

TECHNOLOGIEN UND GRENZEN VON HIGH TORQUE ANTRIEBEN

1 Einleitung

Unter „High Torque Antrieben“ versteht man Antriebe vergleichsweise kleiner Drehzahl und hoher Momentenüberlastbarkeit, die als Direktantrieb für schnelle, genaue Verfah- und Positionieraufgaben genutzt werden können. Ein typischer Vertreter ist der in **Bild 1** dargestellte Walzwerksantrieb. Da der Begriff „High Torque“ weder genormt noch sonst im Sprachgebrauch eine feste Bedeutung hat, wird dieses Etikett heute für praktisch alle langsamlaufenden Antriebe verwendet.



Bild 1: Walzwerkantrieb

Heute werden aber auch im Bereich kleinerer Leistungen, z.B. bei Werkzeugmaschinen, Anforderungen gestellt, die nur mit modernen langsamlaufenden Antrieben befriedigt werden können. Antriebe mit Getriebe sind hier oft im Nachteil, da Getriebe nur mit hohem Aufwand spielfrei gebaut werden können und das wirksame Massenträgheitsmoment eines schnelllaufenden Motors mit dem Quadrat der Getriebeübersetzung auf die langsame Seite übertragen wird. Der Direktantrieb mit vergleichsweise kleinem Trägheitsmoment dagegen eröffnet die Möglichkeit, die hohe Dynamik moderner leistungselektronischer Stellglieder auszunutzen und infolge der Leistungsfähigkeit der heute verfügbaren Sensoren und der Regelungstechnik auch präzise Positionieraufgaben mit großer Wiederholgenauigkeit auszuführen. Diese Entwicklung und die damit verbundene Erweiterung des Marktes erfordert eine präzisere Klassifizierung und Eingrenzung von „High Torque“ Antrieben, als es bisher erforderlich war.

Tabelle 1: Aufgabenfelder für „High Torque“ Antriebe

Beschleunigungsantriebe	Hohe Dynamik durch geringe wirksame träge Massen
Stellantriebe	Hohe Genauigkeit durch Reibungsfreiheit, Spielfreiheit und besondere Motorstruktur, hohe Haltemomente im Stillstand
Hochüberlastbare Antriebe	Hohe kurzzeitige Überlastbarkeit mit hoher Kraftdichte im Nennpunkt, Geeignet für steife Regelungen, z.B. exakter Winkelgleichlauf
Zusatzforderung	Gleichförmiges Moment bei kleinen Drehzahlen

Nachteilig bei „High Torque“ Antrieben jeglicher Baugröße ist die Tatsache, daß bei elektrischen Energiewandlern das Drehmoment die Baugröße bestimmt, so daß diese Motoren relativ groß und damit teuer sind. Im Anwendungsfall sind somit die höheren Kosten des Antriebs gegen die Funktionsvorteile abzuwägen. „High Torque“ Antriebe sind daher stets **Sonderantriebe**, die i.w. den Aufgabenfeldern nach **Tabelle 1** zugeordnet werden können.

1.1 Zielsetzung

Aufgabe der durchgeführten Studie [1], die inzwischen als Forschungsheft Nr. 586 vorliegt, war somit die Betrachtung von kleineren „High Torque“ Antrieben im Leistungsbereich bis 100 kW und die Erarbeitung von Eigenschaftsmerkmalen, die eine Auswahl von Antrieben für bestimmte Aufgaben gestatten.

Ausgangspunkt der Untersuchungen war eine im Arbeitskreis „geregelte elektrische Antriebe“ erstellte repräsentative Basisspezifikation (**Tabelle 2**). Diese geht in ihren Anforderungen besonders bezüglich der Leistung und der Überlastbarkeit weit über die im Servomaschinenbereich üblichen Werte hinaus.

Tabelle 2: Basisspezifikation für einen „High Torque Antrieb“

Leistungsbereich	10 - 100 kW, typisch 50 kW
Drehzahl	≤ 300 1/min
Betriebsweise	4 Q
Momentenüberlastbarkeit	3 fach für 10 sec

Darüber hinaus wurde versucht, Ansätze für einen kompakten und flexibel konfigurierbaren „High Torque“Antrieb zu finden.

