

# **Elektrische Antriebe in der Bühnentechnik Stand: 04.03.1997**

**Erschienen in der  
Bühnentechnischen Rundschau 06/1997**

## **INHALTSVERZEICHNIS**

1	EINLEITUNG .....	2
2	GRUNDPRINZIP .....	2
3	MOTOREN.....	3
3.1	Gleichstrommotor .....	3
3.2	Elektronisch kommutierter Motor .....	3
3.3	Drehstrom-Asynchronmotor .....	3
3.4	Drehstrom-Synchronmotor .....	4
4	STELL- UND REGELUNGSGLIEDER .....	4
4.1	Allgemeines .....	4
4.2	Stell- und Regelungsglieder für Gleichstrommotoren .....	4
4.2.1	Netzgeführter Stromrichter .....	4
4.2.2	Gleichstrom-Servoverstärker .....	4
4.3	Umrichter für elektronisch kommutierte Motoren.....	5
4.4	Stellglieder für Drehstrommotoren .....	5
4.4.1	Netzbetrieb.....	5
4.4.2	Sanftanlaufgerät.....	5
4.4.3	Frequenzumrichter.....	5
4.4.4	Digitaler Pulsumrichter .....	5
5	RESÜMEE .....	6

Rudolf Timmes  
Teta Automation GmbH  
Marie-Curie-Straße 5  
47475 Kamp-Lintfort  
Tel. 02842 96642-12  
Fax 02842 96642-27  
Email [Timmes@Teta-Automation.de](mailto:Timmes@Teta-Automation.de)

RUDOLF TIMMES

## Elektrische Antriebe in der Bühnentechnik

### 1 EINLEITUNG

Die elektrische Antriebstechnik hat in Theatern und Mehrzweckhallen eine große Verbreitung gefunden. In nahezu allen Häusern sind Elektromotoren im Einsatz. Selbst diejenigen Häuser, die über hydraulische Antriebe verfügen, können zum Betrieb der Pumpen ihrer Druckstationen auf Elektromotoren nicht verzichten.

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Motoren und dazugehöriger Stell- und Regelungsglieder ist es nicht immer trivial, den Überblick zu behalten. Das gilt besonders dann, wenn für einen bestimmten Anwendungsfall ein geeigneter Antrieb ausgewählt werden muß. Der vorliegende Aufsatz soll dabei eine kleine Hilfestellung leisten. Dazu werden die in der Bühnentechnik sinnvoll einsetzbaren Motoren in ihrem prinzipiellen Aufbau kurz erläutert. Aus dem Aufbau lassen sich unmittelbar ihre spezifischen Eigenschaften ableiten. In die Betrachtung einbezogen werden die dazugehörigen Stell- und Regelungsglieder, da durch sie die Funktionalität und damit die Einsatzmöglichkeiten der Motoren maßgeblich geprägt werden. In einem abschließenden Resümee werden die einzelnen Antriebsarten miteinander verglichen.

Um den Rahmen eines Übersichtsaufsatzes nicht zu sprengen, mußten einige physikalische und technologische Grundlagen als bekannt vorausgesetzt werden. Auf Wunsch der DTHG-Mitglieder bin ich gerne bereit, diese Lücken durch Vorträge z.B. bei den Regionaltagungen zu schließen.

Wesentliche Kriterien zur Bewertung der Eigenschaften eines Antriebs sind das Motormoment, die maximale Drehzahl, der Drehzahlstellbereich, das Verhalten bei niedrigen Drehzahlen bis hin zum Stillstand, die Abbremsseigenschaften, die Regelgüte, die Geräuschemission, der Wartungsaufwand und nicht zuletzt die Investitions- und Unterhaltungskosten.

Unter dem Drehzahlstellbereich versteht man das Verhältnis von maximaler zu minimaler ruckfrei fahrbarer Betriebsdrehzahl. Motoren, die in Moment, Drehzahl und Position sehr feinfühlig regelbar sind und auch im Stillstand ein hinreichendes Motormoment abgeben, werden häufig als **Servoantriebe** bezeichnet. Mit ihnen sind Drehzahlstellbereiche von ca. 1:2.000 und besser erreichbar.

### 2 GRUNDPRINZIP

Alle in der Antriebstechnik gebräuchlichen Motoren basieren auf demselben Prinzip. Stator und Rotor sind mit Magneten ausgerüstet, die durch ihre anziehende bzw. abstoßende Wirkung Drehmomente im Rotor erzeugen. Um eine kontinuierliche Rotorbewegung zu erreichen, sind ein umlaufendes und ein in der Regel stationäres Feld erforderlich. Dabei sind zwei Möglichkeiten gegeben: entweder wird im Stator ein umlaufendes Feld erzeugt, welches den Rotor mit seinem stationären Feld mitzieht, oder aber der Rotor wird mit einem Wechselfeld belegt, mit dem er sich am stationären Statorfeld abstoßt.

Magnetfelder können durch Permanentmagneten oder durch Elektromagneten erzeugt werden. Permanentmagneten weisen ein konstantes, stationäres Feld auf. Umlaufende Magnetfelder lassen sich mit ihnen nicht erzeugen. Motoren ohne zusätzlichen Elektromagneten sind daher nicht denkbar. Elektromagneten bieten gegenüber Permanentmagneten den wesentlichen Vorteil, daß die Stärke ihrer Kraftwirkung über den Stromfluß stufenlos einstellbar ist. Noch wichtiger ist, daß die Richtung der Kraftwirkung umpolbar ist. Nur so lassen sich die neutralen Zonen überbrücken, in denen ungleichnamige Pole sich gegenüberstehen und aufgrund ihrer Anziehung jegliche weitere Bewegung verhindern würden. Diese Feldumschaltung (Kommutierung) kann rein mechanisch, aber auch elektronisch erfolgen.

