magnete, die für das konstante Magnetfeld sorgen. Die Motoren sind üblicherweise geschlossen (IP 65) und eigenbelüftet.

Der Motor kann mit unterschiedlichen Stromeinprägeverfahren betrieben werden. Hier werden das block- und das sinuskommutierte Verfahren benutzt. Der Unterschied liegt in der Bestromung und in der Art und Ausführung der notwendigen Gebersysteme.

1.6.2.1 Permanenterregter Synchronmotor (mit blockförmiger Speisung) / Brushless DC

Der permanenterregte Drehstrom-Synchronmotor mit Blockkommutierung, wie er nachfolgend beschrieben wird, wird häufig auch als bürstenloser Gleichstrommotor bezeichnet.

Bei der Blockkommutierung erfolgt die Ansteuerung der Stromregler und Leistungsendstufen über einen Rotorlagegeber (RLG). Dies können einfache Hallensensoren, Lichtschranken oder ähnliches sein.

Ein großer Vorteil der blockförmigen Speisung ist die einfache Erzeugung der Lagesignale und deren Umsetzung in die Steuersignale für den Strom.

In den nachfolgenden Bildern sind die Verläufe der einzelnen Kenngrößen aufgezeigt.

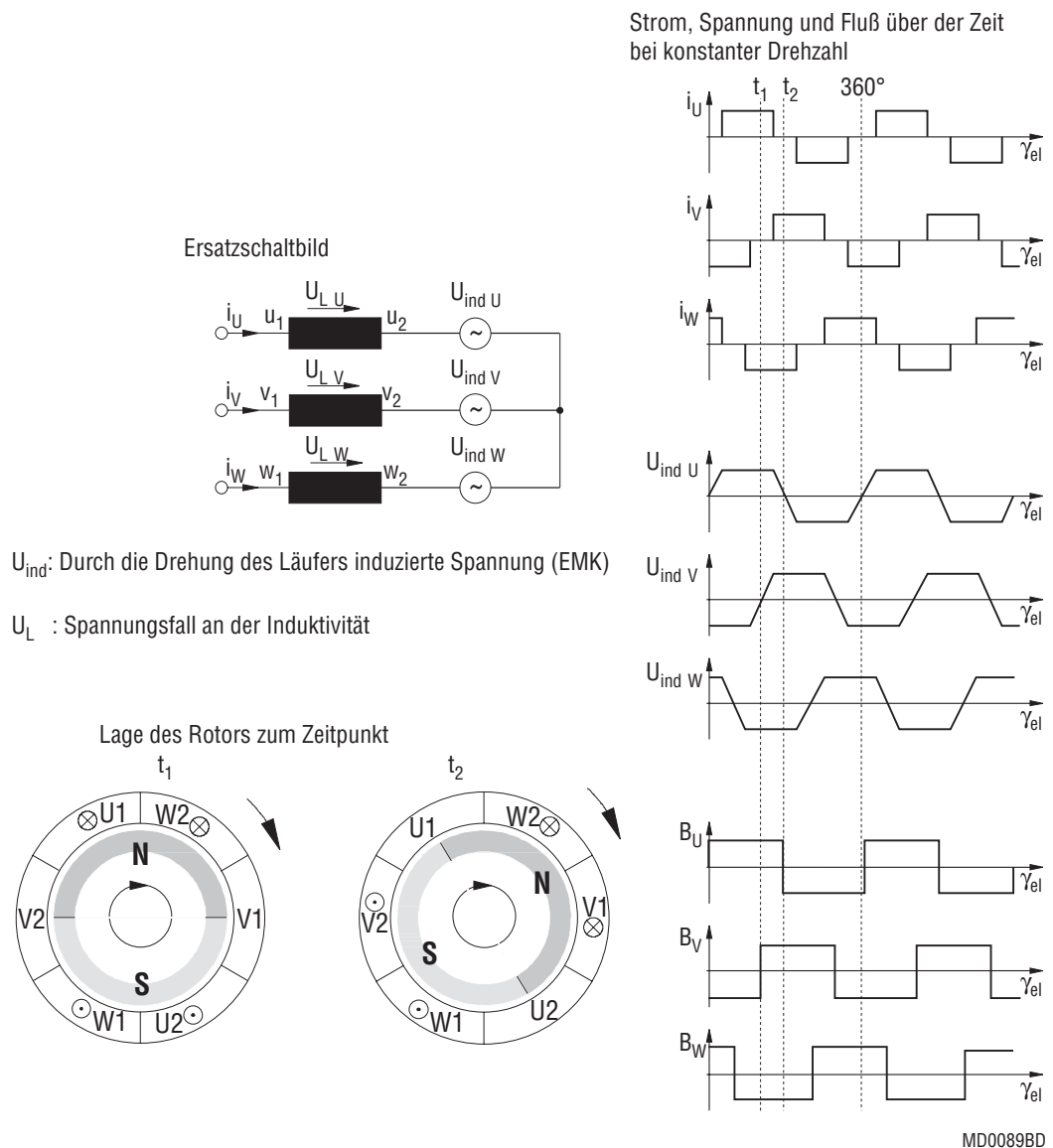
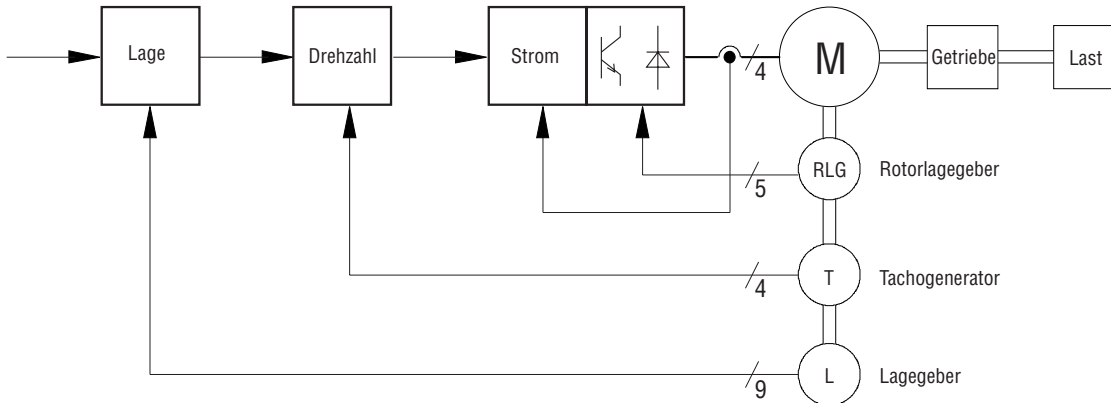


Bild 8: Blockförmige Speisung

In den Motorwicklungen werden blockförmige Ströme eingepreßt. Im Motor werden damit trapezförmige Spannungen induziert. Bauartbedingt entsteht eine rechteckförmige Verteilung der Luftspaltinduktion. Dies hat eine konstante Drehmomentbildung zur Folge.

Bei der Blockkommutierung werden immer zwei benachbarte Phasen bestromt.

Zur Erfassung der Rotorlage wird ein Rotorlagegeber verwendet, zur Erfassung der Drehzahl bürstenlose Tachogeneratoren.



MD0088AD

Bild 9: Regelstruktur mit Geber beim blockkommutierten Motor

Bild 9 zeigt die Komponenten eines Regelkreises beim blockkommutierten Motor. Es verdeutlicht, daß für jede Regelgröße ein eigener Istwertgeber mit der dazugehörigen Verdrahtung erforderlich ist.

1.6.2.2 Permanenterregter Synchronmotor (mit sinusförmiger Speisung) / Brushless AC

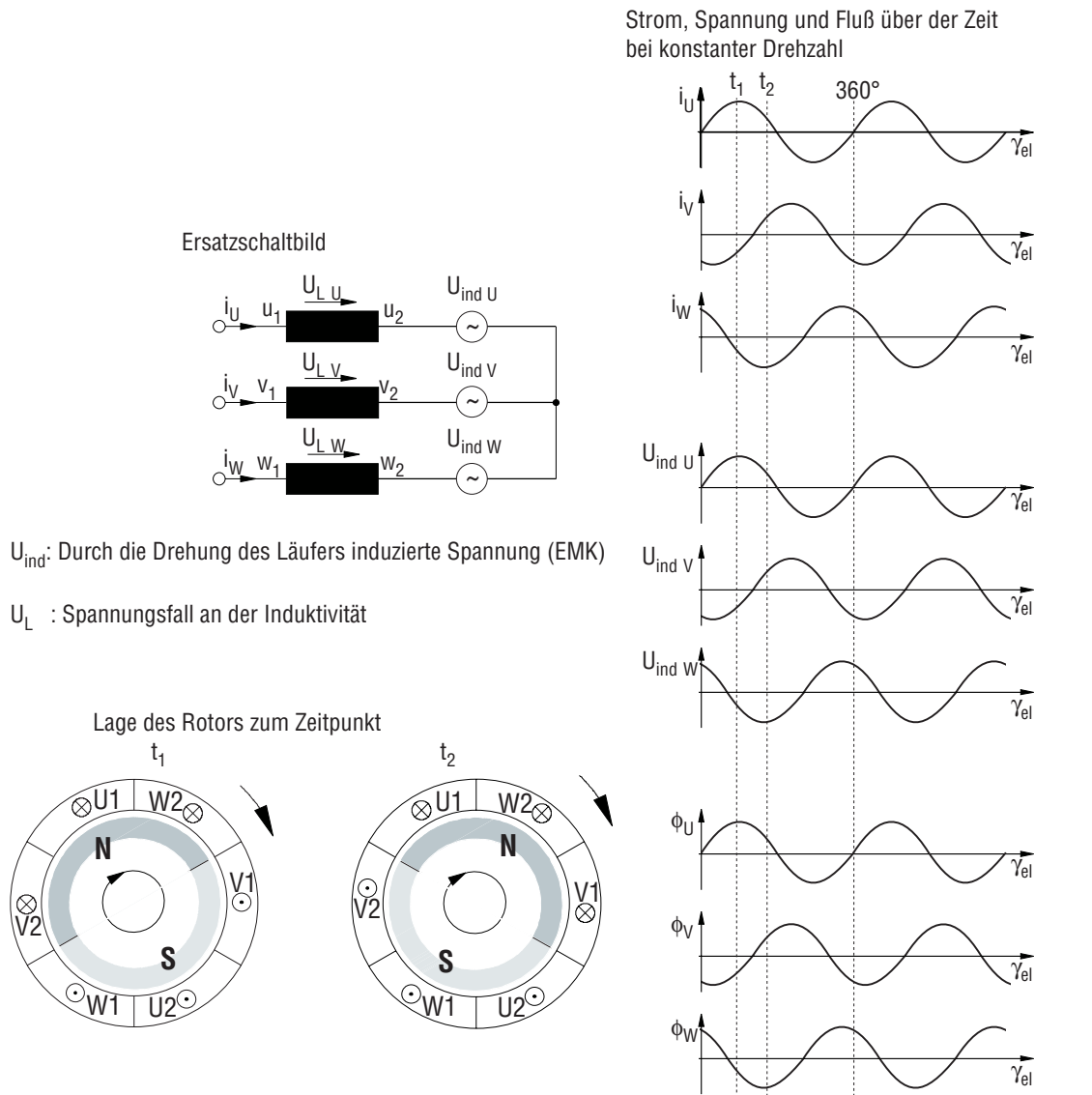
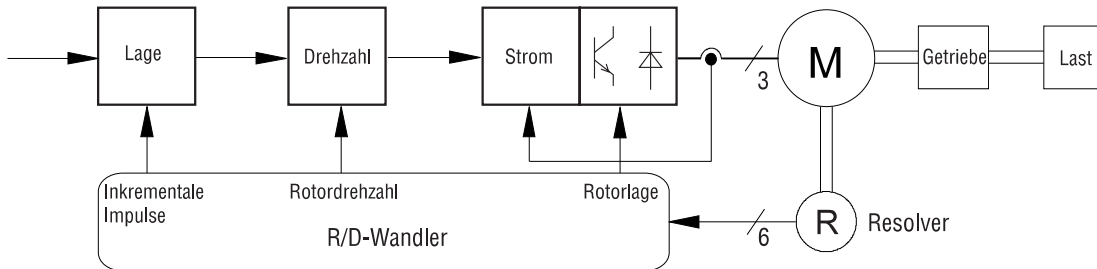


Bild 10: Sinusförmige Speisung

Die Kommutierungsreihenfolge erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie bei der Blockkommutierung. Unterschiede sind, daß jetzt alle drei Phasen gleichzeitig bestromt werden, und daß der Strom, die induzierte Spannung und der Fluß sinusförmig sind. Dadurch wird eine Drehmoment- und Drehzahlkonstanz auch bei kleinen Drehzahlen erreicht. Zusätzlichen Maßnahmen in der mechanischen Ausführung der Motoren unterstützen dies.

Die sinusbestromten Motoren werden in der Regel mit Resolvieren als Gebersystem ausgestattet. Resolver sind zwar aufwendiger in der Auswertung, können aber aufgrund der digitalen Auswertung eine höhere Auflösung erzielen und insbesondere mit überlagerter Lageregelung ein Gebersystem einsparen, wodurch auch der Verdrahtungsaufwand geringer wird.



MD0090AD

Bild 11: Regelstruktur mit Geber beim sinuskommutierten Motor

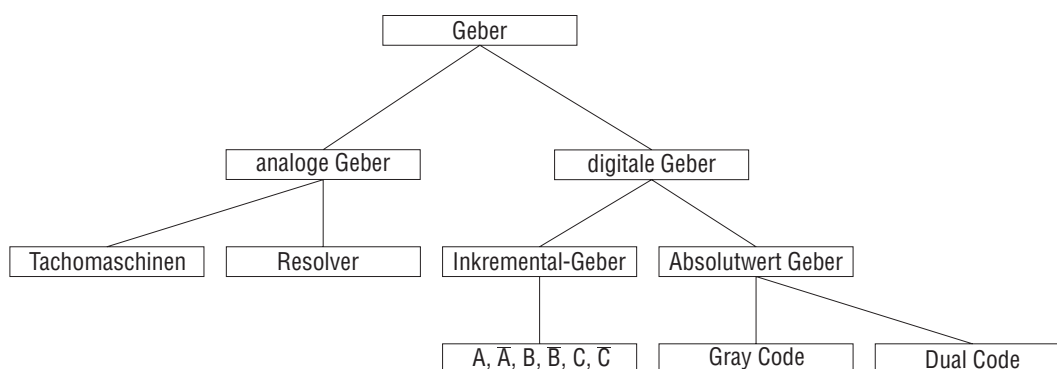
Die komplette Motorführung eines sinusbestromten permanentenerregten Synchronmotors wird in Kapitel 4 beschrieben.

1.7 Gebersysteme

Ein Gebersystem dient zur Erfassung bestimmter Daten eines Antriebs. Dazu gehören:

- Drehzahl
- Rotorwinkel (Lage innerhalb einer Umdrehung)
- Maschinenposition (Lage über mehrere Umdrehungen)

1.7.1 Überblick über gebräuchliche Gebersysteme



MD0091AD

Bild 12: Übersicht Geber

Die verschiedenen Geber liefern folgende Daten:

Gebersystem	gelieferte Daten		
	Rotorlagewinkel	Maschinenposition	Drehzahl
Absolutwertgeber Single-Turn	X	(X)	(X)
Absolutwertgeber Multi-Turn	X	X	(X)
Inkrementalgeber	(X)	(X)	(X)
Resolver mit R/D-Wandler	X	(X)	X
Tachogenerator			X

X direkt auswertbar, (X) mit zusätzlicher Auswertung verfügbar

Ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl eines Gebers ist die Robustheit des Gebersystems. Da der Geber direkt am Motor angebracht wird, muß er temperatur- und vibrationsunempfindlich sein. Eine große Rolle spielt auch die Störempfindlichkeit des Gebersystems.

1.7.2 Vor- und Nachteile der wichtigsten Gebersysteme

Gebersystem	Vorteil	Nachteil
Inkrementalgeber	<ul style="list-style-type: none"> ▪ relativ robuste Ausführungen möglich ▪ großes Angebot an Auflösung, Bauformen, Schnittstellen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bei Spannungsausfall geht die Lageinformation verloren
Absolutwertgeber	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lageinformation auch nach Spannungsausfall vorhanden ▪ eindeutige Zuordnung einer Position zum Ausgangswert ▪ sehr hohe Auflösung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ hohe Kosten
Resolver	<ul style="list-style-type: none"> ▪ robuste Ausführung ▪ vibrations- und temperaturunempfindlich ▪ geringer Verdrahtungsaufwand ▪ Einbau in Motor möglich ▪ Einsparung weiterer Gebersysteme 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ höherer Auswerteaufwand

Betrachtet man die Vor- und Nachteile der einzelnen Gebersysteme, so kristallisiert sich der Resolver für den Einsatz mit dem Servomotor heraus.

2 Der permanenterregte Synchronmotor

2.1 Aufbau und Wirkungsweise

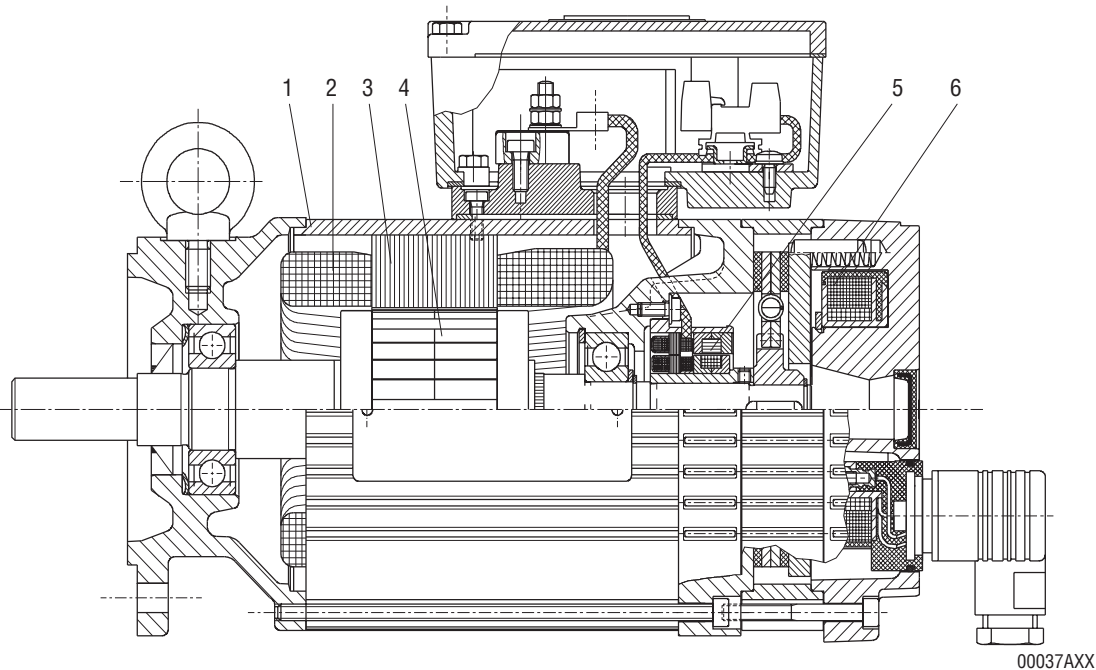


Bild 13: Schnittbild vom permanenterregten Synchronmotor

- Erläuterung:**
- | | |
|----------------------|---------------------------------|
| 1. Ständer | 4. Läufer mit Permanentmagneten |
| 2. Ständerwicklung | 5. Resolver |
| 3. Ständerblechpaket | 6. Bremse |

Synchronmotoren sind Drehfeldmotoren, bei denen Ständerdrehfeld und Läuferdrehfeld synchron laufen.

Durch die räumliche Anordnung der Ständerspulen und die zeitliche Phasenfolge des Eingangsstroms wird ein Drehfeld erzeugt.

Die Drehzahl des Drehfeldes n_d berechnet sich zu:

$$n_d = \frac{f \cdot 60}{p} \quad \text{mit: } f = \text{Frequenz der angelegten Spannung}$$

$$p = \text{Polpaarzahl des Ständers}$$

Die SEW-Synchronmotoren sind immer als 6polige ($p = 3$) Motoren ausgeführt.

f [Hz]	100	150	225
n_d [min^{-1}]	2000	3000	4500

Abhängigkeit der Drehzahl von der Frequenz bei $p = 3$.

Die permanenterregten SEW-Synchronmotoren werden deshalb 6polig ausgeführt, da bei dieser Polzahl die Eisenverluste bei 3000 min^{-1} (150 Hz) gering sind, und gleichzeitig eine gute Drehmomentkonstanz bei kleinem Magnetbedarf erzielt werden kann.

Die SEW-Synchronmotoren sind in Sternschaltung gebaut. Der Sternpunkt ist nicht herausgeführt.

Der Ständer besteht, wie beim Asynchronmotor, aus dem Gehäuse, dem Blechpaket und der Ständerwicklung. Der Läufer, auch Rotor genannt, besteht aus Welle, Rotorblechen und aufgeklebten Permanentmagneten. Um eine größere Dynamik des Motors zu erhalten, werden die Bleche des Rotors nicht massiv, sondern mit Aussparungen (siehe Bild 14) ausgeführt. Dadurch sinkt das Massenträgheitsmoment des Läufers und die Hochlaufzeit des Motors.

Die eingesetzten Permanentmagneten sind aus dem Seltene-Erden-Material Neodym-Eisen-Bor. Magneten aus diesem Material haben im Vergleich zu den bisher eingesetzten Ferrit-Magneten besonders gute magnetische Eigenschaften und können größere Drehmomente entwickeln.

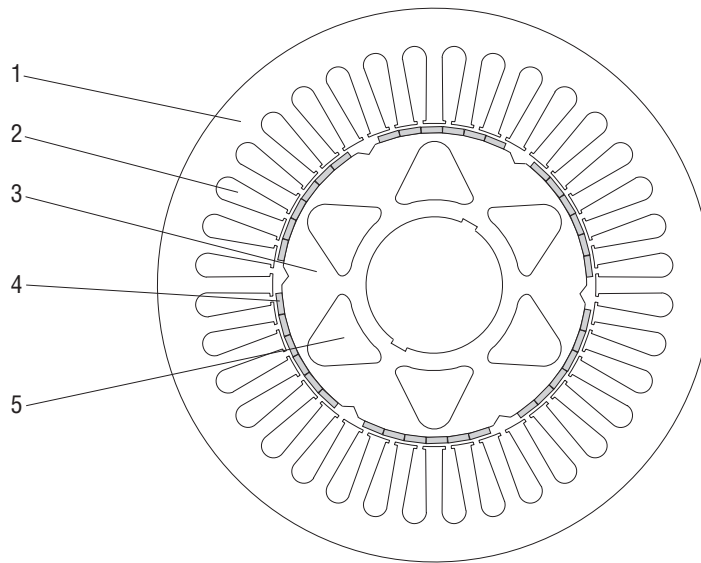


Bild 14: Schnittbild von Ständer und Läufer

00038AXX

- Erläuterung:**
1. Ständerblech
 2. Nuten für die Wicklung
 3. Läuferblech
 4. Permanentmagnete
 5. Aussparungen

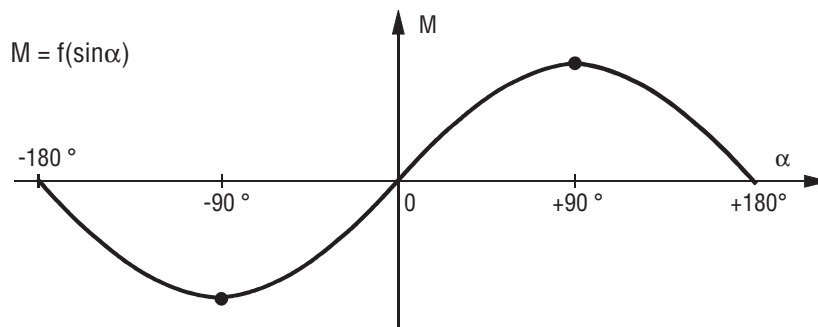
2.1.1 Funktion des permanenterregten AC-Synchronmotors

Schließt man den Motor an einen dafür geeigneten Umrichter an, so wird in den Wicklungen des Ständers ein Drehfeld, das sogenannte Ständerdrehfeld, erzeugt. Dieses Drehfeld wirkt auf den Läufer und übt eine Kraft auf ihn aus. Der Läufer wird aufgrund der magnetischen Kopplung zwischen Ständer und Läufer beschleunigt und läuft mit gleicher Winkelgeschwindigkeit, also synchron.

Belastet man den Motor, so ergibt sich eine Verschiebung des Läuferdrehfeldes bezogen auf das Ständerdrehfeld. Die Pole des Polrads (Läufer) eilen denen des Ständerdrehfeldes um einen bestimmten Winkel, den sogenannten Polradwinkel α , nach. Das Drehmoment wird zunächst um so größer,

je größer der Polradwinkel ist. Beträgt der Winkel genau 90° , d.h. die Pole des Läufers liegen genau zwischen zwei Ständerpolen, so ist die Kraft, die auf den Läufer wirkt, maximal. Dies ist der Fall, da der gegenüber dem Läuferpol voreilende Ständerpol den Läufer "zieht", und der ihm gegenüber nacheilende ihn "schiebt". Wird der Polradwinkel weiter vergrößert, d.h. der Motor wird überlastet, so nimmt das Drehmoment wieder ab, der Motor befindet sich in einer instabilen Betriebslage → der Motor bleibt stehen.

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



MD0092AX

Bild 15: Verlauf des Drehmoments über dem Polradwinkel

2.1.2 Motorführung

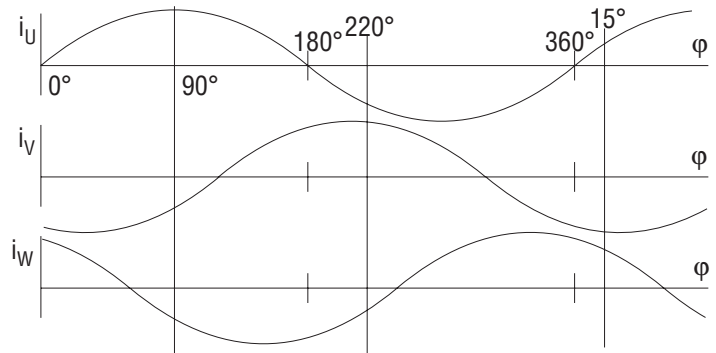
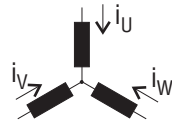
Um den Synchronmotor mit dem größtmöglichen Drehmoment betreiben zu können, muß sichergestellt werden, daß der Polradwinkel α 90° beträgt. Im motorischen Betrieb muß das Statorfeld demnach stets um 90° vorseilen, im generatorischen Betrieb stets um 90° nacheilen. Die Aufgabe der Motorführung besteht darin, die Sollwerte der drei Phasenströme des Motors aus einem vorgegebenen Drehmoment zu berechnen, sowie die Stromsollwerte aus einer Tabelle auszulesen.

Dazu wird die Rotorlage mit Hilfe des Lagegebers erfaßt. Zu dem erhaltenen Wert des Lagewinkels werden je nach Drehrichtung und Drehmomentrichtung 90° addiert oder subtrahiert und die dazugehörigen Ströme berechnet.

Zu jeder Rotorlage wird die entsprechende Lage des Ständerdrehfeldes ermittelt, d.h. der Rotor bestimmt die Größe und Richtung des Statorfeldes. Der Rotor "dreht" somit das Statorfeld.

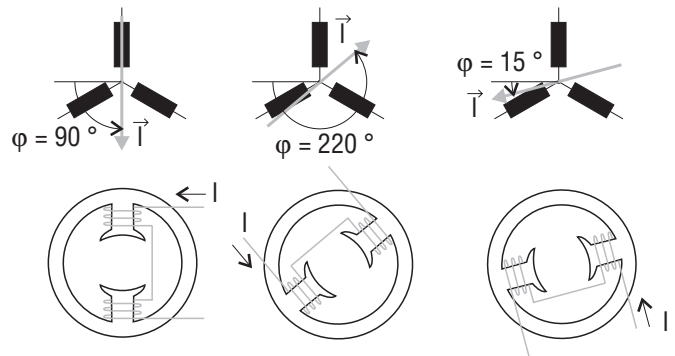
Bei dem in diesem Zusammenhang erwähnten Polradwinkel α handelt es sich stets um den elektrischen Winkel, bei einem 6poligen Motor entsprechen 90° elektrisch 30° mechanisch.