2 Bewertungskriterien und Vorgehensweise

Für die Antriebsaufgabe „hohes Drehmoment bei kleiner Drehzahl“ kommen Maschinen in Frage, die hohe Kraftdichte mit ausreichend großem momentenbildenden Radius kombinieren können.

In diesem Sinne wurde unter den zahlreichen heute am Markt zu findenden Antriebskonzepten eine Vorauswahl aussichtsreicher Kandidaten getroffen, für die anhand der Basisspezifikation vereinfachte Entwürfe und - soweit erforderlich - numerische Feldberechnungen durchgeführt wurden. Die Ergebnisse werden dann mit Hilfe von spezifischen Ausnutzungsziffern und Gütekriterien gemäß **Tabelle 3** gegenübergestellt. Weitere wichtige Kriterien folgen aus einer Systembetrachtung für Motor und Umrichter: Es sind dies der **Aufwand für den Wechselrichter**, daß **dynamische Verhalten** und der **Drehzahleinbruch unter Überlast**. Darüberhinaus wurden über den Einfluß des Kühlverfahrens Aussagen erarbeitet, die einen Vergleich von Volumen – und Drehmomentausnutzung bei intensiverer Kühlung gestatten.

Es war nicht Ziel dieser Studie, einen bestimmten Antrieb auszuwählen, dies bleibt dem Anwender überlassen. Die Entwürfe und die erarbeiteten Kriterien gestatten jedoch eine anwendungsspezi-

fische Klassifizierung der Antriebe und erleichtern dem Anwender, für eine bestimmte Aufgabenstellung in Frage kommende Antriebe technisch zu beurteilen.

Tabelle 3 : Gütekriterien für „High Torque“ Antriebe

1. Kennziffern	
Wirkungsgrad	η
wirksamer Drehschub / Kraftdichte	τ_w
Drehmomentausnutzung = Drehschub x drehmomentbildender Radius	$\tau_w \cdot R$
aktive Masse	m_{akt}
aktives Volumen	V_{akt}
Trägheitsmoment	J_p
Drehmoment / aktives Volumen	M / V_{akt}
Verlustdichte	P_v / V_{akt}
Nutwandbelastung	$P_{vcu} / (N_s \cdot A_{rw})$
Bauleistung des Umrichters bezogen auf die Nennleistung des Antriebs	r_{VA}
Dynamisches Verhalten	L_σ, L_d
2. Qualitative Kriterien	
Geräusche	
Ungleichförmigkeitsgrad	
Anforderungen an die Fertigung / Konstruktive Besonderheiten	
Feldschwächbereich	
Systemkosten	

2.1 Auswahl der untersuchten Maschinen

Gleichstromantriebe kommen für diese Aufgaben kaum in Frage, so daß man innerhalb dieser Studie die Auswahl auf bürstenlose umrichter gespeiste Antriebe eingrenzen kann. Im einzelnen sind dies:

2.1.1 Asynchronmaschinen

Asynchronmaschinen sind heute der am weitesten verbreitete Antrieb überhaupt. Bei den geregelten Antrieben beginnen sie sich allmählich auch gegenüber den Gleichstromantrieben durchzusetzen. Ihre magnetische Struktur kann hier als bekannt vorausgesetzt werden.

- Netzgespeicher Asynchronantrieb (ASM) als Vergleichsbasis.
Die netzgespeiste ASM gestattet keine Drehzahlregelung und die geforderte Nenndrehzahl ist durch die Polpaarzahl ($p = 10$) einzustellen. Dieser Entwurf dient als Vergleichsbasis für die übrigen Antriebe.
- Umrichtergespeicher Asynchronantrieb
Über die Wahl der Polpaarzahl und der Speisefrequenz kann der Antrieb bezüglich Blindleistungsbedarf und Abmessungen / Gewicht optimiert werden.