Der zum Aufbau der Motormomente erforderliche Stromfluß kann wegen seiner Wärmewirkung ein erhebliches Problem darstellen. So ist allen Motoren mit einem stromdurchflossenen Rotor gemeinsam, daß die Wärme gerade dort auftritt, wo sie am schlechtesten abgeführt werden kann, nämlich im Innern des Motors. Das kann besonders im bühnentechnischen Einsatz zu Problemen führen, weil aus Geräuschemissionsgründen in der Regel auf Lüfter verzichtet werden muß. Auch die in manchen Industriezweigen einsetzbaren Wasser- oder Ölkühlungen sind für die Bühnentechnik weniger geeignet. Ist der Antrieb für Dauerfahrten vorgesehen, so kann das Wärmeproblem nur durch den Einsatz von Motoren höherer Leistungsklassen gelöst werden, die über vergrößerte Oberflächen die Wärme besser an die Umgebung abgeben. Generell müssen bei der Motorauswahl die im Theaterbereich üblichen leistungsmindernden hohen Umgebungstemperaturen berücksichtigt

werden. Bei Motoren, die nur mit Statorwicklungen ausgerüstet sind und deren Rotor mit Permanentmagneten belegt ist, ist das Wärmeproblem weit weniger ausgeprägt, da die Wärme über das Gehäuse leicht abgeführt werden kann. Motoren dieser Bauart sind in der Regel daran zu erkennen, daß sie ohne Kühlrippen auskommen.

Elektromotoren können auch als Generatoren arbeiten, d.h. daß sie zum Betrieb keine Energie benötigen, sondern Energie erzeugen. Dieser Betriebsfall kann bei Abwärtsfahrten unter Last und besonders beim Abbremsen auftreten. Die an die Steuerung zurückgespeiste, überschüssige Energie darf nicht zu einer Zerstörung der Steuerung führen. Abhilfe schaffen Bremswiderstände oder Netzrückspeisungen. Gibt es im Generatorbetrieb keinen Abnehmer für die Energie, wie es z.B. bei defekten Bremswiderständen auftreten kann, so „rauscht der Antrieb durch“, er kann nur noch durch mechanische Bremsen angehalten werden.

Je nach Art der Magnetfelderzeugung und Steuerung unterscheidet man die folgenden Hauptmotorarten: Gleichstrommotoren, elektronisch kommutierte Motoren und die Drehstrommotoren Asynchron- und Synchronmotor.

Für den Betrieb der Motoren sind Stell- und Regelungsglieder erforderlich. Ein direkter Netzbetrieb ist nur in Ausnahmefällen möglich. Schon bei Motorleistungen ab 4 KW müssen zur Vermeidung von Netzrückwirkungen die Anfahrströme begrenzt werden.

Je nach Motorart und gewünschten Bewegungseigenschaften kommen die folgenden Geräte in Frage: Gleichstrommaschinen werden meist mit netzgeführten Stromrichtern oder Servoverstärkern betrieben. Elektronisch kommutierte Motoren benötigen spezielle Umrichter (EC-Servoverstärker). Für Drehstrommotoren stehen Frequenzumrichter und speziell für Asynchronmotoren digitale Pulsumrichter mit feldorientierter Regelung zur Verfügung.

Damit ein Motor zu jedem Zeitpunkt die erforderlichen Momente und Drehzahlen abgeben kann, muß er geregelt betrieben werden. Dazu wird sein Istzustand kontinuierlich gemessen. Als Maß für das Moment wird beim Gleichstrom- und beim elektronisch kommutierten Motor der Motorstrom erfaßt. Beim Asynchronmotor lie-

gen die Verhältnisse komplizierter, da Motorstrom und Moment nichtlinear miteinander verknüpft sind. Hier sind noch weitere Meßwerte erforderlich. Die Drehzahl wird mit analogen oder digitalen Tachogeneratoren, die meist integraler Bestandteil der Motoren sind, gemessen. Diese Meßgrößen werden dem Stell- und Regelungsglied als Istsignal zugeführt.

Die Positionsregelung erfolgt durch übergeordnete Rechnersysteme, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

## 3 MOTOREN

### 3.1 Gleichstrommotor

Bis vor etwa 10 - 15 Jahren wurden drehzahlregelbare Antriebe fast ausschließlich durch Gleichstrommotoren realisiert.

Die Statorerregung erfolgt je nach Bauart des Motors durch Permanent- oder Elektromagneten. Der Rotor ist in jedem Falle mit einer Wicklung versehen. Der Strom wird über Bürsten und einen Kollektor (= Kommutator) so zugeführt, daß er im Bereich der neutralen Zone seine Flußrichtung ändert und damit eine Umkehr der Rotorkraftwirkung bewirkt, so daß eine umlaufende Bewegung erzielt wird.

Diese Art der mechanischen Kommutierung ist mit einigen Nachteilen behaftet. So wird bei höheren Drehzahlen der Stromübergang zunehmend erschwert. Dadurch müssen der Stromfluß und damit das Motormoment eingeschränkt werden. Das bedeutet in der Praxis, daß aufgrund dieser „Kommutierungsgrenze“ die Motoren erheblich überdimensioniert werden müssen, wenn die Nennlast auch bei Maximalgeschwindigkeit zur Verfügung stehen soll. Im Bereich von niedrigen Drehzahlen ist die Kühlung eingeschränkt und es besteht die Gefahr des Festbrennens von Kommutatorlamellen. Die Ankerspannung muß wegen einer begrenzten Spannungsfestigkeit der Lamellen beschränkt werden. Daher sind häufig kostenerhöhende Transformatoren notwendig. Die Wärme, die durch die Ankerwicklung im Innern des Motors entsteht, ist nur schlecht ableitbar. Der prinzipbedingte Verschleiß der Bürsten erfordert eine regelmäßige Wartung. Wegen der geringen Fahrleistungen in den Theatern stellt dieser Aspekt anders als im industriellen Fertigungsbereich keine wesentliche Einschränkung dar.

