

# **Verluste in synchronen Reluktanzmaschinen am Spannungszwischenkreis-Umrichter**

Dipl.-Ing. Stefan Winkler, Univ. Prof. Dr.-Ing. Ralf Werner

Elektrotechnisches Institut, TU Chemnitz

## **Kurzfassung**

In diesem Beitrag wird gezeigt, welche Auswirkung die Rotorform einer Reluktanzmaschine und die Ansteuerung mittels Umrichter auf den Verlusthaushalt der Maschine hat. Darüber hinaus werden die Möglichkeiten zur Verluststeuerung, welche sich durch den Betrieb von Reluktanzmaschinen ergeben, vorgestellt.

## **Abstract**

This paper shows the effect of the rotor shape of a reluctance machine and the converter control on the losses of the machine. In addition, it will be shown which possibilities for loss control will result from the operation of reluctance machines.

## **1 Einleitung**

Reluktanzmaschinen bieten den Vorteil, dass sie weder Magnete noch eine zusätzliche Wicklung im Rotor benötigen. Die Rotoren können dadurch vergleichsweise günstig hergestellt werden und es treten keine Stromwärmeverluste im Rotor auf. Dieser Umstand ist besonders für Spindelantriebe in Werkzeugmaschinen interessant, da die Erwärmung in Folge der Rotorverluste zu einer thermisch bedingten Verlagerung der Welle und damit zu einer erhöhten Bearbeitungsungenauigkeit führen kann. Gleichzeitig bieten Reluktanzmaschinen auf Grund ihres Wirkprinzips einen großen Stellbereich für eine Verluststeuerung. Dies bietet die Möglichkeit die Werkzeugmaschine auch bei unterschiedlichen Arbeitszyklen in einem gleichmäßigen thermischen Beharrungszustand zu halten. Hierfür ist es notwendig den Verlusthaushalt der Maschine zu kennen.

Für Untersuchungszwecke wurde eine Reluktanzmaschine für den Einsatz als hoctouriger Spindelantrieb ausgelegt und vermessen. Der Rotor wurde als Massivläufer ausgeführt, da diese Ausführungsform in der Herstellung sehr kostengünstig ist und über eine hohe mechanische Festigkeit verfügt. Die Vermessung erfolgte auf einem Prüfstand, der speziell für hoctourige Motoren ausgelegt wurde, vgl. Abb. 1.

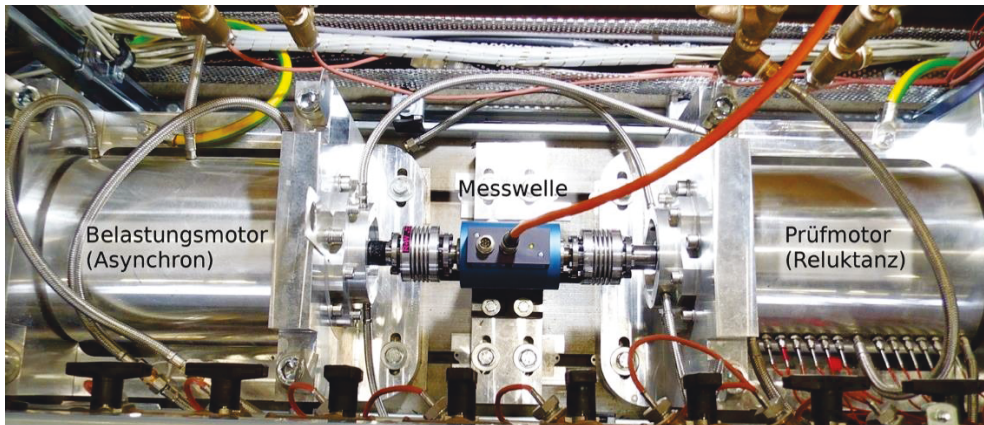


Abb. 1: Messaufbau für hochtourige Motoren

## 2 Grundlagen der Reluktanzmaschine

Der Stator einer synchronen Reluktanzmaschine ist, wie bei anderen Synchronmaschinen auch, genutet und mit einer mehrsträngigen Wicklung ausgestattet. Der Rotor besteht aus einem ferromagnetischen Material und verfügt über Bereiche mit einem hohen magnetischen Widerstand ( $q$ -Achse), die sich mit Bereichen mit einem niedrigen magnetischen Widerstand ( $d$ -Achse) abwechseln, s. Abb. 2. Dieser Reluktanzunterschied bewirkt das Drehmoment der Maschine, ohne dass eine zusätzliche Erregung nötig ist.

