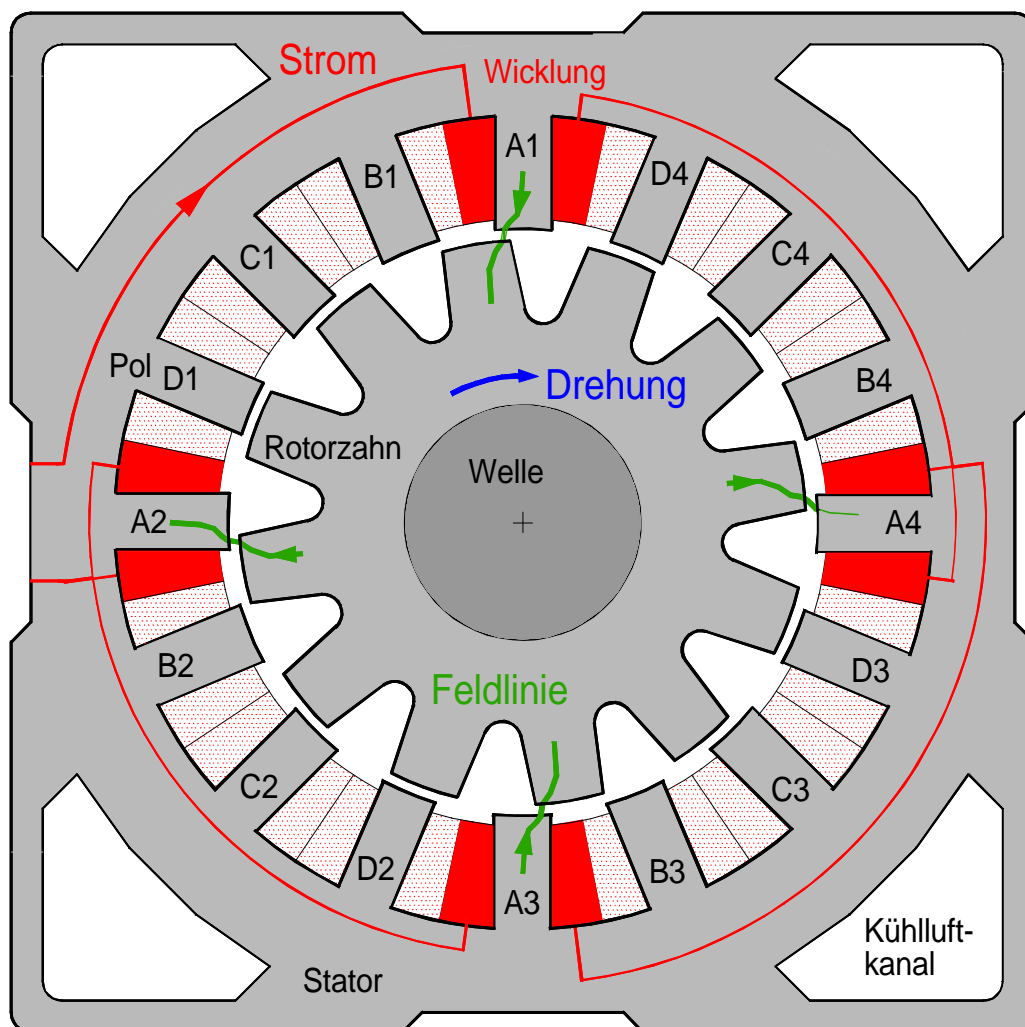


### Geschalteter Reluktanzmotor

Drehmomentstarker Elektromotor mit kleinem Bauvolumen



# Einsatzgebiete

Der Geschaltete Reluktanzantrieb ist grundsätzlich für drehzahlveränderbare Antriebslösungen und für Positionieraufgaben geeignet. Je nach Ausführung des Umrichters ist ein Zwei-Quadranten-Betrieb oder der Vier-Quadranten-Betrieb möglich.

Im Vergleich zu anderen Antrieben zeichnet er sich durch

- überdurchschnittliches Dauerdrehmoment im Grunddrehzahlbereich
- sehr hohes Beschleunigungsvermögen
- geringe Wartung
- großes Haltemoment - auch über lange Zeiträume
- hohe Überlastbarkeit
- geringe Abmessungen
- sehr gute Notlaufeigenschaften nach Ausfall einer oder mehrerer Motorphasen
- ausgezeichneten Wirkungsgrad über einen großen Drehzahlbereich
- Robustheit
- sehr geringe Läufererwärmung im unteren Drehzahlbereich

aus.

Für Applikationen, bei denen eine oder mehrere dieser Eigenschaften gefordert werden, lohnt der Einsatz des Geschalteten Reluktanzantriebes.