Unabhängig von der Ausführung des Ankerstromkreises haben sich für die Statorerregung neben den Permanentmagneten Elektromagneten durchgesetzt. Wird die Erregung durch einen vom Anker völlig entkoppelten Stromkreis durchgeführt, spricht man von **fremderregten Maschinen**. Bei **Ne-**

**nen**. Bei **Nebenschlußmotoren** werden der Stator und der Anker parallel geschaltet und von einer gemeinsamen Spannungsversorgung betrieben, bei **Reihenschlußmotoren** werden Stator und Anker in Reihe geschaltet, so daß sie von einem gemeinsamen Strom durchflossen werden.

Wegen ihrer sehr guten, relativ lastunabhängigen regelungstechnischen Eigenschaften haben sich in der Bühnentechnik permanenterreichte und elektrisch fremderregte Gleichstrommaschinen durchgesetzt. Der Vorteil der magnetischen Permanenterrregung liegt in einem geringeren Steuerungs- und Verkabelungsaufwand.

Sonderausführungen der Gleichstrommaschinen wie **Scheibenläufermotoren** und **Schrittmotoren** haben wegen ihrer geringen Motormomente in der Bühnentechnik keine Bedeutung.

### 3.2 Elektronisch kommutierter Motor

Beim elektronisch kommutierten Motor (EC-Motor) werden die prinzipbedingten Nachteile des durch Permanentmagneten erregten Gleichstrommotors, wie die Wärmeentwicklung im Rotor und Problematik der mechanischen Kommutierung, umgangen. Dazu wird der Aufbau des Motors im Vergleich zum Gleichstrommotor genau umgekehrt: Die Wicklung wird in den Stator verlegt und die Magnete in den Rotor. Dabei ist anzumerken, daß die Statorwicklung dreiphasig ausgeführt wird. Da nunmehr der Rotor mit einem stationären, nicht umpolbaren Feld belegt ist, entfällt die mechanische Kommutierung des Rotors. Statt dessen erfolgt eine elektronische Kommutierung des Ständerstromes. Dazu wird die aktuelle Rotorstellung meist mit Hilfe eines Hallgenerators gemessen und einer Steuerungseinheit zugeführt, die im Ständer ein umlaufendes Magnetfeld erzeugt.

Elektronisch kommutierte Motoren können ohne ihre dazugehörenden Umrichter nicht betrieben werden, sie bilden mit ihnen eine funktionsmäßige Einheit.

Ebenso wie Gleichstromantriebe sind auch elektronisch kommutierte Antriebe sehr gut regelbar. Der Momentenabfall bei hohen Drehzahlen ist weit geringer als beim Gleichstrommotor. Der Betrieb bei niedrigen Drehzahlen ist unproblematisch, da Wärme im Stator entsteht und unmittelbar an die Umgebung abgegeben werden kann. Da keine Bürsten benötigt werden, tritt kein typischer Verschleiß auf, und die Wartung kann auf ein Minimum reduziert werden. Der Motor kann anders als der Gleichstrommotor mit hohen Spannungen betrieben werden, so daß bei gleicher Lei-

stung eine geringere Stromstärke benötigt wird.

### 3.3 Drehstrom-Asynchronmotor

Ebenso wie der elektronisch kommutierte Motor arbeitet auch der Asynchronmotor ohne Kollektor und Bürsten. Der Stator des Motors ist mit einer dreiphasigen Wicklung ausgestattet, die beim Anschluß an ein Drehstromnetz ein umlaufendes Magnetfeld erzeugt, ohne daß eine zusätzliche mechanische oder elektronische Kommutierung notwendig wäre. Je nach Art der Wicklung können die Felder zweipolig, vierpolig, sechspolig usw. ausgeführt werden. Ein zweipoliges Feld führt am 50-Hz-Netz zu einer Umlauffrequenz von  $3.000 \text{ min}^{-1}$ , ein vierpoliges zu  $1.500 \text{ min}^{-1}$ , ein sechspoliges zu  $1.000 \text{ min}^{-1}$ . Für die Bühnentechnik kommen wegen der drehzahlabhängigen Geräuscherhöhung nur vier oder besser sechspolige Motoren zum Einsatz.

Bei der Erzeugung des Magnetfelds des Rotors macht man sich zunutze, daß sich ändernde Magnetfelder in elektrischen Leitern Spannungen induzieren. Um diesen Effekt auszunutzen, wird der zylindrische Rotor an seiner Oberfläche mit Stäben belegt, die an den Stirnseiten kurzgeschlossen werden, so daß die Form eines Käfigs entsteht. In den Stäben fließen Ausgleichsströme, durch die Magnetfelder erzeugt werden. Wegen dieser speziellen Rotorart wird der Motor auch als **Kurzschlußläufer** oder **Käfigläufer** bezeichnet.

Rotorspannungen werden nur induziert, wenn sich das Statormagnetfeld relativ zur Rotorbewegung ändert. Stimmen Rotordrehzahl und Statorfrequenz überein, wird keine Spannung erzeugt, es fließt demnach auch kein Strom, es wird kein Magnetfeld aufgebaut und es entsteht kein Moment. Die Rotordrehzahl muß daher immer geringer als die Statorfrequenz sein. Diese Differenz wird Schlupf genannt. So liefert ein vierpoliger Standardmotor mit einer elektrischen Umlauffrequenz von  $1.500 \text{ min}^{-1}$  im Nennbetrieb nur eine Wellendrehzahl von ca.  $1.380 \text{ min}^{-1}$ .

Als Sonderbauform werden Asynchronmotoren mit zwei und mehr unabhängigen Wicklungen mit verschiedenen Polzahlen angeboten. Durch Umschaltung der Wicklung (**Polumschaltung**) können so mit einem Motor verschiedene Festdrehzahlen eingestellt werden. Die Umschaltung ist auch im laufenden Betrieb möglich.

