



Roland Benzing | Ralf Wieland

Elektromagnetische Bremsen und Kupplungen

**PRÄZISION UND SICHERHEIT
FÜR DIE WELT VON MORGEN**

Roland Benzing
Ralf Wieland

Elektromagnetische Bremsen und Kupplungen

**PRÄZISION UND SICHERHEIT
FÜR DIE WELT VON MORGEN**

1. Auflage

Herausgeber
Kendrion (Villingen) GmbH

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	8
Danke	9
Kendrion	12
Das Unternehmen	12
Tradition trifft Innovation: Über 100 Jahre Kendrion	15
Industrial Drive Systems	17
Grundlagen des Magnetismus	26
Der Elektromagnet.....	26
Elektromagnetische Kupplungen und Bremsen.....	30
Technische Grundlagen	36
Begriffe und Definitionen	36
Magnetische Kenngrößen	42
Elektromagnetische Energieumwandlung.....	42
Magnetkraft.....	54
Induktion	60
Selbstinduktion	62
Magnetische Kreise mit Permanentmagneten	66
Elektromagnetische Wandlerelemente	72

Grundlagen elektromagnetischer Brems- und Kupplungssysteme	76
Auslegung und Berechnung	76
Elektromagnetische Bremsen	83
Elektromagnetische Federdruckbremsen	87
Elektromagnetische Permanentmagnetbremsen	100
Optimierung des Betriebsverhaltens	118
Grundlagen.....	118
Optimierung des Einschaltverhaltens	122
Optimierung des Ausschaltverhaltens.....	126
Zusammenfassung und Bewertung der elektrischen Ansteuermethoden	130
Grundlagen für Schutz und Entstörung	134
Schutzbeschaltungen für Erregerwicklungen (Spulen).....	136
Geräuschreduzierung von elektromagnetisch betätigten Bremsen beim Öffnen und Schließen	140
Applikationen	146
Servomotoren.....	146
Sichere Roboteranwendung	149
Medizintechnik	151
Maschinen & Anlagenbau	155
Erneuerbare Energien – Windkraftanlagen	159
Aufzugstechnik.....	161

Innovationen	166
Servo Line	166
Servo Slim Line	169
Überwachungssensor für die Aufzugsbremse	173
Intelligente Bremse	175
Am Ende	180
Der Blick zurück	180
Der Ausblick	180
Megatrends	181
Schnelle Urbanisierung	182
Internet der Dinge / Internet of Things (IoT)	184
Diversifizierung von Robotern	186
Schlusswort	188
Abbildungsverzeichnis	190
Quellenverzeichnis	193
Bildnachweis	194

*„Wussten Sie, dass
kein Tag vergeht,
an dem Sie nicht
tausenden unserer
Produkte begegnen?“*



*„Sie werden feststellen –
wir sind aus Ihrem Alltag
nicht wegzudenken!“*

VORWORT

Kennen Sie die Herren Wilhelm Eduard Weber, Heinrich Friedrich Lenz, Carl Friedrich Gauß oder Michael Faraday?

Sicherlich ist Ihnen der ein oder andere Name bereits aus dem Physikunterricht bekannt: Nach Herrn Weber ist der Magnetische Fluss benannt - Herr Lenz hat uns die Lenz'sche Regel überlassen - Herr Gauß ist zumindest Menschen mit einer Affinität zur Statistik bekannt und Herr Faraday hat sich durch die Erforschung der elektromagnetischen Induktion einen Namen gemacht. Alle der genannten (und noch einige weitere) haben im 19. Jahrhundert Bahnbrechendes zur Erforschung des Magnetismus beigetragen. Die Aktivitäten in unserem Unternehmen beruhen heute immer noch darauf.