Aufgrund des ausgewählten und optimierten Querschnittes besitzt der von uns entwickelte Switched-Reluctance-Motor für alle Arbeitspunkte im unteren Drehzahlbereich eine unkritische Geräuschemission.

Höchste Drehzahlen: Der Maschinenläufer des Geschalteten Reluktanzmotors trägt weder eine Wicklung noch Permanentmagnete. Er kann deshalb mit hohen Radialkräften belastet werden und ist somit für den Betrieb bei großen Drehzahlen besonders geeignet. Aufgrund der mit der Drehzahl zunehmenden Ummagnetisierungsverluste sind für diese Anwendungen eher niederpolige Reluktanzmotoren geeignet.

## **Funktionsprinzip**

Das Wirkungsprinzip des „Geschalteten Reluktanzmotors“, der in vielen Veröffentlichungen der englischsprachigen Literatur unter dem Namen „Switched-Reluctance-Motor“ propagiert wurde, ist denkbar einfach: Ein drehbar gelagerter Eisenstab oder auch die Eisenzähne eines Maschinenläufers richten sich in das durch einen elektrischen Strom in einem Ständerpol erzeugte Magnetfeld aus. Durch gezieltes Weiterschalten des Magnetfeldes gerät der Eisenstab oder der Motorläufer in eine drehende Bewegung. Besitzt dieser Läufer, der auch als Rotor bezeichnet wird, mehrere Zähne, so ist seine Form mit einem langgestreckten Zahnrad vergleichbar. Der Begriff „Reluktanz“ steht für den magnetischen Widerstand, den ein solcher Rotor dem elektromagnetischen Feld entgegensetzt. Erzeugung und Weiterschaltung des Magnetfeldes werden von den Polwicklungen im feststehenden Teil der Maschine und einer dem Motor vorgeschalteten Leistungselektronik übernommen. Mit der Leistungselektronik, welche als Stromrichter bzw. Frequenzumrichter bezeichnet wird, können die Drehzahl und das Drehmoment des Switched-Reluctance-Motors gezielt beeinflusst werden. Geschaltete Reluktanzmotoren lassen sich von Kleinstmotoren bis hin zu Großantrieben realisieren.

## **Musterantrieb**

Am Elektrotechnischen Institut der Universität Karlsruhe wurden zwei Geschaltete Reluktanzantriebe mit einer Bemessungsleistung von 18,5 kW bzw. 23,5 kW bei einer Drehzahl von 1500 U/min entwickelt, optimiert und getestet. Der Umrichter ist direkt an das Drehstromnetz 400V/50Hz angeschlossen. Einige Meßergebnisse dieses Musterantriebes sollen in den nachfolgenden Abschnitten beispielhaft die Leistungsfähigkeit Geschalteter Reluktanzantriebe nachweisen. Den Auftrag über die Fertigung der Motoren übernahm das Elbtalwerk Heidenau. Auf dem Deckblatt ist die Wirkungsweise und der prinzipielle Blechschnitt des neu entwickelten Switched-Reluctance-Motors dargestellt. Dieser Motor besitzt 16 ausgeprägte Statorpole und 12 Rotorzähne.

## Kleines Trägheitsmoment - große Dynamik

Aufgrund der masselosen Zahnspalten im Außenbereich des Maschinenläufers besitzt der Switched-Reluctance-Motor ein sehr kleines Trägheitsmoment. Der Rotor besteht nur aus dem Blechpaket und der Welle. Er trägt weder eine Wicklung noch Permanentmagnete. Die Tabelle 1 zeigt den Vergleich der Trägheitsmomente eines Asynchron-Normmotors, einer für hochdynamische Anforderungen optimierten Drehstrom-Asynchronmaschine und des Geschalteten Reluktanzmotors. Letzterer liegt gegenüber seinen Mitbewerbern deutlich vorn. Hinsichtlich des Bemessungspunktes, der Wärmeklasse und der Kühlung verfügen alle drei Motoren über gleichwertige technische Daten.