Der Kurzschlußläufer hat sich wegen seines einfachen mechanischen Aufbaus zu einem kostengünstigen Industriestandardmotor entwickelt, der sich durch einen geringen Verschleiß und damit ein-

hergehend einen geringen Wartungsaufwand auszeichnet. Er ist prinzipiell weniger gut regelbar, das gilt insbesondere bei niedrigen Drehzahlen. Erst durch einen erhöhten regelungstechnischen Aufwand können ihm Servoeigenschaften „anerzogen“ werden. Doch dann sind hohe Anforderungen an die Wicklungen zu stellen, die von Standard-Normmotoren kaum noch erreicht werden.

Eine Variante des Asynchronmotors ist der **Schleifringläufer**. Er ist mit der gleichen Statorwicklung ausgerüstet wie der Kurzschlußläufer. Die drei Wicklungen des Läufers sind jedoch nicht kurzgeschlossen, sie werden über Schleifringe aus dem Motor herausgeführt. Über variable Widerstände kann das Anlaufverhalten des Motors eingestellt werden. Werden die drei Wicklungen kurzgeschlossen, so unterscheidet sich der Schleifringläufer in seinen Eigenschaften nicht mehr vom Kurzschlußläufer.

### 3.4 Drehstrom-Synchronmotor

Der Stator des Synchronmotors ist genauso aufgebaut wie der des Asynchronmotors. Auch hier wird beim Anschluß an ein Drehstromnetz ein umlaufendes Magnetfeld erzeugt. Der Läufer wird entweder mit Permanentmagneten belegt, oder aber er erhält sein Magnetfeld durch eine Wicklung, die über Schleifringe konstant mit Strom versorgt wird. Der Läufer wird von dem umlaufenden Ständerfeld synchron mitgezogen. Da das Läuferfeld stets zur Verfügung steht, kann dieser Motor im Gegensatz zum Asynchronmotor auch im Stillstand ein Moment abgeben.

Für den direkten Netzbetrieb ohne weitere Hilfsmittel ist der Synchronmotor im allgemeinen ungeeignet, da er aufgrund seiner Rotorträgheit die Synchrondrehzahl gegenüber dem umlaufenden Statorfeld nicht erreichen kann. Lediglich für sehr kleine Leistungen ist er einsetzbar. So wird er häufig in netzgeführten Uhren eingesetzt, deren Genauigkeit allein durch die Präzision der Frequenz des europäischen Verbundnetzes bestimmt wird.

Wegen ihres ungünstigen Anlaufverhaltens ist die Synchronmaschine als Motor kaum brauchbar, sie wird in erster Linie als Generator eingesetzt, wo sie durch einen externen Hilfsantrieb zunächst auf die Netzfrequenz beschleunigt werden muß.

Der **Reluktanzmotor** stellt einen Sonderfall der Synchronmaschine dar. Er ist für den Anlauf mit einer zusätzlichen Asynchronwicklung ausgestattet. Da er jedoch relativ teuer ist und einen schlechten Wirkungsgrad aufweist, wird er selten eingesetzt.

Der besondere Vorteil des Synchronmotors liegt darin, daß er der vorgegebenen Netzfrequenz - wenn er sie einmal erreicht hat - mit äußerster Präzision folgt. Das bedeutet auch, das mehrere Motoren, die an demselben Netz betrieben werden, absolut synchron laufen. Wenn die Statorfrequenz einstellbar ist, kann der Läufer aus dem Stillstand „abgeholt“ werden und unter Berücksichtigung seiner Trägheit auf jede beliebige Drehzahl bis hin zu einer maximal zulässigen Drehzahl eingestellt werden.

Der Synchronmotor ist ähnlich aufgebaut wie der elektronisch kommutierte Motor. Der wesentliche Unterschied liegt allein darin, daß der EC-Motor zusätzlich einen Lagegeber zur Messung der aktuellen Rotorstellung enthält.

## 4 STELL- UND REGULUNGSGLIEDER

### 4.1 Allgemeines

Die spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Motorarten werden erst mit Hilfe der Stell- und Regelungsglieder nutzbar gemacht. Sie bestimmen maßgeblich den Drehzahlstellbereich und die drehzahlabhängigen Motormomente, letztlich also die Eignung eines Motors für bestimmte Anwendungsfälle.

### 4.2 Stell- und Regelungsglieder für Gleichstrommotoren

#### 4.2.1 Netzgeführter Stromrichter

Die zum Betrieb von Gleichstrommaschinen erforderliche Gleichspannung wird aus der dreiphasigen Netzspannung mit Hilfe von gesteuerten sechspulsigen Thyristor-Gleichrichterbrücken durch Phasenanschnitt erzeugt. Mit den Brücken wird sowohl der motorische als auch der generatorische Betrieb abgedeckt. Die Öffnungszeiten der jeweiligen Thyristorzweige werden durch eine integrierte Strom- und Drehzahlregelung vorgegeben. Zum Betrieb von fremderregten Maschinen ist die Stromversorgung für die Erregerwicklung bereits in vielen Geräten integriert.

Mit Stromrichtern lassen sich wegen einer durch das Netz vorgegebenen geringen Taktfrequenz zwar keine Servoqualitäten erzielen, Drehzahlregelbereiche von ca. 1:100 sind aber durchaus üblich. Bei niedrigeren Drehzahlen wird das Verhalten zunehmend ruckhafter, aber dem Antrieb steht ein genügendes Moment zur Verfügung, um Lasten auch im „Stillstand“ zu halten.

Die regelungstechnischen Qualitäten reichen in vielen Fällen aus, insbesondere dann, wenn die Maximalgeschwindigkeit

deutlich niedriger als 1,2 m/s ist. Höhere Getriebeübersetzungen führen zu niedrigeren ruckfrei fahrbaren Geschwindigkeiten.

Stromrichter sind bewährte, relativ kostengünstige Komponenten, die auch für höhere Leistungsanforderungen erhältlich sind. Mit ihnen können auch Schwerlastzüge und Bühnenpodien betrieben werden.