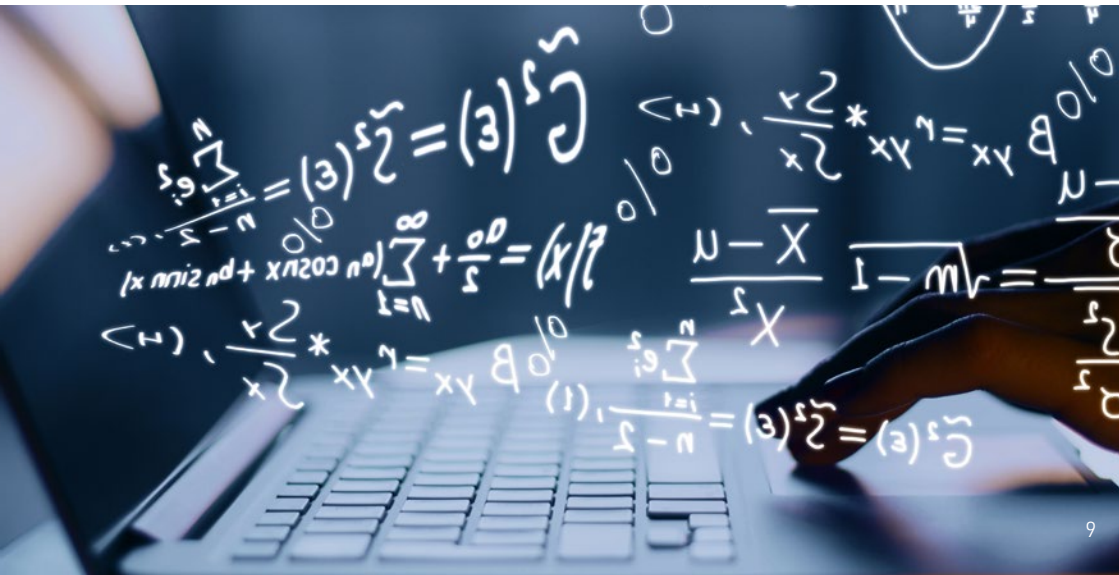
Mit diesem Buch möchten wir Ihnen einen kleinen Überblick über die faszinierende Welt des Elektromagnetismus und im speziellen über elektromagnetische Kupplungen und Bremsen geben. In den nachfolgenden Kapiteln stellen wir Ihnen die physikalischen und technischen Grundlagen des Elektromagnetismus vor. Auf dieser Basis fußen die zwei wesentlichen Wirkprinzipien von elektromagnetisch betätigten Bremsen: federkraftbetätigte und permanentmagneterregte Bremsen. Beide Arten leisten tagtäglich ihre Arbeit zum Beispiel in der Antriebstechnik, Medizintechnik oder Aufzugstechnik. Je nach Applikation, Arbeitsaufgabe und Anforderung kommt eine der beiden Bremsentechnologien zum Einsatz.

*Ganz egal, welche Aufgabenstellung Sie haben, welches Produkt Sie benötigen.
Kendrion hat die richtige Lösung für Sie.*

Danke

Bevor es aber so richtig losgeht, möchten wir an dieser Stelle noch all jenen danken, die dieses Buch ermöglicht haben. Insbesondere Beate Hermannstädter, Maria Frank, Jürgen Berndt und Sören Storbeck sowie allen anderen Mitarbeitern unseres Unternehmens, unseren Partnern und interessierten Personen, welche ebenso die Leidenschaft für den Elektromagnetismus mit uns teilen. Ohne Sie alle hätten wir die nachfolgenden Seiten nicht erstellen können. Vielen Dank.

Villingen, Mai 2019



Kapitel ①

KENDRION

KENDRION

Das Unternehmen

KENDRION steht für hochqualitative elektromagnetische Systeme und Komponenten für die Automobil- und Industriebranche. Mit unseren vielseitigen Lösungen sorgen wir weltweit für sichere und präzise Prozesse in dynamischen Zukunftsbranchen. Unsere Produkte werden in einer Vielzahl von Anwendungen verwendet, die Sie tagtäglich antreffen, wie z. B. in Autos, Bussen, Aufzügen, Geldautomaten, Getränkeautomaten, Windkraftanlagen, medizinischen Geräten

und unzähligen anderen Produkten. Bereits seit mehr als einem Jahrhundert baut Kendrion auf Kompetenz im Magnetismus und bietet komplexe Komponenten und maßgeschneiderte Systeme als auch marktspezifische Lösungen. Dabei entstehen Produkte mit einzigartigen Merkmalen. Die Ergebnisse der gemeinsamen Zusammenarbeit mit unseren Kunden ergeben ein optimales Paket in Bezug auf die spezifischen Produkt- und Marktanforderungen.





