

Inhalt

| | | |
|----------|---|------------|
| 1 | Elektrische Antriebe im Überblick | 1-1 |
| 1.1 | Historischer Abriss der Antriebstechnik | 1-1 |
| 1.2 | Aufbau moderner elektrischer Antriebe | 1-4 |
| 1.3 | Systematik elektrischer Antriebe | 1-6 |
| 1.3.1 | Drehzahlverstellbarkeit | 1-6 |
| 1.3.2 | Motortyp und Art des Stellgerätes | 1-8 |
| 1.3.3 | Technische Daten | 1-9 |
| 2 | Mechanische Grundlagen | 2-1 |
| 3 | Elektrotechnische Grundlagen | 3-1 |
| 3.1 | Felder in der Elektrotechnik | 3-1 |
| 3.2 | Entstehung des Drehmomentes | 3-3 |
| 3.2.1 | Lorentzkraft | 3-3 |
| 3.2.2 | Leiterschleife im Magnetfeld | 3-4 |
| 3.2.3 | Spannungsinduktion | 3-5 |
| 3.2.4 | Größen und Gleichungen der Elektrotechnik | 3-5 |
| 3.2.5 | Bauelemente der Elektrotechnik | 3-6 |
| 4 | Konstantantriebe und drehzahlveränderliche Antriebe mit Gleichstrommotor | 4-1 |
| 4.1 | Gleichstromantriebe | 4-1 |
| 4.2 | Der Gleichstrommotor | 4-2 |
| 4.2.1 | Funktionsprinzip | 4-2 |
| 4.2.2 | Konstruktiver Aufbau und elektrische Anschlüsse | 4-6 |
| 4.2.3 | Wartung des Gleichstrommotors | 4-7 |
| 4.2.4 | Mathematische Beschreibung | 4-8 |
| 4.2.5 | Regelbarkeit | 4-10 |
| 4.3 | Konstantantriebe mit Gleichstrommotor | 4-11 |
| 4.3.1 | Aufbau und Anwendungsbereich | 4-11 |
| 4.3.2 | Nebenschlussverhalten | 4-11 |
| 4.3.3 | Reihenschlussverhalten | 4-13 |
| 4.4 | Drehzahlveränderliche Antriebe mit Gleichstrommotor | 4-15 |
| 4.4.1 | Aufbau und Anwendungsbereich | 4-15 |
| 4.4.2 | Stromrichter | 4-16 |
| 4.4.3 | Drehzahlgeber für Gleichstromantriebe | 4-21 |
| 4.4.4 | Regelungsstruktur | 4-22 |
| 5 | Konstantantriebe und drehzahlveränderliche Antriebe mit Asynchronmotor | 5-1 |
| 5.1 | Antriebe mit Asynchronmotor | 5-1 |
| 5.2 | Der Asynchronmotor | 5-2 |
| 5.2.1 | Funktionsprinzip | 5-2 |
| 5.2.2 | Konstruktiver Aufbau und elektrische Anschlüsse | 5-5 |
| 5.2.3 | Mathematische Beschreibung | 5-7 |
| 5.2.4 | Regelbarkeit | 5-11 |
| 5.3 | Konstantantriebe mit Asynchronmotor | 5-13 |
| 5.3.1 | Aufbau und Anwendungsbereich | 5-13 |
| 5.3.2 | Anlauf des Asynchronmotors | 5-14 |
| 5.3.3 | Bremsen des Asynchronmotors | 5-19 |
| 5.4 | Drehzahlveränderliche Antriebe mit Asynchronmotor | 5-19 |
| 5.4.1 | Aufbau und Anwendungsbereich | 5-19 |
| 5.4.2 | Drehzahländerung mit Schützen | 5-20 |
| 5.4.3 | Drehzahländerung mit Frequenzumrichtern | 5-22 |
| 5.4.4 | Betrieb mit U/f-Steuerung | 5-29 |
| 5.4.5 | Betrieb mit Vektorregelung | 5-31 |
| 5.4.6 | Drehzahlgeber | 5-35 |
| 5.5 | Funktionen moderner Frequenzumrichter | 5-38 |
| 5.5.1 | Allgemeines | 5-38 |
| 5.5.2 | Leistungsoptionen | 5-38 |
| 5.5.3 | Elektronikoptionen | 5-40 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.5.4 | Prozessschnittstelle | 5-41 |
| 5.5.5 | Anwenderschnittstelle | 5-43 |
| 5.5.6 | Regelungs- und Steuerungsfunktionen | 5-44 |
| 6 | Servoantriebe | 6-1 |
| 6.1 | Aufbau und Anwendungsbereich | 6-1 |
| 6.2 | Systematik der Servoantriebe | 6-2 |
| 6.2.1 | Regelfunktionen | 6-2 |
| 6.2.2 | Motortyp, Art des Stellgerätes | 6-3 |
| 6.2.3 | Technische Daten | 6-5 |
| 6.3 | Drehzahl- und Lagegeber für Servoantriebe | 6-6 |
| 6.3.1 | Systematik und Kenndaten | 6-6 |
| 6.3.2 | Kommutierungsgeber | 6-10 |
| 6.3.3 | Resolver | 6-11 |
| 6.3.4 | Sin-Cos-Geber | 6-13 |
| 6.3.5 | Absolutwertgeber | 6-15 |
| 6.4 | Servoantriebe mit Gleichstrommotor | 6-16 |
| 6.4.1 | Aufbau und Anwendungsbereich | 6-16 |
| 6.4.2 | Gleichstrommotoren für Servoantriebe | 6-17 |
| 6.4.3 | Pulssteller für Servoantriebe mit Gleichstrommotor | 6-17 |
| 6.4.4 | Regelungsstruktur | 6-20 |
| 6.5 | Servoantriebe mit bürstenlosem Gleichstrommotor (Blockkommutierung) | 6-21 |
| 6.5.1 | Aufbau und Anwendungsbereich | 6-21 |
| 6.5.2 | Der bürstenlose Gleichstrommotor | 6-22 |
| 6.5.3 | Frequenzumrichter für Servoantriebe mit bürstenlosem Gleichstrommotor | 6-24 |
| 6.5.4 | Regelungsstruktur | 6-26 |
| 6.6 | Servoantriebe mit Synchronmotor (Sinuskommutierung) | 6-27 |
| 6.6.1 | Aufbau und Anwendungsbereich | 6-27 |
| 6.6.2 | Der Synchronmotor | 6-28 |
| 6.6.3 | Frequenzumrichter für Servoantriebe mit Synchronmotor | 6-30 |
| 6.6.4 | Regelungsstruktur | 6-30 |
| 6.7 | Servoantriebe mit Asynchronmotor | 6-32 |
| 6.8 | Direktantriebe | 6-33 |
| 6.8.1 | Aufbau und Anwendungsbereich | 6-33 |
| 6.8.2 | Linearmotor | 6-34 |
| 6.8.3 | Torquemotor | 6-36 |
| 6.9 | Regelung und Optimierung von Servoantrieben | 6-37 |
| 6.9.1 | Allgemeine Gütekriterien zur Beurteilung von Regelkreisen | 6-37 |
| 6.9.2 | Regelkreise bei Servoantrieben | 6-41 |
| 6.9.3 | Optimierung des Stromregelkreises | 6-42 |
| 6.9.4 | Optimierung des Drehzahlregelkreises | 6-45 |
| 6.9.5 | Optimierung des Lageregelkreises | 6-48 |
| 6.10 | Funktionen moderner Servosteller | 6-51 |
| 6.10.1 | Allgemeines | 6-51 |
| 6.10.2 | Leistungsoptionen | 6-51 |
| 6.10.3 | Elektronikoptionen | 6-52 |
| 6.10.4 | Prozessschnittstelle | 6-52 |
| 6.10.5 | Anwenderschnittstelle | 6-52 |
| 6.10.6 | Regelungs- und Steuerungsfunktionen | 6-52 |
| 7 | Schrittantriebe | 7-1 |
| 7.1 | Aufbau und Anwendungsbereich | 7-1 |
| 7.2 | Systematik der Schrittantriebe nach Motortyp | 7-2 |
| 7.3 | Technische Daten | 7-2 |
| 7.4 | Der Schrittmotor | 7-3 |
| 7.4.1 | Allgemeines | 7-3 |
| 7.4.2 | Permanentmagnetschrittmotor | 7-4 |
| 7.4.3 | Hybridschrittmotor | 7-5 |
| 7.5 | Ansteuergeräte | 7-7 |
| 7.6 | Regelverhalten | 7-9 |