Häufig bieten Stromrichter die einzige wirtschaftlich vertretbare Möglichkeit, ältere Maschinerien, deren Mechanik noch brauchbar ist, mit einer neuen Steuerung auszurüsten. Die früher vielfach eingesetzten Gleichstrommotoren, die ja keinem hohen Verschleiß unterworfen waren, können meist weiterhin genutzt werden.

Nachteilig bei Stromrichtern ist die Geräuscentwicklung. Ein Netzbrummen von 300 Hz ist unüberhörbar.

### 4.2.2 Gleichstrom-Servoverstärker

Bis vor ca. 10-15 Jahren wurden regelungstechnisch hochwertige Antriebe mit Gleichstrommotoren und Transistor-Servoverstärkern realisiert.

Bei diesen Verstärkern wird über einen Drehstrom-Transformator und eine 6-pulsige Brückenschaltung ein Gleichstrom-Zwischenkreis gespeist, der mit Hilfe von Kondensatoren gepuffert wird. Die Gleichspannung wird dem Motor über einen vierpoligen Wechselrichter zugeführt. Die Transistoren der Brücke werden mit Frequenzen von ca. 4 - 10 kHz getaktet betrieben. Mit Hilfe der Pulsbreitenmodulation und einer hochwertigen Strom- und Drehzahlregelung werden lastunabhängig sehr große Drehzahl-Stellbereiche von mindestens 1:2.000 realisiert. Im Bremsbetrieb wird die überschüssige Energie in den Zwischenkreis zurückgespeist und über eine Ballastschaltung Bremswiderständen zugeführt.

Servoverstärker stehen nur für eingeschränkte Motorströme zur Verfügung. Daher wurden in vielen Theatern nur für Punktzüge und Prospektzüge geringerer Last Servoverstärker eingesetzt. Für Schwerlastzüge und besonders Untermaschinerien wurde auf Stromrichter zurückgegriffen. Eine inhomogene Technik war das Resultat.

Neuanlagen werden kaum noch mit der Gleichstrom-Servoverstärkertechnik ausgerüstet. Ersatzteile sind jedoch von einigen Herstellern noch lieferbar. Weiter- oder gar Neuentwicklungen wird es nicht mehr geben.

### 4.3 Umrichter für elektronisch kommutierte Motoren

Umrichter für elektronisch kommutierte Antriebe sind ähnlich aufgebaut wie die Gleichstrom-Servoverstärker. Sie arbeiten ebenfalls mit einem Gleichstrom-Zwischenkreis, der allerdings meist statt von einer Gleichstrombrücke von einem Wechselrichter gespeist wird, mit dem überschüssige Energie ins Netz zurückgespeist werden kann. Auf Netztransformatoren wird verzichtet, da elektronisch kommutierte Motoren mit höheren Spannungen arbeiten als Gleichstrommotoren. Ein 6-pulsiger, von einer Pulsbreitenmodulation gesteuerter Wechselrichter versorgt entsprechend der aktuellen Rotorposition die drei Statorwicklungen mit Strom. Bei älteren Geräten erfolgt der Stromübergang von einer Phase auf die nächste meist trapezförmig. Kleine Momentensprünge im Bereich der Übergänge waren die Folge. Bei einem sinusförmigen Übergang, wie er heute meist realisiert ist, wird dieser Nachteil vermieden.

Während bis vor einigen Jahren als elektronische Schalter ausschließlich Transistoren eingesetzt wurden, ist man inzwischen zu IGBTs (insulated gate bipolar transistor) übergegangen, die sich durch eine Kurzschlußfestigkeit von ca. 10 Sekunden sowie eine erhöhte Taktfrequenz bei gleichzeitiger Reduzierung der Ansteuerleistung auszeichnen.

Elektronisch kommutierte Antriebe vermeiden die typischen Nachteile der Gleichstromtechnik. Bei ähnlich gutem Regelungsverhalten sind sie auch für deutlich höhere Motormomente erhältlich. Hervorzuheben ist die geringe Geräuschentwicklung. Das gilt besonders bei Anwendung der Sinuskommütierung.

## 4.4 Stellglieder für Drehstrommotoren

### 4.4.1 Netzbetrieb

Der direkte Betrieb von Asynchronmotoren am Drehstromnetz führt zu einem ruckhaften Hochlauf, wobei die Hochlaufzeiten stark lastabhängig sind. Zudem tritt während der Hochlaufphase ein gegenüber dem Nennbetrieb um etwa den Faktor 8 stark erhöhter Motorstrom auf, der zu unerwünschten Netzrückwirkungen führt. Aus diesem Grunde dürfen nur Antriebe bis max. 4 KW direkt ans Netz angeschlossen werden. Die nach dem Hochlauf erreichte Drehzahl ist lastabhängig. Für synchrone Gruppenfahrten ist der direkte Netzbetrieb daher völlig ungeeignet.

### 4.4.2 Sanftanlaufgerät

Durch Sanftanlaufgeräte wird der erhöhte Strombedarf in der Hochlaufphase auf ein erträgliches Maß reduziert. Dadurch steht ein geringeres Moment für die Beschleunigung zur Verfügung, so daß sich auch mechanisch ein sanfteres Anfahren ergibt.

Das Abbremsen erfolgt nach wie vor sehr abrupt. Erst wenn ein Sanftanlaufgerät auch eine Sanftauslauffunktion umfaßt, ist mit einer Verbesserung zu rechnen. In jedem Fall erhalten bleibt die Problematik der Lastabhängigkeit. So kann z.B. beim Betrieb einer Winde unter Vollast in der Startphase das Moment zu gering sein, um die Last zuverlässig zu halten. Andererseits kann bei einem lastfreien Betrieb der mechanische Sanftanlauf zu wenig ausgeprägt sein.

Eine wesentlich bessere, wenngleich teurere Lösung, kann mit Frequenzumrichtern erreicht werden.