Bild: Wilhelm Binder jun.

Tradition trifft Innovation: Über 100 Jahre Kendrion

Bereits 1911 gründete Wilhelm Binder zusammen mit seinem Geschäftspartner Rudolf Moog und einem Startkapital von 8.500 Mark die Firma W. Binder in Villingen.

Anfang der 20er Jahre begann Wilhelm Binder, elektromagnetische Komponenten wie Aufspanngeräte, Schutzmagnete, Magnettrommeln und Hubmagnete zu entwickeln und zu produzieren. Binder steckte jeden Pfennig in den Betrieb und überwand erfolgreich Hürden wie Weltkriege und Wirtschaftskrisen. Innerhalb von 25 Jahren wuchs die Belegschaft auf 400 Mitarbeiter.

Im Jahr 1938 wurde Binders Sohn mit in das Unternehmen aufgenommen. In einem Vierteljahrhundert hat Wilhelm Binder mit viel Leidenschaft und Innovationskraft ein weltweit renommiertes Unternehmen geschaffen.

Nach dem 2. Weltkrieg musste die Firma neu aufgebaut werden. Nachdem 1951 ein



neues Fabrikgebäude zur Verfügung stand, verhalf 1953 der erste Auftritt auf der Hannover Messe zu internationaler Anerkennung. Magnetismus wurde für Wilhelm Binder zur Faszination, er entwickelte sich zum Erfinder und konnte im Laufe der Jahre über 100 Patente und Gebrauchsmuster anmelden, so auch die Erfindung des Proportionalmagneten, der heute immer noch eingesetzt wird.

Für jeden Fall die richtige Bremse

Automatisierungslösungen sind heute ein wesentlicher Bestandteil der Industrie und des Alltags. Die Verbreitung von Automatisierungslösungen wird durch die Mechatronik gefördert. Dadurch erhöht sich auch die Vielfalt der Anwendungen. Hierbei erfüllen elektromagnetische Bremsen häufig die notwendigen Sicherheitsanforderungen zum Halten von Lasten und zum sicheren Abbremsen bei einem Notfall.

Optimale Abstimmung auf die branchenspezifischen Anforderungen

Die Vielzahl der Anwendungsmöglichkeiten bringt auch eine starke Differenzierung der Spezifikationen mit sich – beispielsweise bezogen auf Drehmoment, Gleitgeschwindigkeit und Bremsenergie. Diesen unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden und gleichzeitig die Standardisierung der Produkte zu wahren, stellt eine Herausforderung dar, der sich Kendrion stellt. So können kundenspezifische Lösungen auf Basis eines bestehenden Produktportfolios entwickelt und hergestellt werden. Voraussetzung dafür ist die Analyse und das Verständnis der branchenspezifischen Anforderungen der Kunden. Mit dem passenden Produktportfolio und hoher Kompetenz in der Automatisierungstechnik, der Robotik, dem Maschinenbau und der Aufzugstechnik kann Kendrion Industrial Drive Systems als zuverlässiger Partner die optimale individuelle Bremsenlösung für jeden Anwendungsfall anbieten.



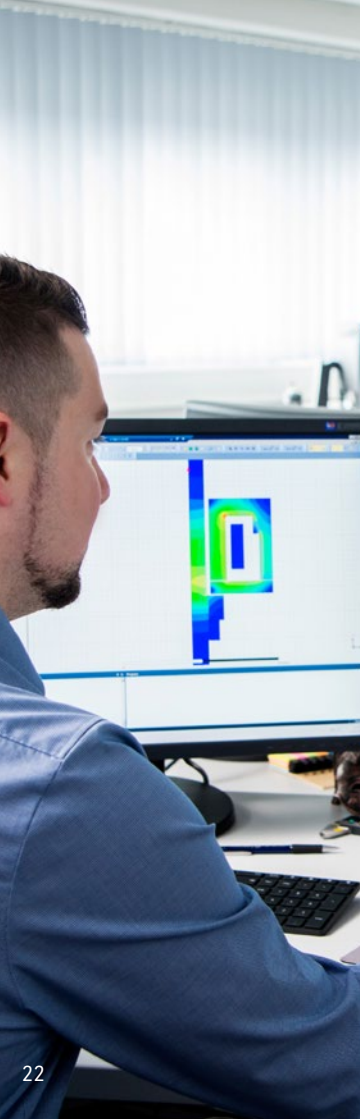
Marktgerechte Realisierung von Produkten