| | | |
|-----------|--|-------------|
| 8 | Elektrische Antriebssysteme im Überblick | 8-1 |
| 8.1 | Vom Antrieb zum Antriebssystem | 8-1 |
| 8.2 | Systematik elektrischer Antriebssysteme | 8-2 |
| 8.2.1 | Komponenten in Antriebssystemen | 8-2 |
| 8.2.2 | Funktionalität von Antriebssystemen | 8-4 |
| 8.2.3 | Informationsfluss in Antriebssystemen | 8-6 |
| 8.2.4 | Energiefluss zwischen Antrieben | 8-8 |
| 8.2.5 | Elektromagnetische Beeinflussungen | 8-9 |
| 8.3 | Auslegung von elektrischen Antrieben als Systemaufgabe | 8-9 |
| 9 | Feldbusse für elektrische Antriebe | 9-1 |
| 9.1 | Veranlassung und Funktionsprinzip | 9-1 |
| 9.2 | Übersicht gebräuchlicher Feldbusse | 9-5 |
| 9.3 | AS-Interface | 9-5 |
| 9.3.1 | Übersicht | 9-5 |
| 9.3.2 | Topologie, Verkabelung, Physik | 9-6 |
| 9.3.3 | Zugriffsverfahren | 9-8 |
| 9.4 | CAN | 9-9 |
| 9.4.1 | Übersicht | 9-9 |
| 9.4.2 | Topologie, Verkabelung, Physik | 9-10 |
| 9.4.3 | Zugriffsverfahren | 9-11 |
| 9.4.4 | Projektierung | 9-13 |
| 9.5 | Profibus-DP | 9-13 |
| 9.5.1 | Übersicht | 9-13 |
| 9.5.2 | Topologie, Verkabelung, Physik | 9-14 |
| 9.5.3 | Zugriffsverfahren | 9-16 |
| 9.5.4 | Profibus-DP V2 | 9-18 |
| 9.5.5 | Projektierung | 9-20 |
| 9.6 | Profinet-I/O | 9-22 |
| 9.6.1 | Übersicht | 9-22 |
| 9.6.2 | Topologie, Verkabelung, Physik | 9-23 |
| 9.6.3 | Zugriffsverfahren | 9-25 |
| 9.6.4 | Gerätebeschreibungen zur Projektierung | 9-30 |
| 10 | Prozessregelung mit elektrischen Antrieben | 10-1 |
| 10.1 | Begriffsdefinition | 10-1 |
| 10.2 | Prozessregelung mit Einzelantriebssystemen | 10-1 |
| 10.2.1 | Komponenten | 10-1 |
| 10.2.2 | Füllstandsregelung mit Konstantantrieb (Fallbeispiel) | 10-2 |
| 10.2.3 | Druckregelung (Fallbeispiel) | 10-3 |
| 10.2.4 | Aufzugsantrieb (Fallbeispiel) | 10-5 |
| 10.3 | Prozessregelung mit Mehrantriebssystemen | 10-7 |
| 10.3.1 | Komponenten | 10-7 |
| 10.3.2 | Fahrwerksantrieb mit mechanisch gekoppelten Antrieben (Fallbeispiel) | 10-9 |
| 10.3.3 | Beschichtungsanlage mit Zug- und Wickelantrieben (Fallbeispiel) | 10-12 |
| 10.4 | Antriebe mit integrierten Technologiefunktionen | 10-20 |
| 11 | Motion Control mit elektrischen Antrieben | 11-1 |
| 11.1 | Begriffsdefinition und Funktionen | 11-1 |
| 11.2 | Darstellung und Verarbeitung von Lageinformationen | 11-4 |
| 11.3 | Positionieren | 11-6 |
| 11.3.1 | Anwendungen und Grundlagen | 11-6 |
| 11.3.2 | Positioniersteuerung | 11-6 |
| 11.3.3 | Maschinendaten | 11-11 |
| 11.3.4 | Lageerfassung, Lageaufbereitung und Referenzieren | 11-12 |
| 11.4 | Gleichlauf (Synchronisieren) | 11-15 |
| 11.4.1 | Anwendungen und Grundlagen | 11-15 |
| 11.4.2 | Gleichlaufsteuerung | 11-16 |
| 11.4.3 | Maschinendaten | 11-27 |
| 11.5 | Motion Control mit PLCopen | 11-28 |
| 11.6 | Sicherheitsfunktionen in elektrischen Antrieben | 11-31 |
| 11.6.1 | Anwendungen und Grundlagen | 11-31 |