	Geschalteter Reluktanzmotor MFR 132.5	Asynchronmotor (optimierte Baugröße) ACHA 132.5	Asynchronmotor (Normmotor)
Trägheitsmoment	0,0883 kgm <sup>2</sup> 59 %	0,105 kgm <sup>2</sup> 70 %	0,150 kgm <sup>2</sup> 100 %

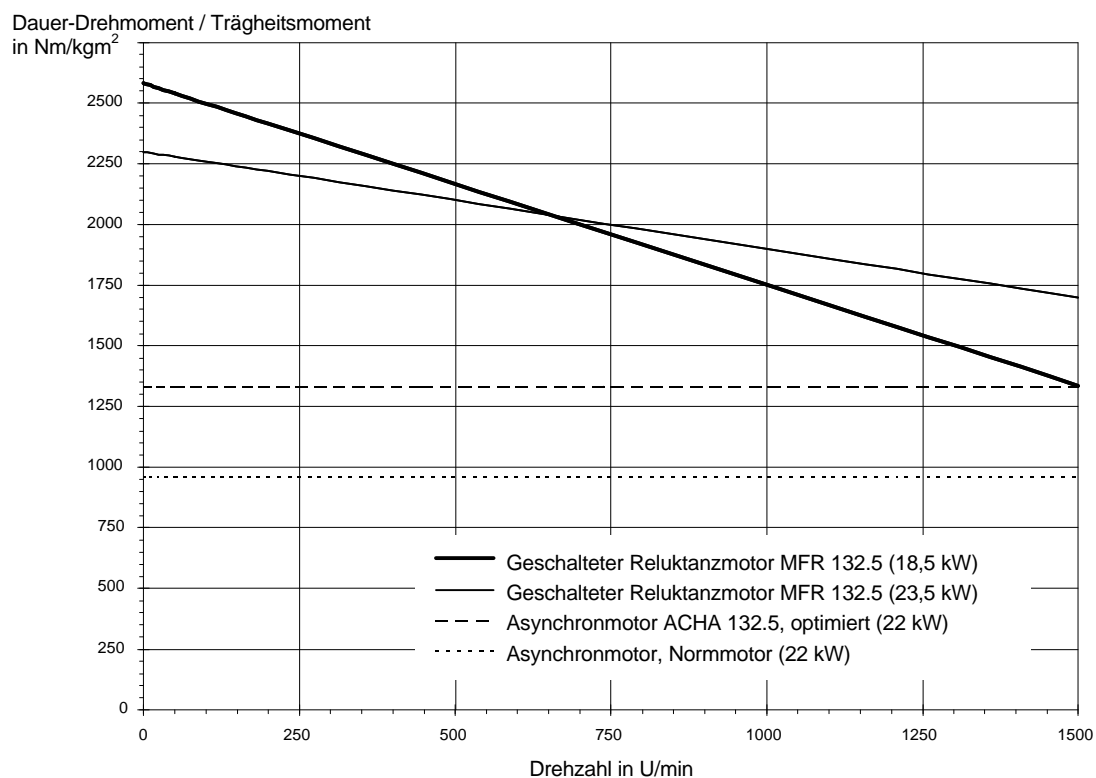
Tabelle 1: Trägheitsmomente

## Wesentlich bessere Ausnutzung bei kleinen Drehzahlen

Anders als bei Asynchronmotoren machen die Eisenverluste der Geschalteten Reluktanzmotoren einen erheblichen Anteil an den Gesamtverlusten aus. Mit abnehmender Drehzahl aber sinken die Eisenverluste sehr stark ab. Dieser Effekt kann zu einer Erhöhung der Effektivströme in den Polwicklungen genutzt werden und führt damit zu einem hohen zulässigen Dauer-Drehmoment im unteren Drehzahlbereich. Weiterhin entstehen im Betrieb bei kleinen Drehzahlen nur geringe Eisenverluste im Rotor - die Läufererwärmung bleibt gering. Bei Asynchronmotoren stellen die Wicklungsverluste im Stator und im Rotor den weitaus größten Anteil an den Gesamtverlusten dar. Diese bleiben mit einem festen Drehmoment vom Stillstand bis zur Bemessungsdrehzahl nahezu konstant. Somit erklärt sich, daß Asynchronmotoren im Dauerbetrieb bis zur Bemessungsdrehzahl nur mit Nenn-

moment belastet werden dürfen. Oberhalb der Nenndrehzahl beginnt für alle drei Motoren der Feldschwächbetrieb.

Im Bild 1 wurde das maximal zulässige Dauer-Drehmoment auf das Trägheitsmoment bezogen und im Drehzahlbereich von über 0 bis 1500 U/min bei Ausnutzung der Wärmeklasse F dargestellt. Bild 1 gibt Auskunft über das Beschleunigungsvermögen bzw. die Ausnutzung der Maschinen im Dauerbetrieb. Die beiden Reluktanzmotoren unterscheiden sich lediglich in der Qualität des verwendeten Elektrobleches. Im Stillstand ist für den Reluktanzmotor (Ausführung 18,5 kW) bei Dauerbetrieb ein maximales Haltemoment von 145% des Nennmomentes zulässig. Sobald aber der Reluktanzläufer dreht, werden alle Polwicklungen thermisch gleichmäßig beansprucht, und das Dauer-Drehmoment darf für kleine Drehzahlen 190% des Nennmomentes betragen. Für dynamische Übergangsvorgänge im gesamten Grunddrehzahlbereich kann den Motoren grundsätzlich das zwei- bis dreifache Bemessungsmoment abverlangt werden.