2.1.3 Stromverhältnisse im Stator



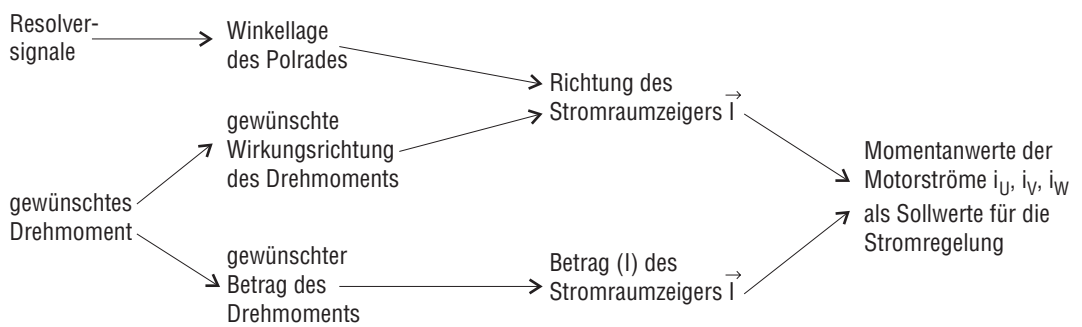
Stromraumzeiger \vec{I} = vektorielle Summe der Ströme i_U, i_V, i_W

Hinsichtlich der Drehmomentbildung kann man sich die Verhältnisse im Stator zu den einzelnen Zeitpunkten folgendermaßen vorstellen:



MD0093AD

Bild 16: Stromraumzeiger



MD0094AD

Bild 17: Erzeugung der Momentanwerte der Ströme

2.2 Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie

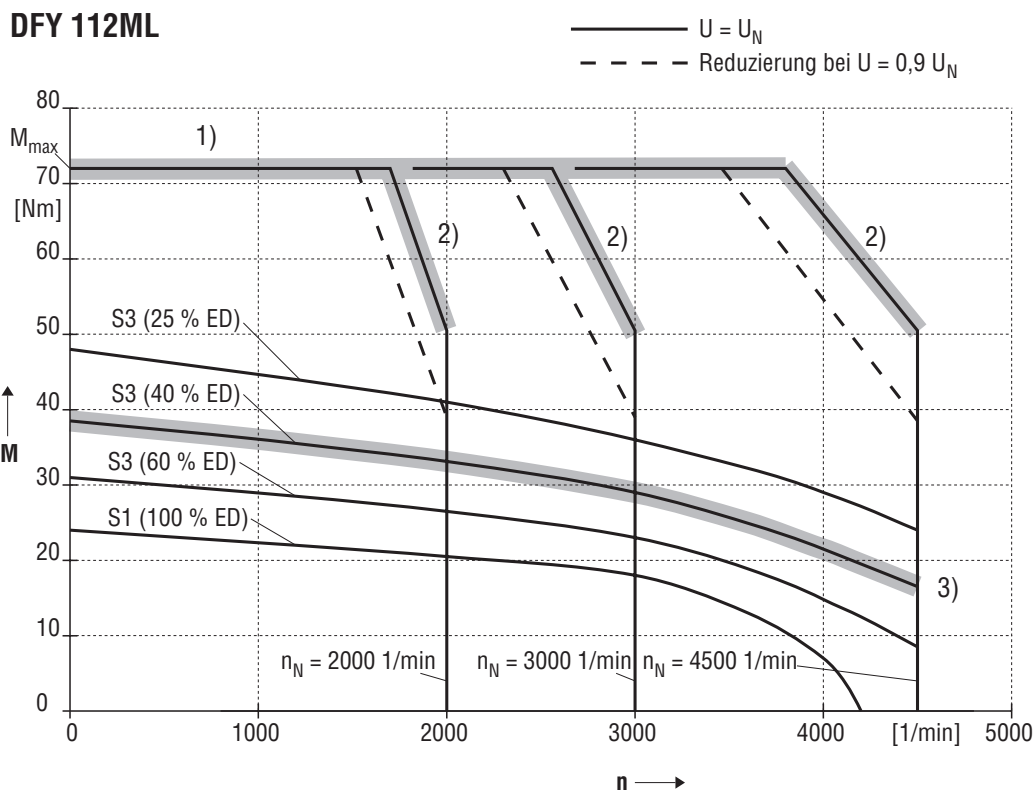
Bei der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie eines DFY-Motors werden drei Grenzen sichtbar, die bei der Projektierung eines Antriebes berücksichtigt werden müssen.

1) Das maximale Drehmoment eines Motors wird u.a. begrenzt durch die Belastbarkeit der Dauermagnete. Wird ein Motor zu stark belastet und der Strom steigt auf zu hohe Werte an, werden die Magnete entmagnetisiert und der Motor "verliert sein Drehmoment".

Bei richtiger Auswahl und Anpassung von Motor und Umrichter kann keine Entmagnetisierung auftreten.

2) Beachtet werden sollten auch die Beschränkungen beim Drehmoment im oberen Drehzahlbereich aufgrund der Spannung. Mit Spannung ist die Spannung gemeint, die an den Motorklemmen anliegt. Diese ist abhängig von der Zwischenkreisspannung, der Netzspannung und dem Spannungsfall der Leitungen. Das Absinken des Drehmoments beruht darauf, daß in den Motor aufgrund der Gegen-EMK (induzierte Spannung im Motor) nicht mehr der maximale Strom eingepreßt werden kann. Damit reduziert sich auch das maximale Drehmoment.

3) Eine weitere Grenze ist die thermische Auslastung des Motors. Sie muß bei der Projektierung gerechnet werden. Hierbei wird das Effektivdrehmoment ausgerechnet. Dies muß kleiner sein als das Stillstandsmoment M_0 . Ein Überschreiten der thermischen Grenze bewirkt ebenfalls eine Entmagnetisierung der Magnete.



00226ADE

Bild 18: Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie eines Servomotors

2.3 Elektromechanische Not- und Haltebremse

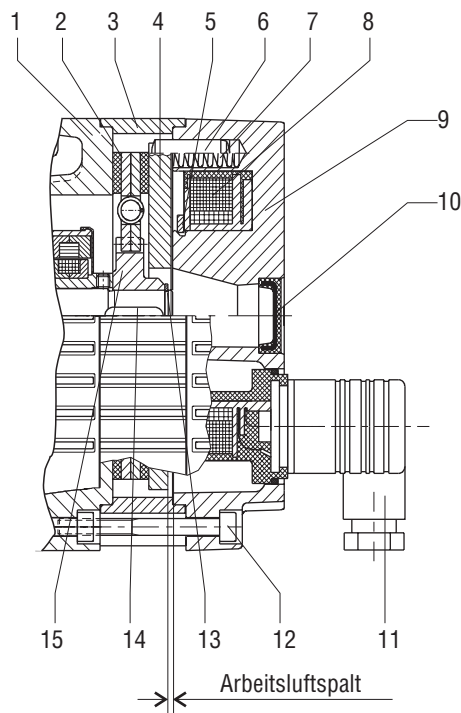
Die Bremse, die in den größeren Servomotoren Verwendung findet, ist von ihrem mechanischen Aufbau von der Betriebsbremse des Asynchronmotors abgeleitet. In der Servotechnik wird diese Bremse jedoch nur als Not- und Haltebremse benötigt, da elektrisch gebremst und gehalten wird. Obwohl die Bremse, die in SEW-Synchronmotoren Verwendung findet, nur als Not- und Haltebremse verwendet wird, kann sie doch ein großes Haltemoment ($3 \cdot M_0$) aufbringen und eine hohe Bremsarbeit verrichten. Dies macht den SEW Synchronbremsmotor für Hubantriebe besonders interessant.

Die Bremse findet üblicherweise nur Verwendung bei:

- längerem Stillstand (thermische Entlastung des Motors)
- bei NOT-AUS

Die optionale Scheibenbremse ist vollständig in den Motor integriert. Demontage und Montage können vor Ort, ohne Eingriffe in den Motor, durchgeführt werden.

Die Bremse besitzt einen eigenen elektrischen Anschluß. Standardmäßig sind die Bremsen lieferbar für Anschlußspannungen von 230 V~, 400 V~ und 24 V=.



Erläuterung:

1. Bremslagerschild
2. Belagträger komplett
3. Zwischenring
4. Ankerscheibe
5. Sicherungsring
6. Zylinderstift
7. Bremsfeder
8. Bremsspule komplett
9. Spulenkörper
10. Verschlusskappe
11. Winkelsteckverbinder
12. Zylinderschraube
13. Sicherungsring
14. Paßfeder
15. Mitnehmer

00039ADE

Bild 19: Schnitt durch die Bremse

Die Bremse ist eine gleichstromerregte Elektromagnet-Scheibenbremse, die elektrisch gelüftet (geöffnet) wird und durch Federkraft bremst. Das System genügt grundsätzlichen Sicherheitsanforderungen. Bei Stromunterbrechung fällt die Bremse automatisch ein.

Die Scheibenbremse arbeitet nach dem bewährten Zweispulen-Prinzip. Die Bremsgleichrichter oder Bremsensteuergeräte schalten zunächst nur die Beschleunigerspule ein. Sobald die Bremse gelüftet hat, wird elektronisch auf die Haltespule umgeschaltet.

Minimaler Verschleiß sowie maximale Standzeit und Schaltvermögen sind die herausragenden Eigenschaften dieses Bremssystems.

Im dauergelüfteten Betrieb sind die Stromwärmeverluste auf das notwendige Minimum reduziert und die Bremse ist somit thermisch nur gering belastet.

Das Bremsmoment wird durch Art und Anzahl der Bremsfedern bestimmt. Bremsen mit höherem Bremsmoment (bis $3 \cdot M_0$) werden vorzugsweise im Hubwerksbetrieb eingesetzt.

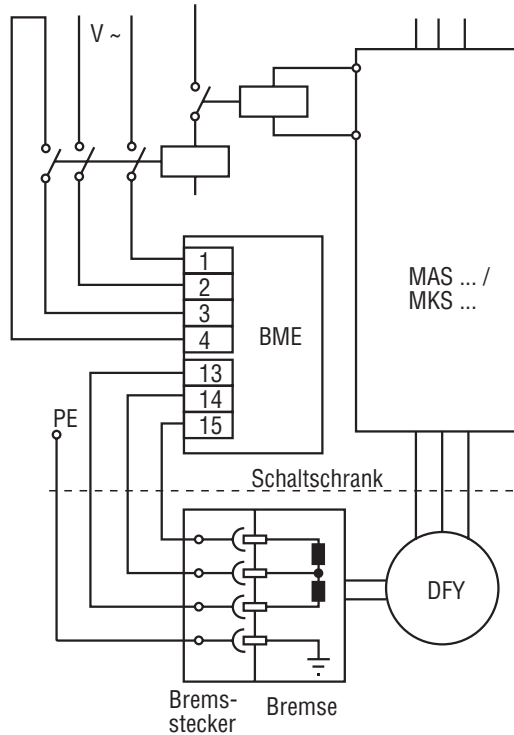
Zur Ansteuerung der Bremse werden Bremsgleichrichter oder Bremsensteuergeräte verwendet. Der Bremsgleichrichter wird bei Wechselspannungs-Anschluß verwendet, das Bremsensteuergerät bei Gleichspannungsanschluß mit 24 V=. Beide werden aus Platzgründen nicht im Klemmenkasten, sondern im Schaltschrank eingebaut.

Der Bremsgleichrichter ist als Einweggleichrichter mit Beschaltungselementen gegen Überspannungen und integrierter Steuerelektronik zur Verkürzung der Ansprechzeiten der Bremse aufgebaut.

Bremsen-Reaktionszeiten

Bremsmotor Baugröße	56 B		71 B			90 B				112 B			
Bremsmoment [Nm]	2,5	3	6	10	15	12	20	30	40	17,5	35	60	90
Lüften der Bremse Ansprechzeit t_1 [ms]	7	10	12	16	20	13	15	18	22	11	14	22	35
Einfallen der Bremse Einfallzeit t_2 [ms]	5	95	45	20	8	28	20	13	10	130	60	32	20

Für 24 V Gleichspannungsanschluß gibt es das Bremsensteuergerät BSG. Es entspricht von seiner Funktion her dem Bremsgleichrichter BME mit dem Unterschied, daß aufgrund der Ansteuerung mit einer Gleichspannung beim Bremsensteuergerät der Gleichrichter entfällt.



MD0107AD

Bild 20: Ansteuerung der Bremse

Bild 20 zeigt einen Bremsgleichrichter für den Schaltschrank. Der Bremsgleichrichter ist für gleich- und wechselstromseitiges Abschalten, d.h. schnelles Einfallen der Bremse, beschaltet. Ebenso ist bei diesem Typ die Schnellerregung enthalten.

Weitere Hinweise zur Bremse sind im Band 4 "Praxis der Antriebstechnik" enthalten.

3 Der Resolver

3.1 Aufbau und Funktion des Resolvers

Der Resolver arbeitet nach dem Prinzip eines Drehtransformators. Beim Drehtransformator besteht der Rotor aus einer Spule (Wicklung), die mit der Statorwicklung einen Transformator bildet.

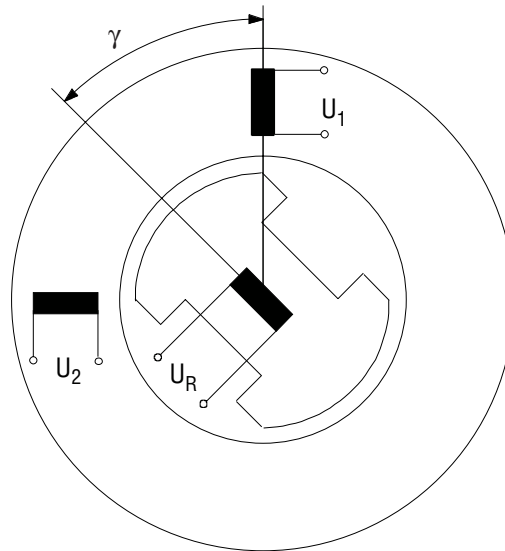
Der Resolver ist prinzipiell genauso aufgebaut, mit dem Unterschied, daß der Stator nicht aus einer, sondern aus zwei um 90° zueinander versetzten Wicklungen aufgebaut ist.

Der Resolver dient zur Ermittlung der absoluten Lage der Motorwelle innerhalb einer Umdrehung. Außerdem wird aus dem Resolversignal die Drehzahl und eine Encoder-Nachbildung für die Lageregelung abgeleitet.



MD0116AX

Bild 21: Resolver



MD0108AX

Bild 22: Schematischer Aufbau

Der Rotor des Resolvers ist auf der Welle des Motors befestigt. Um die Primärspannung des Stators bürstenlos auf den Rotor übertragen zu können, wird auf dem Stator und dem Rotor jeweils eine weitere Wicklung angebracht. Mit Hilfe dieser zusätzlichen Wicklungen kann die Primärspannung der Statorwicklung nach dem Transformatorprinzip übertragen werden. Die beiden Wicklungen, die auf dem Rotor angebracht sind, sind elektrisch gekoppelt, so daß die Spannung, die vom Stator auf den Rotor übertragen wird, auch an der zweiten Wicklung des Rotors anliegt.

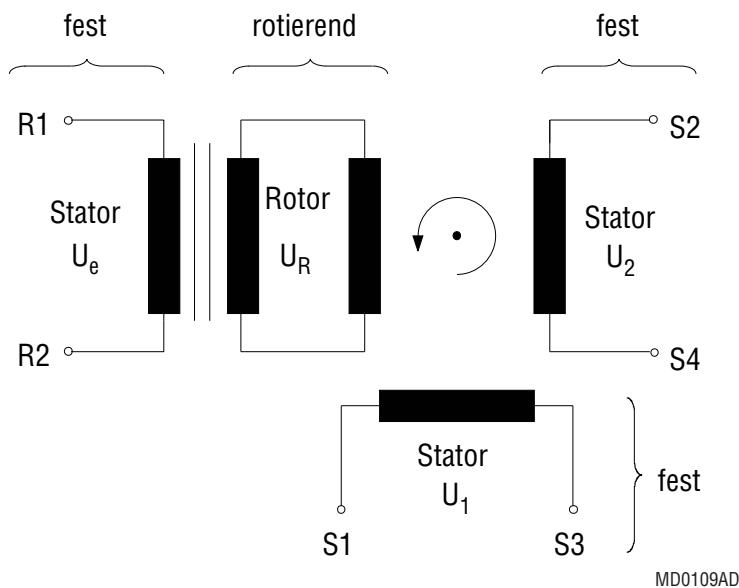


Bild 23: Prinzipielles Ersatzschaltbild

Je nach Lage des Rotors werden in den Statorwicklungen unterschiedlich große Spannungen induziert. An der Wicklung, die beim Winkel $\gamma = 0^\circ$ (s. Bild 22) vollständig durchflutet wird, liegt zu diesem Zeitpunkt die maximale Spannung an. Dreht sich der Rotor, so nimmt die Spannung U_1 an dieser Wicklung ab, bis sie bei einem Winkel von 90° den Wert Null erreicht hat. Dann steigt die Spannung mit umgekehrtem Vorzeichen wieder an bis sie bei 180° wieder ihr Maximum erreicht hat. Die Spannung U_1 hat als Hüllkurve eine Cosinusschwingung. Die Spannung U_2 , die gegenüber U_1 um 90° verschoben ist, hat bei 0° den Wert 0 V. Sie steigt an bis sie bei 90° ihren Maximalwert erreicht hat und fällt dann wieder ab. Die Hüllkurve von U_2 ist folglich eine Sinusschwingung.

Die Ausgangsspannungen U_1 und U_2 berechnen sich in Abhängigkeit der Eingangsspannung U_e zu:

$$\text{Eingang: } U_e = U_S \cdot \sin \omega t \quad (\text{Referenzspannung})$$

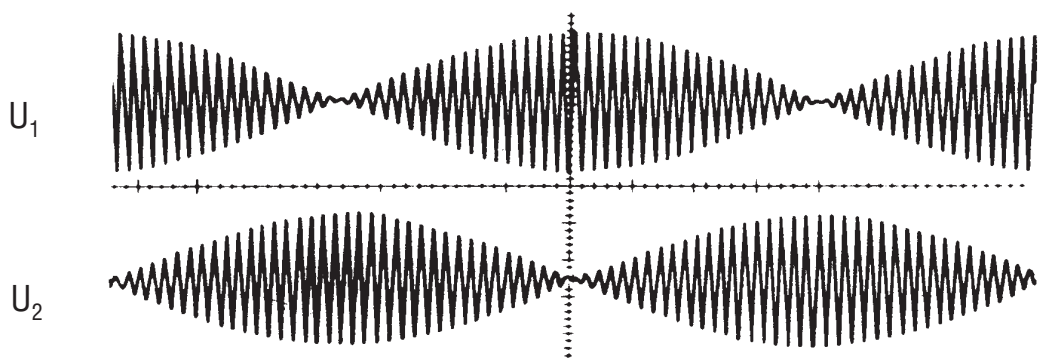
$$\text{Ausgang: } U_1 = U_S \cdot \sin \omega t \cdot \cos \gamma$$

$$U_2 = U_S \cdot \sin \omega t \cdot \sin \gamma$$

mit $\gamma = \text{Rotorwinkel}$

$\omega = \text{Winkelfrequenz von } U_e$

$U_S = \text{Scheitelwert der Eingangsspannung}$

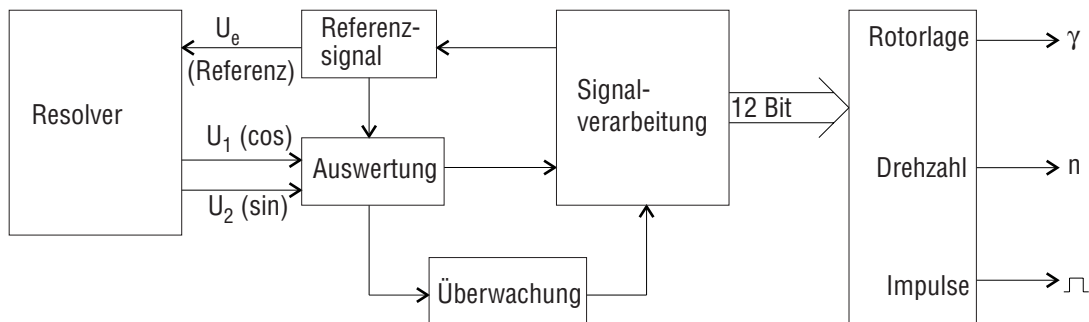
Bild 24: Ausgangsspannungen U_1 und U_2 des Resolvers

00058AXX

3.2 Verarbeitung und Auswertung der Resolver Signale

Die Signale des Resolvers werden im R/D-Wandler (Resolver-Digital-Wandler) des Servoumrichters in einen digitalen Zählwert gewandelt. Dieser digitale Wert wird weiterverarbeitet, um weitere Informationen daraus zu erhalten. Zum einen liefert der R/D-Wandler die Information zur Rotorlage. Gleichzeitig kann mit Hilfe des Zählwertes die Drehzahl des Motors bestimmt werden, indem die Anzahl der Impulse innerhalb eines bestimmten Zeitfensters gezählt und daraus die Drehzahl ermittelt wird. Als drittes können die zwei niederwertigsten Bits des Zählerwertes ausgewertet werden:

- für die Encodernachbildung zur Bestimmung der Drehrichtung
- für übergeordnete Steuerungen zur Positionierung.



MD0112AD

Bild 25: Verarbeitung der Resolver Signale

Der Oszillator [1] (s. Bild 26) speist den Rotor über die Statorwicklung mit einer Wechselspannung von ca. 10 V_{eff} und einer Frequenz von ca. 7 kHz. Der digitale Zählwert des V/R-Zählers (Vorwärts-Rückwärts-Zählers) [6] wird in einem Digital/Analog-Wandler [5] gewandelt. Die Ausgangssignale U₁ und U₂ des Stators des Resolvers werden mit dem Sinus oder dem Cosinus des gewandelten Wertes multipliziert. Der Wert des V/R-Zählers repräsentiert dabei den Winkel φ. Es entstehen die beiden Spannungen

$$U_{F1} = U_S \cdot \sin\omega t \cdot \sin\gamma \cdot \cos\varphi$$

$$U_{F2} = U_S \cdot \sin\omega t \cdot \cos\gamma \cdot \sin\varphi$$

Im Fehlerverstärker [2] werden die beiden multiplizierten Ausgangssignale voneinander subtrahiert. Die Differenz entspricht dem Fehler (Abweichung) zwischen dem Winkel φ und dem tatsächlichen Winkel γ. Der Fehler beträgt:

$$U_{FD} = U_S \cdot \sin\omega t \cdot (\sin\gamma \cdot \cos\varphi - \cos\gamma \cdot \sin\varphi)$$

Diese Gleichung entspricht umgeformt:

$$U_{FD} = U_S \cdot \sin\omega t \cdot \sin(\gamma - \varphi)$$

Im phasempfindlichen Gleichrichter [3], der dem Subtrahierer [2] nachgeschaltet ist, wird dieses Signal demoduliert, um die Trägerfrequenz zu eliminieren. Das am Ausgang des Gleichrichters anstehende Signal ist die zu $\sin(\gamma - \varphi)$ proportionale Fehlerspannung U_F.

Diese Spannung liegt gleichzeitig an einem Ausgang des R/D-Wandlers und am Eingang des Integrators [4] an. Der Integrator [4] integriert die Fehlerspannung, die auf den Eingang eines spannungsgesteuerten Oszillators (voltage controlled oscillator = VCO) [7] gelegt wird.

Besteht zwischen den Winkeln γ und φ eine Winkeldifferenz, so erzeugt der Integrator daraus eine Gleichspannung. Der VCO [7] erzeugt mit Hilfe dieser Gleichspannung Impulse, die im V/R-Zähler [6] verarbeitet werden.

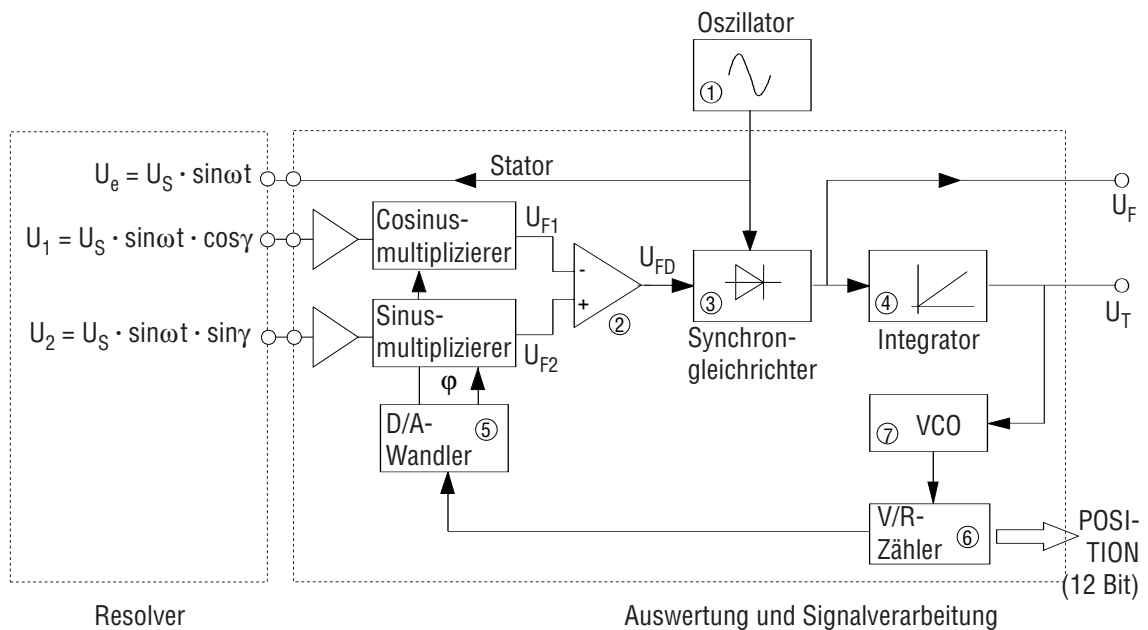


Bild 26: Blockschaltbild eines R/D-Wandlers

MD0113AD

Die Bausteine [2] bis [7] bilden einen Regelkreis. Am VCO [7] liegt solange ein Signal in Form einer Gleichspannung an, bis die Differenz zwischen den Winkeln γ und φ gleich Null ist, d.h. bis gilt:

$$\gamma = \varphi$$

Somit entspricht der digitale Wert des V/R-Zählers dem am Eingang des R/D-Wandlers anliegenden analogen Wert des Winkels γ des Resolvers.

Bei einer fortlaufenden Drehung des Resolvers muß der VCO solange Impulse erzeugen, bis der Zählwert des V/R-Zählers mit dem analogen Wert des Rotorwinkels am Eingang übereinstimmt, d.h. bis die Winkeländerung des Rotors ausgeglichen ist. Die Frequenz des VCO ist folglich proportional zur Drehzahl des Motors und des Resolvers. Daraus folgt, daß die Ausgangsspannung des Integrators ebenfalls proportional zur Drehzahl ist.

Der R/D-Wandler liefert an den Ausgängen eine drehzahlproportionale Gleichspannung U_T , sowie die Absolutinformation für eine Umdrehung des Resolvers.

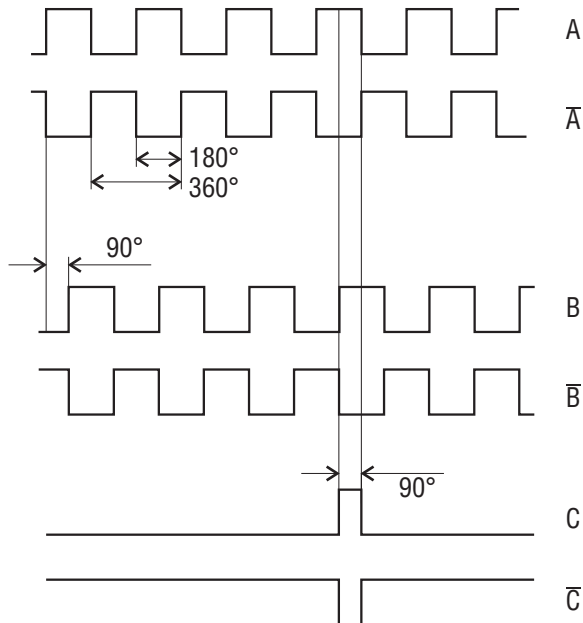
Diese Auswerteschaltung ist als integrierter Schaltkreis realisiert, wobei lediglich der Oszillator [1] extern angeschlossen wird.

Der Fehler des Resolversignals ist vernachlässigbar klein ($< 0,05\%$).

3.3 Inkrementalgebersimulation

Bei der Inkrementalgebersimulation werden aus den bereits vorhandenen Ausgangssignalen des Resolvers insgesamt sechs Spuren erzeugt, die für übergeordnete Steuerungen zur Positionierung verwendet werden. Diese sechs Spuren sind Spur A, B und C und ihre invertierten Signale \bar{A} , \bar{B} und \bar{C} .

Die Inkrementalgebersimulation liefert 1024 Impulse je Umdrehung. Für Positioniersteuerungen stehen durch 4fache Auswertung 4096 Impulse pro Umdrehung zur Verfügung.



MD0114AD

Bild 27: Inkrementalgebersimulation

Die Impulse des Kanals A und des Kanals B sind um 90° verschoben. Eilen die positiven Flanken der Impulse des Kanals A denen des Kanals B vor, so befindet sich der Motor im Rechtslauf. Umgekehrt eilt Kanal B gegenüber Kanal A um 90° vor, wenn der Motor im Linkslauf betrieben wird.

Kanal C liefert für jede volle Umdrehung des Motors, d.h. beim Durchlaufen der Nullstellung, einen Impuls.

Die Drehrichtung des Motors kann anhand der zwei niederwertigsten Bits (LSB = least significant bits) der Signalverarbeitung bestimmt werden.

2^1	2^0
0	0
0	1
1	0
1	1

↓
Rechtslauf
↑
Linkslauf

Funktionstabelle der zwei LSBs

Betrachtet man den Rechtslauf (positive Drehrichtung), so zählt der Zähler im R/D-Wandler aufwärts. Das entspricht der Funktionstabelle von oben nach unten gelesen. Bei jedem Kippen des niederwertigsten Bits 2^0 von 1 auf 0 ändert sich der Wert des Bits 2^1 ebenfalls.

Ändert man die Drehrichtung des Motors, so daß der Motor im Linkslauf betrieben wird, so muß die Funktionstabelle entsprechend von unten nach oben gelesen werden. Betrachtet man wiederum die Übergänge von 1 auf 0 des niederwertigsten Bits 2^0 , so erkennt man, daß sich hierbei der Wert des Bits 2^1 nicht ändert.

4 Der Servoumrichter

Der Servoumrichter dient zur Drehzahl- und Drehmomentregelung des Servomotors. In der Regel handelt es sich heute um digitale Umrichter. Der digitale Umrichter hat gegenüber dem analogen folgende Vorteile:

- alterungsbeständig
- driftfrei
- einfache Kommunikation
- Rechenoperationen leicht ausführbar

Servoumrichter werden sowohl in Form von Kompakt-Servoumrichtern (sog. Stand-Alone-Geräte) als auch in modularer Bauform eingesetzt.



Bild 28: Servoumrichter in modularer Bauweise

MD0061AX



MD0104AX

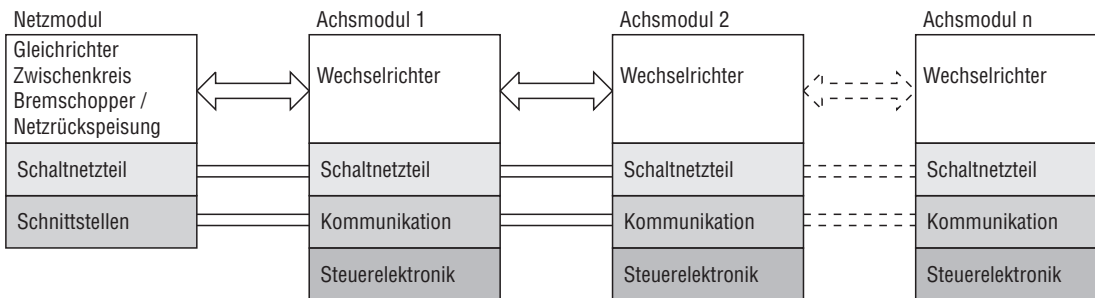
Bild 29: Kompakt-Servoumrichter

Stand-Alone-Geräte haben den Vorteil, daß der Servoumrichter als komplette Einheit zur Verfügung steht. Gleichzeitig entfällt die zusätzliche Verdrahtung zwischen den einzelnen Gerätekomponenten, wie sie beim modularen System notwendig ist.