| | | |
|-----------|---|-------------|
| 11.6.2 | Funktion "Sichere Impulssperre" | 11-33 |
| 11.6.3 | Sichere Bewegungsfunktionen | 11-34 |
| 11.6.4 | Sichere Feldbusse | 11-36 |
| 12 | EMV in der elektrischen Antriebstechnik | 12-1 |
| 12.1 | Grundlagen | 12-1 |
| 12.1.1 | Veranlassung und Begriffsdefinition | 12-1 |
| 12.1.2 | EMV-Beeinflussungsmodell | 12-2 |
| 12.1.3 | Koppelmechanismen | 12-3 |
| 12.1.4 | Mathematische Beschreibung | 12-8 |
| 12.2 | Elektrische Antriebe als Störquelle | 12-12 |
| 12.2.1 | Galvanische Störungen bei Gleichstromantrieben mit Stromrichter, Gegenmaßnahmen | 12-12 |
| 12.2.2 | Galvanische Störungen bei Stellgeräten mit Gleichspannungszwischenkreis, Gegenmaßnahmen | 12-14 |
| 12.2.3 | Galvanische Störungen durch Wechselrichter, Gegenmaßnahmen | 12-16 |
| 12.2.4 | Feldgebundene Störungen durch den Wechselrichter | 12-21 |
| 12.2.5 | Feldgebundene Störungen durch digitale Antriebe, Gegenmaßnahmen | 12-23 |
| 12.3 | Elektrische Antriebe als Störsenke | 12-24 |
| 12.3.1 | Allgemeines | 12-24 |
| 12.3.2 | Galvanische Störungen, Gegenmaßnahmen | 12-24 |
| 12.3.3 | Kapazitive Störungen, Gegenmaßnahmen | 12-25 |
| 12.3.4 | Induktive Störungen, Gegenmaßnahmen | 12-27 |
| 12.4 | EMV-Regeln | 12-28 |
| 13 | Auslegung elektrischer Antriebe | 13-1 |
| 13.1 | Vorgehensweise | 13-1 |
| 13.2 | Auswahl der Antriebsart | 13-1 |
| 13.3 | Motorauslegung | 13-4 |
| 13.3.1 | Vorgehensweise | 13-4 |
| 13.3.2 | Berücksichtigung des Getriebes | 13-5 |
| 13.3.3 | Auslegung des Motors nach mechanischen Kenngrößen | 13-10 |
| 13.3.4 | Thermische Auslegung des Motors | 13-15 |
| 13.3.5 | Konstruktive Auslegung des Motors | 13-21 |
| 13.3.6 | Auswahl des Gebers | 13-25 |
| 13.4 | Auslegung des Stellgerätes bei drehzahlveränderlichen Antrieben und Servoantrieben | 13-27 |
| 13.4.1 | Elektrische Auslegung des Stellgerätes | 13-27 |
| 13.4.2 | Thermische Auslegung des Stellgerätes | 13-28 |
| 13.4.3 | Thermische Auslegung der Netzeinspeisung | 13-32 |
| 13.4.4 | Auslegung der Netzeinspeisung bezüglich der Zwischenkreiskapazität | 13-36 |
| 13.4.5 | Auslegung des Bremschoppers und des Bremswiderstandes | 13-36 |
| 13.4.6 | Auswahl der Leistungsoptionen | 13-38 |
| 13.4.7 | Elektronikoptionen, Zubehör, Verbindungstechnik | 13-39 |
| 13.5 | Auslegungsbeispiel | 13-39 |
| 13.5.1 | Anwendungsdaten | 13-39 |
| 13.5.2 | Auslegung | 13-41 |
| 14 | Fehlerbehebung bei elektrischen Antrieben | 14-1 |
| 14.1 | Fehlervermeidung und Fehlerbehebung | 14-1 |
| 14.2 | Fehlermöglichkeiten bei elektrischen Antrieben | 14-1 |
| 14.2.1 | Motorfehler | 14-2 |
| 14.2.2 | Geberfehler | 14-3 |
| 14.2.3 | Fehler im Stellgerät | 14-4 |
| 14.2.4 | Netzfehler | 14-5 |
| 14.2.5 | Kommunikationsfehler | 14-6 |
| 14.2.6 | EMV-Probleme | 14-7 |
| 14.2.7 | Projektierungsfehler | 14-8 |
| 14.2.8 | Parametrierfehler | 14-9 |
| 14.3 | Fehlermeldungen elektrischer Antriebe | 14-10 |
| 15 | Quellenangaben | 15-1 |

6.9 Regelung und Optimierung von Servoantrieben

6.9.1 Allgemeine Gütekriterien zur Beurteilung von Regelkreisen

Regelkreis

Die Regelung von physikalischen Größen ist ein Steuerverfahren, bei dem die zu beeinflussende Größe (Regelgröße) laufend erfasst und mit einem Sollwert (Führungsgröße) verglichen wird. Treten Abweichungen auf, wird eine Stellgröße so verändert, dass die Abweichung minimal wird oder ganz verschwindet.

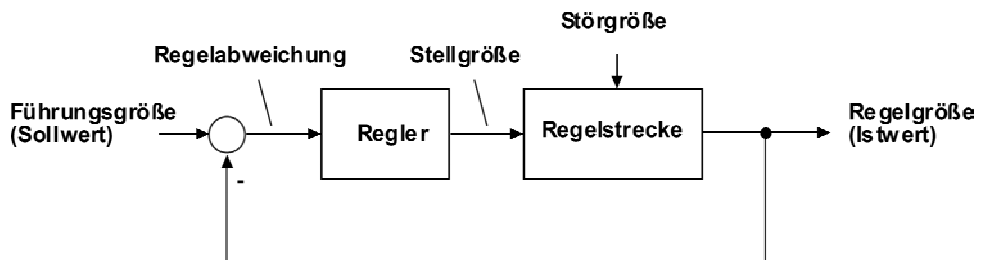


Bild 6.9.1-1 Aufbau eines allgemeinen Regelkreises

Die Hauptkomponenten des Regelkreises sind die Regelstrecke und der Regler. Die Regelstrecke ist die zu beeinflussende Komponente. Der Regler ist eine Funktionseinheit, die nach vorgegebenen Algorithmen aus der Regelabweichung die erforderliche Stellgröße zur Verringerung der Regelabweichung berechnet.

Regelabweichungen treten entweder

- durch Änderungen der Führungsgröße (z. B. durch Vorgabe neuer Sollwerte) oder
- durch Störgrößen, die auf die Regelstrecke einwirken, auf.

Signalflusspläne und Übertragungsglieder

Zur Beschreibung von Regelkreisen werden Signalflusspläne verwendet. Sie bestehen aus Signalpfaden und Übertragungsgliedern. Die Übertragungsglieder wandeln ihre Eingangsgröße nach einer mathematischen Funktion (Übertragungsfunktion) in ihre Ausgangsgröße um. Man unterscheidet

- lineare und nichtlineare sowie
- kontinuierliche und diskontinuierliche (zeitdiskrete)

Übertragungsglieder. Moderne Frequenzumrichter und Servosteller haben eine digitale Regelung, die diskontinuierlich arbeitet. Die Übertragungsglieder der Regelung müssten deshalb bei genauer Betrachtung als diskontinuierliche Übertragungsglieder behandelt werden. Ist die Abtastzeit hinreichend klein, ist jedoch die vereinfachende Betrachtung als kontinuierliche Übertragungsglieder, von der nachfolgend ausgegangen wird, zulässig.

Führungs- und Störverhalten

Die Qualität von Regelkreisen wird anhand von Kenngrößen bewertet. Dabei sind zwei grundsätzliche Betriebsfälle des Regelkreises zu unterscheiden:

- Das **Führungsverhalten** beschreibt, wie der Regelkreis auf Änderungen des Sollwertes reagiert. Ideales Führungsverhalten liegt vor, wenn der Istwert exakt dem Sollwert folgt.
- Das **Störverhalten** beschreibt, wie der Regelkreis auf Störgrößen reagiert. Ideales Störverhalten liegt vor, wenn Störgrößen keinen Einfluss auf den Istwert haben.

Für beide Betriebsfälle sind Gütekriterien der Regelgröße

- im Zeitbereich (als Funktion über der Zeit) und
- im Frequenzbereich (als Funktion über die Frequenz der Führungsgröße oder der Störgröße)

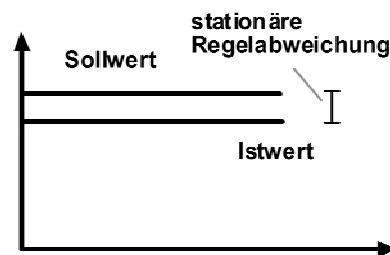
definiert.

Gütekriterien im Zeitbereich

Im Zeitbereich sind folgende allgemeine Gütekriterien üblich:

- Der **Regelfaktor** ist eine Kenngröße für die Regelabweichung, die sich bei konstanten Sollwerten oder Störgrößen einstellt. Brauchbare Regelkreise zeichnen sich durch einen Regelfaktor von 0 aus. Das heißt, der Regelkreis kann Sollwertänderungen folgen und Störungen ausregeln.

Bild 6.9.1-2
Regelabweichung



- Die **Anregelzeit** ist eine Kenngröße für die Reaktionsgeschwindigkeit einer Regelung nach einer sprunghaftigen Änderung des Sollwertes oder der Störgröße. Sie beginnt, nachdem der Istwert ein vorgegebenes Toleranzband verlässt und endet, wenn der Istwert erstmalig in ein vorgegebenes Toleranzband um den Sollwert eintritt.
- Die **Ausregelzeit** ist eine Kenngröße für die Geschwindigkeit, mit der eine Regelung sich nach einer sprunghaftigen Änderung des Sollwertes oder der Störgröße auf ihren Endwert einschwingt. Sie beginnt, nachdem der Istwert ein vorgegebenes Toleranzband verlässt und endet, wenn der Istwert letztmalig in ein vorgegebenes Toleranzband um den Sollwert eintritt. Im Idealfall entspricht die Ausregelzeit der Anregelzeit.