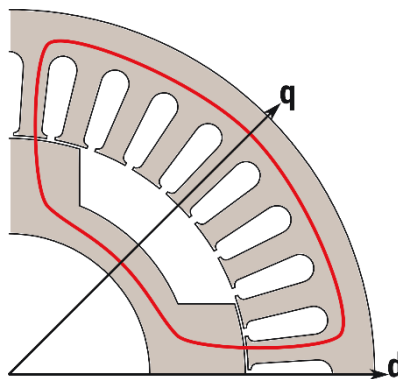


Abb. 2: Reluktanzmotor mit ausgeprägten Polen

Die Aufteilung der Reluktanzmaschine in einem  $(d, q)$ -Koordinatensystem ermöglicht eine mathematische Beschreibung der Maschine, die mit anderen Synchronmaschinen vergleichbar ist, vgl. [1, 2]. Auf Grund der fehlenden Läufererregung ist der wesentliche Unterschied zu anderen Synchronmaschinen, dass immer beide Stromkomponenten  $I_d$  und  $I_q$  vorhanden sein müssen, um ein Drehmoment zu erzeugen, wodurch der Leistungsfaktor im Vergleich geringer ist.

### 3 Verluste in Reluktanzmaschinen

In Reluktanzmaschinen treten Stromwärmeverluste im Stator, Ummagnetisierungsverluste sowie die Zusatzverluste auf. Zusätzlich treten Reibungsverluste auf, die hier nicht näher betrachtet werden, da sie nicht durch eine Verluststeuerung beeinflusst werden können.

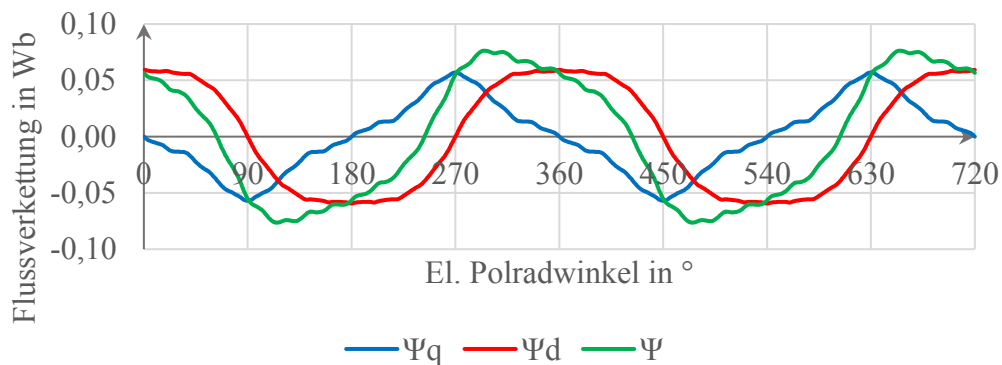
Die Stromwärmeverluste berechnen sich für eine  $m$ -strängige Maschine nach der Formel

$$P_{V,W,S} = m \cdot R_{\text{Strang}} \cdot I_{\text{Strang}}^2 \quad (1)$$

Bei der Bestimmung der Ummagnetisierungsverluste muss berücksichtigt werden, wie sich die unterschiedliche Läuferreluktanz in der  $d$ - und  $q$ -Achse auf die Magnetisierung auswirkt. Auf Grund der Zerlegung des Statorstromzeigers in zwei voneinander unabhängige Komponenten  $I_d$  und  $I_q$