### 4.4.3 Frequenzumrichter

Mit Hilfe von Frequenzumrichtern wird aus dem Netz mit seiner starren Frequenz von 50Hz ein auf Drehstrommotoren zugeschnittenes Spannungssystem mit variabler Frequenz geschaffen. Damit ist es möglich, die Drehzahl von Synchron- und Asynchronmotoren zu steuern.

Die Netzspannung wird über eine Drehstrombrücke in einen Gleichstrom-Zwischenkreis mit einem Pufferkondensator eingespeist. Ein Wechselrichter formt durch entsprechende Ansteuerung seiner Brücke aus dem Gleichstrom einen frequenzvariablen Drehstrom, der dem Motor zugeführt wird. Im Generatorbetrieb wird über den Wechselrichter Strom in den Zwischenkreis zurückgespeist. Steigt die Spannung des Zwischenkreises über einen Schwellwert an, wird über einen elektronischen Schalter die überschüssige Energie einem Bremswiderstand zugeführt und dort in Wärme umgewandelt.

Synchronmotoren folgen exakt der vorgegebenen Frequenz, während bei Asynchronmotoren mit einer deutlichen Lastabhängigkeit der Drehzahl zu rechnen ist.

Frequenzumrichter erzeugen üblicherweise Drehfelder im Frequenzbereich zwischen 2 und 50 Hz. Damit lassen sich Synchronmotoren in einem Drehzahlstellbereich von 1:25 betreiben. Ungeregelte Asynchronmotoren erreichen nur einen Stellbereich von 1:10. Mit Tachorückführung und Drehzahlregelung läßt sich jedoch auch für Asynchronmotoren der Bereich auf 1:25 ausdehnen.

Einzelne Hersteller geben für Asynchronmotoren Stellbereiche von 1:100 an. Grenzen sind jedoch dadurch gesetzt, daß mit abnehmender Frequenz in den Läuferwicklungen kaum noch Spannungen induziert werden, so daß die Läufermomente entsprechend abnehmen. Dieser Effekt läßt sich nur teilweise durch eine Erhöhung der Ständerspannung bei niedrigen Drehzahlen kompensieren. Eine weitere Möglichkeit der Erweiterung des Drehzahlstellbereichs liegt in der Verdopplung der Motordrehzahl durch Erhöhung der Drehfeldfrequenz von 50 auf 100 Hz. Diese Art der Verbesserung von technischen Daten dürfte schon allein aus Geräuschgründen für die Bühnentechnik kaum tragbar sein. Hinzu kommt, daß Standard-Normmotoren nicht für den Betrieb mit erhöhten Frequenzen ausgelegt sind.

Mit Frequenzumrichtern lassen sich bei überlagerter Positionsregelung durchaus schon synchrone Gruppenfahrten ausführen. Es muß jedoch sichergestellt werden, daß alle beteiligten Antriebe ihre minimal zulässige Drehzahl nicht unterschreiten. Richtungswechsel während der Bewegung sind nicht zulässig.

### 4.4.4 Digitaler Pulsumrichter

Gleichstromantriebe und elektronisch kommutierte Antriebe sind sehr gut regelbar, da das Stator- und das Läuferfeld getrennt einstellbar sind. Eines der beiden Felder wird konstant gehalten, z.B. durch den Einsatz von Permanentmagneten, während das andere kontinuierlich verändert wird. Beim Asynchronmotor liegen die Verhältnisse grundlegend anders. Hier sind das Stator- und das Läuferfeld nicht entkoppelt. Ein Läuferfeld, welches ja durch Induktion entsteht, kann sich nur ausbilden, wenn sich das Statorfeld bewegt. Das Läuferfeld hängt also von der Veränderung des Statorfeldes ab. Um dennoch eine gute Regelbarkeit zu erreichen, werden die Felder durch mathematische Transformationen entkoppelt. Eine weitere Problematik ergibt sich dadurch, daß das Läuferfeld für die Regelung bekannt sein muß. Meßtechnisch kann es jedoch kaum erfaßt werden, da es im rotierenden Teil anliegt und die Meßwerte nach außen geführt werden müßten. Abhilfe schafft ein mathematisches Modell, welches auf der Basis der meßbaren Größen Strangspannungen, Strangströme, Ständerfrequenz und Drehzahl das Läuferfeld nachbildet.

Erst durch einen erheblichen mathematischen Aufwand gelingt es, eine definierte Abhängigkeit zwischen Stator- und Rotorfeld zu erzeugen. Damit ist die Grundlage für eine dynamische und präzise Regelung auf der Basis der „feldorientierten Rege-

lung“ gegeben. Die erreichbare Regelgüte ist mit der von Gleichstromantrieben und EC-Servoantrieben durchaus vergleichbar.

Die Wicklungen von Standard-Asynchronmotoren sind in der Regel nicht für den hochdynamischen Betrieb mit Pulsrichter ausgelegt. Rückfragen beim Motorhersteller sind unumgänglich.

## 5 RESÜMEE

Bild 5-1 gibt einen Überblick über die Einordnung der beschriebenen Motorarten in die Klassen Gleichstrommotor, elektronisch kommutierter Motor und Drehstrommotor. In der bühnentechnischen Praxis haben sich permanent- und fremderregte Gleichstrommotoren, elektronisch

kommutierte und Asynchron-Kurzschlußläufermotoren bewährt.

Die grundlegenden Eigenschaften der drei Servo-Motorarten Gleichstrommotor, elektronisch kommutierter Motor und Asynchronmotor sind in Tabelle 5-1 zusammengefaßt.