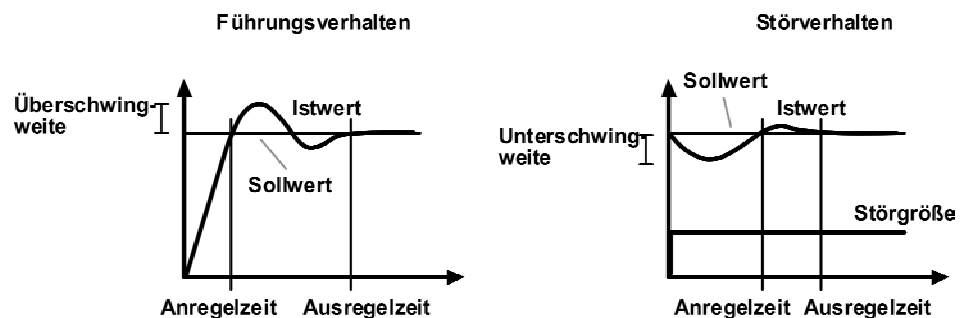
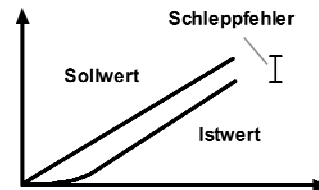


Bild 6.9.1-3 Anregel- und Ausregelzeit

- Die **Überschwingweite** beschreibt die stärkste Amplitude des Istwertes während eines Einschwingvorganges nach einer sprunghaftigen Änderung des Sollwertes oder der Störgröße. Sie wird entweder absolut oder relativ bezogen auf den stationären Endwert angegeben.
- Der **Schleppfehler** ist eine Kenngröße für die Regelabweichung, die sich bei einem rampenförmigen Sollwert stationär einstellt. Der Schleppfehler ist besonders bei La-

geregelkreisen im Zusammenhang mit Bahnsteuerungen von Bedeutung. Lageregelungen mit einem sehr kleinen Schleppfehler können den vorgegebenen Bahnen sehr gut folgen und erreichen damit eine hohe Konturgenauigkeit. Das ist besonders bei Bearbeitungsmaschinen (Fräsen, Drehen) von hoher Bedeutung. Der Schleppfehler wird häufig auch als Schleppabstand bezeichnet.

Bild 6.9.1-4 Schleppfehler



Für Servoantriebe werden oft spezielle Gütekriterien angegeben:

- Die **Verzugszeit** ist eine Kenngröße für die Reaktionsgeschwindigkeit einer Regelung nach einer sprungförmigen Änderung des Sollwertes oder der Störgröße. Sie beginnt, nachdem sich der Sollwert oder die Störgröße geändert haben und endet, wenn der Istwert ein vorgegebenes Toleranzband verlässt. Die Verzugszeit kommt also zur Anregelzeit noch hinzu. Sie wird durch die zyklische Arbeitsweise digitaler Regelungen verursacht.
- Die **Auflösung** gibt bei digitalen Regelungen an, mit welcher Schrittweite ein Sollwert (z. B. eine Lagesollwert) vorgegeben werden kann.
- Die **Genauigkeit** ist dem Regelfaktor sehr ähnlich. Sie gibt die stationäre Abweichung des Istwertes vom Sollwert an. Diese Abweichung hat ihre Ursache jedoch nicht in einer ungünstigen Regelstruktur, sondern in der begrenzten Genauigkeit der Messsysteme und der digitalen Signalverarbeitung. Das heißt, der Regler erkennt eine Regelabweichung innerhalb der Genauigkeitsgrenzen nicht.
- Die **Wiederholgenauigkeit** gibt an, wie genau eine Sollposition bei mehrmaligem Anfahren erreicht wird.
- Die **Konstanz** beschreibt die Schwankungsbreite eines Istwertes um seinen Bemessungswert. Zum Beispiel können Drehzahlabweichungen $n_{\max} - n_{\min}$ bezogen auf die Bemessungsdrehzahl n_N angegeben werden.

$$K = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_N}$$

Die Konstanz ist zum Beispiel bei Walz- oder Folienziehprozessen von großer Bedeutung, da sie direkt die Oberflächengüte des bearbeiteten Materials beeinflusst.

- Die **Welligkeit** beschreibt den Oberschwingungsgehalt eines Istwertes. Sie wird als Effektivwert der Oberschwingungen bezogen auf den Bemessungswert angegeben. Eine typische Angabe bei elektrischen Antrieben ist die Drehmomentwelligkeit.

Gütekriterien im Frequenzbereich

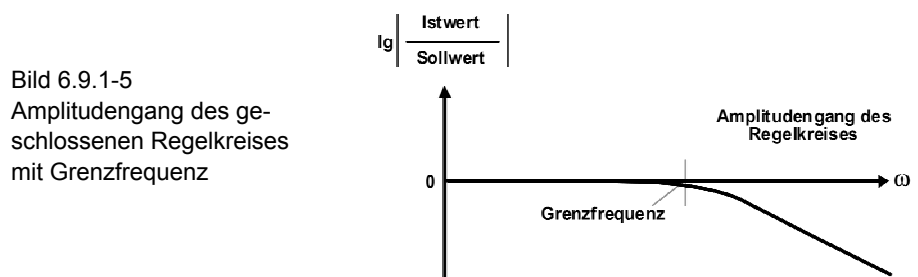
Ein sehr leistungsfähiges Mittel zur Bewertung eines Regelkreises ist der Frequenzgang. Er beschreibt das Verhalten des Regelkreises in verschiedenen Frequenzbereichen und ist für die Darstellung des Führungsverhaltens und des Störverhaltens geeignet.

Um den Frequenzgang zu ermitteln, wird der Regelkreis mit einer sinusförmigen Eingangsgröße (Sollwert oder Störgröße) beaufschlagt und der Verlauf der Ausgangsgröße (Istwert) beobachtet. Das Ergebnis wird im Bodediagramm dargestellt. Das Bodediagramm enthält zum einen den Amplitudengang und zum anderen den Phasengang.

- Der **Amplitudengang** beschreibt das Verhältnis der Amplituden von Eingangs- und Ausgangsgröße in Abhängigkeit von der Frequenz der Eingangsgröße. Es ist üblich dieses Verhältnis im dekadischen Logarithmus oder in Dezibel (dekadischer Logarithmus multipliziert mit 20) darzustellen.
- Der **Phasengang** beschreibt den Winkelversatz (die Phasenverschiebung) zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße.

Amplituden- und Phasengang werden über der Kreisfrequenz ω (Frequenz multipliziert mit 2π) der Eingangsgröße dargestellt. Die Kreisfrequenz ω wird im Bodediagramm ebenfalls im dekadischen Logarithmus abgetragen. Mit dem Frequenzgang kann die Grenzfrequenz und die Phasenreserve eines Regelkreises ermittelt werden. Diese beiden Größen stellen die eigentlichen Gütekriterien eines Regelkreises dar.

- Die **Grenzfrequenz** gibt an, bis zu welcher Frequenz ein Regelkreis Sollwertänderungen folgen oder Störgrößen unterdrücken kann. Hochwertige Regelkreise insbesondere bei Servoantrieben weisen hohe Grenzfrequenzen auf.