2.1.2 Dauermagneterregte Maschinen – läuferseitige Erregung

- Dauermagneterregte Synchronmaschine (PMSM) (Bild 2)
Diese Bauart, auch als elektronisch kommutierter Gleichstrommotor bekannt, hat wegen ihrer guten dynamischen Eigenschaften und wegen ihres guten Gleichlaufes erhebliche Bedeutung bei den Servoantrieben erlangt.

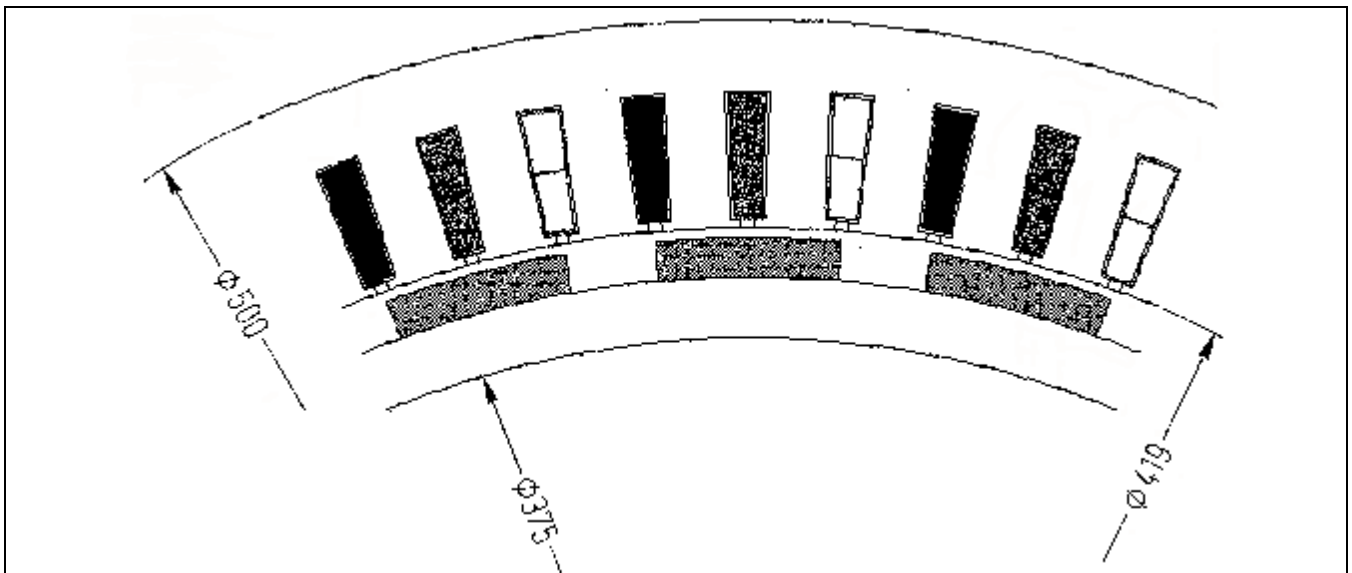


Bild 2: Permanentmagneterregte Synchronmaschine

- Polyphasige dauermagneterregte Synchronmaschine (PPSM) (Bild 3)
Maschinen dieser Bauweise werden auch als modulare Dauermagnetmaschine (MDM) bezeichnet. Sie zeichnen sich durch eine ungleiche Zahl von Polen in Ständer und Läufer aus und bilden ihr Drehmoment mit der zweiten Oberwelle von Luftspaltinduktion und Ankerstrombelag. Infolge der besonderen Anordnung des magnetischen Kreises sind besonders kleine Polteilungen und besonders hohe Kraftdichten möglich.