Die Basis für individuell optimierte Bremslösungen von Kendrion bildet das breite Produktportfolio. Dieses enthält Permanentmagnetbremsen, Federdruckbremsen und elektronische Komponenten.

Im Bereich der Permanentmagnetbremsen werden sowohl Standardlösungen als auch Bremsen in „High Torque“-Technologie für einen Temperatureinsatzbereich von -40 °C bis $+120\text{ °C}$ angeboten. Außerdem stellt Kendrion Federkraftbremsen für Asynchronmotoren, Aufzüge oder explosionsgeschützte Bereiche her.

Neuentwicklungen wie die Federdruckbremse für Servomotoren oder auch die sehr flache Federdruckbremse für die Robotertechnik komplettieren das Produktportfolio und stehen für die Innovationskraft des Unternehmens. So kann für jede Applikation die optimale Lösung angeboten werden.





Kundenspezifische Lösungen und Service

Kendrion entwickelt individuelle Lösungen, die optimal auf den jeweiligen Kunden und dessen spezifisches Anwendungsgebiet zugeschnitten sind. Hierfür verfügt der Bremsenexperte über das nötige Projekt- und Prozess-Knowhow. Die in Jahrzehnten erworbene Kernkompetenz im Bereich des Elektromagnetismus ermöglicht erst die marktgerechte Realisierung von Produkten. Die Umsetzung innovativer Konzepte und modernster Technologien in der Entwicklung, verbunden mit neuesten Fertigungs- und Logistikprozessen, sind die Stärken des Unternehmens. Durch die Verwendung von Standard-Produktplattformen können Kunden sowohl bei hohem Auftragsvolumen als auch bei geringen Stückzahlen stets individuelle Lösungen erhalten. Die kontinuierliche Optimierung der Geschäftsprozesse erweitert das Unternehmens-Knowhow dabei laufend.

Auch bietet Kendrion eine breite Palette von Spezialprodukten, Standardmodifikationen und einen umfassenden Reparatur-Service an.

Große Ersatzteillager ermöglichen es einem erfahrenen und hochqualifizierten Service-Team, einen schnellen und effizienten Service zu bieten.



WAS DRANF STEHT, IST AUCH DRIN

Bei der Validierung und Verifikation der Werte kann sich der Anwender auf das kompetente Labor-Team des Bremsenspezialisten verlassen. Kendrion hat sich über Jahre eine hohe Kompetenz in der Prüfung und Qualifizierung seiner Produkte aufgebaut. Das Labor ist ausgestattet mit Prüfvorrichtungen für den Messbereich von 0,1 Nm bis hin zu 10.000 Nm. Die Prüfaufbauten spiegeln die Applikationsbedingungen 1:1 wider und können so die realen Bedingungen abbilden. Sämtliche Messdaten werden unter verschiedenen Einsatzbedingungen wie Temperatur, Reißarbeit, Drehzahl und Drehrichtung aufgezeichnet und für die technischen Daten herangezogen. Durch diese Möglichkeiten können dem Anwender fundierte technische Angaben bereitgestellt werden.

Kapitel ②

GRUNDLAGEN DES MAGNETISMUS

GRUNDLAGEN DES MAGNETISMUS

Die folgenden Kapitel bieten eine Einführung in die Welt des Magnetismus und ermöglichen Ihnen, Schritt für Schritt die Wirkungsweise eines elektromagnetischen Aktors zu verstehen.