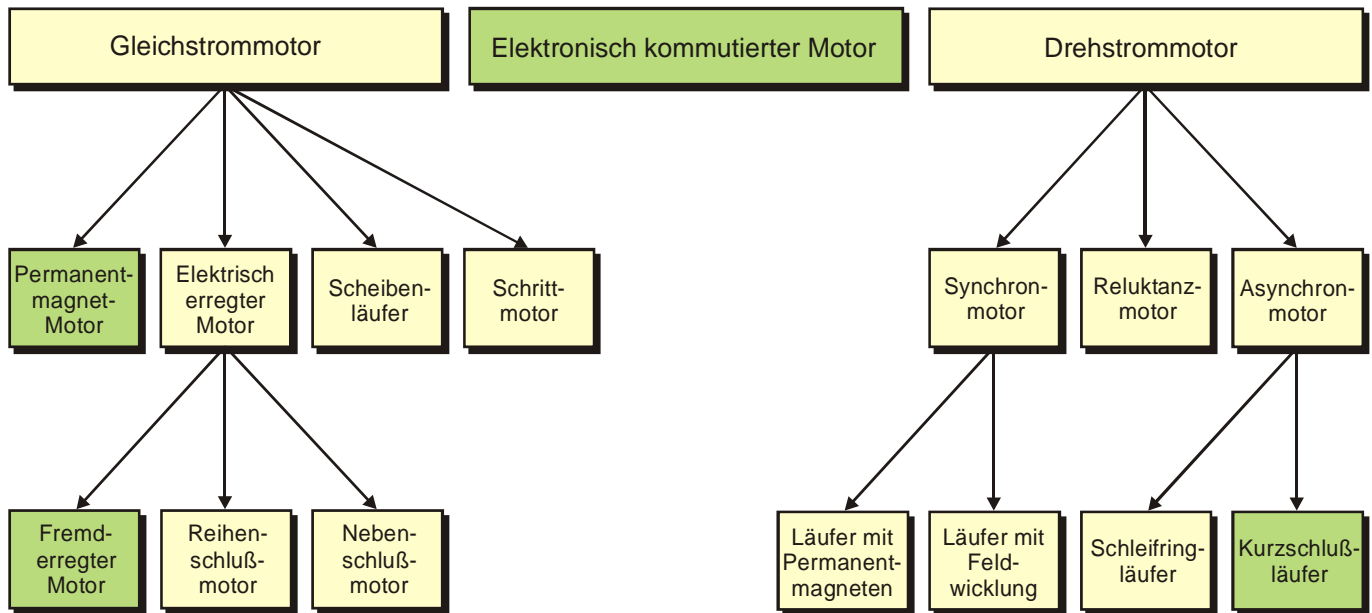


Bild 5-1: Klassifizierung elektrischer Antriebe

Eigenschaften	Gleichstrom-Servomotor	Elektronisch kommutierter Motor	Asynchron-Servomotor
Aufbau des Motors	aufwendig	aufwendig	einfach
Bürsten	ja	nein	nein
Netzanschluß	Transformator	direkt	direkt
Energierückspeisung	nein	Standard	möglich
Motorstrom	hoch	niedrig	niedrig
Kabelquerschnitte	hoch	gering	gering
hohe Schutzart	aufwendig	einfach	einfach
Verschleiß	relativ hoch	gering	gering
Wartung	erforderlich	nein	nein
Wärmeableitung	ungünstig	einfach	ungünstig
Temperaturüberwachung	schwierig	einfach	schwierig
Dynamik	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Regelverhalten	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Regelaufwand	einfach	hoch	sehr hoch
Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinie	ungünstig	günstig	günstig
Notbetrieb	aufwendig	aufwendig	am 50-Hz-Netz

Tab 5-1 Eigenschaften der Servoantriebe

Wegen ähnlicher Eigenschaften wird beim Gleichstrommotor nicht zwischen permanent- und fremderregtem Motor unterschieden. Beim Asynchronmotor wurde nur der Kurzschlußläufer betrachtet. Der Schleifringläufer hat bei einem höheren mechanischen Aufwand gleiche Eigenschaften. Der Hochlauf über Stellwiderstände wird heute kaum noch genutzt.

In Tabelle 5-2 sind die spezifischen Daten und Eigenschaften der verschiedenen Motorarten im Zusammenspiel mit den für sie geeigneten Stell- und Regelungsgliedern aufgelistet. Die maximalen Motormomente und Motorleistungen geben Auskunft darüber, bis zu welchen Leistungsklassen die jeweiligen Antriebe zur Verfügung stehen. Dabei wurde von einer maximalen Drehzahl von  $1.500 \text{ min}^{-1}$  ausgegangen, die in der Regel einen vertretbaren Kompromiß zwischen der Motorgröße, durch die maßgeblich die Kosten bestimmt werden, und der Geräuschemission darstellt. Die Drehzahl-Stellbereiche und das Motormoment im Stillstand sind entscheidende Parameter im Hinblick auf die Eignung eines Antriebs für harmonisch ablaufende szenische Verwandlungen.