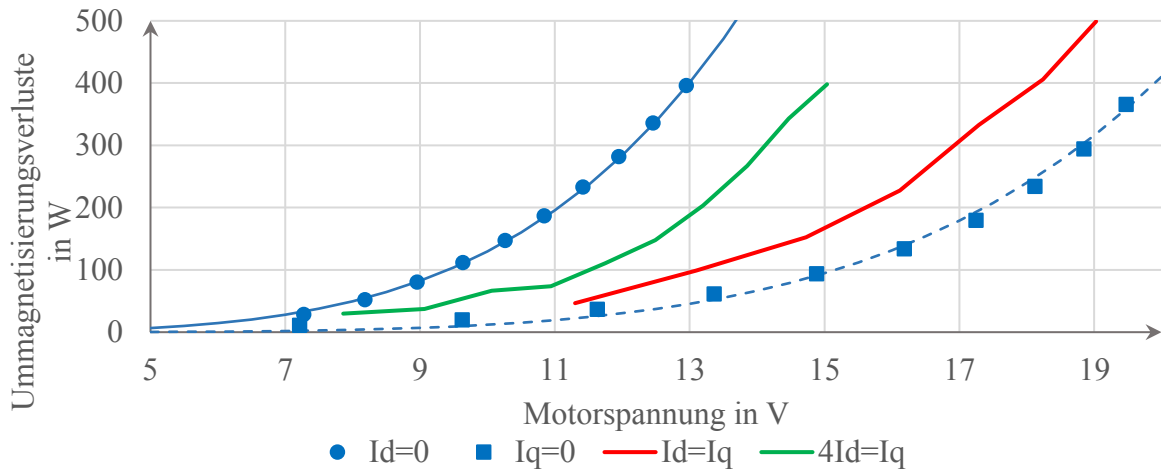
$$\underline{I} = \underline{I}_d + j \cdot \underline{I}_q \quad (2)$$

lässt sich das resultierende Magnetfeld ebenfalls als Überlagerung eines  $d$ - und eines  $q$ -Feldes beschreiben. Abb. 3 zeigt beispielhaft die Flussverkettung für die Simulation der untersuchten Reluktanzmaschine mit eingepprägten Strömen  $I_d = 30\text{A}$  und  $I_q = 80\text{A}$ .

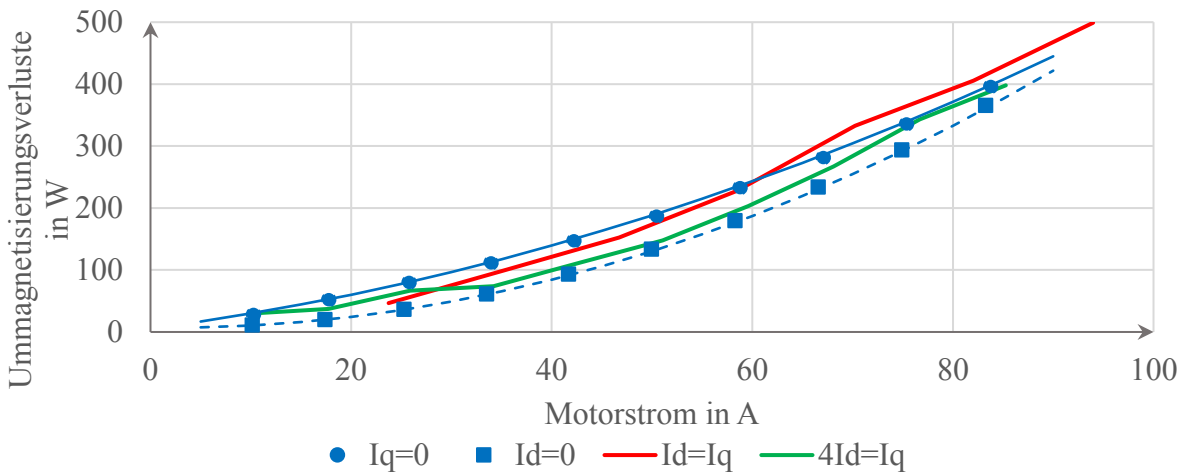


**Abb. 3:** Flussverkettung einer Motorphase bei verschiedenen Eingangsströmen

Für eine messtechnische Bestimmung der Verlustfaktoren kann eine Variation von  $I_d$  und  $I_q$  vorgenommen werden. Durch eine Variation der Ströme treten starke Drehmomentschwankungen auf. Um sicherzustellen, dass die Messungen bei konstanten Drehzahlen bzw. Frequenzen erfolgen, ist es sinnvoll, dass die zu vermessende Maschine mit einem drehzahlgeregelten Motor gekoppelt wird. Da die Maschine einzig für die Fälle  $I_d = 0$  bzw.  $I_q = 0$  kein Drehmoment erzeugt, ist die Messung der mechanischen Leistung ebenfalls unerlässlich.