Die Vorteile des modular aufgebauten digitalen Servoumrichters (Netzmodul und Achsmodul) liegen im Bereich der Mehrachsenanwendungen. Bei Mehrachsenanwendungen können über ein Netzmodul mehrere Achsmodule versorgt werden. Dabei wird die Leistung des Netzmoduls von der Gesamtleistung der angeschlossenen Achsmodule und deren Auslastung bestimmt.

In den folgenden Kapiteln wird ein digitaler Servoumrichter in modularer Bauweise beschrieben.

4.1 Grundkomponenten des modularen Systems



MD0154AD

Bild 30: Strukturbild eines modularen Servoumrichters

Der modulare Servoumrichter besteht aus den zwei Komponenten

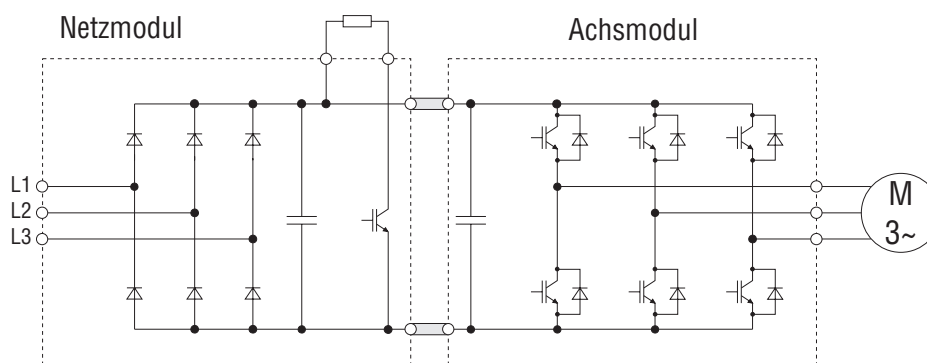
- Netzmodul
- Achsmodul

Das Netzmodul dient zur Leistungsversorgung der angeschlossenen Achsmodule über den Zwischenkreis und zur Spannungsversorgung der Steuerelektronik. Es enthält zudem den Bremschopper oder die Netzurückspeisung, verschiedene Schutzfunktionen und Kommunikationsschnittstellen (RS-232 und RS-485).

Das Achsmodul regelt Drehzahl und Drehmoment eines Servomotors. Es enthält den dafür notwendigen Wechselrichter, die Steuerelektronik, fest belegte und frei programmierbare binäre Ein- und Ausgänge, analoge Ein- und Ausgänge, den Ausgang für die Encoder-Simulation und einen freien Steckplatz für die Optionskarten.

Die Anzahl der Achsen, die an ein Netzmodul angeschlossen werden können, ist begrenzt durch:

- Leistung des Netzmoduls
- Leistung des Schaltnetzteils
- max. Bremsleistung
- Leitungslänge der Zwischenkreis-Verschönerung, der Datenleitung (Störsicherheit) und des 24V-Busses



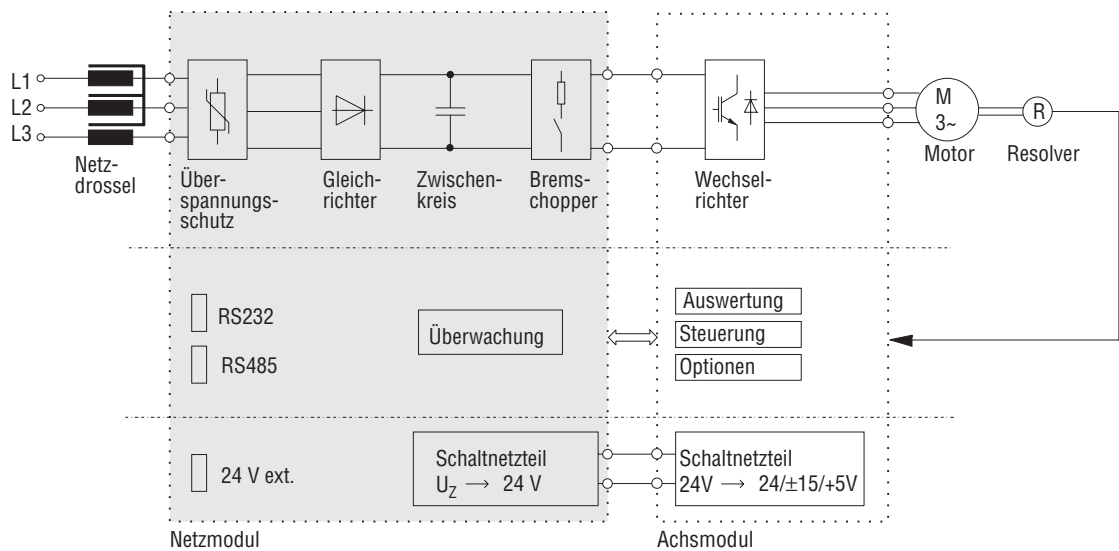
MD0155AD

Bild 31: Leistungsteil eines Servoumrichters

Das Leistungsteil des Servoumrichters basiert auf dem Prinzip des Spannungs-Zwischenkreisumrichters. Dies bedeutet, daß im Zwischenkreis Kondensatoren die Spannung stabil halten. Die Endstufen- oder Wechselrichtertransistoren sind IGBTs. Die Vorteile sind niedrige Schaltverluste, einfache Ansteuerung, niedrige Durchlaßverluste und hohe Schaltfrequenzen.

4.2 Das Netzmodul

Das Netzmodul wird über eine vorgeschaltete Netzdrossel an das Drehstromnetz angeschlossen. Der Spannungsbereich ist $3 \cdot 380 \dots 500 \text{ V}$. Die Netzdrossel ersetzt, in Verbindung mit konstruktiven Maßnahmen im Leistungsteil des Verstärkers, die sonst üblichen einschaltstrombegrenzenden Ladeeinrichtungen vollständig. Sie minimiert die Netzurückwirkungen und ist Bestandteil des Geräteschutzes gegen nicht periodische Überspannungen.



MD0156AD

Bild 32: Blockschaltbild eines modularen Servoumrichters

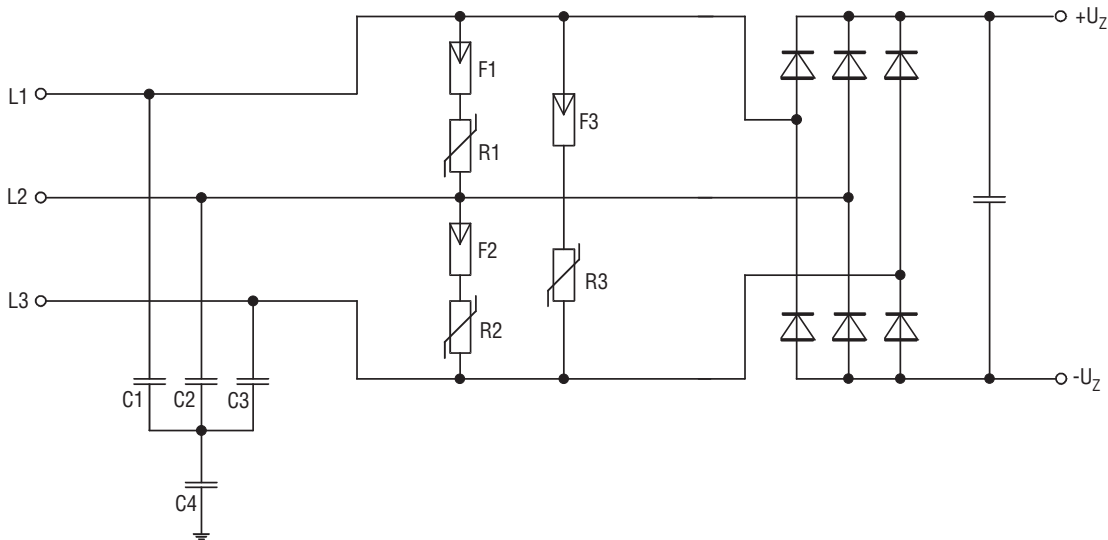
Das Netzmodul enthält folgende Überwachungsfunktionen:

- Überspannung im Zwischenkreis
- Netzphasenausfall
- Erdschluß
- Übertemperatur
- Bremschopper

4.2.1 Gleichrichter und Überspannungsschutz

Innerhalb des Netzmoduls sorgt eine Überspannungsschutzschaltung dafür, daß Spannungsspitzen im Netz, die vor allem durch Schalten induktiver und kapazitiver Lasten auf das Netz verursacht werden, das Leistungsteil des Netzmoduls nicht beschädigen.

Dieser Überspannungsschutz wird mit Hilfe von Kondensatoren, Gasableitern und Varistoren realisiert.



MD0158AD

Bild 33: Gleichrichter und Überspannungsschutz

Der Eingangsgleichrichter ist ein dreiphasiger Brückengleichrichter. Dieser Gleichrichter erzeugt aus der Wechselspannung eine Gleichspannung, die Zwischenkreisspannung $U_Z \approx \sqrt{2} \cdot U_{\text{eff}}$.

4.2.2 Zwischenkreis und Energierückspeisung

Beim Abbremsen eines Antriebes wird kinetische Energie in elektrische Energie umgewandelt, und in den Zwischenkreis zurückgespeist. Da der Zwischenkreiskondensator nur eine begrenzte Kapazität hat, steigt die Spannung im Zwischenkreis an. Damit der Antrieb abgebremst werden kann, muß gewährleistet sein, daß die überschüssige Energie abgeführt wird.

Es ist daher notwendig, die überschüssige Energie zu speichern oder in andere Energieformen umzuwandeln.

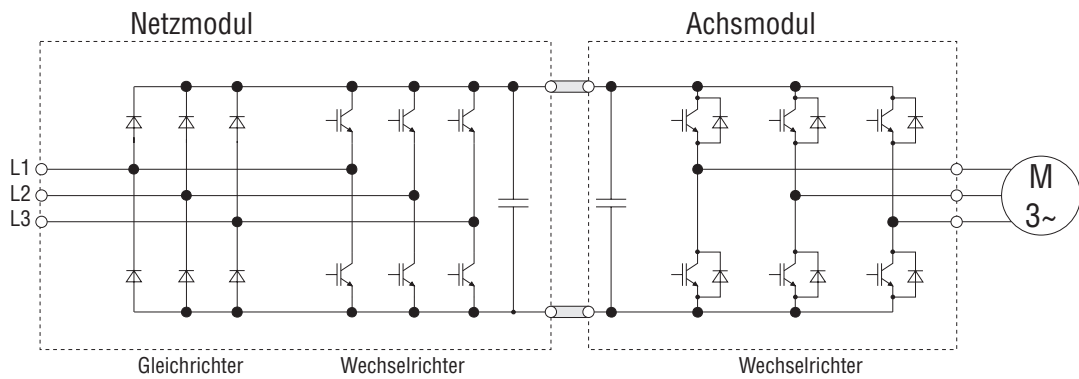
Hierfür gibt es prinzipiell drei Möglichkeiten:

- Netzzückspeisung (Nutzung der elektrischen Energie durch andere Verbraucher)
- Bremschopper und Bremswiderstand (Umwandeln der Energie in Wärme)
- Energieaustausch bei Mehrachs Anwendungen (Nutzung der elektrischen Energie von anderen angeschlossenen Motoren)

4.2.2.1 Netzurückspeisung

Die Netzurückspeisung hat den Vorteil, daß die Bremsenergie als elektrische Energie erhalten bleibt.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten einer Realisierung der Netzurückspeisung, z.B. die der antiparallelen Brücke. Bei dieser Form der Netzurückspeisung wird der Netzgleichrichter durch einen Wechselrichter, der netzsynchron angesteuert wird, ergänzt. Übersteigt die Zwischenkreisspannung den Gleichrichtwert, so wird die überschüssige Energie ins Netz zurückgespeist.

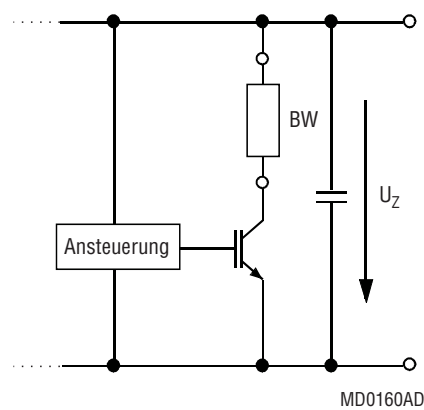


MD0159AD

Bild 34: Netzurückspeisung

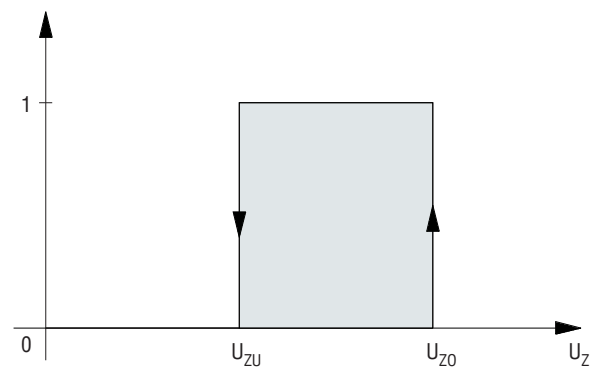
4.2.2.2 Bremschopper und Bremswiderstand

Im Gegensatz zur Netzurückspeisung wird beim Bremschopper die überschüssige Energie nicht ins Netz zurückgespeist, sondern über einen Bremswiderstand in Wärme umgewandelt. Wenn nur wenig Bremsarbeit zu verrichten ist, so kann die Ausführung mit Bremschopper kostengünstiger sein als die mit Netzurückspeisung.



MD0160AD

Bild 35: Bremschopper



MD0161AD

Bild 36: Schaltverhalten des Bremschoppers

4.2.2.3 Vergleich zwischen Netzurückspeisung und Bremschopperbetrieb

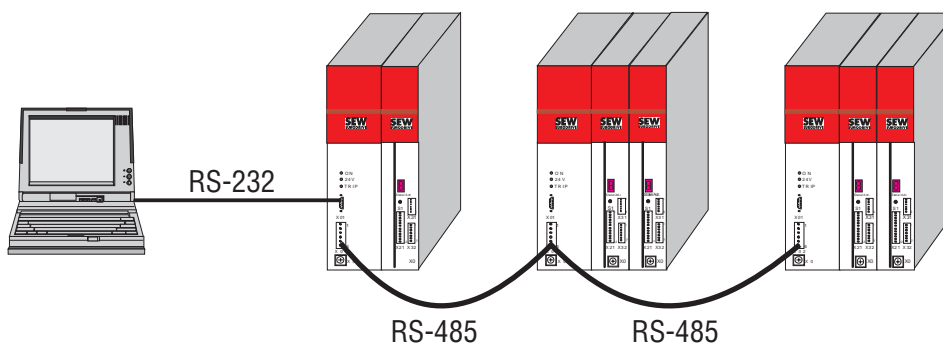
Je nach Anwendungsfall muß anhand der Eigenschaften entschieden werden, welches Verfahren am besten geeignet ist.

	Netzurückspeisung	Bremschopper und Bremswiderstand
Unterbringung	vollständig im Netzmodul integriert	Bremschopper im Netzmodul, Bremswiderstand extern oder im Schaltschrank
Auswirkung auf Umgebungstemperatur	gering	Wärmeentwicklung am Bremswiderstand
Verdrahtung	entfällt	Anschluß externer Bremswiderstand
Energiebilanz	elektrische Energie bleibt erhalten	elektrische Energie wird in Wärme umgesetzt
Kosten	Steuerelektronik, Wechselrichter	Steuerelektronik, Schaltertransistor, Bremswiderstand, Montage, Verdrahtung
Aufwand für EMV	gering	geschirmte Leitungen zum Bremswiderstand

4.2.3 Serielle Schnittstellen

Über die im Netzmodul integrierte Standardschnittstelle RS-232 können die Achsmodule mit Hilfe eines PCs parametrierbar werden. Die RS-232-Schnittstelle dient zur Kommunikation zwischen zwei Kommunikationseinheiten, z.B. PC und Achsmodul.

In Verbindung mit der im Netzmodul integrierten Schnittstelle RS-485 wird die Schnittstelle RS-232 "busfähig". Damit können bis zu 31 physikalische oder 59 logische Achsen über die mit der Schnittstelle RS-485 verbundenen Netzmodule parametrierbar werden. Jede Achse muß lediglich eine eindeutige Adresse haben.



MD0162AD

Bild 37: Kommunikation über serielle Schnittstellen

4.2.4 Elektronik-Versorgung

Das Netzmodul enthält ein zentrales Schaltnetzteil (SNT) zur Elektronik-Versorgung, das aus der Zwischenkreisspannung U_z eine Gleichspannung von 24 V erzeugt. Diese Spannung wird zur Versorgung der Überwachungselektronik benötigt. Gleichzeitig werden alle am Netzmodul angeschlossenen Achsmodule über den 24V-Bus mit dieser Spannung versorgt.

Das Netzmodul bietet zusätzlich die Möglichkeit des Anschlusses einer externen 24V-Hilfsspannung. Mit Hilfe dieser externen Spannung bleibt die gesamte Steuerelektronik in Betrieb und damit Rotorlage-Informationen und Fehlermeldungen auch bei Unterbrechung der Hauptspannungsversorgung erhalten. Dies spielt vor allem für den Betrieb eines Antriebs mit Positioniersteuerung eine Rolle, da bei Ausfall der Hauptspannung keine erneute Referenzfahrt notwendig ist.

Zudem ermöglicht die externe 24V-Spannungsversorgung eine Parametrierung der Achsmodule bei spannungslosem Zwischenkreis.

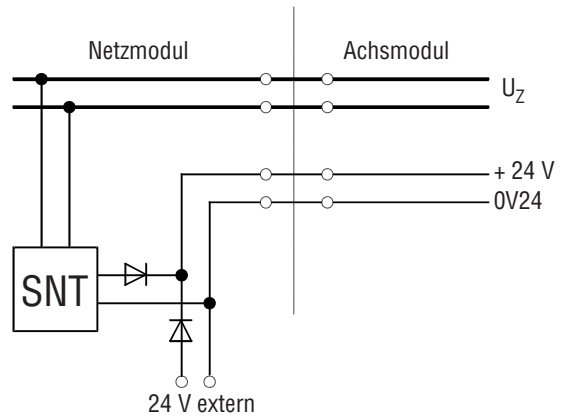
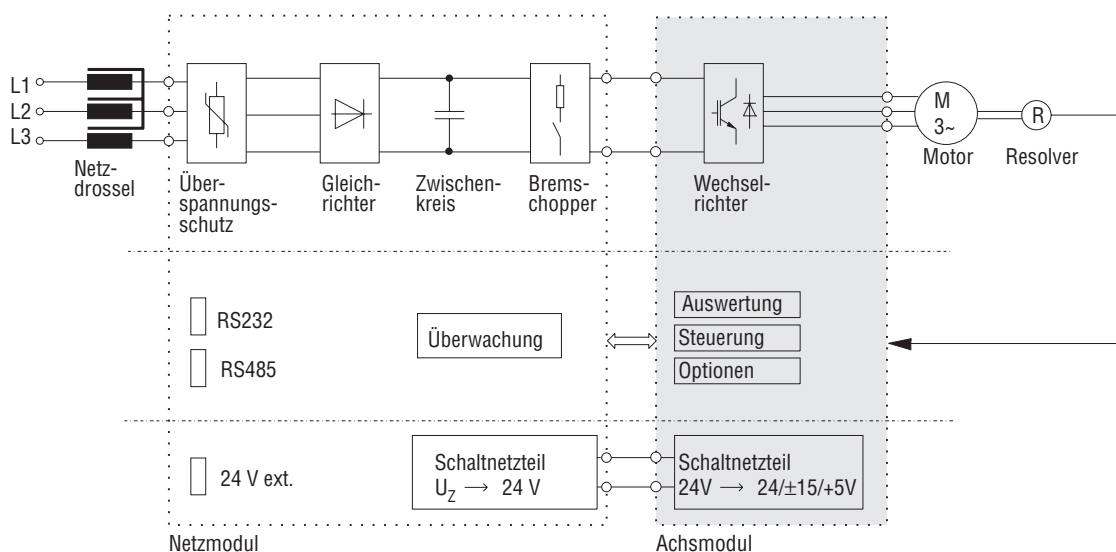


Bild 38: 24 V - Versorgung

MD0163AD

4.3 Das Achsmodul

Der Anschluß der Achsmodule an den Zwischenkreis und den Schutzleiter erfolgt mit Stromschiene. Für die Spannungsversorgung der Steuerelektronik wird eine separate 24V-Versorgung benutzt. Für die Kommunikation eines PC oder einer übergeordneten Steuerung (SPS) mit den angeschlossenen Achsmodulen ist an den Geräteunterseiten ein Daten-Bus verlegt, der jedoch für den Anwender nicht zugänglich ist.



MD0196AD

Bild 39: Blockschaltbild eines modularen Servoumrichters

Die Achsmodule können in den Betriebsarten "Drehzahlregelung" oder "Drehmomentregelung" betrieben werden. Sie liefern sinusförmige Ausgangsströme, so daß schon bei kleinen Drehzahlen

ein exakter Rundlauf mit geringster Drehmomentwelligkeit gewährleistet ist. Dadurch werden auch die Verluste im Motor minimiert und es wird für eine gute Ausnutzung der Motorleistung gesorgt.

Die Parametrierung der Achsmodule und der Optionskarten erfolgt mit einem PC über die Standard-Schnittstelle RS-232 oder mit einer SPS über die Schnittstelle RS-485.

Als Option stehen auch Bus-Schnittstellen zur Verfügung, mit denen ebenfalls eine Parametrierung möglich ist.

4.3.1 Aufbau des Achsmoduls

Die Bereiche Steuerung, Auswertung (Resolvauswertung, Stromregler) und Optionen (Zusatzklemmen, Positioniersteuerung) sind im Achsmodul modular ausgeführt. Der Vorteil liegt darin, daß durch Austausch der Steuerkarte und/oder der Auswertekarte auch andere Regelverfahren (z.B. U/f- oder Vektorregelung) zum Einsatz kommen könnten.

Bild 41 zeigt die Zusammenhänge im Achsmodul. Die Funktionen der einzelnen Blöcke werden in den nachfolgenden Kapiteln und in der Beschreibung der Regelstruktur aufgezeigt.

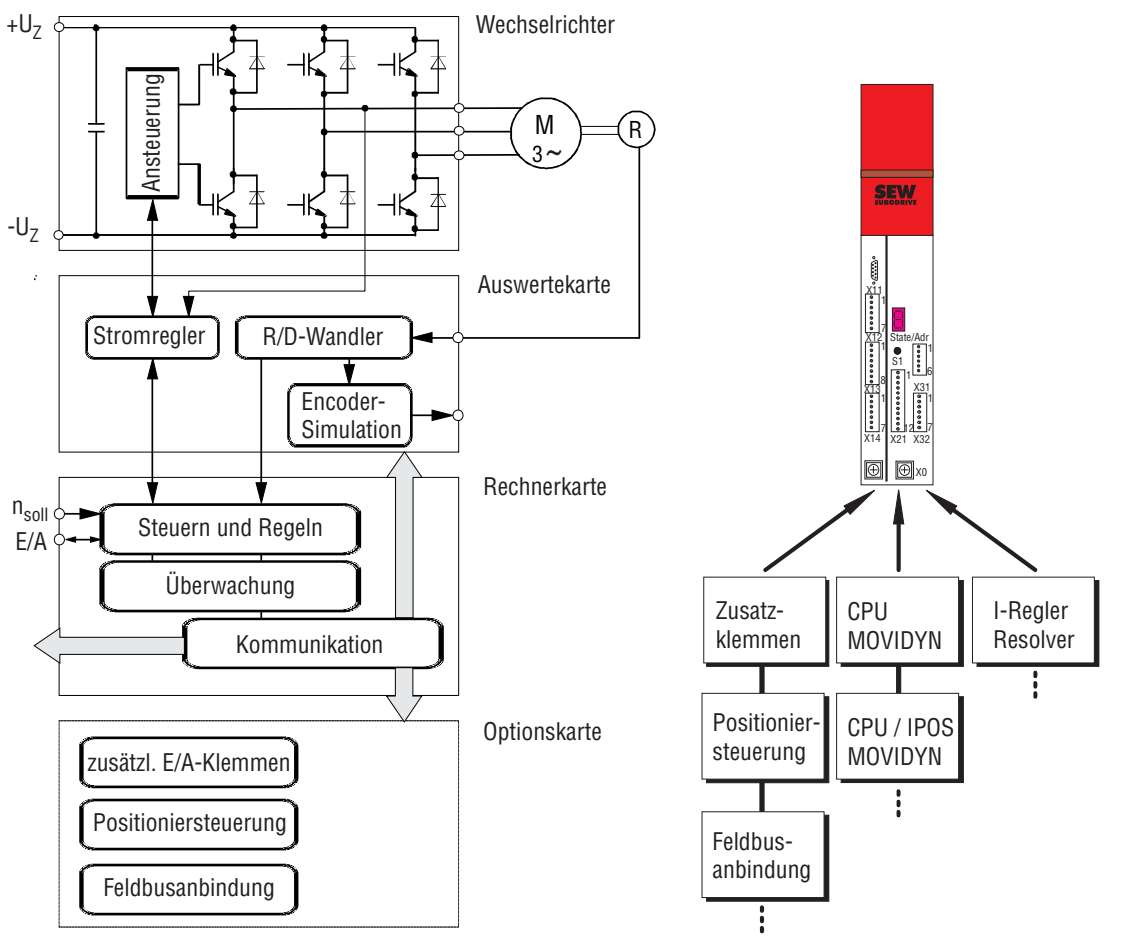


Bild 40: Zusammenhänge im Achsmodul

MD0181AD

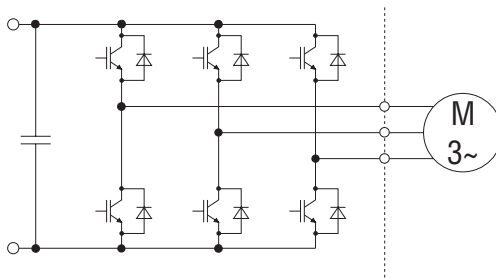
Bild 41: Modularer Aufbau

MD0180BD

Der Wechselrichter

Der Wechselrichter wird über die Zwischenkreisspannung U_z versorgt. Die Leistungstransistoren werden von der zugehörigen Ansteuerschaltung so getaktet, daß am Ausgang des Achsmoduls und somit am Motor eine pulsweitenmodulierte Spannung anliegt. 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.

Parallel zu jedem Leistungstransistor ist eine Diode geschaltet. Diese Freilaufdioden verhindern bei induktiver Ausgangslast, daß die im Umschaltmoment auftretenden Selbstinduktionsspannungen den Wechselrichter beschädigen. Sie leiten die gespeicherte Energie an den Eingang des Wechselrichters zurück. Ebenso werden sie für den Austausch der Blindenergie zwischen Motor und Umrichter benutzt.



MD0182AD

Bild 42: Wechselrichter

Aufgaben der Auswertekarte

Diese Karte enthält die Funktionen:

- Resolverauswertung
- Encodernachbildung
- Stromregelung.

Die Resolverauswertung und die Encodernachbildung wurden in den vorherigen Kapiteln beschrieben.

Die Stromregelung ist analog aufgebaut. Die Anpassung des Stromreglers erfolgt werksseitig und ist auf die anschließbaren Motoren angepaßt.

Aufgaben der Steuerkarte

Auf der Steuerkarte befindet sich der Mikrocontroller und dessen Peripherie. Die Hauptfunktionen des Mikrocontrollers sind:

- die Drehzahlregelung mit ihren umfangreichen Eingriffsmöglichkeiten
- die Halterege lung
- interne Positioniersteuerung (Option)
- umfassende Überwachungsfunktionen für Prozeßgrößen, Ein-/Ausgänge, Kontrollfunktionen
- die Kommunikation mit Auswertekarte und Optionskarte über den Rückwandbus
- die Kommunikation mit anderen Achsmodul(en)

4.3.2 Optionen

Klemmenerweiterung AIO11

Die Option AIO11 erweitert die Ansteuerungs- und Überwachungsmöglichkeiten durch zusätzliche digitale und analoge Ein- und Ausgänge und eine serielle Schnittstelle.

Positioniersteuerungen API/APA und IPOS

Mit Positioniersteuerungen können Bewegungsabläufe, genaues Anfahren von Positionen und deren Einhaltung (Lageregelung) einfach realisiert werden.

Vorteile der Optionskarten, die mit verschiedenen Gebersystemen zusammen arbeiten, sind:

- weniger Platzbedarf im Schaltschrank
- Spannungsversorgung vom Servoumrichter
- digitale Sollwertvorgabe für die Drehzahl
- Programmierung über vorhandene Standardschnittstelle (RS-232, RS-485) des Achsmoduls
- Steuersignale über digitale Ein- und Ausgänge direkt vom und an den Prozeß

Bei der integrierten Positioniersteuerung IPOS bleibt der Optionskartensteckplatz frei. Dadurch kann dieser mit anderen Optionskarten (z.B. Feldbus) belegt werden.

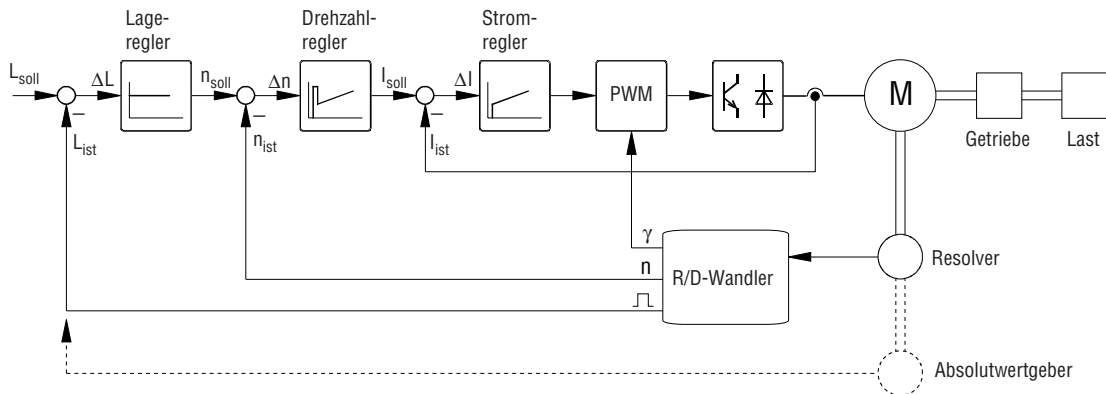
Feldbusanbindungen

Für wichtige in der Automatisierungstechnik verbreitete Standard-Feldbus-Systeme (z. B. PROFIBUS, INTERBUS-S, CAN-Bus) sind Anschlußkarten verfügbar.