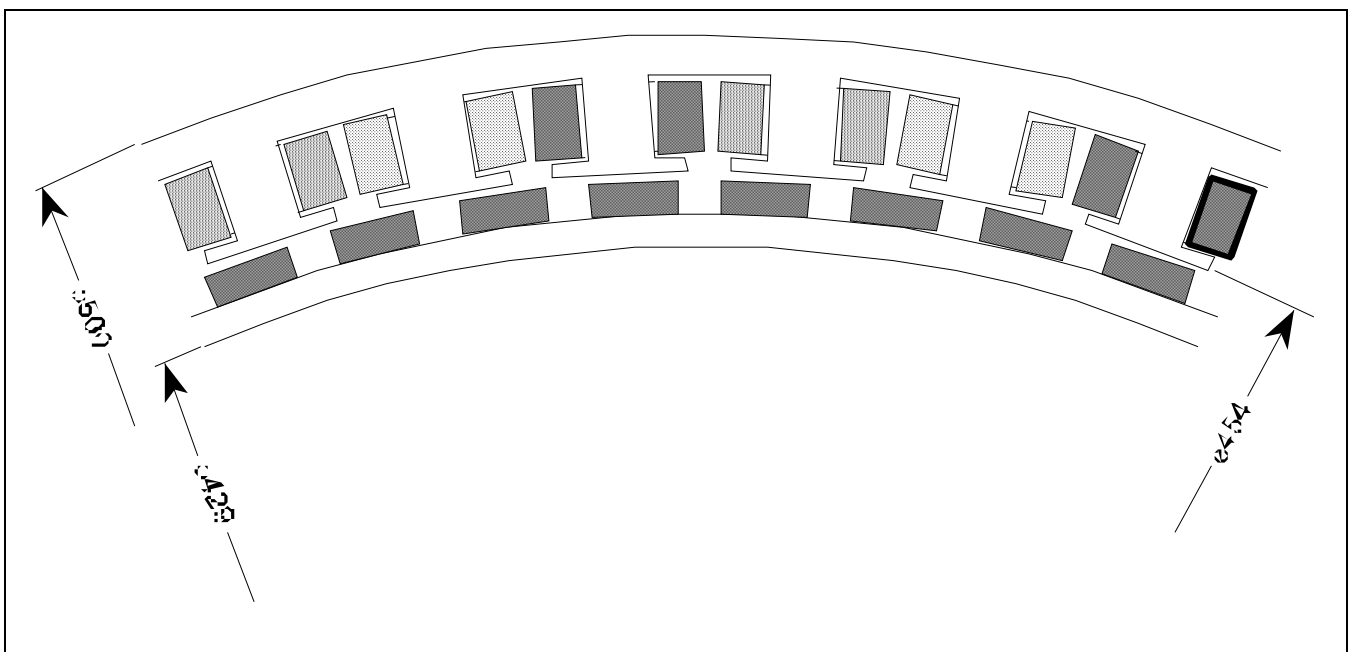
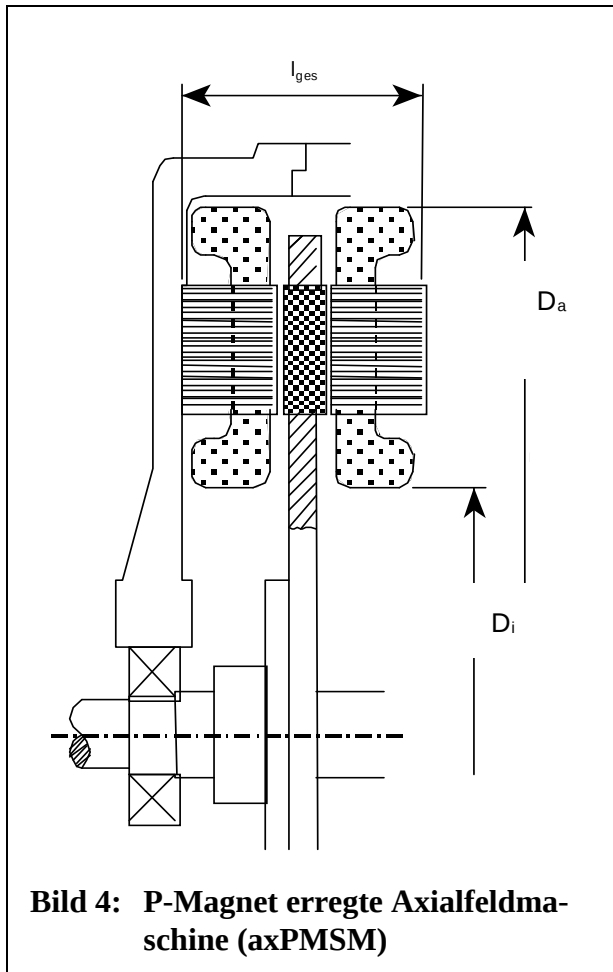