**Abb. 4a:** Gemessene Ummagnetisierungsverluste als Funktion der Motorspannung bei  $n = 1200\text{min}^{-1}$



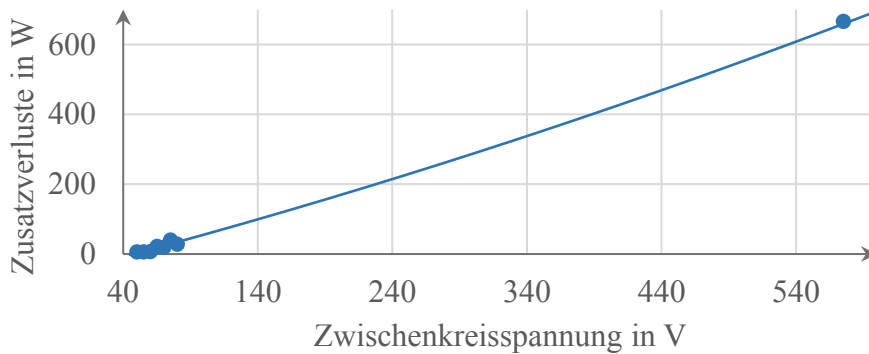
**Abb. 4b:** Gemessene Ummagnetisierungsverluste als Funktion des Motorstroms bei  $n = 1200\text{min}^{-1}$

Bei gleicher Spannung steigen die Ummagnetisierungsverluste, je höher der Anteil von  $I_q$  ist. Dies ist damit begründet, dass sich auf Grund der kleineren Induktivität in der  $q$ -Achse bei gleichem Spannungsabfall ein größerer Strom und damit eine stärkere Magnetisierung einstellen. Betrachtet man die Ummagnetisierungsverluste als Funktion des Motorstroms, zeigt sich, dass  $I_d$  auf Grund des geringeren magnetischen Widerstands in der  $d$ -Achse höhere Verluste erzeugt. Der Einfluss von  $I_d$  und  $I_q$  ist deutlich nicht-linear, weshalb die Ummagnetisierungsverluste in Zweifelsfall nur durch die Vermessung eines Kennlinienfeldes bestimmt werden können.

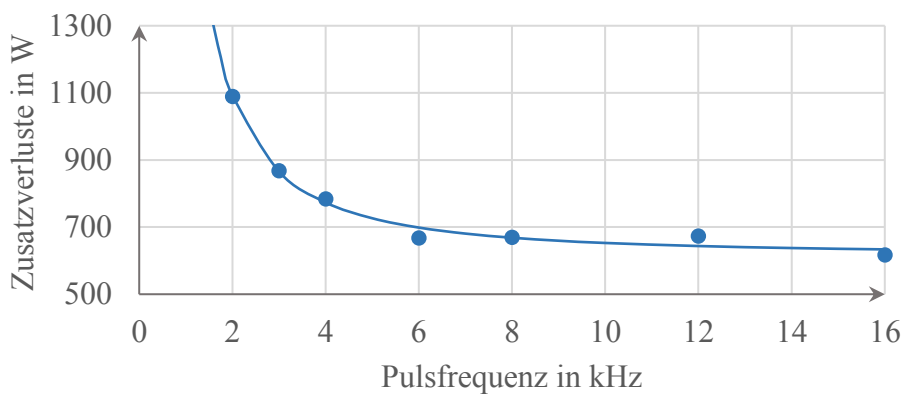
Neben den Stromwärme- und Ummagnetisierungsverlusten treten in Folge der Umrichter-pulsung oder der nicht-sinusförmigen Verteilung des Strombelags auch bei Reluktanzmotoren

zusätzliche Verluste auf. Insbesondere massiv ausgeführte Rotoren sind für Zusatzverluste anfällig, da die im Rotor hervorgerufenen Wirbelströme nicht durch eine Isolierung gedämpft werden.

Speziell die Pulsung durch den Umrichter hat hier einen großen Einfluss, allem voran eine Erhöhung der Zwischenkreisspannung sowie eine niedrige Pulsfrequenz führen in Kombination mit der kleinen Motorinduktivität ( $L_d = 286\mu\text{H}$  bzw.  $L_q = 84\mu\text{H}$ ) zu einem Stromripple, der erhöhte Zusatzverluste verursacht, vgl. Abb. 5 und 6. Die Messungen wurden mit zwei verschiedenen Umrichter durchgeführt, einem Industrieumrichter mit einer festen Zwischenkreisspannung von  $U_{\text{DC}} = 575\text{V}$  und einem selbstaufgebautem Umrichter mit einer variablen Zwischenkreisspannung von maximal  $U_{\text{DC,Max}} = 80\text{V}$ .