Die Feldbuskarten können problemlos in den freien Optionskartensteckplatz eingeschoben werden. Über den Feldbus können Steuersignale, Prozeßdaten und Parameter zwischen übergeordneter Steuerung und dem Servoumrichter übertragen werden.

5 Regelungsstruktur / Betriebsarten

In vielen Anwendungen werden elektrische Servoantriebe zur Lageregelung eingesetzt. Dabei wird dem Lageregler ein Drehzahl- und ein Stromregler unterlagert, um ein gutes Führungsverhalten zu erzielen.



MD0183AD

Bild 43: Regelungsstruktur im Servosystem

Führungsgröße des Servoreglers ist der externe Lage-Sollwert. Die Regeldifferenz aus dem Lage-Sollwert und dem Lage-Istwert ist die Eingangsgröße des Lagereglers. Dieser liefert am Ausgang die zugehörige Soll-Drehzahl n_{soll} des Motors.

Soll- und Istwert der Drehzahl werden im untergeordneten Drehzahlregler verglichen. Die Regeldifferenz wird im Drehzahlregler proportional-integral verarbeitet.

Das Ausgangssignal des Drehzahlreglers bildet den Stromsollwert und wird, um Motor und Wechselrichter zu schützen, einer Begrenzerschaltung zugeführt, deren Ausgangssignal wiederum den Sollwert für den Stromregler darstellt. Die Stromistwerte werden über eine Gleichrichterschaltung in ein Gleichstromsignal umgewandelt. Der Stromregler vergleicht Soll- und Istwert und bildet über den Pulsweitenmodulator (PWM) die Steuersignale, die auf die Ansteuerstufen der einzelnen Leistungstransistoren des Wechselrichters geführt werden.

Bis auf die Stromregelung, die aufgrund der geforderten Schnelligkeit analog ausgeführt ist, werden alle anderen Regel-, Steuer- und Überwachungsaufgaben vom Microcontroller übernommen.

5.1 Stromregler

Der Stromregler ist als PI-Regler aufgebaut. Eingangsgröße ist die Abweichung zwischen Soll- und Iststrom einer Motorphase, Ausgangsgröße die Steuerspannung für den Pulsweitenmodulator. Dieser erzeugt mit Hilfe des Sinus-Dreieck-Vergleichs eine pulsweitenmodulierte Spannung, mit der der Wechselrichter angesteuert wird.

Der Stromistwert wird mit Hilfe eines Gleichstrommeßwandlers am Ausgang des Wechselrichters gemessen und auf den Vergleich am Eingang des Stromreglers geführt.

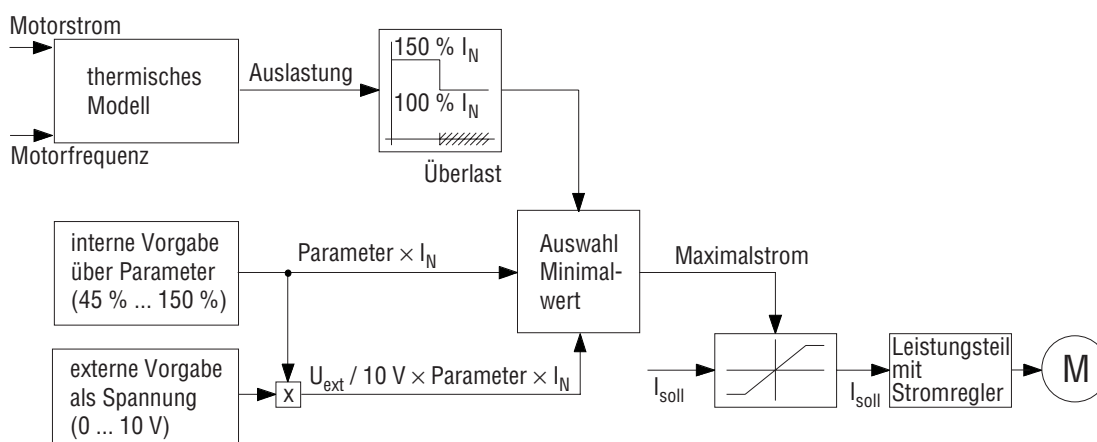
Der Stromregler ist die innerste Regelschleife des Servoreglers und muß daher sehr schnell reagieren, da alle übergeordneten Regler in ihrer Geschwindigkeit von diesem abhängig sind.

Dem Stromregler vorgeschaltet ist ein Strombegrenzungsglied. Mit Hilfe dieser Begrenzung wird der Sollstrom auf einen bestimmten Maximalwert begrenzt.

Der Maximalstrom wird dabei von folgenden drei möglichen Faktoren bestimmt. Diese sind:

- Thermisches Modell (Schutz der Endstufe bei niedrigen Frequenzen)
- Begrenzung durch interne Parameter
- Begrenzung durch externe Vorgabe

Das folgende Blockschaltbild zeigt den Stromregler und die drei bestimmenden Faktoren der Strombegrenzung:



MD0188AD

Bild 44: Stromregler mit Strombegrenzung

Die Begrenzung des Sollstroms über das thermische Modell ist nur bei Frequenzen im Bereich bis 1,5 Hz wirksam. Innerhalb dieses Frequenzbereichs muß der Strom begrenzt werden, da die Stromflußzeiten innerhalb der Endstufe sonst zu lang werden und diese thermisch überlastet wird.

Im normalen Betriebsfall verträgt die Endstufe bis zu 150% des Nennstroms auf Dauer. Bei Frequenzen kleiner 1,5 Hz sinkt diese Schwelle auf 100% I_N ab. Wird der Motor unterhalb 1,5 Hz betrieben, so ist ein Strom über 100% I_N nur für eine kurze Zeit zulässig. Wird die erlaubte Belastungszeit überschritten, so wird der Maximalwert des Stroms auf 100% abgesenkt.

Die Begrenzung über einen internen Parameter dient unter anderem zum Schutz des Motors. Der Parameter wird abhängig vom maximalen Motorstrom innerhalb des Menüs im Verstärker eingestellt. Der Maximalwert bewegt sich dabei im Bereich von 45 bis 150% I_N .

Die Strombegrenzung durch externe Vorgabe ist nur mit der Optionskarte AIO11 möglich.

Eingangssignal ist eine Spannung von 0 ... 10 V. Diese Spannung wird ins Verhältnis zu der maximalen Spannung dieses Bereichs gesetzt. Der Quotient der beiden Spannungswerte wird mit dem eingestellten Maximalwert des Stromes multipliziert. Der extern definierte Maximalstrom kann somit nur kleiner oder maximal gleich dem intern festgelegten sein.

Wirksam ist immer die Begrenzung mit der niedrigsten Vorgabe.

Beispiel: Der maximale Motorstrom ($3 \cdot I_0$) beträgt 110 % des Nennstroms des Umrichters und die Frequenz, mit der der Motor betrieben wird, ist größer 1,5 Hz.

Die Voraussetzungen für eine externe Vorgabe des Maximalstroms sind gegeben und am Analogeingang für die externe Vorgabe liegt eine Spannung von 8 V an.

- Die Begrenzung aufgrund des thermischen Modells ist nicht wirksam, da die Motorfrequenz nicht innerhalb des wirksamen Bereichs ($< 1,5$ Hz) des Modells liegt.
- Der interne Parameter wird auf 110 % des Nennstroms programmiert, da dies dem maximal zulässigen Motorstrom entspricht.
- Der externe Wert des Maximalstromes ist mit 8 V vorgegeben. Ins Verhältnis zur maximal möglichen Spannung an diesem Eingang von 10 V gesetzt ergibt sich ein Faktor von 0,8 (= 80 %). Mit diesem Faktor wird der Wert des intern vorgegebenen Maximalstroms multipliziert:

$$0,8 \cdot 110\% \cdot I_N = 88\% I_N$$

Der kleinste vorgegebene Wert des Maximalstroms ist demnach der über den Analogeingang vorgegebene Stromwert von 88 % I_N .

5.2 Drehzahlregler

Damit die Drehzahlregelung den geforderten hohen Stellbereich aufweist, müssen auch kleinste Drehzahlen noch genau erfaßt werden. Daher benötigt man einen hoch auflösenden Rotorpositionsgeber und einen möglichst kurzen Abtastzyklus. Dies wiederum erfordert eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit und daher einen besonders leistungsfähigen Rechner.

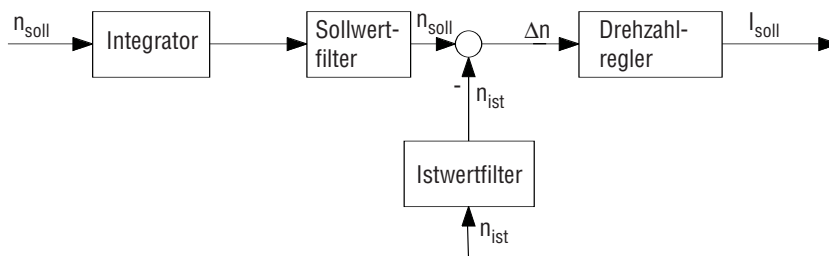


Bild 45: Drehzahlregler

MD0189BD

Der Drehzahlregler ist dem Stromregler überlagert. Er erhält die Vorgabe der Sollzahl über:

- Positioniersteuerung
- Analogeingang
- Feldbusschnittstelle
- Serielle Schnittstelle

Aufgebaut ist der Drehzahlregler als PID-Regler. Alle drei Regleranteile sind getrennt einstellbar. Der D-Anteil wird aufgrund der schwierigen Einstellung und Optimierung in den meisten Anwendungen auf Null gestellt, um ein mögliches Schwingen des Antriebs zu vermeiden.

5.2.1 Drehzahlfilter

Drehzahlsollwertfilter

Ein Drehzahlsollwertfilter ist notwendig, da

- der analoge Drehzahlsollwert häufig mit Störungen behaftet ist
- der Drehzahlsollwert der überlagerten Positioniersteuerung aufgrund von deren Zykluszeit "stufig" ist.

Folgende Diagramme zeigen den Verlauf des Drehzahlsollwertes und des Drehmomentes am Motor ohne Filter und im Vergleich dazu den idealen Verlauf der beiden Größen.

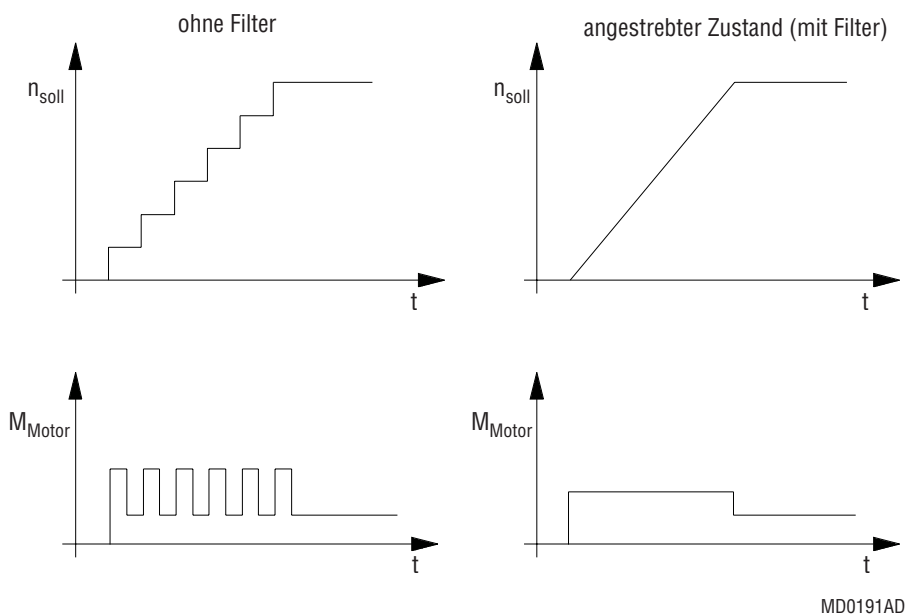


Bild 46: Drehzahlsollwertfilter

Das Diagramm der Soll Drehzahl ohne Filter zeigt ein stufiges Signal einer Positioniersteuerung, das im Motor einen impulsartigen Verlauf des Motordrehmomentes bewirken kann. Im Gegensatz dazu ist bei Einsatz eines Drehzahlsollwertfilters ein kontinuierlicher Verlauf der Soll Drehzahl und damit auch des Motordrehmomentes zu erkennen.

Drehzahlwertfilter

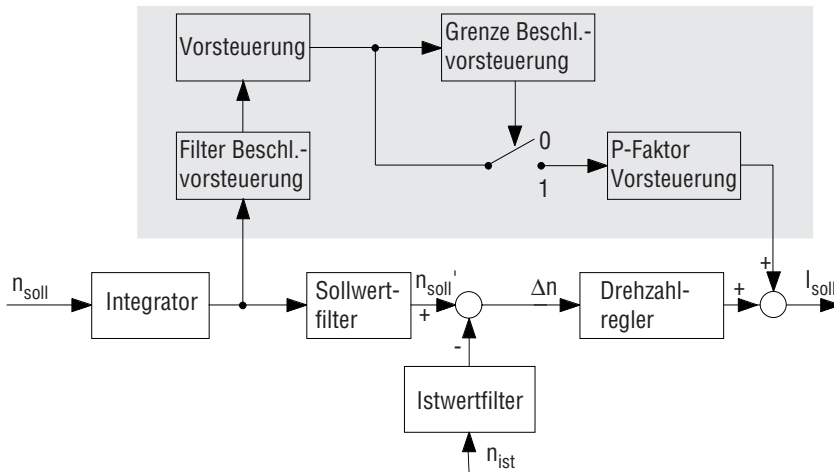
Ein Drehzahlwertfilter ist notwendig, um Störungen auszufiltern. Diese verursachen vor allem im Bereich niedriger Drehzahlen Probleme.

Allgemein gilt, daß die Zeitkonstante eines Filters so gewählt werden muß, daß die Dynamik des Antriebs nicht eingeschränkt wird. Ist die Zeitkonstante des Filters zu groß, so verliert das System einen Teil seiner Dynamik.

5.2.2 Drehzahlregler mit Vorsteuerung

Ziel des Einsatzes einer Beschleunigungsvorsteuerung ist ein besser geführter Beschleunigungsvorgang (Verbesserung des Führungsverhaltens). Durch den zusätzlichen P-Anteil der Vorsteuerung ist der Beschleunigungsvorgang schneller abgeschlossen. Da die Vorsteuerung nur in einem bestimmten Bereich wirksam ist, hat dies keine Auswirkungen auf das Regelverhalten des Systems im normalen Betrieb bzw. auf das Störverhalten.

Die Drehzahlregelung mit Vorsteuerung wird verwendet, wenn der Beschleunigungsvorgang schnell abgeschlossen werden soll. Die Vorsteuerung wird parallel zum Drehzahlregler geschaltet.



MD0190BD

Bild 47: Drehzahlregelung mit Vorsteuerung

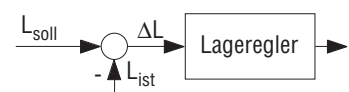
Der Drehzahlsollwert vom Integrator wird im Filter der Beschleunigungsvorsteuerung gefiltert. Das gefilterte Signal wird auf ein Differenzierglied geführt. Abhängig von der Änderung der Drehzahl über der Zeit liefert das Differenzierglied am Ausgang einen bestimmten Wert. Überschreitet dieser Wert die Ansprechschwelle der Drehzahlvorsteuerung, wird sie auf ein Proportionalglied geführt. An diesem P-Glied läßt sich die Verstärkung der Vorsteuerung einstellen. Der Ausgang des Proportionalgliedes ist wiederum auf den Eingang der Strombegrenzung geführt.

Wird die Ansprechschwelle wieder unterschritten, so wird die Vorsteuerung gesperrt und der Drehzahlregler wird wieder allein wirksam.

Wird ein Antrieb ohne Beschleunigungsvorsteuerung betrieben, so bildet sich ein großer I-Anteil im Drehzahlregler aus, der zum Überschwingen führt.

5.3 Lageregler

Der Lageregler wird als reiner Proportionalregler ausgeführt. Ein Integral-Anteil würde zu einem unzulässigen Überschwingen des Antriebs beim Einfahren in die Zielposition führen. Der Integral-Anteil des untergeordneten Drehzahlreglers sorgt dafür, daß eine bleibende Regelabweichung der Lage (z.B. bei Belastung) vermieden wird.

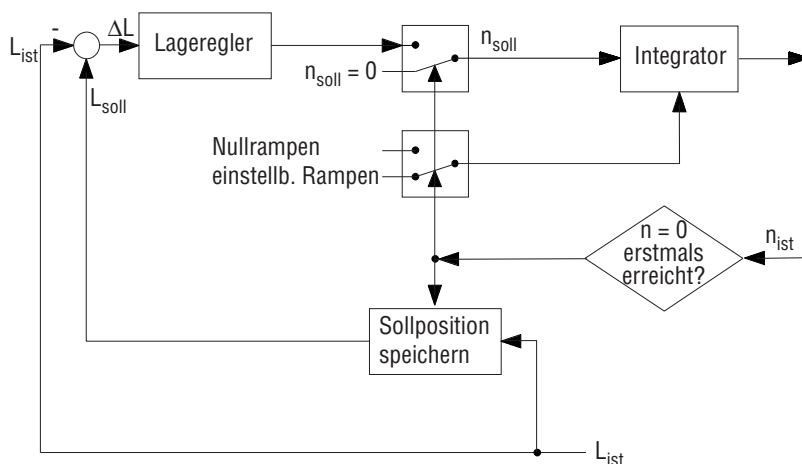


MD0192CD

Bild 48: Lageregler

Halteregelung

Die Halteregelung ist eine Abwandlung des Lagereglers. Aufgabe der Halteregelung ist, daß bei Auftreten von Störgrößen (beispielsweise Be- oder Entladen eines Hubwerkes), die ursprüngliche Lage erhalten bleibt, ohne daß eine externe Positioniersteuerung benötigt wird. Die Halteregelung ist eine spezielle Funktion, die über einen Binäreingang aktiviert werden kann. Wird der Eingang logisch "1", wird dem Drehzahlregler der Sollwert "n = 0" vorgegeben. An den aktiven Sollwerttrampen wird der Antrieb auf Drehzahl Null abgebremst. Wird von der Lageerfassung das erste Mal Drehzahl Null erkannt, wird der gerade aktuelle Positionswert als Lagesollwert gespeichert. Gleichzeitig wird der Ausgang des Lagereglers auf den Eingang des Drehzahlreglers geschaltet. Das System ist nun lagegeregelt auf die Position, die im Sollwert gespeichert wurde.



MD0193BD

Bild 49: Halteregelung

5.4 Betriebsarten

Servoumrichter werden in zwei Betriebsarten eingesetzt:

- Drehzahlregelung
- Drehmomentregelung

5.4.1 Drehzahlregelung

Die Drehzahlregelung besteht aus einem Drehzahlregelkreis mit vorgeschalteter Drehzahlbegrenzung. Die Drehzahlbegrenzung begrenzt den von der Sollwertquelle gelieferten Sollwert auf eine Maximaldrehzahl. Erreicht der Antrieb die Solldrehzahl oder die Maximaldrehzahl, behält er diese bei und arbeitet somit drehzahl geregelt.

Wird der Motor zu stark belastet, so wird wegen des großen Stromes die Strombegrenzung erreicht, ohne daß die vorgegebene Drehzahl erreicht wird. Steigt die Last weiter an, so kann es passieren, daß der Motor zum Stehen kommt. Ein Fehler wird dabei nur erkannt, sofern die Funktion "Drehzahlüberwachung" eingeschaltet ist, oder sobald die Temperaturüberwachung des Kühlkörpers anspricht.

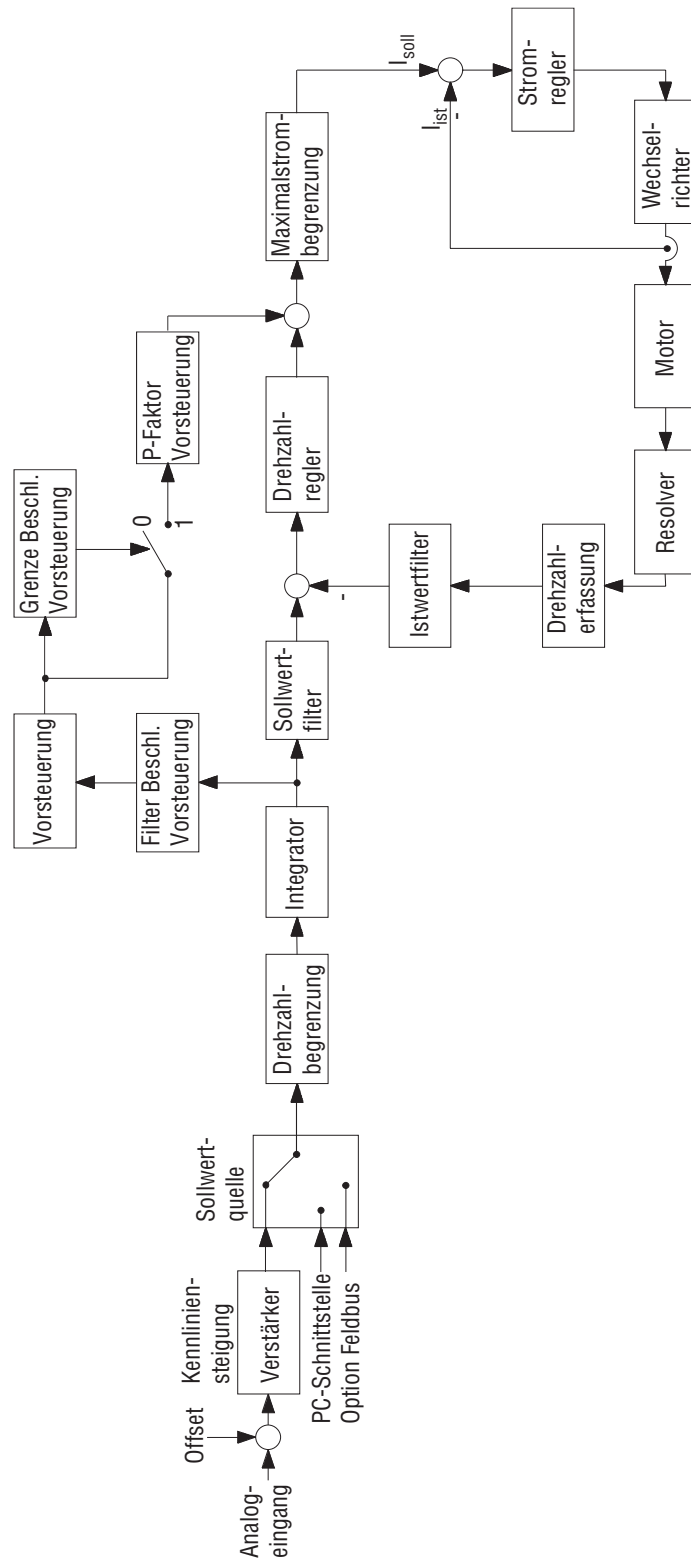


Bild 50: Drehzahlregelung

MD0195BD

5.4.2 Drehmomentregelung

Die reine Drehmomentregelung von Servoantrieben wird hauptsächlich bei sogenannten "Stromfolgeregelungen" im Master-Slave-Prinzip eingesetzt.

Dabei wird dem Slave als Eingangssignal (Sollwert) der aktuelle Strom-Istwert des Masters aufgeschaltet. Beide Antriebe müssen dazu mechanisch fest verbunden sein (z.B. über eine Welle). Der Slave liefert somit das gleiche Drehmoment wie der Master und es erfolgt eine Lastaufteilung zwischen beiden Antrieben.

Eine weitere Anwendung der Drehmomentregelung findet sich z.B. bei Wickelantrieben.

Bei der Drehmomentregelung wird der Drehzahlregler übersteuert. Übersteuert heißt, der Regler wird ständig voll ausgesteuert betrieben. Dabei ist die Strombegrenzung durch das Solldrehmoment, d.h. den Stromsollwert vorgegeben. Je nach Vorzeichen des Solldrehmomentes wird n_{\max} rechts oder n_{\max} links als Drehrichtungsvorgabe benutzt.

Im drehmomentgeregelten Betrieb erreicht die Drehzahlregelung die Drehzahlvorgabe n_{\max} im Normalfall nicht, da die Strombegrenzung aktiv ist. Dann entspricht der eingestellte Strom dem Sollstrom, d.h. das Solldrehmoment ist erreicht. Der Motor bewegt sich somit drehmomentgeregelt.

Falls das Lastdrehmoment nicht ausreicht, um den Sollstrom einzustellen, beschleunigt der Motor bis auf die Grenzdrehzahl n_{\max} .

6 Das Getriebe

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

6.1 Forderungen der Servotechnik an ein Getriebe

- niedriges Massenträgheitsmoment
- geringes Verdrehspiel
- hohe Verdrehsteifigkeit
- hoher Wirkungsgrad
- schwingungsarm

Das niedrige Massenträgheitsmoment des Getriebes ist Voraussetzung für die Realisierung eines hochdynamischen Antriebs. Besonders bei Antrieben, die schnell beschleunigt werden müssen, ist ein dynamisches Getriebe mit möglichst hohem Wirkungsgrad unumgänglich.

Bei Einsatz einer Positioniersteuerung wird ein möglichst geringes Verdrehspiel und hohe Verdrehsteifigkeit gefordert, da sonst relativ große Winkelfehler auftreten, die eine genaue Positionierung unmöglich machen.

6.2 Allgemeine Getriebeübersicht

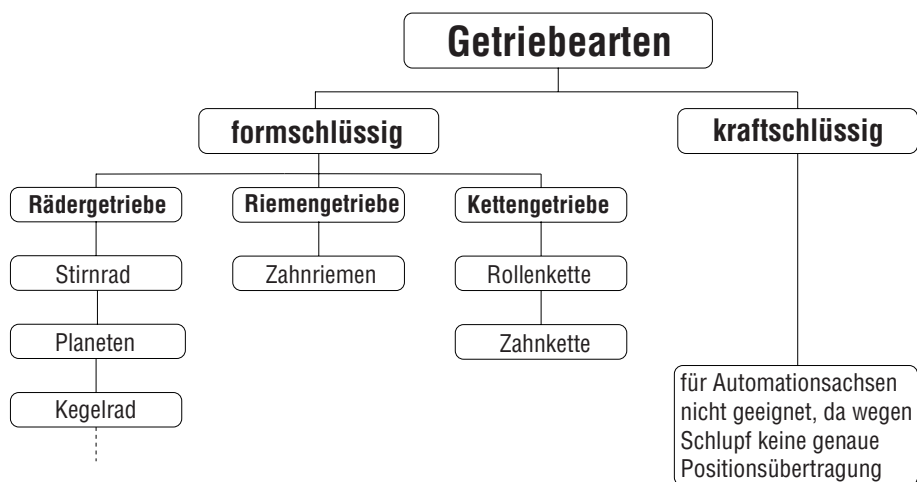


Bild 51: Getriebeübersicht

MD0202AD

Man unterscheidet, abhängig von der Richtung des Kraftflusses, zwischen Koaxial- oder Parallelwellengetriebe und Winkelgetriebe. Bei Koaxial- und Parallelwellengetrieben liegen die eintreibende und die abtreibende Welle in einer Ebene. Der Kraftfluß ist demnach geradlinig. Bei Winkelgetrieben stehen eintreibende und abtreibende Welle senkrecht zueinander, der Kraftfluß wird rechtwinklig umgelenkt.

Im folgenden werden die in der Servotechnik am häufigsten verwendeten Getriebe beschrieben.

6.2.1 Stirnradgetriebe

Da Stirnradgetriebe mit unkomplizierten Werkzeugen prozeßsicher und kostengünstig hergestellt werden können, sind sie die am häufigsten eingesetzten Getriebe. Mit ihrer einfachen und robusten Bauweise genügen sie den meisten Anwendungsfällen.

Bei Stirnradflachgetrieben verlaufen eintreibende und abtreibende Welle parallel zu einander. Der Gesamtantrieb wird dadurch kurz und schmal, weshalb diese Getriebe vor allem bei beengten Platzverhältnissen eingesetzt werden. Mit der parallelen Wellenanordnung führt man die Abtriebswelle vorzugsweise als Hohlwelle aus. Das ist zum Beispiel bei Fahrantrieben von Vorteil – über die durchgesteckte Achse kann die Kraft synchron auf beide Antriebsräder übertragen werden.

6.2.2 Planetengetriebe

Bei dynamischen Anwendungen werden häufig spielarme, verdrehsteife Planetengetriebe eingesetzt.

Die Lastverteilung auf mehrere Planetenräder führt gegenüber Stirnradgetrieben zu einer deutlich höheren Leistungsdichte und damit zu kleinerem Bauvolumen. Durch die optimierte Verzahnungsgeometrie sowie engste Fertigungstoleranzen gewährleisten Planetengetriebe sehr geringe Verdrehwinkel (3 bis 10 Winkelminuten). Großzügig bemessene Wellendurchmesser garantieren eine sehr hohe Verdrehsteifigkeit und damit eine gute Positioniergenauigkeit. Planetengetriebe sind zudem verlustarm mit Wirkungsgraden von $\eta = 97\%$ (einstufiges Getriebe) und $\eta = 94\%$ (zweistufiges Getriebe) bei 80 °C Betriebstemperatur. Sie sind außerdem leise und wartungsarm.

6.2.3 Kegelradgetriebe

Besonders kompakte Antriebslösungen lassen sich mit Kegelradgetrieben realisieren, bei denen der Kraftfluß rechtwinklig umgelenkt wird.

Bei Kegelradgetrieben können als Abtriebswellen sowohl Hohlwellen als auch Vollwellen eingebaut werden.

6.3 Vergleich der verschiedenen Getriebebauarten für die Servotechnik

	Stirnradgetriebe	Planetengetriebe	Kegelradgetriebe
Leistungsdichte	mittel	groß	mittel
Übersetzung je charakteristischer Stufe	klein ca. $i = 1 \dots 8$	mittel ca. $i = 4 \dots 10$	klein ca. $i = 1 \dots 6$
Verdrehflankenspiel	mittel	klein bis sehr klein	mittel
Verdrehwinkel (am Abtrieb)	$\alpha = 12' \dots 18'$	$\alpha = 3' \dots 10'$	$\alpha = 12' \dots 18'$
Verdrehsteifigkeit	mittel	groß	mittel
Geräuschentwicklung	mittel	gering	mittel

7 Einsatz in industrieller Umgebung

7.1 Netzverhältnisse

Beim Industrienetz wird von sinusförmiger Spannung ausgegangen. Instabile Verhältnisse haben üblicherweise keine Auswirkungen. Die Umrichter können an den meisten Netzformen (TN, TT, ...) betrieben werden.