Nach der Zusammenstellung technischer Grundlagen werden die einzelnen spezifischen Lösungen und dazugehörige Applikationsbeispiele ins Zentrum gerückt. Abschließend widmen wir uns Themen und Trends am Puls der Zeit sowie Einblicken in aktuelle und künftige technologische Entwicklungen, die unsere Zukunft prägen werden.

Der Elektromagnet

Elektromagnete werden infolge der während der Bewegung des Ankers aufgebracht mechanischen Arbeit bzw. wegen der bei angezogenem Anker auftretender Haltekraft als Antriebs- bzw. Stellelemente in der Technik eingesetzt. Die mechanische Arbeit entsteht durch Umwandlung aus elektrischer Energie, die über elektrische Leiter dem elektromagnetischen Wandlerelement (Spule) zugeführt wird. Der Elektromagnet ist somit seinem Wesen nach ein Energie-

wandler. In diversen Applikationen findet man Elektromagnete für Gleichstrom- und Wechselstrombetrieb, polarisierte Elektromagnete mit Permanentmagneten und Elektromagnete als Teil komplexer Baugruppen z.B. in Kupplungen, Bremsen zum Öffnen und Schließen der Kupplung bzw. Bremse, als Ventilmagnete in Pneumatik- und Hydrauliksystemen und als Betätigungs-, Dreh- und Haftmagnet, etc.

Exemplarische Ausführungsformen von Elektromagneten



Permanentmagnetbremse



Verriegelungsmagnet



Haftmagnet



Federdruck-Einscheibenbremse

Infolge des magnetischen Feldes im eingeschalteten Zustand des Elektromagneten kommt es zu einer elektromagnetisch erzeugten Kraftwirkung auf den axial oder drehbar begrenzt bewegbaren „Anker“ des Elektromagneten. Dadurch lassen sich wechselsinnige Bewegungen realisieren mit meist zwei stabilen Endlagen des Ankers, die sich jeweils nach dem Ein- bzw. Ausschalten des Elektromagneten einstellen. Die Rückstellung des bewegbaren Ankers erfolgt dabei entweder durch äußere Kräfte, z.B. durch Federn, oder durch Einschalten einer zweiten Spule bzw. eines zweiten Elektromagneten, wie z.B. bei einem Drehmagneten mit zwei unabhängig voneinander ein- und ausschaltbaren Spulen.

Ausführung von Elektromagneten in Abhängigkeit zur elektrischen Ansteuerung

- Elektromagnet für Gleichstromanschluss mit und ohne Anpassung der Magnetkraftkennlinie je nach Belastungsfall mit massivem Magnetkreis.
- Elektromagnete für Einphasen- und Dreiphasenwechselstromanschluss mit lamellierter, geblechter Ausführung des Magnetkreises und ggf. Kurzschlussring.

Elektromagnete sind „*elektro-magneto-mechanische*“¹ Energiewandler, welche die zugeführte elektrische Energie zuerst in magnetische Energie und in der Folge in mechanische Bewegungsenergie umwandeln.



Elektromagnetische Kupplungen und Bremsen

Elektromagnetische Bremsen bzw. Kupplungen sind Kraftübertragungselemente, die nach den Richtlinien und Vorschriften der DIN VDE 0580 (Elektromagnetische Geräte und Komponenten) entwickelt, gebaut und geprüft werden. DIN VDE 0580 unterscheidet zwischen elektromagnetischem Gerät und elektromagnetischer Komponente. Das elektromagnetische Gerät ist dafür vorgesehen,

als selbstständige Funktionseinheit betrieben zu werden. Kupplungen und Bremsen sind im Sinne der DIN VDE 0580 elektromagnetische Komponenten, die Bestandteile eines Gerätes sind. In DIN VDE 0580 werden die wichtigsten Kenngrößen und Begriffe, die für die Auslegung, Bau, Prüfung und den Betrieb von Brems- und Kupplungssystemen benötigt werden, beschrieben.