**Abb. 5:** Gemessene Zusatzverluste in Abhängigkeit der Zwischenkreisspannung bei  $f_{\text{Puls}} = 8\text{kHz}$



**Abb. 6:** Gemessene Zusatzverluste in Abhängigkeit der Pulsfrequenz bei  $U_{\text{DC}} = 575\text{V}$

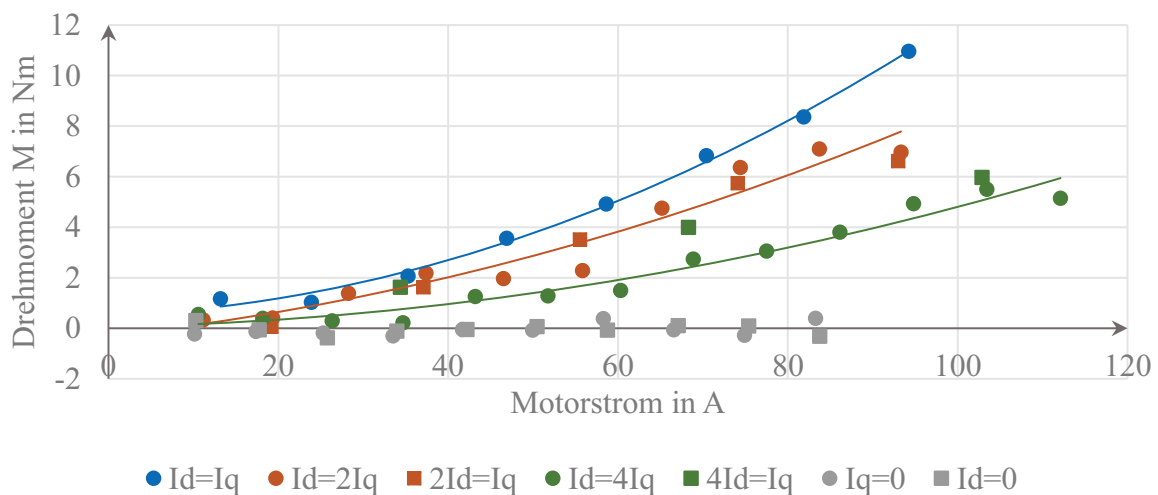
#### 4 Verluststeuerung

Es gibt Anwendungen, wie beispielsweise in Werkzeugmaschinen, bei denen versucht wird die Maschine trotz unterschiedlicher Belastungen einem thermischen Beharrungszustand zu halten. Die Steuerung der Verluste elektrischer Antriebe ist eine Variante, dies zu erreichen.

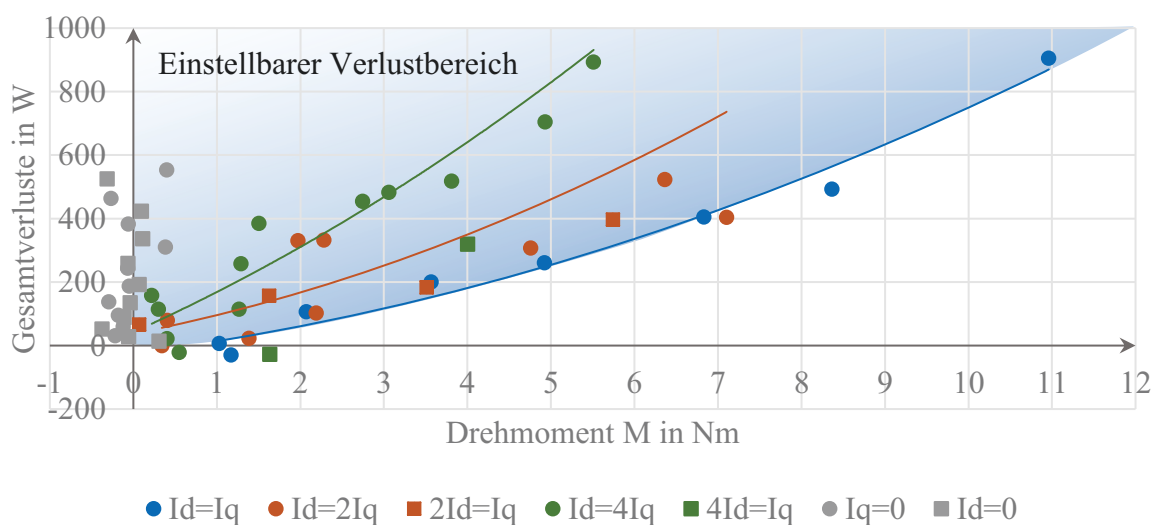
Reluktanzmaschinen bieten hierfür eine sehr einfache Möglichkeit. Für eine Reluktanzmaschine ergibt sich das Drehmoment nach Gl. 3 (s. [1,3]) nicht nur über die Höhe des Stroms, sondern auch über das Verhältnis von  $I_d$  zu  $I_q$ .