- Die **Phasenreserve** ist ein Maß für die Stabilität eines Regelkreises. Sie wird ebenfalls im Bodediagramm ermittelt. Allerdings wird dabei nicht der geschlossene Regelkreis sondern der offene Regelkreis betrachtet. Am Schnittpunkt des Amplitudenganges des offenen Regelkreises mit der ω -Achse wird im Phasengang die Winkelverschiebung zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße abgelesen. Die Differenz dieser Winkelverschiebung zu -180° wird als Phasenreserve bezeichnet. Je größer diese Phasenreserve ist, um so stabiler ist der Regelkreis.

6.9.2 Regelkreise bei Servoantrieben

Servoantriebe weisen im Allgemeinen eine kaskadierte Regelungsstruktur auf. Andere Regelungsstrukturen konnten sich bisher in der Breite nicht durchsetzen. In mehreren überlagerten Regelkreisen werden die wesentlichen Zustandsgrößen

- Drehmoment (Strom)
- Drehzahl und
- Lage

separat geregelt. Der überlagerte Regler berechnet jeweils den Sollwert für den unterlagerten Regelkreis. Der Stromregler ermittelt als unterster Regler den Spannungssollwert, übergibt ihn an das Leistungsteil, das dann die entsprechende Spannung bzw. die entsprechenden Spannungen an den Klemmen des Motors bereitstellt. Die Strom-, Drehzahl- und Lageistwerte werden durch Sensoren und Geber erfasst und in die Regelkreise zurückgeführt.

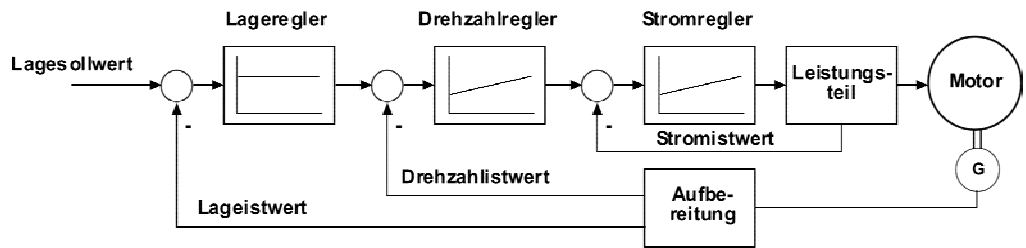


Bild 6.9.2-1 Struktur der Kaskadenregelung bei elektrischen Antrieben

Je nach Ausführung kann der Lageregler auch in einer übergeordneten Positioniersteuerung angeordnet sein und der Antrieb drehzahl geregelt arbeiten. An der Kaskadenstruktur der Regelkreise ändert sich dadurch jedoch nichts.

Die verschiedenen Motoren, die bei Servoantrieben eingesetzt werden, erfordern hinter der Stromregelung Motormodelle oder eine Kommutierungslogik zur Bildung der erforderlichen Klemmenspannungen. Aus regelungstechnischer Sicht sind diese Funktionen nicht relevant und werden vernachlässigt. Sie sind für die Regelung so zu sagen transparent. Treten jedoch in einem Antrieb trotz optimierter Stromregelung Probleme auf, sind diese Funktionen bei der Ursachensuche sehr wohl zu berücksichtigen.

Oberhalb der Stromregelung, beginnend mit dem Drehzahlregler, weisen die verschiedenen Servoantriebe aus Sicht der Regelung keine prinzipiellen Unterschiede mehr auf.

6.9.3 Optimierung des Stromregelkreises

Der Stromregelkreis muss nur noch bei analogen Servostellern manuell optimiert werden. Digitale Geräte verfügen über eine Selbstoptimierung, die auf den eingegebenen oder gemessenen Motorparametern beruht.

Bei der manuellen Optimierung wird der Stromregler mit kleinen Sollwertsprüngen beaufschlagt. Die Sollwertvorgabe erfolgt meist über einen analogen Eingang. Bei digitalen Geräten können die intern vorhandenen Festsollwerte verwendet werden. Für die Optimierung der Stromregelung muss der Drehzahlregler deaktiviert sein und der Sollwert direkt auf den Stromregler wirken. Der Servosteller ist entsprechend zu parametrieren.

PI-Regler

Der Stromregelkreis wird auf gutes Führungsverhalten optimiert. Das ist sinnvoll, da im Stromregelkreis praktisch keine dynamischen Störgrößen wirken. Die im Motor drehzahlabhängig induzierte Spannung (EMK) ist eine langsam veränderliche Größe und wird vom Regler im Allgemeinen problemlos beherrscht.

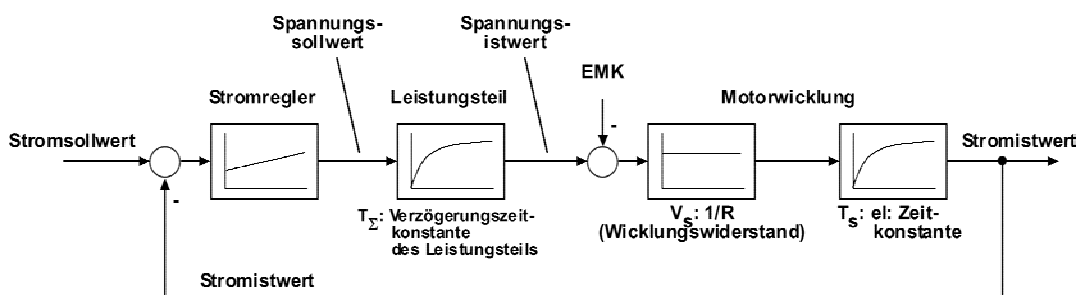


Bild 6.9.3-1 Stromregelkreis am Beispiel eines Gleichstrommotors

Der Stromregler ist als PI-Regler ausgeführt. Seine Einstellparameter sind die

- Proportionalverstärkung K_P und die
- Nachstellzeit T_N

Betragsoptimum

Sie werden nach dem so genannten Betragsoptimum eingestellt. Bei dieser Einstellung weist der geschlossene Regelkreis für einen großen Frequenzbereich eine Übertragungsfunktion von $G(\omega) = 1$ auf. Das heißt, in einem großen Frequenzbereich kann der Istwert dem Sollwert folgen. Für die Optimierung nach dem Betragsoptimum lassen sich folgende einfache Bestimmungsgleichungen für die Reglerparameter angeben.

$$K_P = \frac{T_S}{V_S \cdot 2T_\Sigma} \qquad T_N = T_S$$

mit:

| | Servoantrieb mit | | | |
|---|--|-------------------------------|---------------------|---------------------|
| | Gleichstrom-motor | Bürstenloser Gleichstrommotor | Synchron-motor | Asynchron-motor |
| Ersatzzeitkonstante des Leistungsteils T_Σ | Stromrichter: $1/(6f_{\text{Netz}})$ Pulssteller: $1/f_{\text{Puls}}$ | $1/f_{\text{Puls}}$ | $1/f_{\text{Puls}}$ | $1/f_{\text{Puls}}$ |
| Streckenverstärkung V_S | $1/R_A$ | $1/R_S$ | $1/R_S$ | $1/R_S$ |
| Streckenzeitkonstante T_S | L_A/R_A | L_S/R_S | L_S/R_S | L_S/R_S |
| L_A in H R_A in Ohm | | | | |

Tabelle 6.9.3-1 Einstellwerte für den Stromregler bei verschiedenen Motortypen

Die optimalen Einstellparameter ergeben sich aus den Kenngrößen des Motors (elektrische Zeitkonstante T_S und ohmscher Wicklungswiderstand R) sowie einer Ersatzzeitkonstante T_Σ des Leistungsteils. Diese Ersatzzeitkonstante berücksichtigt vereinfacht die dynamischen Eigenschaften des Leistungsteils, d.h. die Geschwindigkeit, mit der eine vom Stromregler geforderte Spannungsänderung an den Motorklemmen wirksam werden kann.