Definition einer Bremse und Kupplung nach DIN VDE 0580

Die in DIN (Deutsches Institut für Normung e.V.) und VDE (Verband der Elektrotechnik, Elektronik, Informationstechnik e.V.) erschienene Norm DIN VDE 0580 gilt für elektromagnetische Komponenten und Geräte mit einem begrenzten Arbeitshub zum Kupplern oder Bremsen und bis zu einer Bemessungsspannung von 1000 V. Dabei nutzt die elektromagnetische Komponente die Kraftwirkung eines elektrisch erzeugten ma-

gnetischen Feldes auf einen ferromagnetischen Körper, um eine Kupplungswirkung bzw. Bremswirkung zu erreichen. Um hohe Kupplungs- bzw. Bremsmomente realisieren zu können, kommen in den meisten elektromagnetisch betriebenen Kupplungen und Bremsen tribologische Reibsysteme zum Einsatz in Ausführung mit einer oder auch mehreren Reibpaarungen.

Was ist eine elektromagnetische Kupplung im Sinne der DIN VDE 0580?

Die elektromagnetische Kupplung ist eine Komponente zum Verknüpfen und Trennen eines Energieflusses in Form einer Drehmomentübertragung.

Nach DIN VDE 05080 werden elektromagnetisch betätigte Kupplungen und Bremsen nach ihren physikalischen Wirkprinzipien eingeteilt in **schließende arbeitsstrombetätigte Kupplung bzw. Bremse** und **öffnende ruhestrombetätigte Kupplung bzw. Bremse**.

Was ist eine elektromagnetische Bremse im Sinne der DIN VDE 0580?

Die elektromagnetische Bremse ist eine besondere Form der elektromagnetischen Kupplung, bei der die Abtriebsseite stillsteht.

Schließende arbeitsstrombetätigte Kupplung bzw. Bremse

Kupplung oder Bremse, bei der die Drehmomentübertragung durch elektromagnetische Kraftwirkung hergestellt wird.

Kupplungen und Bremsen mit diesem Wirkprinzip nutzen die Kraftwirkung eines elektromagnetischen Feldes zum Aufbau des Kupplungs- bzw. Bremsmoments. Infolge eines magnetischen Feldes wird am Polsys-

tem der Kupplung bzw. Bremse eine axiale Kraft erzeugt, die auf das im Magnetsystem axial bewegliche Bauteil (Anker) einwirkt. Durch Reibschluss wird das Kupplungs- bzw. Bremsmoment erzeugt.

Öffnende ruhestrombetätigte Kupplung bzw. Bremse

Kupplung oder Bremse, bei der die Drehmomentübertragung durch elektromagnetische Kraftwirkung aufgehoben wird.

Kupplungen und Bremsen mit diesem Wirkprinzip nutzen die Kraftwirkung eines elektromagnetischen Feldes zum Aufheben des Kupplungs- bzw. Bremsmoments. Durch den Aufbau des magnetischen Feldes wird am Polsystem der Kupplung bzw. Bremse

eine axiale Kraft erzeugt, die auf das im Magnetsystem axial bewegliche Bauteil (Anker) einwirkt und entweder das permanentmagnetische Feld (bei Permanentmagnetsystemen) oder die Federkraft (bei Federdrucksystemen) aufhebt.

Elektromagnetisch betätigte Bremsen und Kupplungen

Elektromagnetisch betätigte Bremsen und Kupplungen nach DIN VDE 0580



Kapitel ③

TECHNISCHE GRUNDLAGEN

TECHNISCHE GRUNDLAGEN

Elektromagnetisch schaltbare Kupplungen und Bremsen sollen unter der Wirkung eines Drehmoments entweder Lasten zuschalten (einkuppeln) oder eine Last zum Stillstand bringen oder in Position halten (bremsen). Beim Einkuppeln (synchronisieren) von Antrieb und Abtrieb und beim Abbremsen von Lasten wird kinetische Energie (Schaltarbeit nach DIN VDE 0580) durch Reibung im

tribologischen Reibsystem der Kupplung bzw. Bremsen in Wärme umgewandelt. Zur Auslegung und Betrieb der Komponenten sind dabei Kenntnisse über die technischen und physikalischen Gesetzmäßigkeiten von elektromagnetischen Kreisläufen und spezielle Kenntnisse über das zu verwendende tribologische System von Kupplung und Bremse erforderlich.