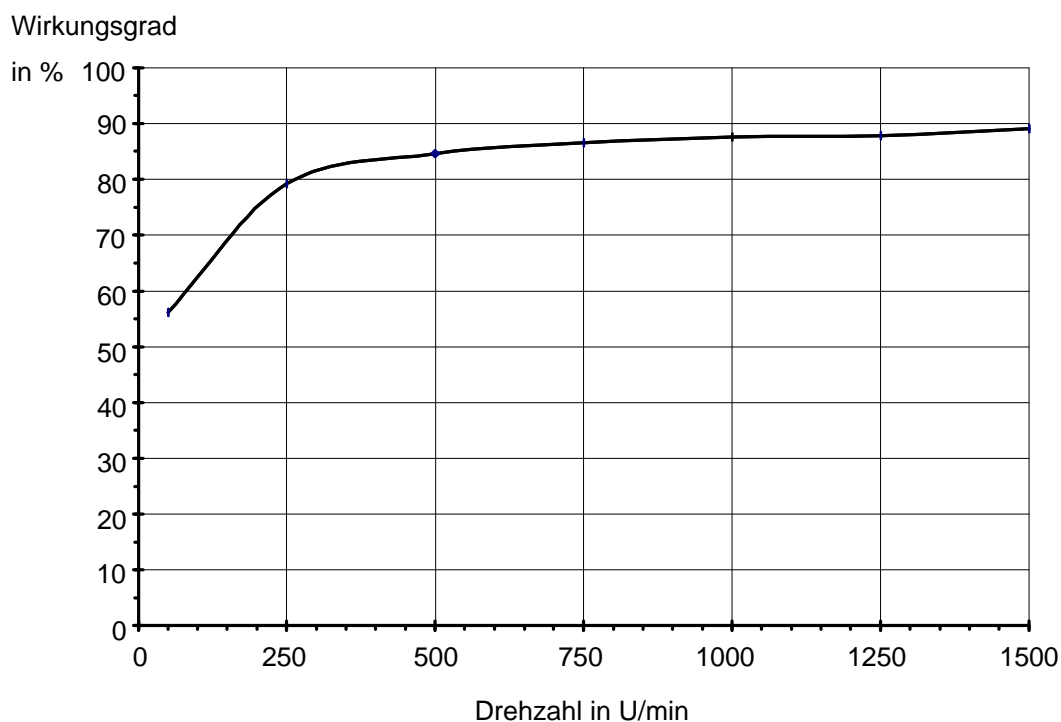


**Bild 1:** Zulässiges Dauer-Drehmoment bezogen auf das Trägheitsmoment bei Ausnutzung der Wärmeklasse F (Messung)

Die Kennlinien und Werte der Drehstrom-Asynchronmaschine ACHA 132.5 ist dem Datenblatt des Herstellers [1] entnommen. Bauvolumen, Baugröße, Außenabmessungen und Blechpaketlänge des optimierten Asynchronmotors ACHA 132.5 sind mit den Werten des Geschalteten Reluktanzmotors MFR 132.5 identisch.