Übergangsfunktion

Regelkreise, die nach dem Betragsoptimum eingestellt wurden, weisen in der Übergangsfunktion (Sprungantwort) ein Überschwingen von weniger als 5 % auf. Die Anregelzeit liegt typischerweise bei dem 5-fachen der Ersatzzeitkonstante T_Σ des Leistungsteils.

Hinweis: Die Optimierung erfolgt im Kleinsignalbereich. Das heißt, dass die Sollwertsprünge für den Strom so klein gewählt werden, dass die im Antrieb vorhandenen Begrenzungen (Spannung, Strom) nicht erreicht werden.

Sind die Reglerparameter nicht auf die Regelstrecke abgestimmt, treten Abweichungen vom optimalen Übergangsverhalten auf. Bei geringfügig verstellten Reglerparametern sind diese problemlos verkraftbar. Zu starke Abweichungen verringern die Dynamik oder bringen den Antrieb zum Schwingen.

Beispiel: Servosteller mit $f_{\text{Puls}} = 4 \text{ kHz}$; $T_{\Sigma} = 0,25 \text{ ms}$; $I_{\text{Soll}} = 1 \text{ A}$
 K_p und T_N optimal eingestellt

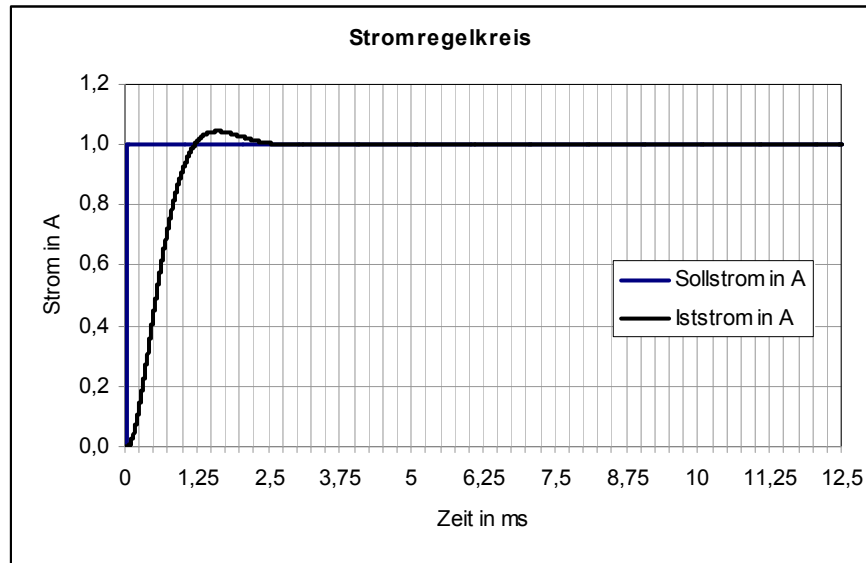


Bild 6.9.3-2 Übergangsfunktion eines optimal eingestellten Stromregelkreises

Betragsoptimal eingestellte Stromregelkreise weisen eine Durchtrittsfrequenz von $1/2T_{\Sigma}$ auf. Bis zu dieser Frequenz ist die Stromregelung in der Lage, Sollwertänderungen zu folgen. Oberhalb dieser Frequenz verhält sie sich wie ein unreguliertes System. Die Stromregelung folgt den Sollwertänderungen nicht mehr. Da die Zeitkonstante T_{Σ} die Ersatzzeitkonstante des Leistungsteils ist, hängt die Dynamik der Stromregelung unmittelbar von der Dynamik des Leistungsteils ab. Aus diesem Grund werden für Servoanwendungen nur hoch dynamische Leistungsteile verwendet. Mit diesen Leistungsteilen sind Grenzfrequenzen von mehr als 1 kHz im Stromregelkreis erreichbar.

Beispiel: Servosteller mit $f_{\text{Puls}} = 4 \text{ kHz}$; $T_{\Sigma} = 0,25 \text{ ms}$; $I_{\text{Soll}} = 1 \text{ A}$
 $K_p = 3K_{p_optimal}$

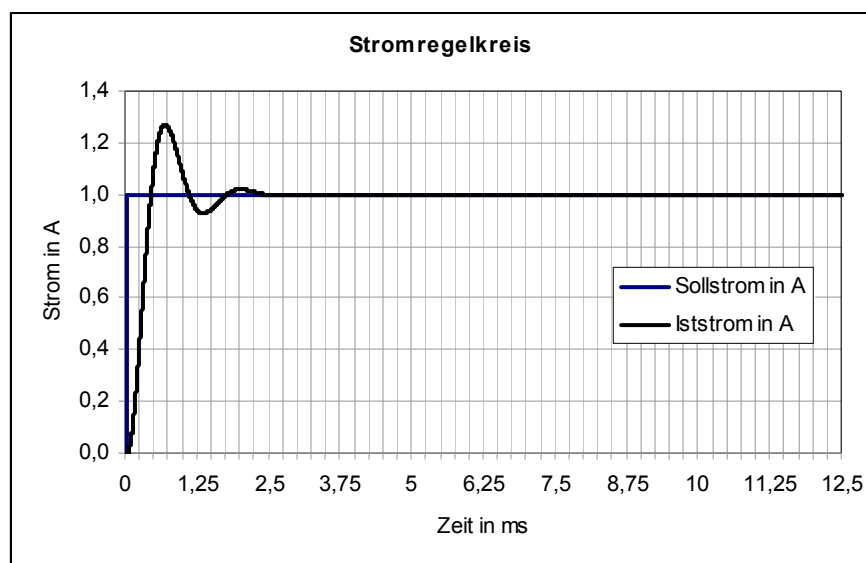


Bild 6.9.3-3 Übergangsfunktion eines Stromregelkreises mit zu großer Proportionalverstärkung

6.9.4 Optimierung des Drehzahlregelkreises

Der Drehzahlregelkreis kann bei digitalen Servostellern oft automatisch optimiert werden. Entsprechende Geräte verfügen über eine Selbstoptimierung, die auf einer Messung der relevanten Streckenparameter beruht. Allerdings erfordert die Messung den Hochlauf des Antriebes mit angekoppelter Last. Das ist nicht in alle Anwendungen möglich. Deshalb ist die manuelle Optimierung oder Nachoptimierung des Drehzahlreglers nach wie vor gängige Praxis.

Bei der manuellen Optimierung wird der Drehzahlregler mit kleinen Sollwertsprüngen beaufschlagt. Die Sollwertvorgabe erfolgt entweder über einen analogen Eingang oder unter Verwendung der internen Festsollwerte. Für die Optimierung der Drehzahlregelung muss der eventuell vorhandene Lageregler deaktiviert und der Sollwert direkt auf den Drehzahlregler wirken. Der Servosteller ist entsprechend zu parametrieren.