Begriffe und Definitionen

Die folgenden Begriffe und Definitionen nach DIN VDE 0580 sind im Betrieb und bei der Auslegung der Komponenten von Bedeutung. Die Verwendung einheitlich definierter Begriffe ermöglicht es dem Entwickler, aber auch dem Anwender von elektroma-

gnetischen Kupplungen und Bremsen, die technischen Eigenschaften der Produkte sicher zu interpretieren und auch technische Merkmale verschiedener Produktausführungen miteinander zu vergleichen.

Grundelemente einer elektromagnetischen Bremse

- 1.1** **Magnetgehäuse**
Teil, das die Spule- bzw. die Erregerwicklung (1.2) enthält
- 1.2** **Spule- bzw. Erregerwicklung**
Teil zur Erzeugung des magnetischen Feldes
- 2** **Anker**
Teil, das durch das Magnetfeld gehalten bzw. bewegt wird
- 3** **Reibscheibe**
Teil zur Erzeugung des Bremsmoments
- 4** **Federn**
Teil, zur Erzeugung der axialen Federkraft

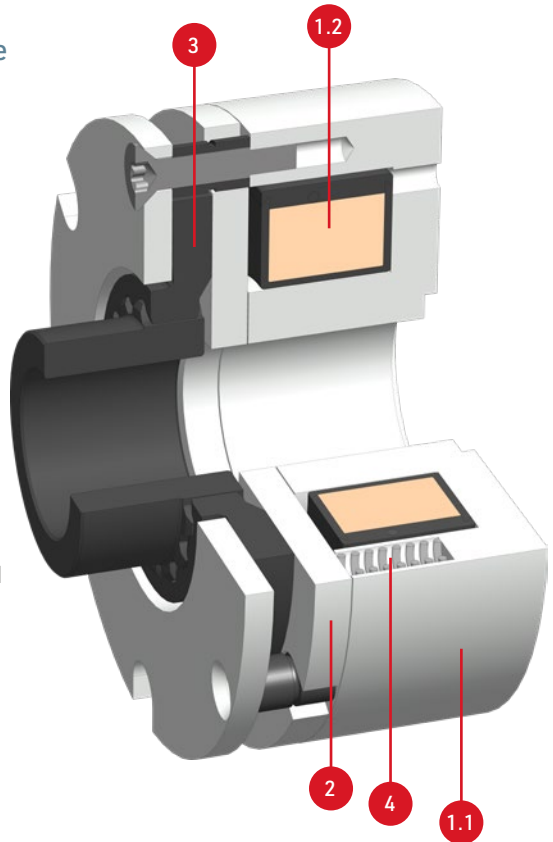


Abb. 01: Federdruckbremse Baureihe Servo Line

Drehmomentbegriffe nach DIN VDE 0580 (Auszug)

Schaltmoment M_1

Bei schlupfender Kupplung bzw. beim Bremsvorgang im Wellenstrang wirkendes dynamisches Drehmoment

Übertragbares Drehmoment M_4

Größtes statisches Drehmoment, mit der die geschlossene Kupplung bzw. Bremse ohne Eintreten von Schlupf belastet werden darf

Nennmoment M_2

Das vom Hersteller dem Gerät oder der Komponente zur Bezeichnung oder Identifizierung zugeordnete Schaltmoment M_1

Lastmoment M_g (nicht abgebildet)

Am Abtrieb der geschlossenen Kupplung bzw. Bremse wirkendes Drehmoment

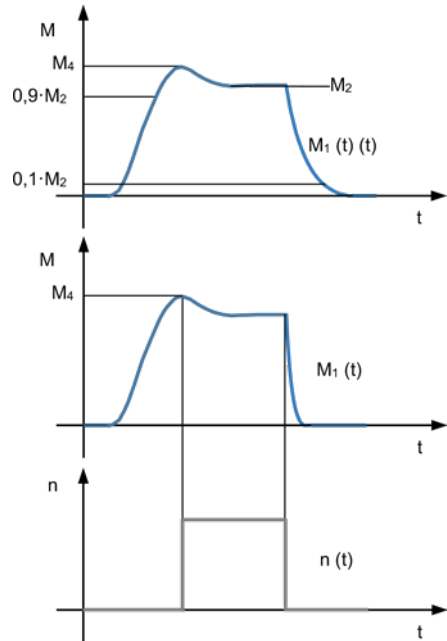


Abb. 02/1: Drehmomente bei Kupplungen und Bremsen

Zeitbegriffe nach DIN VDE 0580 (Auszug)