Bild 3: Polyphasige dauermagneterregte Synchronmaschine

- Dauer-magneterregte Axialfeldmaschine (axPMSM) (Bild 4):
Maschinen dieser Bauart entsprechen der PMSM, wobei durch die Scheibenbauweise eine kurze Baulänge und eine gute Volumenausnutzung erreicht wird.
- Dauer-magneterregte Transversalfußmaschine (TFM) (Bild 5):
Aufgrund der speziellen Struktur des magnetischen Kreises mit einer Flußführung quer zur Bewegungsrichtung des Rotors werden extrem kleine Polteilungen ermöglicht, ohne Einschränkungen bei der Ankerdurchflutung hinnehmen zu müssen. Damit zeichnen sich solche Maschinen durch besonders hohe Kraftdichten aus. Die Anordnung der Dauermagnete zwischen flußkonzentrierenden Polschuhen läßt aber auch eine große Streuung mit einem entsprechenden Drehzahleinbruch unter Überlast erwarten.



2.1.3 Reluktanzmaschinen mit beidseitiger Polausprägung

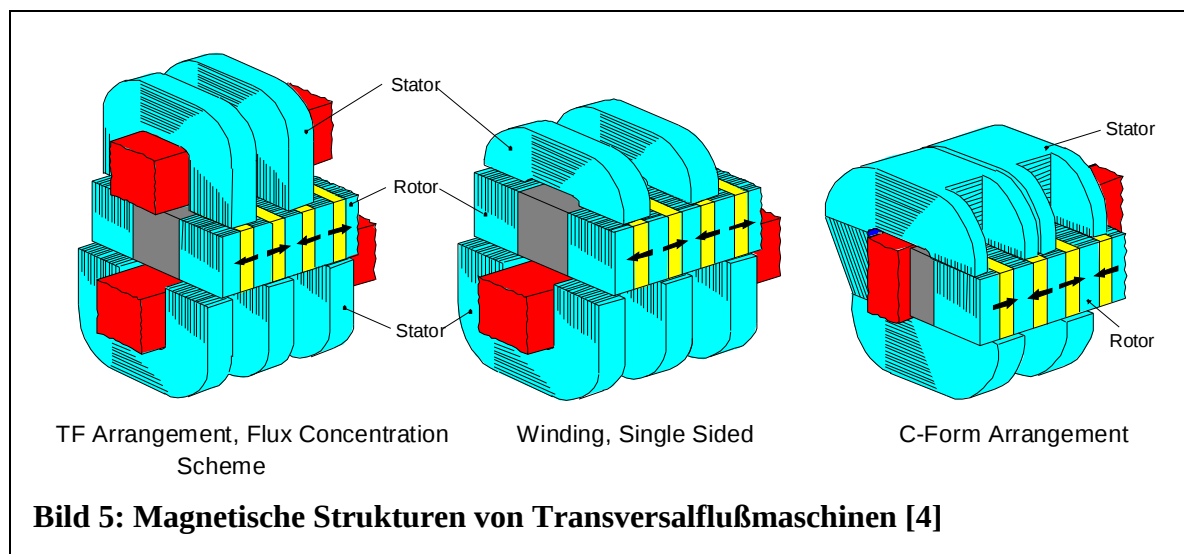
Reluktanzmaschinen dieser Bauart sind von den aus der Servotechnik bekannten Schrittmotoren abgeleitet. Der Reiz dieser Maschinen liegt im sehr einfach aufgebauten Rotor, der als einfaches Stanzteil ohne Wicklung und Dauermagnete hergestellt werden kann. Alle Maschinen dieser Bauart benötigen die Bereitstellung der Magnetisierungsblindleistung über den Stator, woraus auf einen erhöhten Umrichteraufwand geschlossen werden kann.