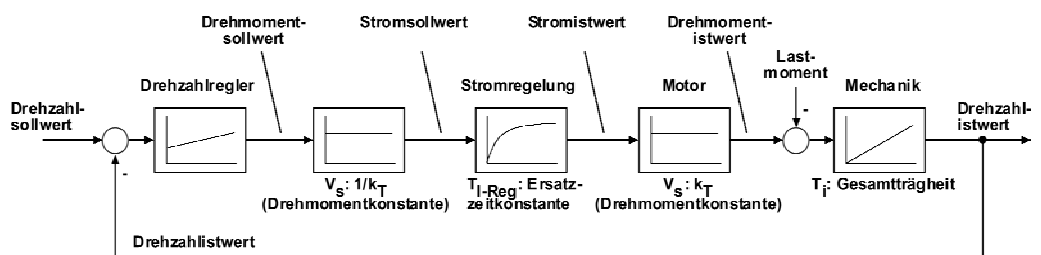


Bild 6.9.4-1 Drehzahlregelkreis

Symmetrisches Optimum

Im Drehzahlregelkreis tritt das Last(dreh)moment als Störgröße auf. Das Lastmoment wird sowohl von der Anwendung als auch von wenig deterministischen Einflüssen wie Reibung, Unwuchten und Rastmomenten bestimmt. Um diese Einflüsse gut zu beherrschen, erfolgt die Optimierung des Drehzahlregelkreises auf optimales Störverhalten. Der Drehzahlregler ist als PI-Regler ausgeführt. Seine Parameter werden nach dem so genannten symmetrischen Optimum eingestellt. Damit wird erreicht, dass der geschlossene Drehzahlregelkreis für einen großen Frequenzbereich Störgrößen unterdrückt und das Lastmoment in weiten Frequenzbereichen keinen Einfluss auf die Drehzahl an der Motorwelle hat.

Zur Vereinfachung der Regelungsstruktur bei der Betrachtung des Drehzahlregelkreises wird der unterlagerte Stromregelkreis durch ein PT1-Glied mit der Verzögerungszeitkonstante T_{I-Reg} betrachtet. Ist der Stromregler nach dem Betragsoptimum eingestellt, gilt in guter Näherung:

$$T_{I-Reg} = 4T_{\Sigma}$$

Für die Optimierung nach dem symmetrischen Optimum lassen sich einfache Bestimmungsgleichungen für die Reglerparameter angeben.

$$K_P = \frac{T_i}{2T_{I-Reg}} \qquad T_N = 4T_{I-Reg}$$

mit:

$$T_i = J \cdot s / \text{kgm}^2 \quad J \text{ in kgm}^2: \text{ Gesamtträgheit bestehend aus Trägheitsmoment des Motors und der Arbeitsmaschine}$$

Übergangsfunktion

Die optimalen Einstellparameter ergeben sich aus der Ersatzzeitkonstante des Stromregelkreises und dem Trägheitsmoment des mechanischen Systems.

Regelkreise, die nach dem symmetrischen Optimum eingestellt wurden, weisen in der Übergangsfunktion (Sprungantwort) ein Überschwingen von ca. 43 % auf. Die Anregelzeit liegt typischerweise bei dem 3-fachen der Zeitkonstante T_{I-Reg}

Eine entsprechend optimierte Drehzahlregelung weist eine Durchtrittsfrequenz von ca. $1/2T_{I-Reg}$ auf. Bis zu dieser Frequenz ist die Drehzahlregelung in der Lage, Sollwertänderungen zu folgen. Oberhalb dieser Frequenz verhält sie sich wie der offene Regelkreis und folgt den Sollwertänderungen nicht mehr. Da die Zeitkonstante T_{I-Reg} die Ersatzzeitkonstante der unterlagerten Stromregelung ist, hängt die Dynamik der Drehzahlregelung unmittelbar von der Dynamik der Stromregelung ab.

Beispiel: Servosteller mit $f_{Puls} = 4 \text{ kHz}$; $T_{I-Reg} = 1,0 \text{ ms}$; $n_{soll} = 10 \text{ U/min}$
 K_p und T_N optimal eingestellt

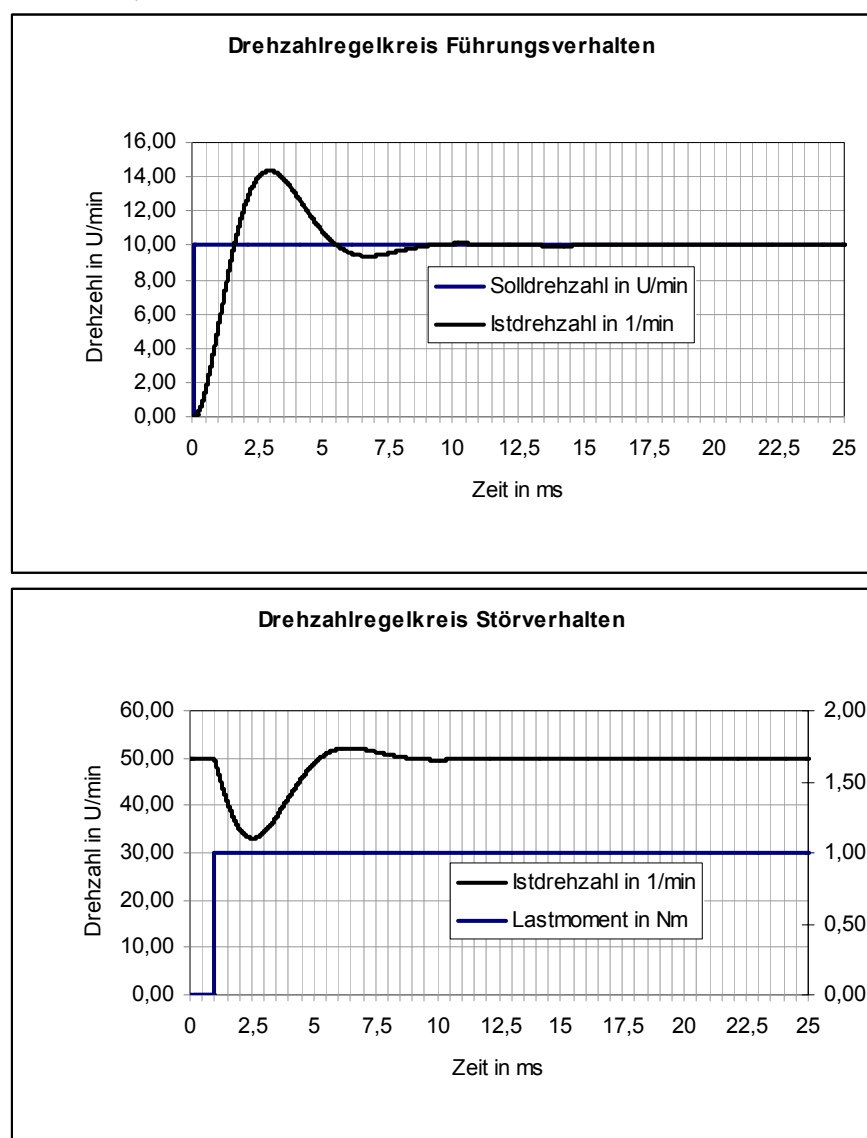


Bild 6.9.4-2 Übergangsfunktionen eines optimal eingestellten Drehzahlregelkreises

Bezüglich des Führungsverhaltens sind nach dem symmetrischen Optimum eingestellte Regelkreise nicht optimal. Das Überschwingen ist zu stark und die Drehzahlregelung zu „scharf“. Oft ist bei der Einstellung nach dem symmetrischen Optimum ein deutliches „Brummen“ oder „Pfeifen“ des Antriebes selbst im Stillstand zu hören. Ursache sind kleine stochastische Ungenauigkeiten in der Drehzahlmessung, die der Drehzahlregler als Stör-

größen interpretiert und auf die er reagiert. Die Optimierung nach dem symmetrischen Optimum ist in der Praxis nur bei Servoantrieben mit sehr guten Drehzahlgebern machbar. Bei diesen Antrieben wird dann durch additive Filter oder durch erweiterte PI-Regler das Führungsverhalten optimiert und das starke Überschwingen beseitigt.