Motor	Sensorik	Stell- und Regellingsglied	Motormoment bei 1500 min <sup>-1</sup> max. ca. Nm	Motorleistung bei 1500 min <sup>-1</sup> max. ca. KW	Drehzahl-Stellbereich ca.	Lastabhängigkeit	Moment bei Drehzahl Null	Positionsregelung
Asynchronmotor	keine	direkter Netzbetrieb	25 <sup>1)</sup>	4 <sup>1)</sup>	1 Festdrehzahl	ja	undefiniert	unmöglich
Asynchronmotor mit Polumschaltung	keine	direkter Netzbetrieb	25 <sup>1)</sup>	4 <sup>1)</sup>	max. 4 Festdrehz.	ja	undefiniert	unmöglich
Asynchronmotor	keine	Sanftanlaufgerät	2.500	400	1 Festdrehzahl	ja	undefiniert	unmöglich
Asynchronmotor	keine	Frequenzumrichter	1.200	200	1 zu 10	ja	undefiniert	eingeschränkt
Asynchronmotor	Tacho	Frequenzumrichter	1.200	200	1 zu 25 <sup>2)</sup>	nein	undefiniert	eingeschränkt
Asynchronmotor (kein Normmotor)	Tacho, Lagegeber	Digitaler Pulsumrichter	600	100	1 zu 2000	nein	ja	sehr gut
Synchronmotor	keine	direkter Netzbetrieb	-	-	1 Festdrehzahl	nein	-	unmöglich
Synchronmotor	keine	Frequenzumrichter	1.200	200	1 zu 25	nein	nein	eingeschränkt
Reluktanzmotor	keine	Frequenzumrichter	50	8	1 zu 25	nein	nein	eingeschränkt
Fremderregter Gleichstrommotor	Tacho	Netzgeführter Stromrichter	2.000	300	1 zu 100	nein	ja	befriedigend
Permanenterregter Gleichstrommotor	Tacho	Netzgeführter Stromrichter	100	16	1 zu 100	nein	ja	befriedigend
Permanenterregter Gleichstrommotor	Tacho	DC-Servo-Verstärker	50	8	1 zu 2000	nein	ja	sehr gut
Scheibenläufermotor	Tacho	DC-Servo-Verstärker	14	2	1 zu 2000	nein	ja, aber..	sehr gut
Elektronisch kommutierter Servomotor	Tacho, Lagegeber	Umrichter	140	22	1 zu 2000	nein	ja	sehr gut

<sup>1)</sup> Beschränkung durch Netzrückwirkungen

<sup>2)</sup> Einzelne Hersteller geben auch schon 1:100 an.

Tab. 5-2: Spezifische Daten elektrischer Antriebe inkl. ihrer Stell- und Regellingsglieder

Je größer der Drehzahl-Stellbereich, desto feinfühlicher läßt sich ein Antrieb fahren. Ein exaktes Positionieren ist nur möglich, wenn auch bei niedrigsten Drehzahlen bis hin zum Stillstand noch ein hinreichendes Motormoment zur Verfügung steht. Nur dann sind auch anspruchsvolle Gruppenfahrten möglich, die neben der Drehzahlregelung zusätzlich eine rechnergestützte Positionsregelung erfordern. Als Beispiel sind zeitsynchrone Gruppenfahrten zu nennen, bei denen einzelne Antriebe im Extremfall sogar im Stillstand im geregelten Zustand gehalten werden müssen.

Sind beste Fahrqualitäten gewünscht, so kommen bei Neuanlagen nur Asynchronmotoren mit digitalen Pulsumrichtern oder elektronisch kommutierte Servomotoren mit ihren speziellen Umrichtern in Frage. Gleichstrommotoren sollten nicht mehr eingesetzt werden, da viele Hersteller Servoverstärker nicht mehr pflegen und weiterentwickeln. Für vorhandene Anlagen sind die Verstärker häufig noch als Ersatzteile erhältlich. Bei geringeren Ansprüchen an die Fahrqualität können als Alternative durchaus auch kostengünstige Stromrichter eingesetzt werden.

Alle weiteren Antriebe sind für Positionierungen nur bedingt geeignet, da mit ihnen Zielpositionen nicht geregelt angefahren werden können. Ab einer bestimmten Drehzahl wird der Antrieb abgeschaltet und mechanisch abgebremst. Diese Ab-

bremsung ist last-, richtungs- und reibungsabhängig, so daß ein vorgegebenes Ziel nur ungenau erreicht wird. Eine durchgehende Bewegung mit Fahrtrichtungskehr ist im allgemeinen Fall unmöglich, da im Bereich niedriger Drehzahlen kein oder nur ein zu geringes Moment zur Verfügung steht.

Während in der Vergangenheit Steuerungen und Regelungen in diskreter Schaltungstechnik ausgeführt wurden, sind die Hersteller inzwischen dazu übergegangen, leistungsfähige Prozeßrechner einzusetzen. Daraus ergeben sich zahlreiche Vorteile. So lassen sich wesentlich intelligentere Regelungen realisieren. Die Asynchron-Servoantriebe sind nur durch den Rechneinsatz möglich geworden. Für die Inbetriebnahme ergeben sich Vereinfachungen, da alle Parameter direkt als Zahlenwerte einstellbar sind. Dazu wird entweder ein Display und ein Tastenfeld direkt am Stellglied oder ein PC benutzt. Das umständliche Einjustieren an Potentiometern oder Trimmkondensatoren entfällt. Bei gleichartigen Antrieben kann die für einen Verstärker gefundene Parametrierung auf alle weiteren Antriebe problemlos übertragen werden. Die Langzeitstabilität wird erhöht, da sich Alterungsprobleme und Temperaturänderungen kaum noch auswirken. Schnelle Rechnerchnittstellen vereinfachen die Einbindung der Stellglieder in ein übergeordnetes Rechnersystem. Während bisher die

Drehzahl-Sollwerte, die digitalen Stellsignale und die Rückmeldungen auf separaten Leitungen übertragen wurden, genügt heute eine standardisierte Leitung, über die sehr viel mehr Informationen übertragen werden können, als es früher möglich. Dadurch wird die Fehleranalyse erleichtert. Einschwingvorgänge können aufgezeichnet werden und zur Auswertung an PCs übertragen werden.

Stell- und Regellingsglieder, die mit Transistor- oder IGBT-Brücken ausgerüstet sind, weisen, obwohl sie für verschiedene Motorarten ausgelegt sind, in ihrer Hardware doch große Ähnlichkeiten auf. Die motorspezifischen Funktionen werden durch die Software und die jeweiligen Istwertsignale bestimmt. Dennoch konzentrieren sich die meisten Hersteller auf jeweils nur eine Motorart. Es ist jedoch durchaus denkbar, daß allein durch Softwareanpassung ein Stell- und Regellingsglied für verschiedenartige Motoren eingesetzt werden kann. So könnten die bisherigen einleisigen Entwicklungen durchaus in eine gemeinsame Entwicklung münden. Ansätze dazu sind bei einigen Herstellern zu erkennen.