Spannungsschwankungen können Einfluß auf das Betriebsverhalten des Antriebes haben. Im Nennspannungsbereich des Umrichters funktioniert dieser ohne Beeinflussung. Werden die Werte überschritten, muß der Umrichter abschalten, um Schaden zu vermeiden. Wird der Spannungswert unterschritten, liefert der Motor nicht mehr die in den technischen Daten angegebenen Nennwerte. Die Frequenz der Netzspannung hat untergeordneten Einfluß.

Durch Einsatz von Netzdrosseln und Schutzschaltungen sind die Servoumrichter gegen Spannungsspitzen unempfindlich, die z.B. durch nicht verdrosselte Kompensationsanlagen hervorgerufen werden.

7.2 Hinweise zum Motor

Die Auswahl des Motors wird im Projektierungsbeispiel aufgezeigt. Motor und Umrichter müssen aufeinander abgestimmt sein.

Servomotoren sind in der Regel eigenbelüftet. Da die Wärmeabfuhr über Konvektion geschieht, haben die Farbe und die Verschmutzung einen entscheidenden Einfluß.

Die Schutzart des Motors ist serienmäßig IP65. Das Dauerdrehmoment kann durch Einsatz eines Fremdlüfters um den Faktor 1,6 erhöht werden.

7.3 Leitungsverlegung

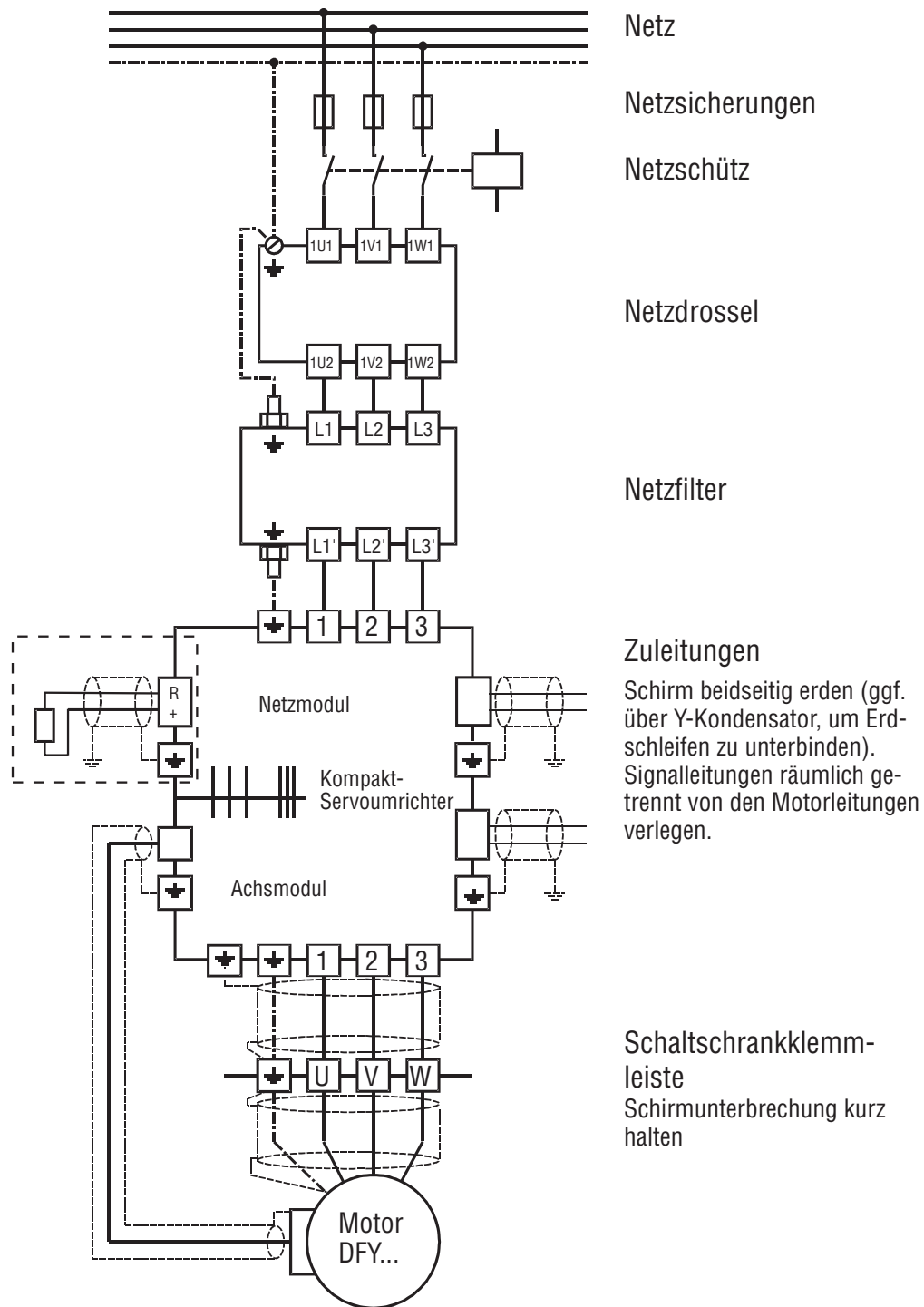
Die Beschaffenheit und Verlegung der Leitungen spielt eine große Rolle beim Einsatz von Servoantrieben. Die Dimensionierung muß auf den fließenden Strom ausgerichtet sein, um den Spannungsfall auf den zulässigen Wert zu begrenzen. Weitere Kriterien zur Dimensionierung sind den jeweils geltenden Vorschriften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

Die Verlegung der Leitungen, speziell im Kabelkanal oder auf Kabelpritsche, erfordert größte Sorgfalt. Eine räumliche Trennung zwischen leistungsführenden Leitungen und Elektronikleitungen reduziert die EMV-Beeinflussung. Geschirmte Leitungen eignen sich sehr gut, um elektromagnetische Störungen in der Anlage zu vermindern.

7.4 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Die EMV der Komponenten einer Anlage und der Gesamtanlage ist von großer Wichtigkeit. Die EMV-Richtlinie definiert die zulässigen Verhältnisse. So wird nicht nur die Störaussendung (Emission) klassifiziert, sondern auch die Störfestigkeit (Immission) festgelegt. Die SEW-Servoumrichter sind alle grundentstört. Damit können die Umrichter in industrieller Umgebung betrieben werden. Zur Entstörung gehört die Empfehlung geschirmte Leitungen zu verwenden und Netzfilter einzusetzen.

zen. Insbesondere die Resolverleitung muß geschirmt sein. Wie der Schirm geerdet werden muß, hängt von verschiedenen Faktoren ab. Hinweise stehen in der jeweiligen Dokumentation.



00072ADE

Bild 52: EMV-gerechte Verdrahtung in Wohngebieten

7.5 Schnittstellen zur Umgebung

Der Servoumrichter kann über verschiedene Kanäle angesteuert werden bzw. Rückmeldung zu übergeordneten Funktionseinheiten wie SPS oder ext. Positioniersteuerung geben. Hier ist wichtig, daß die Einhaltung der einschlägigen Normen für Schnittstellen gewährleistet ist.

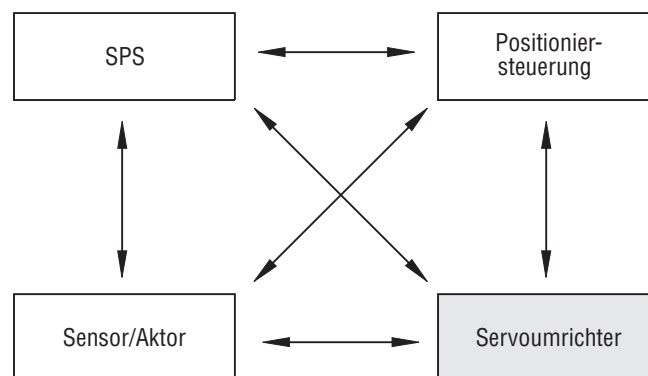
Hierbei gilt:

Schnittstelle	Pegel / Norm
Binäre Eingänge	"1" +13V ... 24V ... 30,2V
Analoge Eingänge	-10V ... +10V
RS-232	nach RS-232 Norm
RS-485	nach RS-485 Norm
Encoder Simulation	nach RS-422 TTL Norm
Feldbus	nach jeweiliger Norm (Profibus, INTERBUS-S, CAN-Bus)

Mit den leistungsstarken Binär-Ausgängen können handelsübliche Relais oder kleine Leistungsschütze direkt betrieben werden. Vorteil eines Relaisstreiberausganges ist, daß beim Ausfall eines Relais nicht die Elektronik mitgetauscht werden muß.

Durch die mittels Optokoppler entkoppelten Eingänge, die direkt über eine SPS etc. angesteuert werden können, ist ein Höchstmaß an Störfestigkeit gewährleistet.

Über die handelsübliche PC-Schnittstelle RS-232 können die Umrichter einfach parametrierbar und in Betrieb genommen werden. Nachfolgendes Bild zeigt den flexiblen Einsatz eines Umrichters im Umfeld.



00040ADE

Bild 53: Schnittstellen

- Digit. Ein-/Ausgänge: Mit vorgegebenen Funktionen frei programmierbar
- Analogeingänge: Sollwertvorgabe für Drehzahl, Drehmoment, Maximalstrom
- Analogausgänge: Ausgabe von Prozeßgrößen
- serielle Schnittstelle: RS-232/RS-485 für PC-Anschluß, Prozeßanbindung
- Encodersimulation: Inkrementelles Lagesignal für internen/externen Lageregler
- Feldbus: Prozeßanbindung

Bild 53 zeigt die möglichen Systemkonfigurationen aus Sicht des Umrichters:

- Denkbar wäre als einfachste Anwendung die Verbindung zwischen Servoumrichter und Sensor-Aktorebene (Endschalter, Druckmarken, Sensoren etc.). Ohne Anbindung an eine SPS oder Positioniersteuerung sind einfache Aufgaben zu bewältigen.
- Bei komplexeren Anlagen ist meist eine übergeordnete Steuerung (SPS) vorhanden. Üblicherweise erfolgt die Kommunikation über die E/A-Ebene von SPS und Umrichter. Zur analogen Sollwertverarbeitung muß die SPS einen Analogausgang besitzen. Möglich ist die Kommunikation auch über serielle Schnittstelle oder Feldbus z.B. zwecks Visualisierung, Parametrierung, Prozeßdatenaustausch usw.
Die Sensor-/Aktorebene kann direkt oder über die SPS angeschlossen werden.
- Verbreitet sind dort, wo Positionieraufgaben zu lösen sind, Positioniermodule als Zusatzbaugruppe zur SPS oder Stand-Alone-Systeme. Zusätzlich zu den unter Punkt 2 angeführten Anbindungsmöglichkeiten wird meist die Encodersimulation vom Umrichter als inkrementelles Lage-Istwert-Signal für die Positionierbaugruppe benutzt.
- Ebenso wie die Integration der Positioniersteuerung in die SPS kann diese als Optionskarte oder Software-Lösung im Umrichter implementiert sein. Hierbei erfolgt die Sollwertvorgabe an den Umrichter digital. Anbindungsmöglichkeiten bestehen über die E/A-Ebene des Umrichters, eine serielle Schnittstelle oder den Feldbus.

7.6 Definitionen der Prozeßanbindung

7.6.1 Unterscheidung nach der Antriebskonfiguration

- Einachsananwendungen:

Diese Anwendung stellt vom Konzept her die geringsten Anforderungen an die übergeordnete Steuerung. Typisch ist der Einsatz einer Positionierregelung unter Nutzung von digitalen Ein-/Ausgängen zur Überwachung des Antriebs.

- Mehrachsananwendungen:

- Punkt zu Punkt
- Gleichlauf
- Winkelsynchronlauf
- Bahnsteuerung

Bei Mehrachsananwendungen bestimmt der Arbeitsprozeß den steuerungstechnischen Aufwand. Die Abhängigkeit und Genauigkeit der Bewegung elektrisch gekoppelter Antriebe führt zur Auswahl einer geeigneten Mehrachssteuerung.

7.6.2 Unterscheidung nach Sollwertquelle für den Drehzahlregler

- Sollwertvorgabe ohne Prozeßanbindung (Steuerung):
 - Interne digitale Sollwertvorgabe im Panel-Betrieb MD_SHELL (Test/Inbetriebnahme).
 - Analoge Drehzahl- oder Drehmomentregelung über Potentiometer.
 - Analoge Drehzahlregelung mit positions- oder zeitabhängiger Sollwertumschaltung.
- Sollwertvorgabe mit Prozeßanbindung:
 - Analoge Sollwertvorgabe einer externen Positioniersteuerung/-regelung.
 - Digitale Sollwertvorgabe durch interne API/APA 12.
 - Digitale Sollwertvorgabe einer externen Positioniersteuerung über Feldbus

7.6.3 Unterscheidung nach Art und Anbauort des Lagegebers

Bei Einsatz einer Positioniersteuerung muß durch einen geeigneten Geber der Istwert der Lage erfaßt werden. Der Meßort ergibt sich aus dem Einfluß von Störgrößen, die Auflösung des Gebers aus der zulässigen Genauigkeit. Bei der Auswahl des Gebers muß auf die Kompatibilität zur Positioniersteuerung geachtet werden. Für viele Anwendungen wird die im Verstärker integrierte Encodersimulation genutzt.

- Lagegeber:
 - Inkrementelle Encodersimulation des Resolversignals
 - Externer Inkrementalgeber im Arbeitsprozeß (Fördergut, Transportband,...)
 - Absolutwertgeber am Motor

7.7 Umgebungsbedingungen

Die Umgebungsbedingungen sind für Motor und Verstärker getrennt zu sehen. Zu beachten sind aber jeweils die max. Umgebungstemperaturen.

Motor:	-25 °C ... 40 °C	mit 100% M ₀	max. ϑ = 60 °C mit 75% M ₀
Verstärker:	0 °C ... 45 °C	mit 100% P _N	max. ϑ = 60 °C mit 55% P _N

Die weiteren zulässigen Umgebungsbedingungen sind den Projektierungshinweisen zu entnehmen.

7.8 Inbetriebnahme und Regleroptimierung

Inbetriebnahme und Regleroptimierung geschehen heutzutage ähnlich wie bei SPS, CNC etc. mit einem PC und der dazugehörigen Software. Die Software muß einfach, übersichtlich und komfortabel sein. Ergänzend gibt es noch die geräteinternen Bedienelemente.

Bevor mit der Inbetriebnahme des Servoantriebssystems begonnen wird, werden die montierten mit den projektierten Komponenten anhand der Projektierungsdaten verglichen.

Wenn die Leitungen vorschriftsmäßig verlegt und verdrahtet sind (Schirmung), kann mit der eigentlichen Inbetriebnahme des Antriebssystems begonnen werden.

7.8.1 Reglereinstellung mittels Bedienoberfläche MD_SHELL

Die hier beschriebene Bedienoberfläche ermöglicht es dem Anwender eine schnelle Erstinbetriebnahme vorzunehmen. Dazu wird innerhalb der Bedienoberfläche die Grundeinstellung des Drehzahlreglers aus anlagenspezifischen Daten berechnet.

- Auswählen des Unterpunktes “Inbetriebnahme” im Menü “Parameter”
- Eingabe der verlangten Daten
 - Motortyp
 - Nenndrehzahl
 - Bremse
 - Dämpfung Drehzahl-Regelkreis
 - Steifigkeit Drehzahl-Regelkreis
 - Zeitraster Positioniersteuerung
 - Antrieb spielfrei / mit Spiel
 - Lastträgheitsmoment an Motorwelle
 - Kürzeste geforderte Rampenzeit

Durch Betätigung der Taste [F2] erfolgt die Berechnung aller notwendigen Parameter und die Einstellung von Grenzwerten für den angegebenen Antrieb. Mit der angezeigten Grundeinstellung des Drehzahlreglers kann der Antrieb in Betrieb genommen werden.

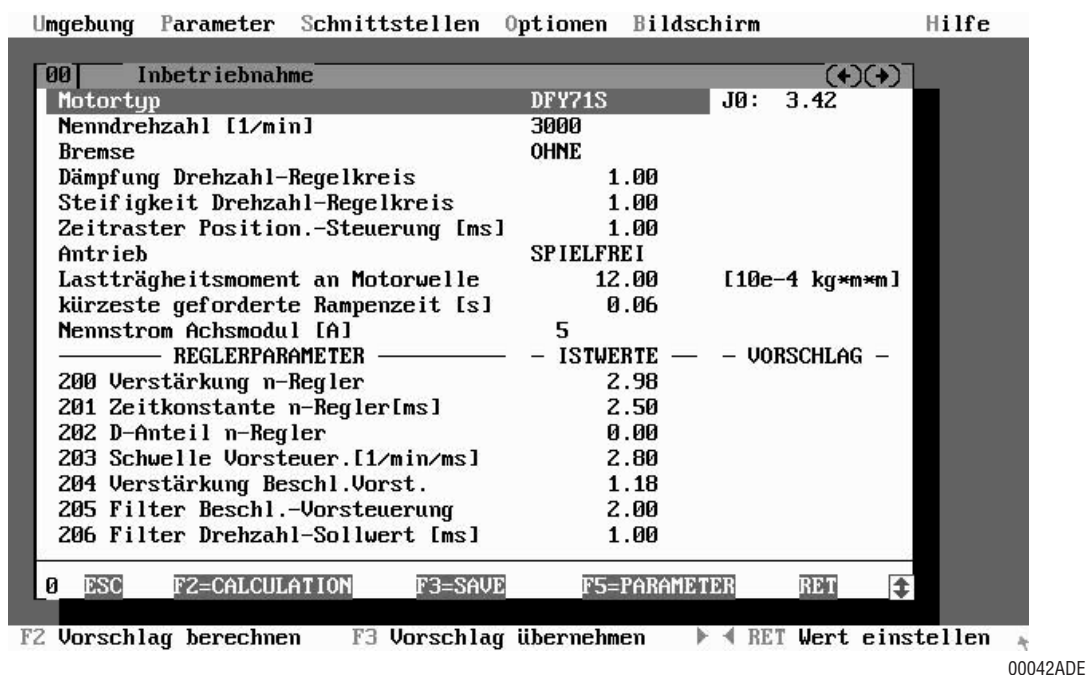


Bild 54: Menü “Inbetriebnahme”

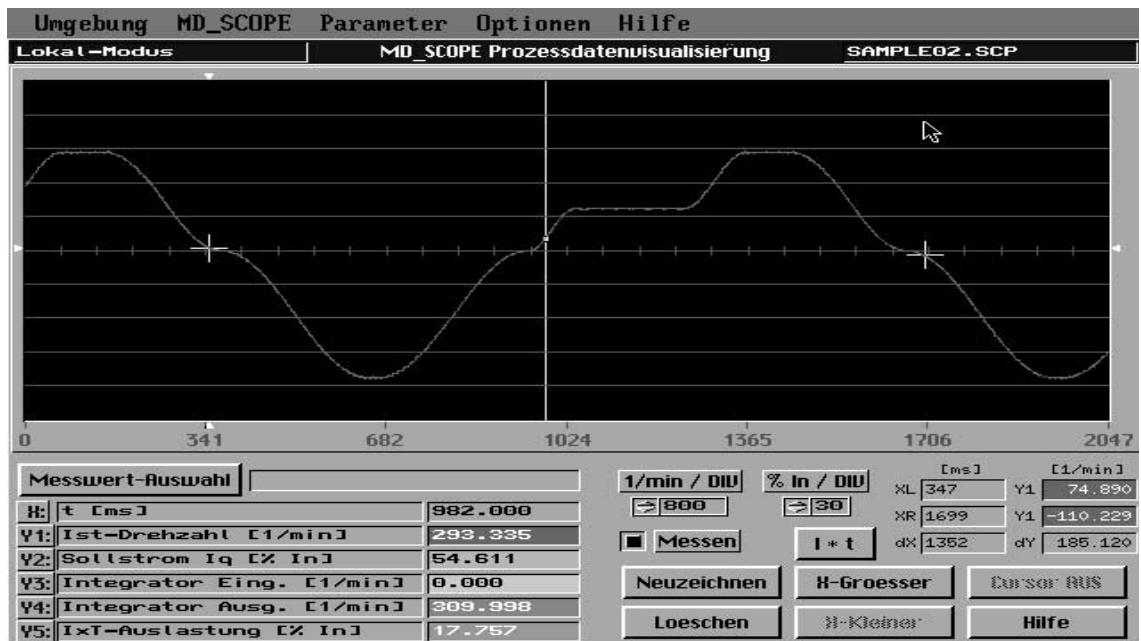
00042ADE

In der Regel liefert die Grundeinstellung zufriedenstellende Ergebnisse. Muß dennoch weiter optimiert werden, stehen folgende Hilfsmittel zur Verfügung:

- Anwenden des Programms MD_SCOPE zur Prozeßdaten-Visualisierung, das Funktionen eines digitalen Speicheroszilloskops bietet. Mit Hilfe dieses Programms können der Zeitverlauf von Soll- und Istwerten usw. auf dem PC-Bildschirm dargestellt, gespeichert und ausgedruckt werden. Gleichzeitig können die Reglerparameter geändert werden ohne in die Bedienoberfläche zu wechseln.

- Ohne Hilfsprogramm können mit Hilfe der Optionskarte AIO11 und einem Oszilloskop die Reglerparameter optimiert werden. Dazu müssen die Analogausgänge auf der Optionskarte entsprechend programmiert werden.

7.8.2 Regleroptimierung mit MD_SCOPE



00043BDE

Bild 55: Aufzeichnung von Prozeßdaten mit MD_SCOPE

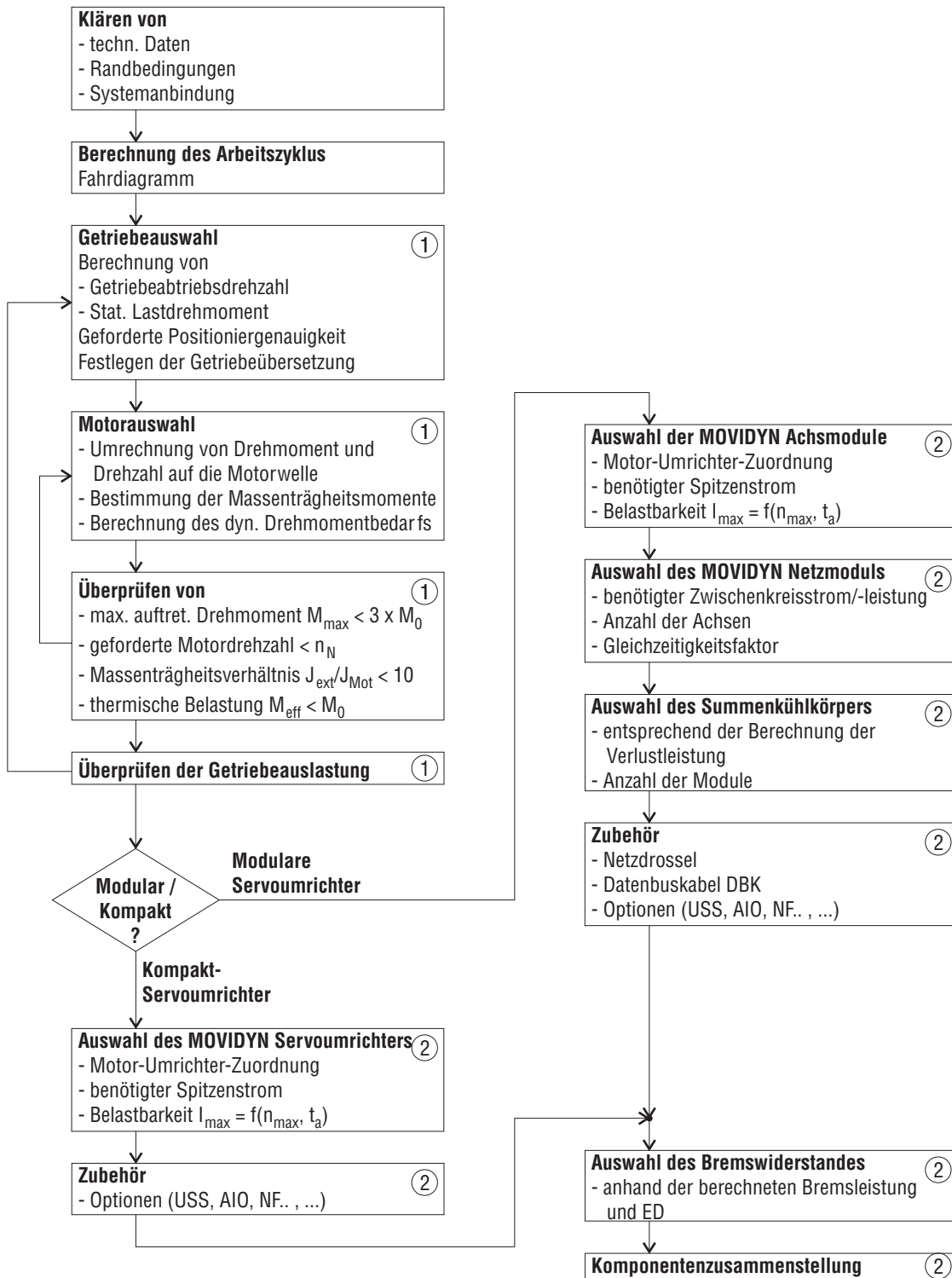
Bild 55 zeigt den Verlauf der ausgewählten Meßwerte (Ist-Drehzahl, Strom-Sollwert, Integrator-Ein- und -Ausgang) für die Einstellung der Parameter nach der Berechnung mit Hilfe der Bedienoberfläche. Der Antrieb erreicht die Solldrehzahl schnell, schwingt einmal über und erreicht den Sollwert relativ schnell.

Mit den Parametern "Dämpfung" und "Steifigkeit" können sämtliche Parameter des Regelkreises harmonisch eingestellt werden.

Damit wird ein optimales Führungs- und Störverhalten erzielt.

8 Projektierung

8.1 Schematischer Ablauf der Projektierung eines Servoantriebs



00211ADE

Bild 56: Schematischer Ablauf der Projektierung



8.2 Projektierungsbeispiel

Für ein dreiaxsiges Portal ist die Auswahl der Servoantriebe und zugehörigen Leistungselektronik zu treffen. Die einzelnen Achsen des Portals werden entsprechend ihrer räumlichen Anordnung mit X, Y, Z bezeichnet:

X-Achse

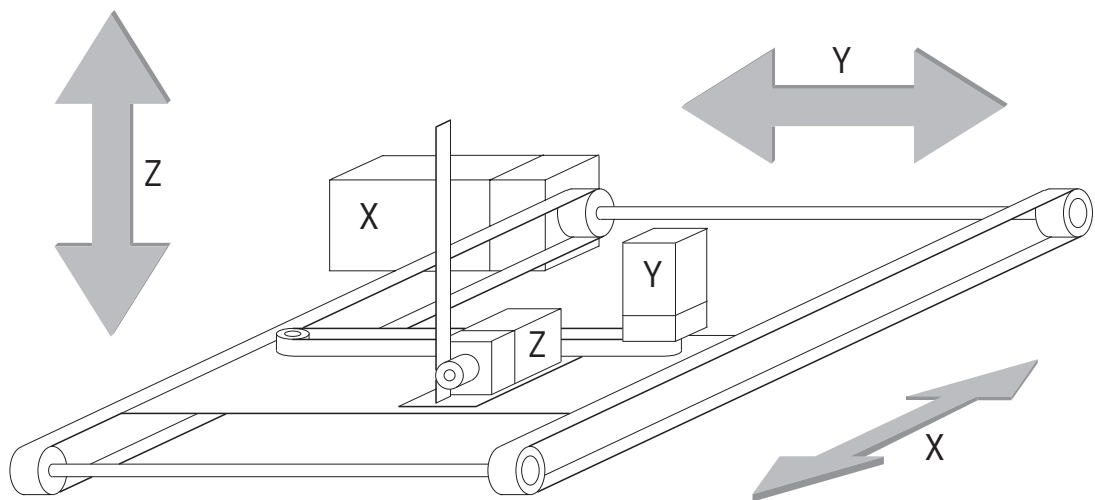
Fahrachse, die über eine Welle zwei Zahnriemen antreibt. Durch die Zahnriemen werden die beiden Antriebseinheiten Y und Z in der Ebene bewegt.

Y-Achse

Fahrachse, die über einen Zahnriemen die Z-Achse bewegt. Die Bewegungsrichtung ist gegenüber der X-Achse um 90° in der Ebene versetzt.

Z-Achse

Hubachse mit Kraftübertragung über eine Zahnstange.



00059AXX

Bild 57: Anordnung der Achsen

Die Berechnung erfolgt separat für jede Achse. Alle Berechnungen basieren auf linearer Beschleunigung und Verzögerung. Eine weitere Forderung besteht darin, modulare Komponenten und einen Bremswiderstand zu verwenden. Die Positionierung erfolgt durch eine übergeordnete SPS.

Hinweis:

Mit "*" werden auf die Antriebsseite umgerechnete Lastdaten gekennzeichnet.

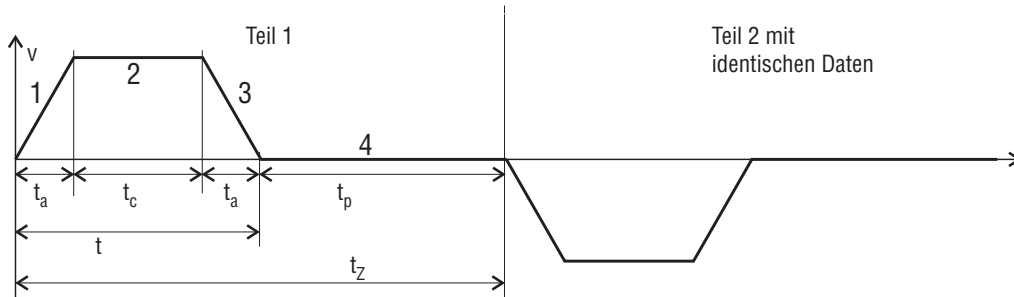
8.3 Berechnung der X-Achse (Fahrwerk)

Vorgabedaten:

m_L	= 453 kg	Summe der bewegten Massen
D	= 0,175 m	Durchmesser der Riemenscheibe
μ_L	= 0,2	Reibkoeffizient
s	= 2 m	Verfahrstrecke
v_{max}	= 2,5 m/s	max. Verfahrgeschwindigkeit
a_{max}	= 10 m/s ²	max. Beschleunigung und Verzögerung
t_z	= 2,1 s	Taktzeit
Δs_1	= ± 0,1 mm	mech. Genauigkeit
Δs	< ± 0,2 mm	geforderte Gesamtgenauigkeit
η_L	= 0,90	Lastwirkungsgrad

8.3.1 Verfahrzyklus

Voraussetzung für die Antriebsbestimmung ist die Feststellung des Bewegungszyklus. Da es sich um eine Fahrachse handelt, reicht es aus, nur eine Fahrrichtung zu ermitteln (1 ... 4).