- Kanteneffekt Reluktanzmaschine (SRM)

(Bild 6):

Diese auch als „Switched Reluctance Machine“ bezeichnete Bauart ist die am einfachsten aufgebaute und damit die am kostengünstigsten herstellbare Maschine und hat sich im letzten Jahrzehnt in der allgemeinen Antriebstechnik bereits ein gewisses Anwendungsfeld erobert.

- Elektrisch erregte Transversalflußmaschine (TFE) (Bild 7):
- Diese Bauart entspricht magnetisch der SRM, jedoch mit transversaler Flußführung und damit auch mit der Möglichkeit, durch kleinere Polteilungen die Kraftdichte zu erhöhen.



- Hochpolige Kanteneffekt Reluktanzmaschine (Megatorque Motor, MTQ) (**Bild 8**).
- Bei dieser Bauweise wird ebenfalls versucht, die Anzahl der kraftbildenden Kanten zu erhöhen und gleichzeitig die Volumenausnutzung durch Mehrfachnutzung der aktiven Oberflächen zu

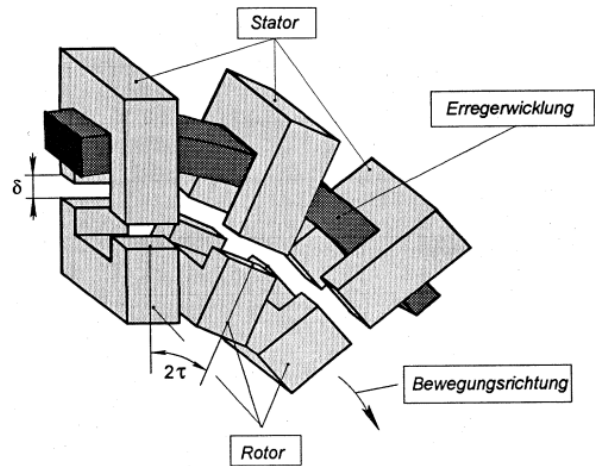
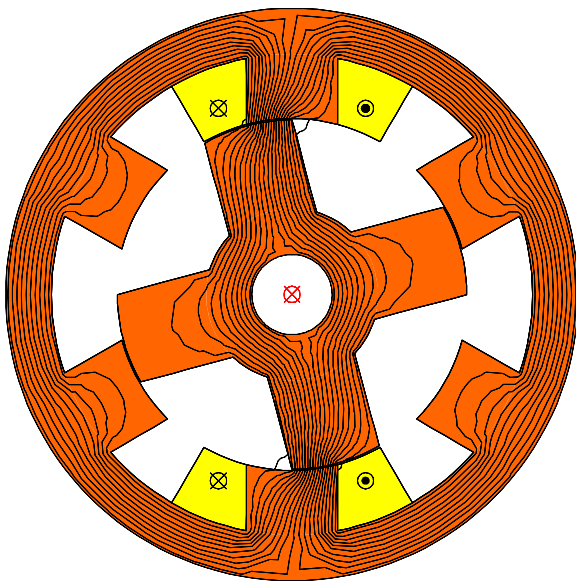


Bild 6: Geschaltete Reluktanzmaschine Bild 7: Statorerregte Transversalflußmaschine