Bei einfacheren Antrieben senkt man im Allgemeinen einfach die Proportionalverstärkung K_P ab und erhöht gleichzeitig die Nachstellzeit T_N bis ein akzeptables Regelverhalten entsteht. Leider ist damit auch eine deutliche Verschlechterung des Störverhaltens verbunden, die dann in Kauf genommen werden muss.

Beispiel: Servosteller mit $f_{\text{Puls}} = 4 \text{ kHz}$; $T_{\text{I-Reg}} = 1,0 \text{ ms}$; $n_{\text{soll}} = 10 \text{ U/min}$
 $K_p = 0,5K_{p_optimal}$ und $T_N = 3T_{N_optimal}$

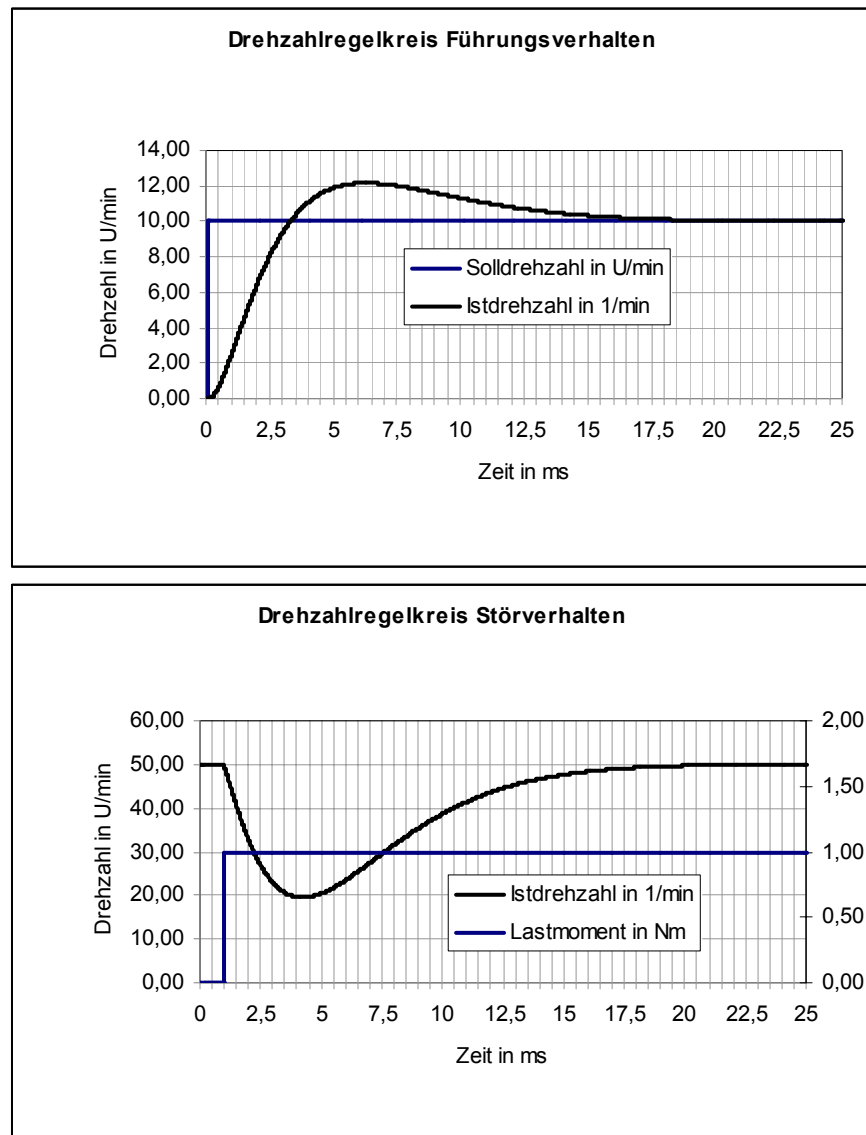
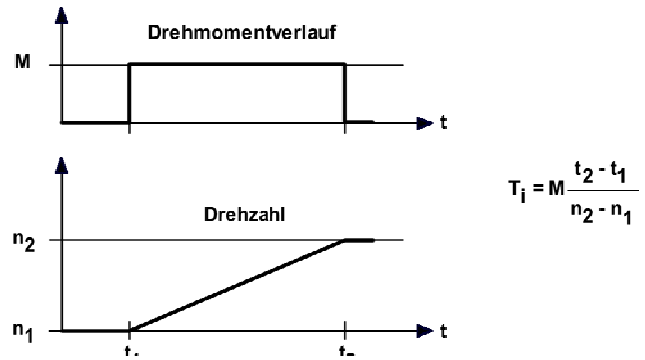


Bild 6.9.4-3 Übergangsfunktionen eines falsch eingestellten Drehzahlregelkreises

Experimentelle Bestimmung von T_i

Das Trägheitsmoment des Motors und der Arbeitsmaschine ist oft nicht genau bekannt. Damit können die Zeitkonstante T_i und die optimalen Reglereinstellungen nicht berechnet werden. In diesem Fall muss die Zeitkonstante T_i experimentell ermittelt werden.

Bild 6.9.4-4 Ermittlung der Zeitkonstante T_i im Hochlaufversuch



Dazu wird der Servoantrieb drehzahl geregelt betrieben und das Motormoment auf ca. 50% bis 80% seines Nennwertes im Steller begrenzt. Anschließend wird ein Drehzahlsollwertsprung in Höhe des Nennwertes vorgegeben. Der Antrieb läuft an der Drehmomentgrenze auf Nenndrehzahl hoch. Aus der Hochlaufzeit lässt sich die Zeitkonstante T_i berechnen.

Gegenüber Änderungen der Gesamtträgheit z. B. bei Anwendungen mit Be- und Entladevorgängen ist der Drehzahlregler relativ robust.

6.9.5 Optimierung des Lageregelkreises

Der Drehzahlregelkreis kann bei hochwertigen digitalen Servostellern zum Teil automatisch optimiert werden. Meistens erfolgt jedoch eine Optimierung per Hand oder eine rein empirische Einstellung. Das ist möglich, da der Lageregler meistens als reiner P-Regler ausgeführt ist und nur die Proportionalverstärkung als Einstellwert hat. Die Proportionalverstärkung hat beim Lageregler einen besonderen Namen und wird als k_V -Faktor bezeichnet.

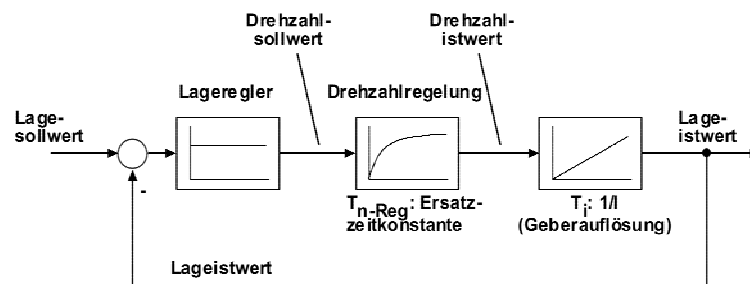


Bild 6.9.5-1 Lageregelkreis

Zur Vereinfachung der Regelungsstruktur wird der unterlagerte Drehzahlregelkreis als ein PT1-Glied mit der Verzögerungszeitkonstante T_{n-Reg} betrachtet. Ist der Drehzahlregler nach dem symmetrischen Optimum eingestellt, gilt in guter Näherung:

$$T_{n-Reg} = 3T_{I-Reg}$$

Betragsoptimum

Der Lageregler wird auf Führungsverhalten optimiert und nach dem Betragsoptimum eingestellt. Damit lässt sich folgende einfache Bestimmungsgleichung für den k_V -Faktor angeben.