### **Wesentlich besserer Wirkungsgrad unterhalb der Nenndrehzahl**

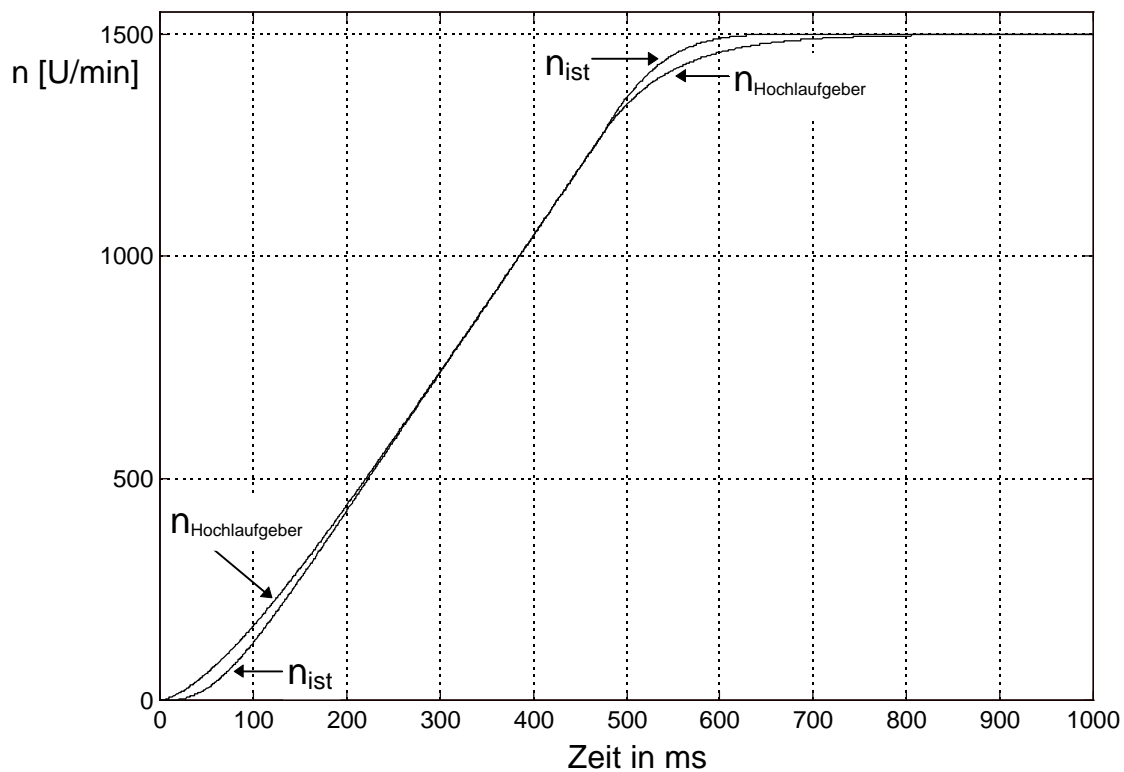
Der Wirkungsgrad des Geschalteten Reluktanzmotors liegt im Nennpunkt bei einem für Drehstrommotoren dieser Leistungsklasse üblichen Wert. Allerdings fällt der Wirkungsgrad des Reluktanzmotors im unteren Drehzahlbereich nur unwesentlich ab (Bild 2). Er liegt bei Belastung mit Nennmoment bereits ab 300 U/min über 80% und steigt bis zur Nenndrehzahl allmählich auf ca. 90% an. Darin liegt ein weiterer Vorteil dieses Antriebes. Der Geschaltete Reluktanzmotor in der 23,5-kW-Ausführung erreicht im Bemessungspunkt einen Wirkungsgrad von 91,1%.