00060ADE

Bild 58: Verfahrzyklus

Beschleunigungs- und Verzögerungszeit t_a

$$t_a = \frac{v_{\max}}{a_{\max}} = \frac{2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} = \underline{\underline{0,25 \text{ s}}}$$

Fahrzeit t_c mit $v_{\max} = \text{konst.}$

$$t_c = \frac{s - 2 \cdot \left(\frac{1}{2} a \cdot t_a^2\right)}{v_{\max}} = \frac{2 \text{ m} - 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (0,25 \text{ s})^2}{2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \underline{\underline{0,55 \text{ s}}}$$

Gesamtverfahrzeit t und Pausenzeit t_p

$$t = 2 \cdot t_a + t_c = 2 \cdot 0,25 \text{ s} + 0,55 \text{ s} = \underline{\underline{1,05 \text{ s}}}$$

$$t_p = t_z - t = 2,1 \text{ s} - 1,05 \text{ s} = \underline{\underline{1,05 \text{ s}}}$$

8.3.2 Abtriebsdrehzahl, Getriebeübersetzung und Positioniergenauigkeit

Abtriebsdrehzahl n

$$n = \frac{v_{\max}}{D \cdot \pi} = \frac{2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,175 \text{ m} \cdot \pi} = 4,547 \text{ s}^{-1} = \underline{\underline{272,8 \text{ min}^{-1}}}$$

Getriebeübersetzung

Im Hinblick auf die geforderte Positioniergenauigkeit wird ein Planetengetriebe mit eintreibender Drehzahl 3000 min^{-1} gewählt.

$$i_{\text{soll}} = \frac{3000 \text{ min}^{-1}}{272,8 \text{ min}^{-1}} = 11,0 \quad \text{gewählte Übersetzung: } i = 10$$

$$n^* = n \cdot i = 272,8 \text{ min}^{-1} \cdot 10 = \underline{\underline{2728 \text{ min}^{-1}}}$$

Positioniergenauigkeit (statisch)

$$\Delta s = \Delta s_G + \Delta s_M + \Delta s_1$$

Δs_G : Positioniergenauigkeit durch Getriebespiel

Δs_M : Positioniergenauigkeit durch Geberauflösung

Δs_1 : Positioniergenauigkeit durch Mechanik

$$\Delta s_G = \frac{D \cdot \pi}{360^\circ} \cdot \alpha_G = \frac{0,175 \text{ m} \cdot \pi}{360^\circ} \cdot 0,1^\circ = 0,153 \text{ mm} \rightarrow \pm 0,076 \text{ mm}$$

$\alpha_G = 6' = 0,1^\circ$ für Planetengetriebe in Normalausführung (einstufig),
s. Katalog PSF – Planetengetriebe

$$\Delta s_M = \pm \frac{D \cdot \pi}{p \cdot i} = \pm \frac{0,175 \text{ m} \cdot \pi}{4096 \cdot 10} = \pm 0,013 \text{ mm}$$

$p = 4096$ Inkremente (Geberauflösung)

$$\Delta s = (\pm 0,076 \text{ mm}) + (\pm 0,013 \text{ mm}) + (\pm 0,1 \text{ mm}) = \underline{\underline{\pm 0,189 \text{ mm}}} < \pm 0,2 \text{ mm}$$

Damit ist die geforderte Positioniergenauigkeit erfüllt.

8.3.3 Lastdrehmomente am Getriebeabtrieb und Getriebeauswahl**Beschleunigung**

$$M_{\text{dyn}_1} = m_L \cdot a_{\text{max}} \cdot \frac{1}{\eta_L} \cdot \frac{D}{2} = 453 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{0,9} \cdot \frac{0,175 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{440,42 \text{ Nm}}}$$

Konstante Fahrt, statische Last

$$M_{\text{stat}} = m_L \cdot g \cdot \mu_L \cdot \frac{1}{\eta_L} \cdot \frac{D}{2} = 453 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,2 \cdot \frac{1}{0,9} \cdot \frac{0,175 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{86,41 \text{ Nm}}}$$

Verzögerung

$$M_{\text{dyn}_2} = m_L \cdot (-a_{\text{max}}) \cdot \eta_L \cdot \frac{D}{2} = 453 \text{ kg} \cdot \left(-10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 0,9 \cdot \frac{0,175 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{-356,74 \text{ Nm}}}$$

Lastdrehmomente im Verfahrenzyklus

$$\text{Beschleunigungsphase} \quad M_1 = M_{\text{stat}} + M_{\text{dyn}_1} = 440,42 \text{ Nm} + 86,41 \text{ Nm} = \underline{\underline{526,83 \text{ Nm}}}$$

$$\text{Gleichförmige Bewegung} \quad M_2 = M_{\text{stat}} = \underline{\underline{86,41 \text{ Nm}}}$$

$$\text{Verzögerungsphase} \quad M_3 = M_{\text{stat}} + M_{\text{dyn}_2} = 86,41 \text{ Nm} - 356,74 \text{ Nm} = \underline{\underline{-270,33 \text{ Nm}}}$$

Das maximale Drehmoment M_1 bestimmt das notwendige M_{amax} des Getriebes und damit die Getriebebaugröße.

Gewählt wird PSF 701, $i = 10$, $M_{\text{amax}} = 800 \text{ Nm}$. Wegen der gewünschten Trennbarkeit von Motor und Getriebe wird ein Getriebe mit Bogenzahnkupplung "EB10" gewählt.

8.3.4 Motorbezogene Drehmomente und Massenträgheitsmomente

Bei der Ermittlung der motorbezogenen Drehmomente ist der Getriebewirkungsgrad, der Motorwirkungsgrad und das jeweilige Eigenmassenträgheitsmoment zu berücksichtigen.

Getriebedaten (s. Katalog PSF – Planetengetriebe)

einstufiges Planetengetriebe: $\eta_G = 0,97$

PSF 701 / EB 10: $J_G^* = 28,51 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$ (bezogen auf die Motorwelle)

Lastdrehmomente im Verfahrzyklus (auf den Motor bezogen)

Beschleunigungsphase $M_1^* = M_1 \cdot \frac{1}{\eta_G \cdot i} = 526,83 \text{ Nm} \cdot \frac{1}{0,97 \cdot 10} = \underline{\underline{54,31 \text{ Nm}}}$

Gleichförmige Bewegung $M_2^* = M_2 \cdot \frac{1}{\eta_G \cdot i} = 86,41 \text{ Nm} \cdot \frac{1}{0,97 \cdot 10} = \underline{\underline{8,91 \text{ Nm}}}$

Verzögerungsphase $M_3^* = M_3 \cdot \eta_G \cdot \frac{1}{i} = -270,33 \text{ Nm} \cdot 0,97 \cdot \frac{1}{10} = \underline{\underline{-26,22 \text{ Nm}}}$

Zusatzdrehmomente durch das Massenträgheitsmoment des Getriebes, bezogen auf den Motor

$$M_{1G}^* = \frac{J_G^* \cdot 2\pi \cdot n^*}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot t_a \cdot \eta_G} = \frac{28,51 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 \cdot 2\pi \cdot 2728 \text{ min}^{-1}}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot 0,25 \text{ s} \cdot 0,97} = \underline{\underline{3,36 \text{ Nm}}}$$

Bei M_2 gibt es kein M_{2G} , da keine Drehzahländerungen stattfinden.

$$M_{3G}^* = \frac{J_G^* \cdot 2\pi \cdot n^* \cdot \eta_G}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot t_a} = \frac{28,51 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 \cdot 2\pi \cdot 2728 \text{ min}^{-1} \cdot 0,97}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot 0,25 \text{ s}} = \underline{\underline{-3,16 \text{ Nm}}}$$

Massenträgheitsmoment der translatorisch bewegten Last

$$J_L^* = m_L \cdot \left(\frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{v_{\text{max}}}{n^*} \right)^2 = 453 \text{ kg} \cdot \left(\frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2728 \text{ min}^{-1}} \right)^2 = \underline{\underline{0,0347 \text{ kgm}^2}}$$

8.3.5 Motorauswahl und Effektivdrehmoment

Für die Auswahl des Motors sind folgende Bedingungen zu prüfen:

a) $k_j = \frac{J_{\text{ext}}^*}{J_{\text{Mot}}} < 10$ (Massenträgheitsmoment)

Das Verhältnis von externem Massenträgheitsmoment zum Massenträgheitsmoment des Motors sollte aus regelungstechnischer Hinsicht kleiner 10 sein.

b) $M_{\text{max}}^* < 3 \cdot M_0$

Die max. dynamische Belastung des Antriebs darf das dreifache Nenndrehmoment des Motors nicht überschreiten.

c) $M_{\text{eff}} < M_{\text{zul}}$

Das über den Verfahrzyklus wirksame Effektivdrehmoment darf das Nenndrehmoment des Motors unter Berücksichtigung der Motorkennlinie nicht überschreiten (M_{zul} aus M_0 und Motorkennlinie).

d) $n^* \approx 0,9 n_N$

Um ca. 10 % Regelreserve zu erhalten, sollte die maximal auftretende Drehzahl bei 90 % der Motornenndrehzahl liegen.

Die jetzt folgende Motorauswahl erfolgt zunächst ohne Beachtung des Motormassenträgheitsmomentes. Die Auswahl muß durch eine Nachrechnung mit dem Motormassenträgheitsmoment bestätigt werden.

$$J_{\text{ext}}^* = J_L^* + J_G^* = 0,0347 \text{ kgm}^2 + 0,0028 \text{ kgm}^2 = \underline{\underline{0,0375 \text{ kgm}^2}}$$

$$M_{\text{max}}^* = M_1^* + M_{1G}^* = 54,31 \text{ Nm} + 3,36 \text{ Nm} = \underline{\underline{57,67 \text{ Nm}}}$$

An dieser Stelle erfolgt zunächst eine Abschätzung. Der Motor wird näherungsweise durch $M_0 \geq \frac{M_{\text{max}}}{2}$ bestimmt.

Die Wahl dieses Faktors erfordert bei der Projektierung ein wenig Erfahrung. Er kann zwischen 2 und 3 gewählt werden.

Ausgewählter Motor: DFY 112 LB

Nenndaten:
 $n_N = 3000 \text{ min}^{-1}$
 $M_0 = 35 \text{ Nm}$
 $J_{\text{Mot}} = 148 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$



Nachrechnung der Motordrehmomente im Verfahrenzyklus mit Berücksichtigung des Massenträgheitsmomentes des Motors

$$\text{Beschleunigungsphase} \quad M_{1\text{Mot}} = M_1^* + M_{1G}^* + \frac{J_{\text{Mot}} \cdot n^* \cdot 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot t_a} = 54,31 \text{ Nm} + 3,36 \text{ Nm} + 16,91 \text{ Nm} = \underline{\underline{74,58 \text{ Nm}}}$$

$$\text{Gleichförmige Bewegung} \quad M_{2\text{Mot}} = M_2^* = \underline{\underline{8,91 \text{ Nm}}}$$

$$\text{Verzögerungsphase} \quad M_{3\text{Mot}} = M_3^* + M_{3G}^* - \frac{J_{\text{Mot}} \cdot n^* \cdot 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot t_a} = -26,22 \text{ Nm} - 3,16 \text{ Nm} - 16,91 \text{ Nm} = \underline{\underline{-46,29 \text{ Nm}}}$$

Effektives Motordrehmoment und mittlere Motordrehzahl

$$M_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{t_z} \cdot (M_{1\text{Mot}}^2 \cdot t_a + M_{2\text{Mot}}^2 \cdot t_c + M_{3\text{Mot}}^2 \cdot t_a)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{2,1 \text{ s}} \cdot ((74,58 \text{ Nm})^2 \cdot 0,25 \text{ s} + (8,91 \text{ Nm})^2 \cdot 0,55 \text{ s} + (-46,29 \text{ Nm})^2 \cdot 0,25 \text{ s})} = \underline{\underline{30,63 \text{ Nm}}}$$

$$\bar{n} = \frac{n^* \cdot (\frac{1}{2} t_a + t_c + \frac{1}{2} t_a)}{t_z} = n^* \cdot \frac{t_a + t_c}{t_z} = 2728 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{0,25 \text{ s} + 0,55 \text{ s}}{2,1 \text{ s}} = \underline{\underline{1039 \text{ min}^{-1}}}$$

$$\text{ED} [\%] = \frac{t_a + t_c + t_a}{t_z} \cdot 100 \% = \frac{0,25 \text{ s} + 0,55 \text{ s} + 0,25 \text{ s}}{2,1 \text{ s}} \cdot 100 \% = \underline{\underline{50 \%}}$$

8.3.6 Überprüfung des ausgewählten Antriebs

Getriebemotor: PSF 701 EB DY 112 LB

Neendaten: $i = 10$
 $M_{\text{amax}} = 800 \text{ Nm}$
 $n_N = 3000 \text{ min}^{-1}$
 $M_0 = 35 \text{ Nm}$
 $I_0 = 24 \text{ A}$
 $J_{\text{Mot}} = 148 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$

Forderungen:

a) $M_{\text{amax}} > M_1$
 $800 \text{ Nm} > 526,83 \text{ Nm}$ erfüllt

b) $k_j > 10$
 $k_j = \frac{J_{\text{ext}}^*}{J_{\text{Mot}}} = \frac{0,0375 \text{ kgm}^2}{0,0148 \text{ kgm}^2} = \underline{\underline{2,53}}$ erfüllt

c) $M_{1\text{Mot}} < 3 \cdot M_0$
 $\frac{M_{1\text{Mot}}}{M_0} = \frac{74,58 \text{ Nm}}{35 \text{ Nm}} = \underline{\underline{2,13}}$ erfüllt

d) $M_{\text{eff}} < M_{\text{zul}}$
 $30 \text{ Nm} < 32 \text{ Nm}$ erfüllt
 $M_{\text{zul}} = 32 \text{ Nm}$; (S1-Betrieb) aus der Kennlinie bei $n = 1039 \text{ min}^{-1}$

e) $n^* \approx 0,9 \cdot n_N$
 $\frac{n^*}{n_N} = \frac{2728 \text{ min}^{-1}}{3000 \text{ min}^{-1}} = \underline{\underline{0,91}}$ erfüllt

Alle Forderungen sind somit erfüllt.

8.3.7 Auswahl und Berechnung der Servoumrichter-Komponenten

Beispielhaft wird die Auslegung an dieser Stelle für einen einzelnen Antrieb (Einachsantrieb) vorgenommen. Nach Abschluß der Berechnung für X-, Y- und Z-Achse wird zum Vergleich die Versorgung für die drei Antriebe zusammen bestimmt.

Achsmodul

Bei der Wahl des Achsmoduls sind folgende Kriterien zu beachten:

$$a) \quad I_N > \frac{I_{\max}}{1,5}$$

Die Bedingung ergibt sich aus der Eigenschaft der Achsmodule, den 1,5fachen Nennstrom liefern zu können.

$$I_{\max} = \frac{M_{1\text{Mot}}}{M_0} \cdot I_0 = \frac{74,58 \text{ Nm}}{35 \text{ Nm}} \cdot 24 \text{ A} = 51,14 \text{ A} \quad \rightarrow \quad I_N > \underline{\underline{34,1 \text{ A}}}$$

$$b) \quad I_N > \bar{I}$$

Der Mittelwert des Stromes \bar{I} ist ein Maß für die thermische Belastbarkeit der Achsmodule.

$$\bar{I} = \frac{I_0}{M_0} \cdot \frac{1}{t_z} \cdot (|M_{1\text{Mot}}| \cdot t_a + |M_{2\text{Mot}}| \cdot t_c + |M_{3\text{Mot}}| \cdot t_a)$$

$$\bar{I} = \frac{24 \text{ A}}{35 \text{ Nm}} \cdot \frac{1}{2,1 \text{ s}} \cdot (74,58 \text{ Nm} \cdot 0,25 \text{ s} + 8,91 \text{ Nm} \cdot 0,55 \text{ s} + 46,29 \text{ Nm} \cdot 0,25 \text{ s}) = 11,5 \text{ A} \quad \rightarrow \quad I_N > \underline{\underline{11,5 \text{ A}}}$$

c) Zulässigkeit der Motor-Achs-Kombination prüfen.

Ausgewähltes Achsmodul: MAS 51A-060-503-00

Nenndaten: $I_N = 60 \text{ A}$
Breite = 4 TE

Forderungen:

$$a) \quad I_N > \frac{I_{\max}}{1,5}$$

$$60 \text{ A} > 34,1 \text{ A} \quad \text{erfüllt}$$

$$b) \quad I_N > \bar{I}$$

$$60 \text{ A} > 11,5 \text{ A} \quad \text{erfüllt}$$

c) Kombination MAS 51A-060-503-00 mit Motor DFY 112 LB (3000 min⁻¹) laut Zuordnungstabelle im Katalog zulässig.

Netzmodul

Bei der Wahl des Netzmoduls sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

$$a) \quad P_{Z\max} \geq P_{\text{Motmax}}$$

Die maximale Leistung im Zwischenkreis muß größer sein als die maximal geforderte Leistung des Antriebs.

$$P_{\text{Motmax}} = \frac{n \cdot M_{1\text{Mot}} \cdot 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = \frac{2728 \text{ min}^{-1} \cdot 74,58 \text{ Nm} \cdot 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = \underline{\underline{21306 \text{ W}}}$$

$$b) P_{BRCmax} > P_{Bmax}$$

Die Bremsleistung des Moduls muß größer sein als die Bremsleistung des Antriebs.

$$P_{Bmax} = |M_{3Mot}| \cdot n \cdot \frac{2\pi}{60 \frac{s}{min}} \cdot \eta_L = 46,29 \text{ Nm} \cdot 2728 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{2\pi}{60 \frac{s}{min}} \cdot 0,9 = \underline{\underline{11902 \text{ W}}}$$

$$c) P_{ZN} > \bar{P}$$

Die Nennleistung im Zwischenkreis muß größer sein als die mittlere Leistung des Antriebs.

$$\bar{P} = \frac{1}{t_z} \cdot \left(\frac{1}{2} P_{max} \cdot t_a + \frac{M_{2Mot} \cdot n \cdot 2\pi}{60 \frac{s}{min}} \cdot t_c + \frac{1}{2} P_{Bmax} \cdot t_a \right)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{2,1 \text{ s}} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 21306 \text{ W} \cdot 0,25 \text{ s} + 2545 \text{ W} \cdot 0,55 \text{ s} + \frac{1}{2} \cdot 11902 \text{ W} \cdot 0,25 \text{ s} \right) = \underline{\underline{2643 \text{ W}}}$$

Ausgewähltes Netzmodul: MPB 51A-027-503-00

Nenndaten:	$P_{ZN} =$	27 kW
	$P_{Zmax} =$	54 kW
	$P_{BRCmax} =$	38 kW
	Breite =	4 TE

Forderungen:

- a) $P_{Zmax} \geq P_{Motmax}$
 $54 \text{ kW} \geq 21,3 \text{ kW}$ erfüllt
- b) $P_{BRCmax} > P_{Bmax}$
 $38 \text{ kW} > 11,9 \text{ kW}$ erfüllt
- c) $P_{ZN} > \bar{P}$
 $27 \text{ kW} > 2,6 \text{ kW}$ erfüllt

Bremswiderstand

Auswahlkriterien für den Bremswiderstand:

$$a) P_{NED} > \bar{P}_{gen}$$

Die ED-Nennleistung des Bremswiderstands muß größer sein als die mittlere generatorische Bremsleistung.

$$\bar{P}_{gen} = \frac{P_{Bmax}}{2} = \frac{11902 \text{ W}}{2} = \underline{\underline{5951 \text{ W}}}$$

$$\text{Einschaltdauer ED}_{BW} [\%] = \frac{t_a}{t_z} \cdot 100 \% = \frac{0,25 \text{ s}}{2,1 \text{ s}} \cdot 100 \% = \underline{\underline{11,9 \%}}$$

- b) Zulässigkeit der Kombination von Bremswiderstand und Versorgungskomponente

Ausgewählter Bremswiderstand: BW 018-015

Nenndaten:	$P_N =$	1,5 kW
	P_N bei 12 % ED =	9 kW

Forderungen:

- a) $P_{NED} > \bar{P}_{gen}$
 $9 \text{ kW} > 6 \text{ kW}$ erfüllt
- b) Bremswiderstand zulässig laut Katalog erfüllt

Kühlkörper

Folgende Kriterien müssen bei der Auswahl des Kühlkörpers berücksichtigt werden:

- Die Gesamtbreite der Summe der verwendeten Module, wobei darauf zu achten ist, daß kein Modul über den Stoß aus zwei Kühlkörpern montiert wird.
- Die maximale Temperatur ϑ_{KKmax} des Kühlkörpers (80 °C) darf nicht überschritten werden (unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur).

Erforderliche Breite: MBP 51A-027-503-00: 4 TE
MAS 51A-060-503-00: 4 TE

Anteile der Verlustleistung zum Kühlkörper:

P_{KK} = Kühlkörperleistung
 P_{VSNT} = Verlustleistung des Schaltnetzteils im Netzmodul
 P_{VLO} = Verlustleistung des Netzmoduls
 P_{VLX} = Verlustleistung des Achsmoduls
 k = Anzahl der Achsmodule
 \bar{I} = Mittelwert des Stroms

$$P_{KK} = \frac{1}{2}P_{VSNT} + P_{VLO} + P_{VLX} \cdot k$$

$$P_{VSNT} = 12 \text{ W} + 13 \text{ W} \cdot 1 = 25 \text{ W}$$

$$P_{VLO} = 2 \frac{\text{W}}{\text{A}} \cdot \bar{I} = 2 \frac{\text{W}}{\text{A}} \cdot 11,5 \text{ A} = 23 \text{ W}$$

$$P_{VLX} = 14 \frac{\text{W}}{\text{A}} \cdot \bar{I} = 14 \frac{\text{W}}{\text{A}} \cdot 11,5 \text{ A} = 161 \text{ W}$$

$$P_{KK} = \frac{1}{2} \cdot 25 \text{ W} + 23 \text{ W} + 161 \text{ W} = \underline{\underline{196,5 \text{ W}}}$$

Hinweis: Die Erklärung der verwendeten Konstanten entnehmen Sie bitte dem Anhang.

Ausgewählter Kühlkörper: DKS 09

Nenndaten: $R_{th} = 0,17 \text{ K/W}$
Breite = 9 TE

Berechnung der Erwärmung für Umgebungstemperatur $\vartheta_{Umg} = 30 \text{ °C}$

$$\Delta\vartheta = R_{th} \cdot P_{KK} = 0,17 \frac{\text{K}}{\text{W}} \cdot 196,5 \text{ W} = \underline{\underline{33,4 \text{ K}}}$$

$$\vartheta_{KK} = \vartheta_{Umg} + \Delta\vartheta = (30 + 33,4) \text{ °C} = \underline{\underline{63,4 \text{ °C}}}$$

Forderungen:

- 9 TE > 8 TE erfüllt
- $\vartheta_{KK} < \vartheta_{KKmax}$; 63,4 °C < 80 °C erfüllt

Datenbuskabel und Netzdrossel

Die Anzahl der an das Netzmodul anzuschließenden Achsmodule bestimmt die Länge des Datenbuskabels:

1 MPB + 1 MAS → DBK01

Die Netzdrossel ergibt sich aus der Zuordnung zum Netzmodul in der Montage- und Inbetriebnahmeanleitung.

Netzmodul: MPB 51A-027-503-00

Netzdrossel: ND 045-013

Nenndaten: $I_{ND} = 45 \text{ A}$
 $L_H = 0,1 \text{ mH}$

Zusammenstellung der Komponenten

Die Zusammenstellung erfolgt zunächst für Einachs Antrieb; für das gesamte Beispiel mit X-, Y- und Z-Achse wird am Ende des Projektierungsbeispiels eine Auswahl getroffen.

Getriebemotor: PSF 701 EB DY 112 LB ($i = 10$; $n_N = 3000^{-1}$; 400 V) EB 10

Achsmodul: MAS 51A-060-503-00

Netzmodul: MPB 51A-027-503-00

Bremswiderstand: BW 018-015

Kühlkörper: DKS 09

Netzdrossel: ND 045-013

Datenbuskabel: DBK01

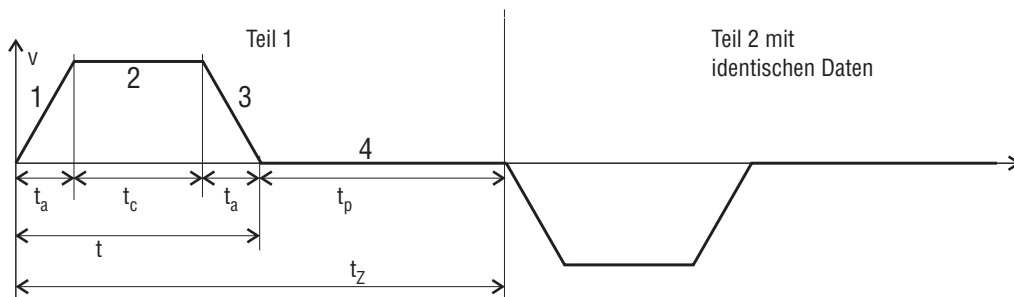
8.4 Berechnung der Y-Achse (Fahrwerk)

Vorgabedaten:

m_L	=	132 kg	Summe der bewegten Massen
D	=	0,175 m	Durchmesser der Riemenscheibe
μ_L	=	0,1	Reibkoeffizient
s	=	1 m	Verfahrstrecke
v_{max}	=	2,5 m/s	max. Verfahrgeschwindigkeit
a_{max}	=	10 m/s ²	max. Beschleunigung oder Verzögerung
t_Z	=	1,3 s	Taktzeit
Δs_1	=	$\pm 0,1$ mm	mech. Genauigkeit
Δs	<	$\pm 0,2$ mm	geforderte Gesamtgenauigkeit
η_L	=	0,90	Lastwirkungsgrad

8.4.1 Verfahrzyklus

Voraussetzung für die Antriebsbestimmung ist die Feststellung des Bewegungszyklus. Da es sich um eine Fahrachse handelt, reicht es aus, nur eine Fahrtrichtung zu ermitteln (1 ... 4).



00060ADE

Bild 59: Verfahrzyklus

Beschleunigungs- und Verzögerungszeit t_a

$$t_a = \frac{v_{max}}{a_{max}} = \frac{2,5 \frac{m}{s}}{10 \frac{m}{s^2}} = \underline{\underline{0,25 \text{ s}}}$$

Fahrzeit t_c mit $v_{max} = \text{konst.}$

$$t_c = \frac{s - 2 \cdot \left(\frac{1}{2} a \cdot t_a^2\right)}{v_{max}} = \frac{1 \text{ m} - 10 \frac{m}{s^2} \cdot (0,25 \text{ s})^2}{2,5 \frac{m}{s}} = \underline{\underline{0,15 \text{ s}}}$$

Gesamtverfahrzeit t und Pausenzeit t_p

$$t = 2 \cdot t_a + t_c = 2 \cdot 0,25 \text{ s} + 0,15 \text{ s} = \underline{\underline{0,65 \text{ s}}}$$

$$t_p = t_Z - t = 1,3 \text{ s} - 0,65 \text{ s} = \underline{\underline{0,65 \text{ s}}}$$

8.4.2 Abtriebsdrehzahl, Getriebeübersetzung und Positioniergenauigkeit

Abtriebsdrehzahl n

$$n = \frac{v_{max}}{D \cdot \pi} = \frac{2,5 \frac{m}{s}}{0,175 \text{ m} \cdot \pi} = 4,547 \text{ s}^{-1} = \underline{\underline{272,8 \text{ min}^{-1}}}$$



Getriebeübersetzung

Im Hinblick auf die geforderte Positioniergenauigkeit wird ein Planetengetriebe mit eintreibender Drehzahl 3000 min^{-1} gewählt.

$$i_{\text{soll}} = \frac{3000 \text{ min}^{-1}}{272,8 \text{ min}^{-1}} = 11,0 \quad \text{gewählte Übersetzung: } i = 10$$

$$n^* = n \cdot i = 272,8 \text{ min}^{-1} \cdot 10 = \underline{\underline{2728 \text{ min}^{-1}}}$$

Positioniergenauigkeit (statisch)

$$\Delta s = \Delta s_G + \Delta s_M + \Delta s_1$$

Δs_G : Positioniergenauigkeit ohne Getriebeispiel

Δs_M : Positioniergenauigkeit durch Geberauflösung

Δs_1 : Positioniergenauigkeit durch Mechanik

$$\Delta s_G = \frac{D \cdot \pi}{360^\circ} \cdot \alpha_G = \frac{0,175 \text{ m} \cdot \pi}{360^\circ} \cdot 0,1^\circ = 0,153 \text{ mm} \rightarrow \pm 0,076 \text{ mm}$$

$\alpha_G = 6' = 0,1^\circ$ für Planetengetriebe in Normalausführung (einstufig),
s. Katalog PSF – Planetengetriebe

$$\Delta s_M = \pm \frac{D \cdot \pi}{p \cdot i} = \pm \frac{0,175 \text{ m} \cdot \pi}{4096 \cdot 10} = \pm 0,013 \text{ mm}$$

$p = 4096$ Inkremente (Geberauflösung)

$$\Delta s = (\pm 0,076 \text{ mm}) + (\pm 0,013 \text{ mm}) + (\pm 0,1 \text{ mm}) = \underline{\underline{\pm 0,189 \text{ mm}}} < \pm 0,2 \text{ mm}$$

Damit ist die geforderte Positioniergenauigkeit erfüllt.