$$M = \frac{m \cdot p}{\omega} \cdot (X_d - X_q) \cdot I_d \cdot I_q \quad (3)$$

Dadurch ist es möglich, eine Reluktanzmaschine auch im Leerlauf mit maximalen Strom und somit mit maximalen Verlusten zu betreiben, vgl. Abb. 7 und 8. Bei Asynchronmaschinen ist dies allenfalls durch eine extreme Sättigung des Magnetkreises realisierbar, was auf Grund der benötigten hohen Spannung in der Regel nicht möglich ist. Bei permanent erregten Maschinen ist dies so gut wie unmöglich, ohne die Magnete zu beschädigen.



**Abb. 7:** Gemessenes, erreichbares Drehmoment der Reluktanzmaschine in Abhängigkeit von  $I_d$  und  $I_q$



**Abb. 8:** Gemessene Gesamtverluste der Reluktanzmaschine in Abhängigkeit von  $I_d$  und  $I_q$

## 5 Zusammenfassung

Die Verlustbestimmung bei Reluktanzmaschinen erfolgt grundsätzlich nach den gleichen Prinzipien, wie bei andere elektrische Maschinen auch. Als Folge der unterschiedliche Induktivitäten in der  $d$ - und  $q$ -Achse muss allerdings bei der Bestimmung der Ummagnetisierungsverluste das Verhältnis von  $I_d$  und  $I_q$  berücksichtigt werden.

Durch eine geeignete Variation von  $I_d$  und  $I_q$  lässt sich wiederum eine sehr effektive Verluststeuerung realisieren.

Auf Grund des verwendeten Massivrotors sind die Zusatzverluste für die untersuchte Maschine von besonderer Bedeutung. Zur Reduzierung der Zusatzverluste empfiehlt es sich, die Pulsfrequenz des Umrichters möglichst hoch ( $\geq 8\text{kHz}$ ) zu wählen und einen Umrichter mit veränderlicher Zwischenkreisspannung einzusetzen. Zusätzlich ist es sinnvoll, den Rotor zur Reduktion der oberflächennahen Zusatzverluste mit Querrillen zu versehen. Dieses Verfahren ist bereits länger für die massiven Polschuhe von Synchronmaschinen [4] und für Massivrotoren von Asynchronmaschinen [5] bekannt.

## Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des Sonderforschungsbereichs Transregio 96 und wird mit Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert, wofür gedankt wird.

## 6 Literatur

- [1] Binder, A.: Elektrische Maschinen und Antriebe. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2016
- [2] Winkler, S; Werner, R.: Hochtourige Reluktanzmotoren für den Einsatz als Spindelantriebe. Antriebstechnik. Mainz: Vereinigte Fachverlage, 2018, Bd. 10, S. 90 - 95
- [3] Fischer, R.: Elektrische Maschinen. Hanser, München, 2013
- [4] Bratoljić, T.: Neuere Untersuchungen über Zusatzverluste in massiven Polschuhen von Synchronmaschinen. BBC Mittelungen, 1966, Bd. 53, S. 521-530
- [5] Bergmann, D.: Betriebseigenschaften von wärmerohrgekühlten Asynchronmaschinen mit gerilltem Massivrotor und Kurzschlußkäfig unter besonderer Berücksichtigung der Stromrichterspeisung. Diss. RWTH Aachen, 1982