Ansprechverzug beim Einkuppeln t_{11}

Zeit vom Einschalten des Stromes (schließende Systeme) bzw. vom Ausschalten des Stromes (öffnende Systeme) bis zum Beginn des Drehmomentanstieges

Anstiegszeit t_{12}

Zeit vom Beginn des Drehmomentanstieges bis zum Erreichen von 90 % des Nennmoments M_2

Einkuppelzeit t_1

Summe aus Ansprechverzug t_{11} und Anstiegszeit t_{12}

Ansprechverzug beim Trennen t_{21}

Zeit vom Ausschalten des Stromes (schließende Systeme) bzw. vom Einschalten des Stromes (öffnende Systeme) bis zum Beginn des Drehmomentabfalls

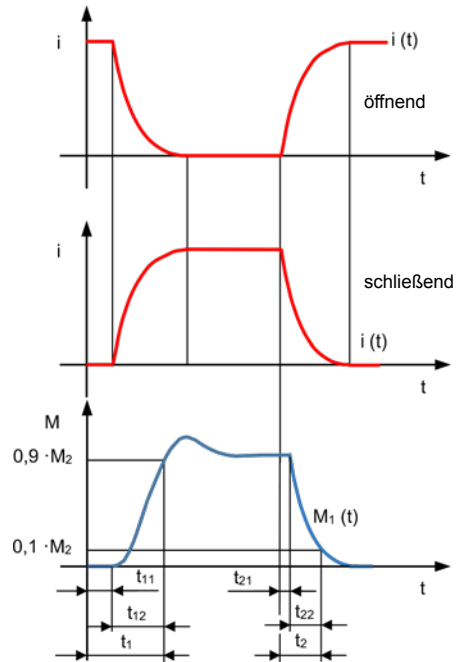


Abb. 02/2: Einkuppel- und Trennvorgang

Abfallzeit t_{22}

Zeit vom Beginn des Drehmomentabfalls bis zum Erreichen von 10 % des Nennmoments M_2

Trennzeit t_2

Summe aus Ansprechverzug t_{21} und Abfallzeit t_{22}

Weitere Begriffe und Definitionen nach DIN VDE 0580 (Auszug)

Schaltarbeit einer Kupplung**bzw. Bremse W**

Infolge eines Schaltvorganges in der Kupplung durch Reibung erzeugte Wärme

Höchst-Schaltarbeit W_{\max}

Schaltarbeit, mit der die Kupplung bzw. Bremse maximal belastet werden darf

Schaltleistung einer Kupplung**bzw. Bremse P**

In Wärme umgesetzte zulässige Schaltarbeit je Zeiteinheit

Höchst-Schaltleistung P_{\max}

In Wärme umgesetzte maximal zulässige Schaltarbeit je Zeiteinheit



Magnetische Kenngrößen

Die Gesetzmäßigkeiten elektromagnetischer Systeme basieren auf physikalisch-magnetischen Kenngrößen, die im Zusammenwirken die Funktion der elektromagnetischen Kupplung und Bremse beeinflussen.

- Magnetische Spannung (Durchflutung) Θ
- Magnetischer Fluss Φ
- Magnetische Feldstärke H
- Magnetische Flussdichte (Induktion) B
- Magnetische Leitfähigkeit (Permeabilität) μ
- Magnetischer Widerstand R_m

Elektromagnetische Energieumwandlung

Die Umwandlung der elektrischen Energie in mechanische Energie findet im Elektromagnet nicht direkt, sondern über die Energie des magnetischen Feldes statt. Im Falle des Elektromagneten spricht man daher von einer „*elektro-magneto-mechanischen*“ Energieumwandlung¹. Wie bei allen Energiewandlern, gilt auch beim Elektromagneten der Satz von der Erhaltung der Energie.