8.4.3 Lastdrehmomente am Getriebeabtrieb und Getriebeauswahl**Beschleunigung**

$$M_{\text{dyn}_1} = m_L \cdot a_{\text{max}} \cdot \frac{1}{\eta_L} \cdot \frac{D}{2} = 132 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{0,9} \cdot \frac{0,175 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{128,33 \text{ Nm}}}$$

Konstante Fahrt, statische Last

$$M_{\text{stat}} = m_L \cdot g \cdot \mu_L \cdot \frac{1}{\eta_L} \cdot \frac{D}{2} = 132 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,1 \cdot \frac{1}{0,9} \cdot \frac{0,175 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{12,59 \text{ Nm}}}$$

Verzögerung

$$M_{\text{dyn}_2} = m_L \cdot (-a_{\text{max}}) \cdot \eta_L \cdot \frac{D}{2} = 132 \text{ kg} \cdot \left(-10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 0,9 \cdot \frac{0,175 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{-103,95 \text{ Nm}}}$$

Lastdrehmomente im Verfahrenzyklus

$$\text{Beschleunigungsphase} \quad M_1 = M_{\text{stat}} + M_{\text{dyn}_1} = 12,59 \text{ Nm} + 128,33 \text{ Nm} = \underline{\underline{140,92 \text{ Nm}}}$$

$$\text{Gleichförmige Bewegung} \quad M_2 = M_{\text{stat}} = \underline{\underline{12,59 \text{ Nm}}}$$

$$\text{Verzögerungsphase} \quad M_3 = M_{\text{stat}} + M_{\text{dyn}_2} = 12,59 \text{ Nm} - 103,95 \text{ Nm} = \underline{\underline{-91,36 \text{ Nm}}}$$

Das maximale Drehmoment M_1 bestimmt das notwendige M_{amax} des Getriebes und damit die Getriebebaugröße.

Gewählt wird PSF 401, $i = 10$, $M_{\text{amax}} = 150 \text{ Nm}$. Wegen der gewünschten Trennbarkeit von Motor und Getriebe wird ein Getriebe mit Bogenzahnkupplung "EB09" gewählt.

8.4.4 Motorbezogene Drehmomente und Massenträgheitsmomente

Bei der Ermittlung der motorbezogenen Drehmomente ist der Getriebewirkungsgrad, der Motorwirkungsgrad und das jeweilige Eigenmassenträgheitsmoment zu berücksichtigen.

Getriebedaten (s. Katalog PSF – Planetengetriebe)

einstufiges Planetengetriebe: $\eta_G = 0,97$
 PSF 401 / EB 09: $J_G^* = 5,76 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$ (bezogen auf die Motorwelle)

Lastdrehmomente im Verfahrzyklus (auf den Motor bezogen)

$$\text{Beschleunigungsphase} \quad M_1^* = M_1 \cdot \frac{1}{\eta_G \cdot i} = 140,92 \text{ Nm} \cdot \frac{1}{0,97 \cdot 10} = \underline{\underline{14,53 \text{ Nm}}}$$

$$\text{Gleichförmige Bewegung} \quad M_2^* = M_2 \cdot \frac{1}{\eta_G \cdot i} = 12,59 \text{ Nm} \cdot \frac{1}{0,97 \cdot 10} = \underline{\underline{1,30 \text{ Nm}}}$$

$$\text{Verzögerungsphase} \quad M_3^* = M_3 \cdot \eta_G \cdot \frac{1}{i} = 91,36 \text{ Nm} \cdot 0,97 \cdot \frac{1}{10} = \underline{\underline{-8,86 \text{ Nm}}}$$

Zusatzdrehmomente durch das Massenträgheitsmoment des Getriebes, bezogen auf den Motor

$$M_{1G}^* = \frac{J_G^* \cdot 2\pi \cdot n^*}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot t_a \cdot \eta_G} = \frac{5,76 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 \cdot 2\pi \cdot 2728 \text{ min}^{-1}}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot 0,25 \text{ s} \cdot 0,97} = \underline{\underline{0,68 \text{ Nm}}}$$

Bei M_2 gibt es kein M_{2G} , da keine Drehzahländerungen stattfinden.

$$M_{3G}^* = \frac{J_G^* \cdot 2\pi \cdot n^* \cdot \eta_G}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot t_a} = \frac{5,76 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2 \cdot 2\pi \cdot 2728 \text{ min}^{-1} \cdot 0,97}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot 0,25 \text{ s}} = \underline{\underline{-0,64 \text{ Nm}}}$$

Massenträgheitsmoment der translatorisch bewegten Last

$$J_L^* = m_L \cdot \left(\frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{v_{\text{max}}}{n^*} \right)^2 = 132 \text{ kg} \cdot \left(\frac{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}}{2\pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2728 \text{ min}^{-1}} \right)^2 = \underline{\underline{0,0101 \text{ kgm}^2}}$$

8.4.5 Motorauswahl und Effektivdrehmoment

Für die Auswahl des Motors sind folgende Bedingungen zu prüfen:

a) $k_j = \frac{J_{\text{ext}}^*}{J_{\text{Mot}}} < 10$ (Massenträgheitsmoment)

Das Verhältnis von externem Massenträgheitsmoment zum Massenträgheitsmoment des Motors sollte aus regelungstechnischer Sicht kleiner 10 sein.

b) $M_{\text{max}}^* < 3 \cdot M_0$

Die max. dynamische Belastung des Antriebs darf das dreifache Nenndrehmoment des Motors nicht überschreiten.

c) $M_{\text{eff}} < M_{\text{zul}}$

Das über den Verfahrzyklus wirksame Effektivdrehmoment darf das Nenndrehmoment des Motors unter Berücksichtigung der Motorkennlinie nicht überschreiten (M_{zul} aus M_0 und Motorkennlinie).

d) $n^* \approx 0,9 n_N$

Um ca. 10 % Regelreserve zu erhalten, sollte die maximal auftretende Drehzahl bei 90 % der Motornenndrehzahl liegen.

Die jetzt folgende Motorauswahl erfolgt zunächst ohne Beachtung des Motormassenträgheitsmomentes. Die Auswahl muß durch eine Nachrechnung mit dem Motormassenträgheitsmoment bestätigt werden.

$$J_{\text{ext}}^* = J_L^* + J_G^* = 0,0101 \text{ kgm}^2 + 0,0006 \text{ kgm}^2 = \underline{\underline{0,0107 \text{ kgm}^2}}$$

$$M_{\text{max}}^* = M_1^* + M_{1G}^* = 14,53 \text{ Nm} + 0,68 \text{ Nm} = \underline{\underline{15,21 \text{ Nm}}}$$



Ausgewählter Motor: DFY 90 MB

Nennaten:
 $n_N = 3000 \text{ min}^{-1}$
 $M_0 = 12 \text{ Nm}$
 $J_{\text{Mot}} = 24,1 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$

Nachrechnung der Motordrehmomente im Verfahrenzyklus mit Berücksichtigung der Massenträgheitsmomente des Motors

$$\text{Beschleunigungsphase} \quad M_{1\text{Mot}} = M_1^* + M_{1G}^* + \frac{J_{\text{Mot}} \cdot n^* \cdot 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot t_a} = 14,53 \text{ Nm} + 0,68 \text{ Nm} + 2,75 \text{ Nm} = \underline{\underline{17,96 \text{ Nm}}}$$

$$\text{Gleichförmige Bewegung} \quad M_{2\text{Mot}} = M_2^* = \underline{\underline{1,30 \text{ Nm}}}$$

$$\text{Verzögerungsphase} \quad M_{3\text{Mot}} = M_3^* + M_{3G}^* + \frac{J_{\text{Mot}} \cdot n^* \cdot 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot t_a} = -8,86 \text{ Nm} - 0,64 \text{ Nm} - 2,75 \text{ Nm} = \underline{\underline{-12,25 \text{ Nm}}}$$

Effektives Motordrehmoment und mittlere Motordrehzahl

$$M_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{t_z} \cdot (M_{1\text{Mot}}^2 \cdot t_a + M_{2\text{Mot}}^2 \cdot t_c + M_{3\text{Mot}}^2 \cdot t_a)}$$

$$= \sqrt{\frac{1}{1,3 \text{ s}} \cdot [(17,96 \text{ Nm})^2 \cdot 0,25 \text{ s} + (1,30 \text{ Nm})^2 \cdot 0,15 \text{ s} + (-12,25 \text{ Nm})^2 \cdot 0,25 \text{ s}]} = \underline{\underline{9,54 \text{ Nm}}}$$

$$\bar{n} = \frac{n^* \cdot (\frac{1}{2} t_a + n^* \cdot t_c + \frac{1}{2} t_a)}{t_z} = n^* \cdot \frac{t_a + t_c}{t_z} = 2728 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{0,25 \text{ s} + 0,15 \text{ s}}{1,3 \text{ s}} = \underline{\underline{839 \text{ min}^{-1}}}$$

$$\text{ED} [\%] = \frac{t_a + t_c + t_a}{t_z} \cdot 100 \% = \frac{0,25 \text{ s} + 0,15 \text{ s} + 0,25 \text{ s}}{1,3 \text{ s}} \cdot 100 \% = \underline{\underline{50 \%}}$$

8.4.6 Überprüfung des ausgewählten Antriebs

Getriebemotor: PSF 401 EB09 DY 90 MB

Nennaten:
 $i = 10$
 $M_{\text{amax}} = 150 \text{ Nm}$
 $n_N = 3000 \text{ min}^{-1}$
 $M_0 = 12 \text{ Nm}$
 $I_0 = 7,9 \text{ A}$
 $J_{\text{Mot}} = 24,1 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$

Forderungen:

a) $M_{\text{amax}} > M_1$
 $150 \text{ Nm} > 140,92 \text{ Nm}$ erfüllt

b) $k_j < 10$
 $k_j = \frac{J_{\text{ext}}^*}{J_{\text{Mot}}} = \frac{0,0107 \text{ kgm}^2}{0,00241 \text{ kgm}^2} = \underline{\underline{4,44}}$ erfüllt

c) $M_{1\text{Mot}} < 3 \cdot M_0$
 $\frac{M_{1\text{Mot}}}{M_0} = \frac{17,96 \text{ Nm}}{12 \text{ Nm}} = \underline{\underline{1,50}}$ erfüllt

d) $M_{\text{eff}} < M_{\text{zul}}$
 $9,54 \text{ Nm} < 12 \text{ Nm}$ erfüllt
 $M_{\text{zul}} = 12 \text{ Nm}$; (S1-Betrieb) aus der Kennlinie bei $n = 840 \text{ min}^{-1}$

e) $n^* \approx 0,9 \cdot n_N$
 $\frac{n^*}{n_N} = \frac{2728 \text{ min}^{-1}}{3000 \text{ min}^{-1}} = \underline{\underline{0,91}}$ erfüllt

Alle Forderungen sind somit erfüllt.

8.4.7 Auswahl und Berechnung der Servoumrichter-Komponenten

An dieser Stelle wird nur noch das notwendige Achsmodul bestimmt. Beim Versorgungsmodul werden nur die zu berücksichtigenden Kriterien aufgeführt; die Bestimmung des Netzmoduls erfolgt dann gemeinsam für alle drei Achsen.

Achsmodul

Bei der Wahl des Achsmoduls sind folgende Kriterien zu beachten:

$$a) \quad I_N > \frac{I_{\max}}{1,5}$$

Die Bedingung ergibt sich aus der Eigenschaft der Achsmodule, den 1,5fachen Nennstrom liefern zu können.

$$I_{\max} = \frac{M_{1\text{Mot}}}{M_0} \cdot I_0 = \frac{17,96 \text{ Nm}}{12 \text{ Nm}} \cdot 7,9 \text{ A} = 11,82 \text{ A} \quad \rightarrow \quad I_N > \underline{\underline{7,88 \text{ A}}}$$

$$b) \quad I_N > \bar{I}$$

Der Mittelwert des Stromes \bar{I} ist ein Maß für die thermische Belastbarkeit der Achsmodule.

$$\bar{I} = \frac{I_0}{M_0} \cdot \frac{1}{t_z} \cdot (|M_{1\text{Mot}}| \cdot t_a + |M_{2\text{Mot}}| \cdot t_c + |M_{3\text{Mot}}| \cdot t_a)$$

$$\bar{I} = \frac{7,9 \text{ A}}{12 \text{ Nm}} \cdot \frac{1}{1,3 \text{ s}} \cdot (17,96 \text{ Nm} \cdot 0,25 \text{ s} + 1,30 \text{ Nm} \cdot 0,15 \text{ s} + 12,25 \text{ Nm} \cdot 0,25 \text{ s}) = 3,92 \text{ A} \quad \rightarrow \quad I_N > \underline{\underline{3,92 \text{ A}}}$$

c) Zulässigkeit der Motor-Achs-Kombination prüfen.

Ausgewähltes Achsmodul: MAS 51A-010-503-00

Nenndaten: $I_N = 10 \text{ A}$
Breite = 2 TE

Forderungen:

$$a) \quad I_N > \frac{I_{\max}}{1,5}$$

$$10 \text{ A} > 7,88 \text{ A} \quad \text{erfüllt}$$

$$b) \quad I_N > \bar{I}$$

$$10 \text{ A} > 3,92 \text{ A} \quad \text{erfüllt}$$

c) Kombination MAS 51A-010-503-00 mit Motor DFY 90 MB (3000 min⁻¹) laut Zuordnungstabelle im Katalog zulässig.

Netzmodul

Bei der Wahl des Netzmoduls sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

$$a) \quad P_{Z\max} \geq P_{\text{Motmax}}$$

Die maximale Leistung im Zwischenkreis muß größer sein als die maximal geforderte Leistung.

$$P_{\text{Motmax}} = \frac{n^* \cdot M_{2\text{Mot}} \cdot 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = \frac{2728 \text{ min}^{-1} \cdot 17,96 \text{ Nm} \cdot 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = \underline{\underline{5131 \text{ W}}}$$

$$b) P_{\text{BRCmax}} > P_{\text{Bmax}}$$

Die Bremsleistung des Moduls muß größer sein als die Bremsleistung des Antriebs.

$$P_{\text{Bmax}} = n^* \cdot |M_{\text{3Mot}}| \cdot \frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} \cdot \eta_L = 2728 \text{ min}^{-1} \cdot 12,25 \text{ Nm} \cdot \frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} \cdot 0,9 = \underline{\underline{3150 \text{ W}}}$$

$$c) P_{\text{ZN}} > \bar{P}$$

Die Nennleistung im Zwischenkreis muß größer sein als die mittlere Leistung des Antriebs.

$$\bar{P} = \frac{1}{t_z} \cdot \left(\frac{1}{2} P_{\text{max}} \cdot t_a + \frac{M_{\text{2Mot}} \cdot n^* \cdot 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} \cdot t_c + \frac{1}{2} P_{\text{Bmax}} \cdot t_a \right)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{1,3 \text{ s}} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot 5131 \text{ W} \cdot 0,25 \text{ s} + 371,4 \text{ W} \cdot 0,15 \text{ s} + \frac{1}{2} \cdot 3150 \text{ W} \cdot 0,25 \text{ s} \right) = \underline{\underline{839 \text{ W}}}$$

Einschaltdauer Bremswiderstand

$$\text{Einschaltdauer } ED_{\text{BW}} [\%] = \frac{t_a}{t_z} \cdot 100 \% = \frac{0,25 \text{ s}}{1,3 \text{ s}} \cdot 100 \% = \underline{\underline{19,23 \%}}$$

Normalerweise würde an dieser Stelle die Wahl von Netzmodul, Bremswiderstand, Kühlkörper und Netzdrossel erfolgen. Da diese Komponenten jedoch für eine Mehrachsanwendung mit dem modularen MOVIDYN realisiert werden sollen, erfolgt die Wahl der Komponenten erst nach Berechnung der X-, Y- und Z-Achse.

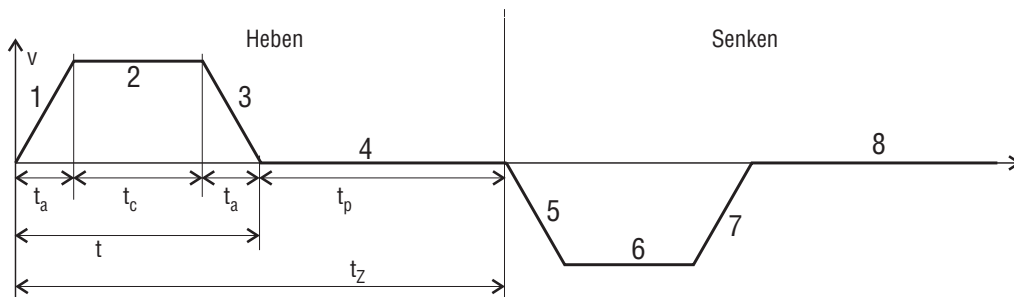
8.5 Berechnung der Z-Achse (Hubwerk)

Vorgabedaten:

m_L	= 40 kg	Summe der bewegten Massen (ohne Gegengewicht)
D	= 0,05 m	Durchmesser des Antriebsrades
μ_L	= 1	Reibkoeffizient (vernachlässigbare Reibung)
s	= 1 m	Verfahrstrecke
v_{max}	= 1,9 m/s	max. Verfahrgeschwindigkeit
a_{max}	= 10 m/s ²	max. Beschleunigung und Verzögerung
t_z	= 2,8 s	Taktzeit (für Hub- und Senkfahrt)
ΔS_1	= ± 0,1 mm	mech. Genauigkeit
ΔS	= ± 0,2 mm	geforderte Gesamtgenauigkeit
η_L	= 0,90	Lastwirkungsgrad

8.5.1 Verfahrzyklus

Voraussetzung für die Antriebsbestimmung ist die Feststellung des Bewegungszyklus.



00201ADE

Bild 60: Verfahrzyklus

Beschleunigungs- und Verzögerungszeit t_a

$$t_a = \frac{v_{max}}{a_{max}} = \frac{1,9 \frac{m}{s}}{10 \frac{m}{s^2}} = \underline{\underline{0,19 \text{ s}}}$$

Fahrzeit t_c mit $v_{max} = \text{konst.}$

$$t_c = \frac{s - 2 \cdot \left(\frac{1}{2} a \cdot t_a^2\right)}{v_{max}} = \frac{1 \text{ m} - 10 \frac{m}{s^2} \cdot (0,19 \text{ s})^2}{1,9 \frac{m}{s}} = \underline{\underline{0,336 \text{ s}}}$$

Gesamtverfahrzeit t und Pausenzeit t_p

$$t = 2 \cdot t_a + t_c = 2 \cdot 0,19 \text{ s} + 0,336 \text{ s} = \underline{\underline{0,716 \text{ s}}}$$

$$t_p = t_z - t = 2,8 \text{ s} - 0,716 \text{ s} = \underline{\underline{2,084 \text{ s}}}$$

8.5.2 Abtriebsdrehzahl, Getriebeübersetzung und Positioniergenauigkeit

Abtriebsdrehzahl n

$$n = \frac{v_{max}}{D \cdot \pi} = \frac{1,9 \frac{m}{s}}{0,05 \text{ m} \cdot \pi} = 12,10 \text{ s}^{-1} = \underline{\underline{725,7 \text{ min}^{-1}}}$$



Getriebeübersetzung

Im Hinblick auf die geforderte Positioniergenauigkeit wird ein Planetengetriebe mit eintreibender Drehzahl 3000 min^{-1} gewählt.

$$i_{\text{soll}} = \frac{3000 \text{ min}^{-1}}{725,7 \text{ min}^{-1}} = 4,1 \quad \text{gewählte Übersetzung: } i = 4$$

$$n^* = n \cdot i = 725,7 \text{ min}^{-1} \cdot 4 = \underline{\underline{2903 \text{ min}^{-1}}}$$

Positioniergenauigkeit (statisch)

$$\Delta s = \Delta s_G + \Delta s_M + \Delta s_1$$

Δs_G : Positioniergenauigkeit durch Getriebespiel

Δs_M : Positioniergenauigkeit durch Geberauflösung

Δs_1 : Positioniergenauigkeit durch Mechanik

$$\Delta s_G = \frac{D \cdot \pi}{360^\circ} \cdot \alpha_G = \frac{0,05 \text{ m} \cdot \pi}{360^\circ} \cdot 0,1^\circ = 0,044 \text{ mm} \rightarrow \pm 0,022 \text{ mm}$$

$\alpha_G = 6' = 0,1^\circ$ für Planetengetriebe in Normalausführung (einstufig),
s. Katalog PSF – Planetengetriebe

$$\Delta s_M = \pm \frac{D \cdot \pi}{p \cdot i} = \pm \frac{0,05 \text{ m} \cdot \pi}{4096 \cdot 4} = \pm 0,010 \text{ mm}$$

$p = 4096$ Inkremente (Geberauflösung)

$$\Delta s = (\pm 0,022 \text{ mm}) + (\pm 0,010 \text{ mm}) + (\pm 0,1 \text{ mm}) = \underline{\underline{\pm 0,132 \text{ mm}}} < \pm 0,2 \text{ mm}$$

Damit ist die geforderte Positioniergenauigkeit erfüllt.

8.5.3 Lastdrehmomente am Getriebeabtrieb und Getriebeauswahl**Konstante Fahrt, Heben**

$$M_{\text{stat}_1} = m_L \cdot g \cdot \frac{1}{\eta_L} \cdot \frac{D}{2} = 40 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{0,9} \cdot \frac{0,05 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{10,90 \text{ Nm}}}$$

Konstante Fahrt, Senken

$$M_{\text{stat}_2} = m_L \cdot g \cdot \eta_L \cdot \frac{D}{2} = 40 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,9 \cdot \frac{0,05 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{8,83 \text{ Nm}}}$$

Beschleunigung

$$M_{\text{dyn}_1} = m_L \cdot a_{\text{max}} \cdot \frac{1}{\eta_L} \cdot \frac{D}{2} = 40 \text{ kg} \cdot 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \frac{1}{0,9} \cdot \frac{0,05 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{11,11 \text{ Nm}}}$$

Verzögerung

$$M_{\text{dyn}_2} = m_L \cdot (-a_{\text{max}}) \cdot \eta_L \cdot \frac{D}{2} = 40 \text{ kg} \cdot (-10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) \cdot 0,9 \cdot \frac{0,05 \text{ m}}{2} = \underline{\underline{-9,00 \text{ Nm}}}$$

Lastdrehmomente im Verfahrzyklus

Beschleunigungsphase Heben	$M_1 = M_{dyn1} + M_{stat1} = 11,11\text{ Nm} + 10,90\text{ Nm} = \underline{\underline{22,01\text{ Nm}}}$
Gleichförmige Bewegung Heben	$M_2 = M_{stat1} = \underline{\underline{10,90\text{ Nm}}}$
Verzögerungsphase Heben	$M_3 = M_{dyn2} + M_{stat1} = -9,00\text{ Nm} + 10,90\text{ Nm} = \underline{\underline{1,90\text{ Nm}}}$
Beschleunigungsphase Senken	$M_5 = M_{dyn1} - M_{stat2} = 11,11\text{ Nm} - 8,83\text{ Nm} = \underline{\underline{2,28\text{ Nm}}}$
Gleichförmige Bewegung Senken	$M_6 = -M_{stat2} = \underline{\underline{-8,83\text{ Nm}}}$
Verzögerungsphase Senken	$M_7 = M_{dyn2} - M_{stat2} = -9,00\text{ Nm} - 8,83\text{ Nm} = \underline{\underline{-17,83\text{ Nm}}}$

Das maximale Drehmoment M_1 bestimmt das notwendige M_{amax} des Getriebes und damit die Getriebebaugröße.

Gewählt wird PSF 301, $i = 4$, $M_{amax} = 80\text{ Nm}$. Wegen der gewünschten Trennbarkeit von Motor und Getriebe wird ein Getriebe mit Bogenzahnkupplung "EB04" gewählt.

8.5.4 Motorbezogene Drehmomente und Massenträgheitsmomente

Bei der Ermittlung der motorbezogenen Drehmomente ist der Getriebewirkungsgrad, der Motorwirkungsgrad und das jeweilige Eigenmassenträgheitsmoment zu berücksichtigen.

Getriebedaten (s. Katalog PSF – Planetengetriebe)

einstufiges Planetengetriebe: $\eta_G = 0,97$
 PSF 301 / EB04 $J_G^* = 2,3 \cdot 10^{-4}\text{ kgm}^2$ (bezogen auf die Motorwelle)

Lastdrehmomente im Verfahrzyklus (auf den Motor bezogen)

Beschleunigungsphase Heben	$M_1^* = M_1 \cdot \frac{1}{\eta_G \cdot i} = 22,01\text{ Nm} \cdot \frac{1}{0,97 \cdot 4} = \underline{\underline{5,67\text{ Nm}}}$
Gleichförmige Bewegung Heben	$M_2^* = M_2 \cdot \frac{1}{\eta_G \cdot i} = 10,90\text{ Nm} \cdot \frac{1}{0,97 \cdot 4} = \underline{\underline{2,81\text{ Nm}}}$
Verzögerungsphase Heben	$M_3^* = M_3 \cdot \frac{1}{\eta_G \cdot i} = 1,90\text{ Nm} \cdot \frac{1}{0,97 \cdot 4} = \underline{\underline{0,49\text{ Nm}}}$
Stillstand	$M_4^* = M_2 \cdot \frac{1}{i} = 10,90\text{ Nm} \cdot \frac{1}{4} = \underline{\underline{2,73\text{ Nm}}}$
Beschleunigungsphase Senken	$M_5^* = M_5 \cdot \frac{1}{\eta_G \cdot i} = 2,28\text{ Nm} \cdot \frac{1}{0,97 \cdot 4} = \underline{\underline{0,59\text{ Nm}}}$
Gleichförmige Bewegung Senken	$M_6^* = M_6 \cdot \frac{\eta_G}{i} = -8,83\text{ Nm} \cdot \frac{0,97}{4} = \underline{\underline{-2,14\text{ Nm}}}$
Verzögerungsphase Senken	$M_7^* = M_7 \cdot \frac{\eta_G}{i} = -17,83\text{ Nm} \cdot \frac{0,97}{4} = \underline{\underline{-4,32\text{ Nm}}}$
Stillstand	$M_8^* = M_2 \cdot \frac{1}{i} = 10,90\text{ Nm} \cdot \frac{1}{4} = \underline{\underline{2,73\text{ Nm}}}$

Zusatzdrehmomente durch das Massenträgheitsmoment des Getriebes, bezogen auf den Motor

$$M_{1G}^* = \frac{J_G^* \cdot 2\pi \cdot n^*}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot t_a \cdot \eta_G} = \frac{2,3 \cdot 10^{-4}\text{ kgm}^2 \cdot 2\pi \cdot 2903\text{ min}^{-1}}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot 0,19\text{ s} \cdot 0,97} = \underline{\underline{0,38\text{ Nm}}} \quad (\text{motorischer Betrieb})$$

Bei M_2 gibt es kein M_{2G} , da keine Drehzahländerungen stattfinden.

$$M_{3G}^* = \frac{J_G^* \cdot 2\pi \cdot n^* \cdot \eta_G}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot t_a} = \frac{2,3 \cdot 10^{-4}\text{ kgm}^2 \cdot 2\pi \cdot 2903\text{ min}^{-1} \cdot 0,97}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}} \cdot 0,19\text{ s}} = \underline{\underline{-0,36\text{ Nm}}} \quad (\text{generatorischer Betrieb})$$



Massenträgheitsmoment der translatorisch bewegten Last

$$J_L^* = m_L \cdot \left(\frac{60 \frac{s}{\min}}{2\pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{v_{\max}}{n^*} \right)^2 = 40 \text{ kg} \cdot \left(\frac{60 \frac{s}{\min}}{2\pi} \right)^2 \cdot \left(\frac{1,9 \frac{m}{s}}{2903 \text{ min}^{-1}} \right)^2 = \underline{\underline{0,00156 \text{ kgm}^2}}$$

8.5.5 Motorauswahl und Effektivdrehmoment

Für die Auswahl des Motors sind folgende Bedingungen zu prüfen:

a) $k_j = \frac{J_{\text{ext}}^*}{J_{\text{Mot}}} < 10$ (Massenträgheitsmoment)

Das Verhältnis von externem Massenträgheitsmoment zum Massenträgheitsmoment des Motors sollte aus regelungstechnischer Hinsicht kleiner 10 sein.

b) $M_{\max}^* < 3 \cdot M_0$

Die max. dynamische Belastung des Antriebs darf das dreifache Nenndrehmoment des Motors nicht überschreiten.

c) $M_{\text{eff}} < M_{\text{zul}}$

Das über den Verfahrenzyklus wirksame Effektivdrehmoment darf das Nenndrehmoment des Motors unter Berücksichtigung der Motorkennlinie nicht überschreiten (M_{zul} aus M_0 und Motorkennlinie).

d) $n^* \approx 0,9 n_N$

Um ca. 10 % Regelreserve zu erhalten, sollte die maximal auftretende Drehzahl bei 90 % der Motornenndrehzahl liegen.

Die jetzt folgende Motorauswahl erfolgt zunächst ohne Beachtung des Motormassenträgheitsmomentes. Die Auswahl muß durch eine Nachrechnung mit dem Motormassenträgheitsmoment bestätigt werden.

$$J_{\text{ext}}^* = J_L^* + J_G^* = 0,00156 \text{ kgm}^2 + 0,00023 \text{ kgm}^2 = \underline{\underline{0,00179 \text{ kgm}^2}}$$

$$M_{\max}^* = M_1^* + M_{1G}^* = 5,67 \text{ Nm} + 0,38 \text{ Nm} = \underline{\underline{6,05 \text{ Nm}}}$$

An dieser Stelle erfolgt zunächst eine Abschätzung. Der Motor wird näherungsweise durch $M_0 \geq \frac{M_{\max}}{2}$ bestimmt.

Die Wahl dieses Faktors erfordert bei der Projektierung ein wenig Erfahrung.

Er kann zwischen 2 und 3 gewählt werden.