**Bild 2:** Wirkungsgrad bei Nennmoment und variabler Drehzahl für den Geschalteten Reluktanzmotor mit 18,5 kW (Messung)

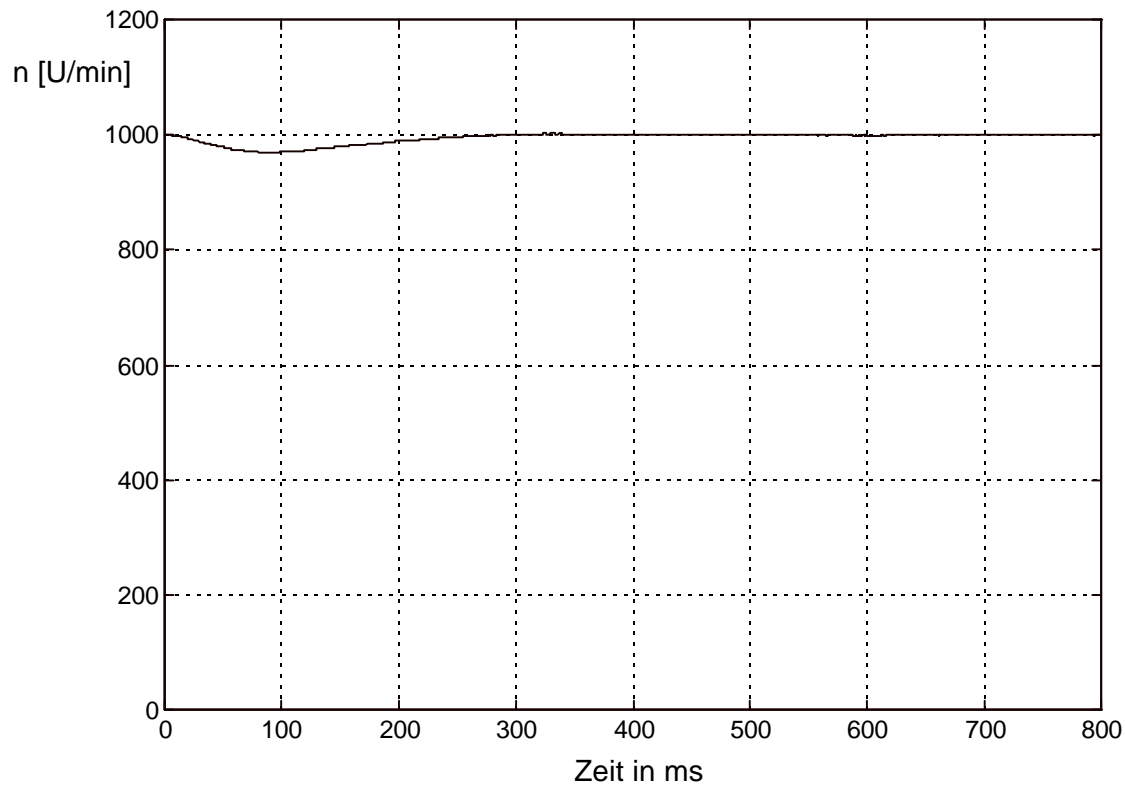
## Drehzahlregelte Antriebslösungen

Die Drehzahlregelung des Geschalteten Reluktanzantriebes wurde nach einem in der Antriebstechnik üblichen Verfahren entworfen und auf das Ausregeln von Drehzahlschwankungen optimiert. Ein Hochlaufgeber stellt sicher, daß bei einem Sollwertsprung der Drehzahl nahezu kein Überschwingen der Istdrehzahl auftritt. Im Bild 3 ist das Führungsverhalten bei Hochlauf auf Bemessungsdrehzahl dargestellt. Der Antrieb beschleunigt hierbei mit einem Drehmoment von ca. 170 Nm. Die Trägheit der bei dieser Messung eingesetzten Arbeitsmaschine beträgt das Fünffache des Reluktanzmotors. Damit ergibt sich die Hochlaufzeit von 630 ms.



**Bild 3:** Hochlauf vom Stillstand auf Bemessungsdrehzahl  
 $J_{\text{gesamt}} = 0,54 \text{ kgm}^2$  (Messung)

In Bild 4 ist das Störverhalten der implementierten Drehzahlregelung durch Meßergebnisse belegt. Bei einem Lastsprung von 10 Nm auf 110 Nm bleibt die Drehzahl innerhalb eines Toleranzbandes von 3%. Nach 250 ms erreicht die Drehzahl wieder ihren stationären Wert von 1000 U/min. Die Steilheit des Lastmomentenanstieges wurde durch die angekuppelte Gleichstrommaschine vorgegeben.

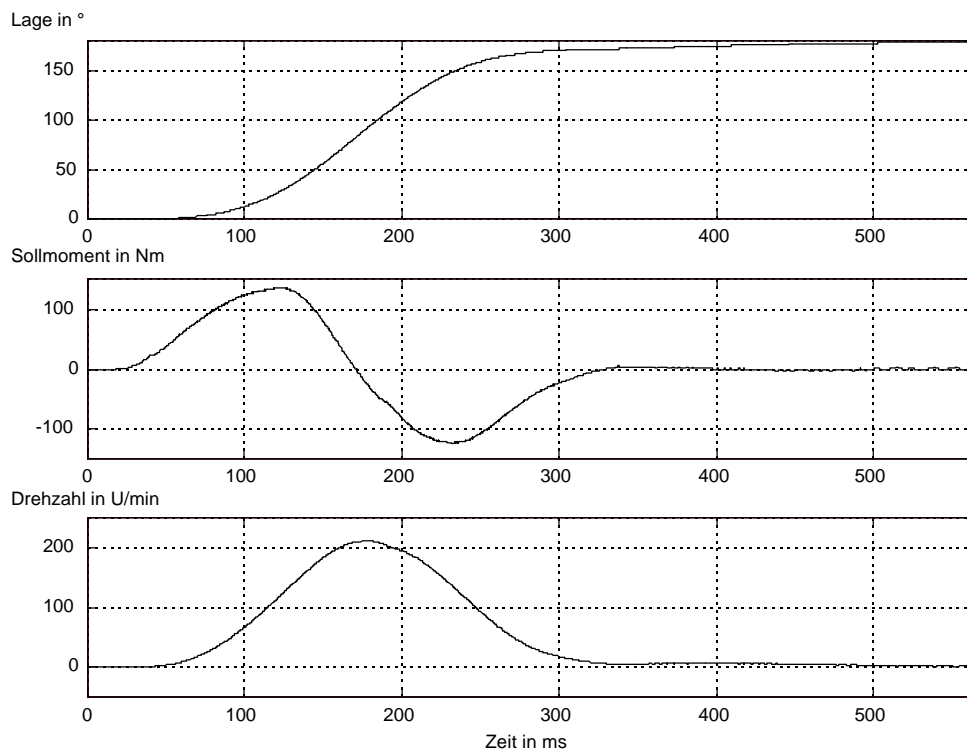


**Bild 4:** Drehzahlverlauf nach einem Drehmomentanstieg von 100 Nm  
 $J_{\text{gesamt}} = 0,54 \text{ kgm}^2$  (Messung)



## Einsatz für Positionieraufgaben

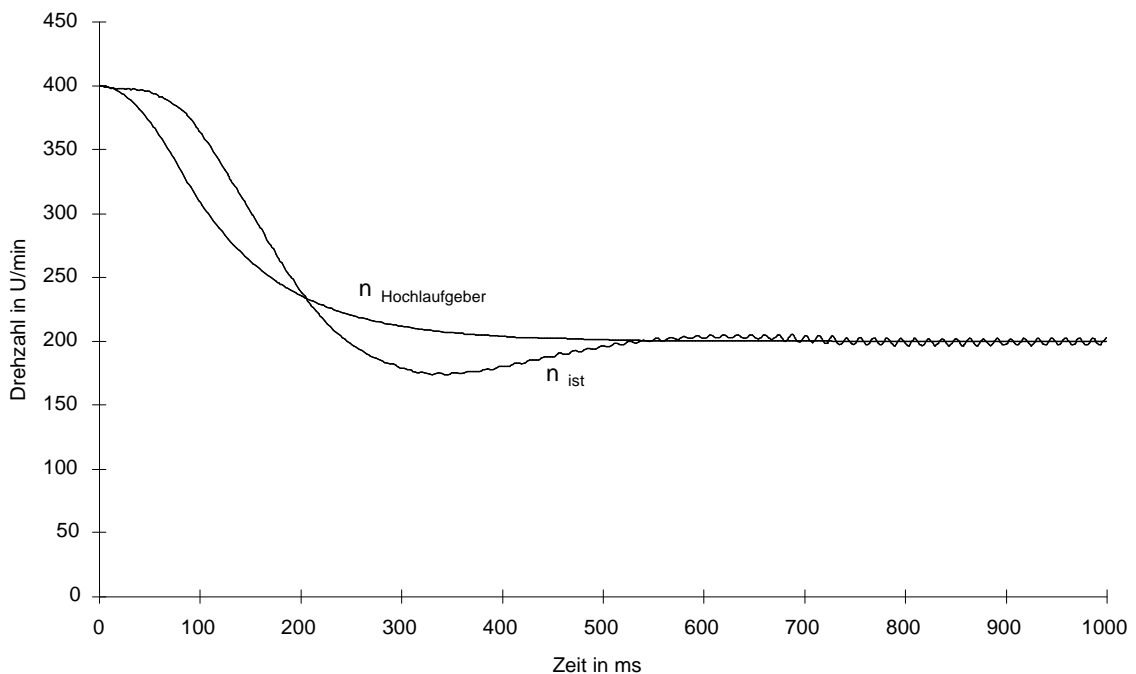
Zu den Antriebsaufgaben von Elektromotoren gehören ebenfalls die Positionierung z.B. von Werkstücken, Werkzeugen, Maschinenteilen, Förderkörben und vieles mehr. Der Geschaltete Reluktanzantrieb ist grundsätzlich auch für solche Applikationen geeignet. Das Bild 5 zeigt das Einschwingverhalten nach einem Lagesprung von  $180^\circ$ . Der Läufer dreht eine halbe Umdrehung weiter und erreicht nach ca. 600 ms den geforderten Sollwert. Bei vielen Positionieraufgaben, insbesondere in Werkzeugmaschinen, ist ein Überschwingen der Endposition unzulässig. Entsprechend dieser Forderung wurden die Parameter der Lageregelung gewählt.



**Bild 5:** Positionsänderung um  $180^\circ$   
 $J_{\text{gesamt}} = 0,54 \text{ kgm}^2$  (Messung)

## Ausgezeichnete Notlaufeigenschaften

Der Geschaltete Reluktanzantrieb zeigt eine hohe Betriebssicherheit bei Ausfall einer oder mehrerer Motorphasen. Nach Auftreten eines derartigen Fehlers läuft der Motor auch unter Last weiter, er kann beschleunigt und abgebremst werden (Bild 6). Allerdings treten meßbare Drehmoment- und Drehzahlschwankungen auf, der Anlauf des Motors ist nicht mehr gesichert. Trotzdem lassen sich somit in vielen Anwendungsfällen die Arbeitsmaschine oder der Arbeitsprozeß in einen gefahrlosen Zustand bringen.