Ausgewählter Motor: DFY 71 MLB

Nenndaten:

$$n_N = 3000 \text{ min}^{-1}$$

$$M_0 = 5 \text{ Nm}$$

$$J_{\text{Mot}} = 0,000831 \text{ kgm}^2$$

Nachrechnung der Motordrehmomente im Verfahrenzyklus mit Berücksichtigung des Massenträgheitsmomentes des Motors

$$M_{\text{ZusMot}} = \frac{J_{\text{Mot}} \cdot n^* \cdot 2\pi}{60 \frac{s}{\min} \cdot t_a} = \frac{0,000831 \text{ kgm}^2 \cdot 2903 \text{ min}^{-1} \cdot 2\pi}{60 \frac{s}{\min} \cdot t_a} = \underline{\underline{1,33 \text{ Nm}}}$$

Beschleunigungsphase Heben $M_{1\text{Mot}} = M_1^* + M_{1G}^* + M_{\text{ZusMot}} = 5,67 \text{ Nm} + 0,38 \text{ Nm} + 1,33 \text{ Nm} = \underline{\underline{7,38 \text{ Nm}}}$

Gleichförmige Bewegung Heben $M_{2\text{Mot}} = M_2^* = \underline{\underline{2,81 \text{ Nm}}}$

Verzögerungsphase Heben $M_{3\text{Mot}} = M_3^* - M_{3G}^* - M_{\text{ZusMot}} = 0,49 \text{ Nm} - 0,36 \text{ Nm} - 1,33 \text{ Nm} = \underline{\underline{1,20 \text{ Nm}}}$

Stillstand $M_{4\text{Mot}} = M_4^* = \underline{\underline{2,73 \text{ Nm}}}$

Beschleunigungsphase Senken	$M_{5Mot} = M_5^* + M_{IG}^* + M_{ZusMot} = 0,59 \text{ Nm} + 0,38 \text{ Nm} + 1,33 \text{ Nm} = \underline{\underline{2,30 \text{ Nm}}}$
Gleichförmige Bewegung Senken	$M_{6Mot} = M_6^* = \underline{\underline{-2,14 \text{ Nm}}}$
Verzögerungsphase Senken	$M_{7Mot} = M_7^* - M_{3G}^* - M_{ZusMot} = -4,32 \text{ Nm} - 0,36 \text{ Nm} - 1,33 \text{ Nm} = \underline{\underline{-6,01 \text{ Nm}}}$
Stillstand	$M_{8Mot} = M_8^* = \underline{\underline{2,73 \text{ Nm}}}$

Effektives Motordrehmoment und mittlere Motordrehzahl

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{1}{t_z} \cdot (M_{1Mot}^2 \cdot t_a + M_{2Mot}^2 \cdot t_c + M_{3Mot}^2 \cdot t_a + M_{4Mot}^2 \cdot t_p + M_{5Mot}^2 \cdot t_a + M_{6Mot}^2 \cdot t_c + M_{7Mot}^2 \cdot t_a + M_{8Mot}^2 \cdot t_p)}$$

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{1}{2,8 \text{ s}} \cdot [(7,38^2 + 1,20^2 + 2,30^2 + 6,01^2) \cdot 0,19 + (2,81^2 + 2,14^2) \cdot 0,336 + (2,73^2 + 2,73^2) \cdot 0,684]} \text{ Nm}^2 \text{ s} = \underline{\underline{3,43 \text{ Nm}}}$$

$$\bar{n} = \frac{2 \cdot (n^* \cdot t_a + n^* \cdot t_c)}{t_z} = \frac{2 \cdot (2903 \text{ min}^{-1} \cdot 0,19 \text{ s} + 2903 \text{ min}^{-1} \cdot 0,336 \text{ s})}{2,8 \text{ s}} = \underline{\underline{1091 \text{ min}^{-1}}}$$

$$ED [\%] = \frac{t_a + t_c + t_a}{t_z} \cdot 100 \% = \frac{0,19 \text{ s} + 0,336 \text{ s} + 0,19 \text{ s}}{2,8 \text{ s}} \cdot 100 \% = \underline{\underline{25 \%}}$$

8.5.6 Überprüfung des ausgewählten Antriebs

Getriebemotor: PSF 301 EB DY 71 MLB

Nenn Daten: $i = 4$
 $M_{amax} = 80 \text{ Nm}$
 $n_N = 3000 \text{ min}^{-1}$
 $M_0 = 5 \text{ Nm}$
 $I_0 = 3,8 \text{ A}$
 $J_{Mot} = 0,000831 \text{ kgm}^2$

Forderungen:

- a) $M_{amax} > M_1$
 $80 \text{ Nm} > 22 \text{ Nm}$ erfüllt
- b) $k_j > 10$
 $k_j = \frac{J_{ext}^*}{J_{Mot}} = \frac{0,00179 \text{ kgm}^2}{0,000831 \text{ kgm}^2} = \underline{\underline{2,15}}$ erfüllt
- c) $M_{1Mot} < 3 \cdot M_0$
 $\frac{M_{1Mot}}{M_0} = \frac{7,38 \text{ Nm}}{5 \text{ Nm}} = \underline{\underline{1,48}}$ erfüllt
- d) $M_{eff} < M_{zul}$
 $3,43 \text{ Nm} < 5 \text{ Nm}$ erfüllt
 $M_{zul} = 5 \text{ Nm}$; (S1-Betrieb) aus der Kennlinie bei $n = 1091 \text{ min}^{-1}$
- e) $n^* \approx 0,9 n_N$
 $\frac{n^*}{n_N} = \frac{2903 \text{ min}^{-1}}{3000 \text{ min}^{-1}} = \underline{\underline{0,97}}$ erfüllt

Alle Forderungen sind somit erfüllt.



8.5.7 Auswahl und Berechnung der Servoumrichter-Komponenten

Achsmodul

Bei der Wahl des Achsmoduls sind folgende Kriterien zu beachten:

$$a) I_N > \frac{I_{\max}}{1,5}$$

Die Bedingung ergibt sich aus der Eigenschaft der Achsmodule, den 1,5fachen Nennstrom liefern zu können.

$$I_{\max} = \frac{M_{\text{Mot}}}{M_0} \cdot I_0 = \frac{7,38 \text{ Nm}}{5 \text{ Nm}} \cdot 3,8 \text{ A} = 5,61 \text{ A} \quad \rightarrow \quad I_N > \underline{\underline{3,74 \text{ A}}}$$

$$b) I_N > \bar{I}$$

Der Mittelwert des Stromes \bar{I} ist ein Maß für die thermische Belastbarkeit der Achsmodule.

$$\bar{I} = \frac{I_0}{M_0} \cdot \frac{1}{t_z} \cdot \sum (|M_{x\text{Mot}}| \cdot t_x)$$

$$\bar{I} = \frac{3,8 \text{ A}}{5 \text{ Nm}} \cdot \frac{1}{2,8 \text{ s}} \cdot [(7,38 + 1,20 + 2,30 + 6,01) \cdot 0,19 + (2,81 + 2,14) \cdot 0,336 + (2,73 + 2,73) \cdot 0,684] \text{ Nms} = \underline{\underline{2,34 \text{ A}}}$$

c) Zulässigkeit der Motor-Achs-Kombination prüfen.

Ausgewähltes Achsmodul: MAS 51A-005-503-00

Nenndaten: $I_N = 5 \text{ A}$
Breite = 2 TE

Forderungen:

$$a) I_N > \frac{I_{\max}}{1,5}$$

$$5 \text{ A} > 3,74 \text{ A} \quad \text{erfüllt}$$

$$b) I_N > \bar{I}$$

$$5 \text{ A} > 2,34 \text{ A} \quad \text{erfüllt}$$

c) Kombination MAS 51A-005-503-00 mit Motor DFY 71 MLB (3000 min⁻¹) laut Zuordnungstabelle im Katalog zulässig.

Netzmodul

Bei der Wahl des Netzmoduls sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

$$a) P_{Z\max} \geq P_{\text{Motmax}}$$

Die maximale Leistung im Zwischenkreis muß größer sein als die maximal geforderte Leistung des Antriebs.

$$P_{\text{Motmax}} = \frac{n \cdot M_{\text{Mot}} \cdot 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = \frac{2903 \text{ min}^{-1} \cdot 7,38 \text{ Nm} \cdot 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} = \underline{\underline{2244 \text{ W}}}$$

$$b) P_{\text{BRCmax}} > P_{\text{Bmax}}$$

Die Bremsleistung des Moduls muß größer sein als die Bremsleistung des Antriebs.

$$P_{\text{Bmax}} = |M_{7\text{Mot}}| \cdot n^* \cdot \frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} \cdot \eta_L = 6,01 \text{ Nm} \cdot 2903 \text{ min}^{-1} \cdot \frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} \cdot 0,9 = \underline{\underline{1644 \text{ W}}}$$

$$c) P_{\text{ZN}} > \bar{P}$$

Die Nennleistung im Zwischenkreis muß größer sein als die mittlere Leistung des Antriebs.

$$\bar{P} = \frac{1}{t_z} \cdot \sum \left(\frac{1}{2} \cdot n^* \cdot |M_{x\text{Mot}}| \cdot \frac{2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} \cdot t_x \right)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{2,8 \text{ s}} \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{2903 \text{ min}^{-1} \cdot 2\pi}{60 \frac{\text{s}}{\text{min}}} \cdot ((7,38 + 1,20 + 2,30 + 6,01) \cdot 0,19 + (2,81 + 2,13) \cdot 0,336 + (2,73 + 2,73) \cdot 2,084) \text{ Nms} \right) = \underline{\underline{882 \text{ W}}}$$

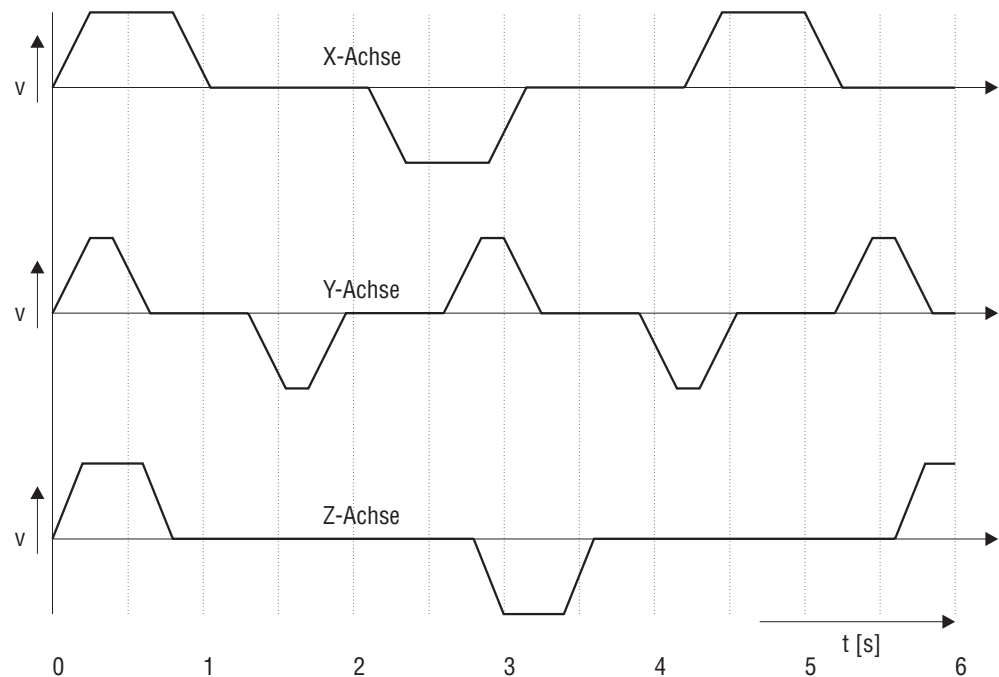
Einschaltdauer Bremswiderstand

$$ED_{\text{BW}} [\%] = \frac{2 \cdot t_a + t_c}{t_z} \cdot 100 \% = \frac{2 \cdot 0,19 \text{ s} + 0,336 \text{ s}}{2,8 \text{ s}} \cdot 100 \% = \underline{\underline{25,6 \%}}$$

Normalerweise würde an dieser Stelle die Wahl von Netzmodul, Bremswiderstand, Kühlkörper und Netzdrossel erfolgen. Da diese Komponenten jedoch für eine Mehrachsanwendung mit dem modularen MOVIDYN realisiert werden sollen, erfolgt die Wahl der Komponenten erst nach der Berechnung der X-, Y- und Z-Achse.

8.6 Gemeinsame Versorgung der X-, Y- und Z-Achse

Betrachtet man die v/t-Diagramme für alle drei Achsen, so erkennt man, daß alle Achsen gleichzeitig beschleunigen müssen. Die Versorgungsleistung muß diesen "worst case" abdecken können. Nach den v/t-Diagrammen fallen die Verzögerungsphasen nicht zusammen. Aber bei einem möglichen NOT-Aus müssen alle Achsen gleichzeitig bremsen können.



00221ADE

Bild 61: v/t-Diagramme aller drei Achsen

Die Berechnung erfolgt mit einem Gleichzeitigkeitsfaktor 1, d.h. alle Achsen können gleichzeitig beschleunigen und bremsen. Deshalb werden die Ströme und Momente addiert.

8.6.1 Netzmodul

Bei der Wahl des Netzmoduls sind folgende Kriterien zu berücksichtigen:

a) $P_{Zmax} \geq P_{Motmax}$

Die maximale Leistung im Zwischenkreis muß größer sein als die maximal geforderte Leistung des Antriebs.

$$P_{Motmax} = P_{Motmax_x} + P_{Motmax_y} + P_{Motmax_z} = 21306 \text{ W} + 5131 \text{ W} + 2244 \text{ W} = \underline{\underline{28681 \text{ W}}}$$

b) $P_{BRCmax} > P_{Bmax}$

Die Bremsleistung des Moduls muß größer sein als die Bremsleistung der Antriebe.

$$P_{Bmax} = P_{Bmax_x} + P_{Bmax_y} + P_{Bmax_z} = 11902 \text{ W} + 3150 \text{ W} + 1644 \text{ W} = \underline{\underline{16696 \text{ W}}}$$

c) $P_{ZN} > \bar{P}$

Die Nennleistung im Zwischenkreis muß größer sein als die mittlere Leistung der Antriebe.

$$\bar{P} = \bar{P}_x + \bar{P}_y + \bar{P}_z = 2643 \text{ W} + 839 \text{ W} + 882 \text{ W} = \underline{\underline{4364 \text{ W}}}$$

Ausgewähltes Netzmodul: MPB 51A-027-503-00

Nenndaten:
 $P_{ZN} = 27 \text{ kW}$
 $P_{Zmax} = 54 \text{ kW}$
 $P_{BRCmax} = 38 \text{ kW}$
 Breite = 4 TE

Forderungen:

- a) $P_{Zmax} \geq P_{Motmax}$
 $54 \text{ kW} \geq 28,7 \text{ kW}$ erfüllt
- b) $P_{BRCmax} > P_{Bmax}$
 $38 \text{ kW} > 16,7 \text{ kW}$ erfüllt
- c) $P_{ZN} > \bar{P}$
 $27 \text{ kW} > 4,4 \text{ kW}$ erfüllt

Bremswiderstand

Auswahlkriterien für den Bremswiderstand:

- a) $P_{NED} > \bar{P}_{gen}$

Die ED-Nennleistung des Bremswiderstandes muß größer sein als die mittlere generatorische Bremsleistung.

$$\bar{P}_{gen} = \bar{P}_{genx} + \bar{P}_{geny} + \bar{P}_{genz} = 5951 \text{ W} + 1575 \text{ W} + 822 \text{ W} = \underline{\underline{8348 \text{ W}}}$$

Zur Prüfung der zulässigen ED-Zeit wird eine Näherung benutzt:

$$\text{Einschaltdauer ED [\%]} = \frac{1}{3}(ED_x + ED_y + ED_z) = \frac{1}{3}(11,9 + 19,2 + 25,6)\% = 18,9 \%$$

- b) Zulässigkeit der Kombination von Bremswiderstand und Versorgungskomponente

Ausgewählter Bremswiderstand: BW 018-035

Nenndaten:
 $P_N = 3,5 \text{ kW}$
 $P_N \text{ bei } 25 \% \text{ ED} = 10,25 \text{ kW}$

Forderungen:

- a) $P_{NED} > \bar{P}_{gen}$
 $10,25 \text{ kW} > 8,3 \text{ kW}$ erfüllt
- b) Bremswiderstand zulässig laut Katalog erfüllt

Kühlkörper

Folgende Kriterien müssen bei der Auswahl des Kühlkörpers berücksichtigt werden:

- a) Die Gesamtbreite der Summe der verwendeten Module, wobei darauf zu achten ist, daß kein Modul über den Stoß aus zwei Kühlkörpern montiert wird.
- b) Die maximale Temperatur ϑ_{KKmax} des Kühlkörpers (80 °C) darf nicht überschritten werden (unter Berücksichtigung der Umgebungstemperatur).

Erforderliche Breite:

MPB 51A-027-503-00:	4 TE
MAS 51A-060-503-00:	4 TE
MAS 51A-010-503-00:	2 TE
MAS 51A-005-503-00:	2 TE
Gesamtbreite:	12 TE

Gewählte Kühlkörper: 1 × DKS 09 und 1 × DKS 05

Die Montage erfolgt so, daß an jeder Seite des Moduls eine TE frei bleibt.

Nenndaten:	DKS 09	$R_{th} =$	0,17 K/W
		Breite =	9 TE
	DKS 05	$R_{th} =$	0,27 K/W
		Breite =	5 TE

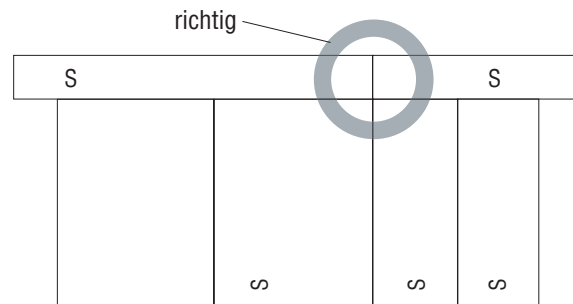


Bild 62: Montage der Kühlkörper

00222ADE

Anteile der Verlustleistung zum Kühlkörper:

P_{KK} =	Kühlkörperleistung
P_{VSNT} =	Verlustleistung des Schaltnetzteils im Netzmodul
P_{VLO} =	Verlustleistung des Netzmoduls
$P_{VLX/Y/Z}$ =	Verlustleistung der Achsmodule
\bar{I} =	Mittelwert des Stromes

Berechnung der Erwärmung für Umgebungstemperatur $\vartheta_{Umg} = 30\text{ °C}$

$$P_{KK09} = \frac{1}{2} P_{VSNT} + P_{VLO} + P_{VLX}$$

$$P_{VSNT} = 12\text{ W} + 3 \cdot 13\text{ W} = 51\text{ W}$$

$$P_{VLO} = \frac{2\text{ W}}{A} \cdot (\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3) = \frac{2\text{ W}}{A} \cdot (11,5\text{ A} + 3,92\text{ A} + 2,34\text{ A}) = 35,5\text{ W}$$

$$P_{KK09} = \frac{51\text{ W}}{2} + 35,5\text{ W} + 161\text{ W} = 222\text{ W}$$

$$\Delta\vartheta_{09} = R_{th09} \cdot P_{KK09} = 0,17 \frac{\text{K}}{\text{W}} \cdot 196,5\text{ W} = 33,4\text{ K}$$

$$\vartheta_{KK09} = \vartheta_{Umg} + \Delta\vartheta_{09} = (30 + 33,4)\text{ °C} = 63,4\text{ °C}$$

$$P_{KK05} = P_{VLY} + P_{VLZ} = \bar{I}_Y \cdot 14 \frac{\text{W}}{A} + \bar{I}_Z \cdot 14 \frac{\text{W}}{A} = (3,92\text{ A} + 2,34\text{ A}) \cdot 14 \frac{\text{W}}{A} = 87,64\text{ W}$$

$$\Delta\vartheta_{05} = R_{th05} \cdot P_{KK05} = 0,27 \frac{\text{K}}{\text{W}} \cdot 87,64\text{ W} = 23,7\text{ K}$$

$$\vartheta_{KK05} = \vartheta_{Umg} + \Delta\vartheta_{05} = (30 + 23,7)\text{ °C} = 53,7\text{ °C}$$

Hinweis: Die Erklärung der verwendeten Konstanten entnehmen Sie bitte dem Anhang.

Forderungen:

- | | | | |
|----|---|-----------------|---------|
| a) | 14 TE > 12 TE | erfüllt | |
| b) | $\vartheta_{KK09} < \vartheta_{KKmax};$ | 63,4 °C < 80 °C | erfüllt |
| | $\vartheta_{KK05} < \vartheta_{KKmax}$ | 53,7 °C < 80 °C | erfüllt |

Datenbuskabel und Netzdrossel

Die Anzahl der an das Netzmodul anzuschließenden Achsmodule bestimmt die Länge des Datenbuskabels:

1 MPB + 3 MAS → DBK03

Die Netzdrossel ergibt sich aus der Zuordnung zum Netzmodul in der Montage- und Inbetriebnahmeanleitung.

Netzmodul: MPB 51A-0503-027-00

Netzdrossel: ND 045-013

Nenndaten: $I_{ND} = 45\text{ A}$
 $L_H = 0,1\text{ mH}$

Zusammenstellung der Komponenten

Getriebemotoren:	X-Achse:	PSF 701 EB DY 112 LB
	Y-Achse:	PSF 401 EB DY 90 MB
	Z-Achse:	PSF 301 EB DY 71 MLB
Achsmodul:	X-Achse:	MAS 51A-060-503-00
	Y-Achse:	MAS 51A-010-503-00
	Z-Achse:	MAS 51A-005-503-00
Netzmodul:		MPB 51A-027-503-00
Bremswiderstand:		BW 018-035
Kühlkörper:		DKS 09 und DKS 05
Netzdrossel:		ND 045-013
Datenbuskabel:		DBK03
Software:		MD_SHELL

Bestimmung der Verlustleistung

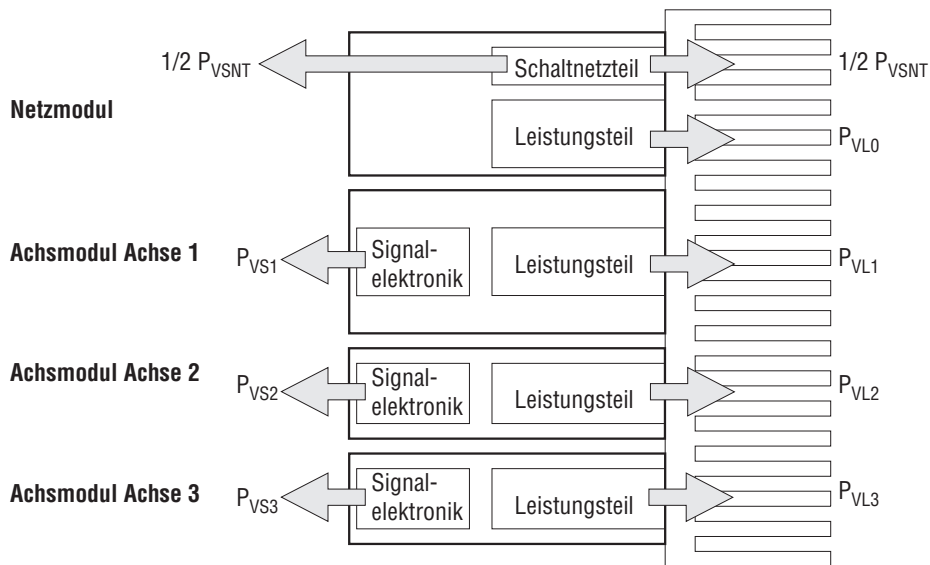


Bild 63: Zusammensetzung der Verlustleistung

00224ADE

Verlustleistung P_{VSNT} des Schaltnetzteils im Netzmodul:

$$P_{VSNT} = 12 \text{ W} + 13 \text{ W} \cdot k$$

12 W = Konstante, Verlustleistung des Schaltnetzteils

13 W = Konstante, Verlustleistung je angeschlossenes Achsmodul

k = Anzahl der angeschlossenen Achsmodule

Verlustleistung P_{VL0} des Leistungsteils im Netzmodul:

$$P_{VL0} = \bar{I} \cdot 2 \text{ W/A}$$

\bar{I} = Mittelwert des Stromes des Achsmoduls / der Achsmodule

2 W/A = Konstante, Verlustleistung je Ampere

Verlustleistung $P_{VL1/2/3}$ des Leistungsteils im Achsmodul:

$$P_{VL1/2/3} = \bar{I} \cdot 14 \text{ W/A}$$

\bar{I} = Mittelwert des Stromes des Achsmoduls

14 W/A = Konstante, Verlustleistung je Ampere

Verlustleistung P_{VS} der Signalelektronik im Achsmodul:

$$P_{VS1/2/3} = 40 \text{ W} \cdot k$$

40 W = Konstante, Verlustleistung der Signalelektronik

k = Anzahl der angeschlossenen Achsmodule

Summe der Verlustleistungen am Kühlkörper:

$$P_{KK} = 1/2 P_{VSNT} + P_{VL0} + P_{VL1} + \dots$$

Verlustleistung P_{SS} im Schaltschrank

Kühlkörper außerhalb montiert:

$$P_{SS} = 1/2 P_{VSNT} + P_{VS}$$

Kühlkörper im Schaltschrank montiert:

$$P_{SS} = 1/2 P_{VSNT} + P_{VS} + P_{KK}$$

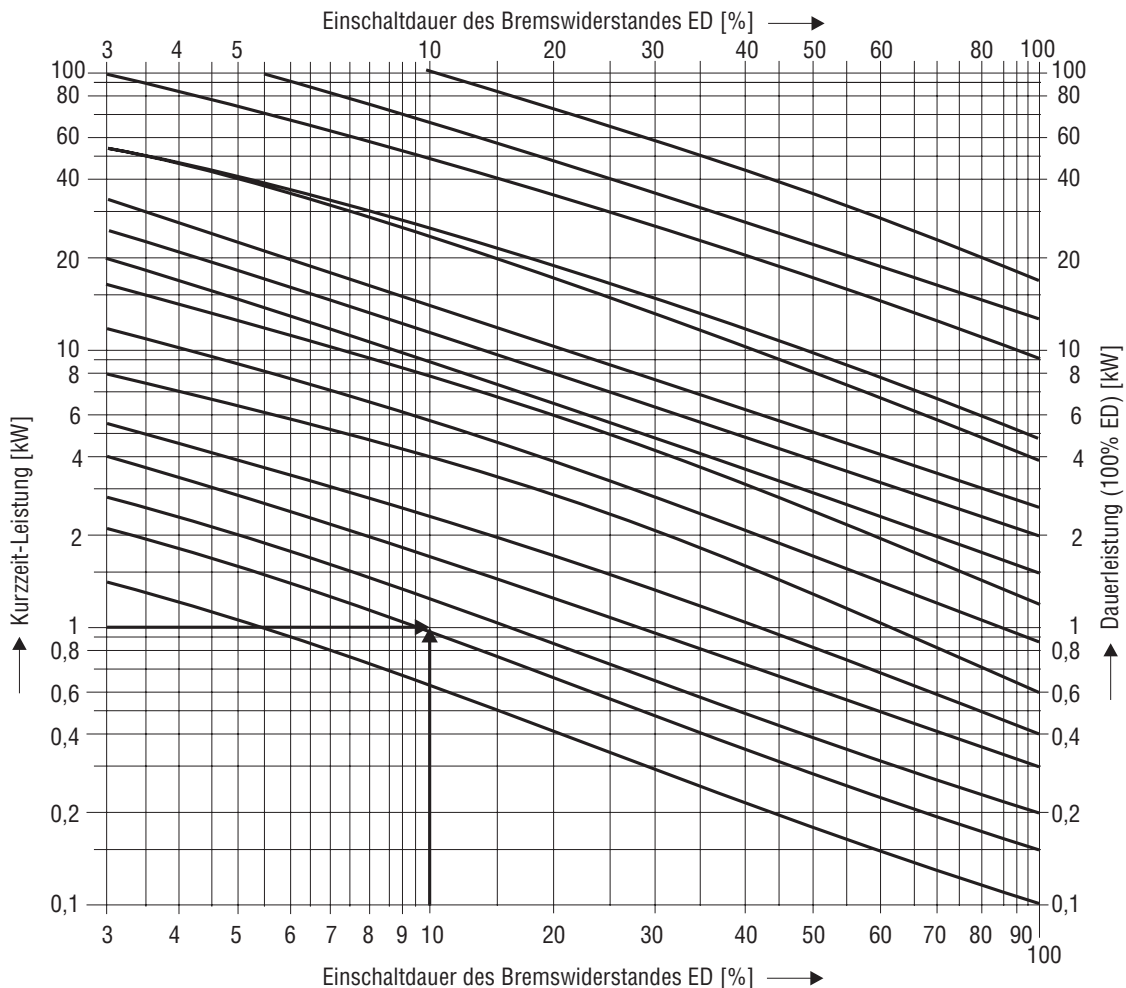
Dimensionierung von Bremswiderständen

Ein Servoumrichter mit Bremschopper benötigt zur Abgabe überschüssiger Bremsenergie einen Bremswiderstand. Der Bremschopper ist am Gleichspannungs-Zwischenkreis angeschlossen und schaltet sich selbsttätig bei einem bestimmten Pegel der Zwischenkreisspannung U_z ein. Der am Bremschopper angeschlossene Bremswiderstand nimmt solange Energie aus dem Zwischenkreis auf, bis der Ausschaltpegel der Zwischenkreisspannung erreicht ist. Bei kontinuierlicher Bremsung schaltet der Bremschopper ständig ein- und wieder aus (er choppt).

Der Widerstandswert (Ω) des Bremswiderstandes ergibt sich aus dem maximal zulässigen Bremsstrom des Bremschopper-Transistors. Für jeden Umrichtertyp wird der zulässige Widerstandswert in den technischen Daten angegeben.

Die Bauleistung (100 % ED-Leistung) des Bremswiderstandes ergibt sich aus der elektrischen Bremsleistung, die nach Abzug der Verluste (Rückwärtswirkungsgrad η') in Maschine, Getriebe und Motor in den Servoumrichter zurückfließt. Da die Bremsleistung meist nicht dauernd, sondern nur zeitlich begrenzt auftritt, ist dieser Aspekt bei der Dimensionierung der Bremswiderstände ebenfalls zu berücksichtigen.

Bei linearen Verzögerungsvorgängen nimmt die Bremsleistung P_B mit der Bremszeit t_B linear ab. Das heißt, die Spitzenbremsleistung ist am Anfang der Bremsphase doppelt so hoch wie die mittlere Bremsleistung. Bei einmaligen Bremsvorgängen innerhalb einer Taktzeit (Wiederholzeit) kann aus der ED-Bremsleistung die daraus resultierende Widerstands-Dauerleistung (100 % ED-Leistung) über folgendes Nomogramm ermittelt werden:



00223ADE

Bild 64: Ermittlung der Kurzzeit-Bremsleistung bei Wiederholzeiten (Taktzeiten ≤ 120 s) aus der Widerstands-Dauerleistung (= 100 % ED). Die unteren Kurven (0,1 - 4 kW; siehe rechte Skala "Dauerleistung") gelten für drahtgewickelte Rohrwiderstände, die oberen Kurven (5/9/13/18 kW) für Stahlgitter-Widerstände.

Beispiel für die Auswahl eines Bremswiderstandes:

Eine geforderte Kurzzeit-Bremsleistung von 1 kW erfordert bei einer Einschaltdauer von 10 % einen Bremswiderstand mit einer Dauerleistung von 150 W.