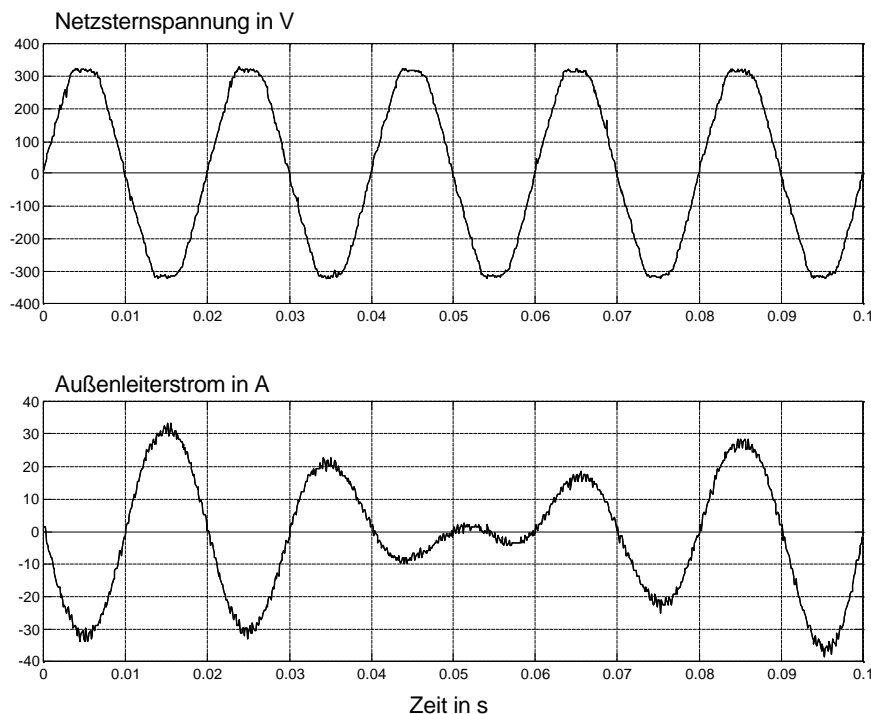


**Bild 6:** Drehzahländerung mit zwei defekten Motorphasen  
 $M_{\text{Last}} = 50 \text{ Nm}$ ,  $J_{\text{gesamt}} = 0,54 \text{ kgm}^2$  (Messung)

Der Hochlaufgeber verhindert auch hier beim Bremsen der Maschine das direkte Umschalten des Drehzahl-Sollwertsprunges auf den Soll-Istwert-Vergleich des Drehzahlreglers.

## Netzfrendlichkeit des Musterantriebes

Der Netzstromrichter besteht aus einem dreiphasigen Transistor-Stromrichter. Die Regelung der Netzströme ist so optimiert, daß der Antrieb im stationären Betrieb mit einem  $\cos\varphi=1$  und einem Leistungsfaktor von ca. eins Energie aus dem Drehstromnetz bezieht oder einspeist. Das bedeutet einen sinusförmigen Netzstrom und die Übereinstimmung der Phasenlage zwischen Strom und Spannung - letztendlich die Netzfrendlichkeit des Antriebes. Bild 7 zeigt Spannung und Strom eines Außenleiters bei einem Lastwechsel des Reluktanzmotors von ca. 18 kW Generatorbetrieb auf 18 kW Motorbetrieb. Mit dem Einsatz dieser Netzstromrichter lassen sich der Vier-Quadranten-Betrieb und damit hochdynamische Antriebslösungen realisieren. Wird ein solcher Stromrichter z.B. für den Hauptantrieb einer Anlage eingesetzt, so kann mit ihm zusätzlich noch Blindleistung der Hilfsantriebe kompensiert werden. Für Reluktanzantriebe mit geringeren Anforderungen an Dynamik und Netzfrendlichkeit werden Diodenbrücken mit Glättungs- und Kommutierungsdrossel als Netzstromrichter eingesetzt.



**Bild 7:** Netzspannung und Netzstrom bei einer Laständerung von 18 kW Generatorbetrieb auf 18 kW Motorbetrieb (Messung)

Quellenangabe:

[1] Datenblatt Drehstrom-Hauptantriebsmotoren, Elbtalwerk GmbH

Autor: J. Wolff  
Universität Karlsruhe  
Elektrotechnisches Institut  
Kaiserstraße 12  
D-76128 Karlsruhe  
Bundesrepublik Deutschland

Das Elektrotechnische Institut der Universität Karlsruhe dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung des Projektes „Switched Reluctance Drive“.

Hersteller: Elbtalwerk GmbH  
Fritz-Schreiter-Straße 31  
D-01259 Dresden  
Bundesrepublik Deutschland