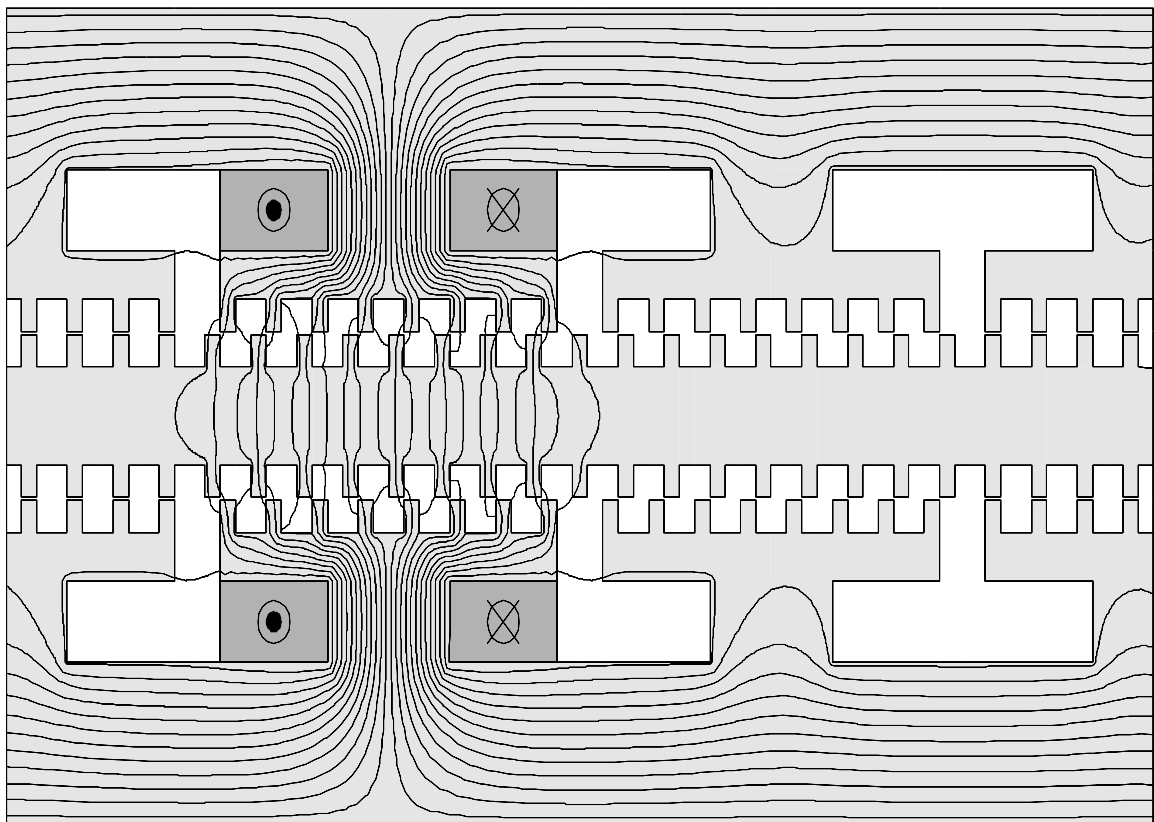
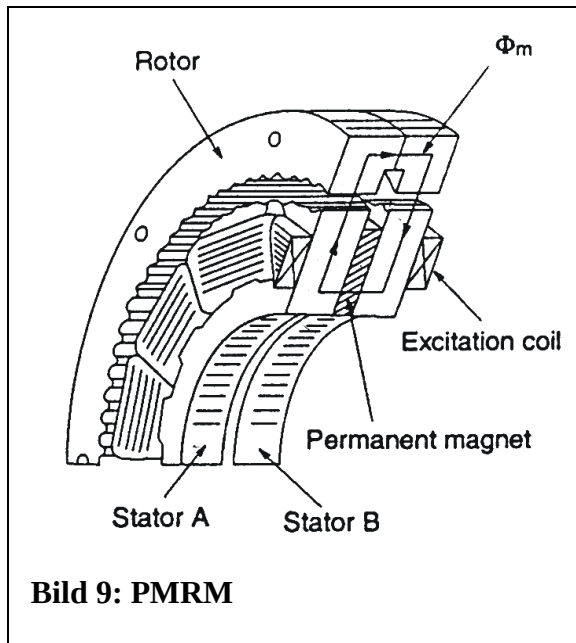


Bild 8: Hochpolige Kanteneffekt Reluktanzmaschine

verbessern. Das Feldbild der magnetischen Struktur in **Bild 8** ist der Einfachheit halber in kartesischen Koordinaten dargestellt. Man erkennt sehr gut die zweifache Nutzung des zwischen den beiden Statoren liegenden Rotors.

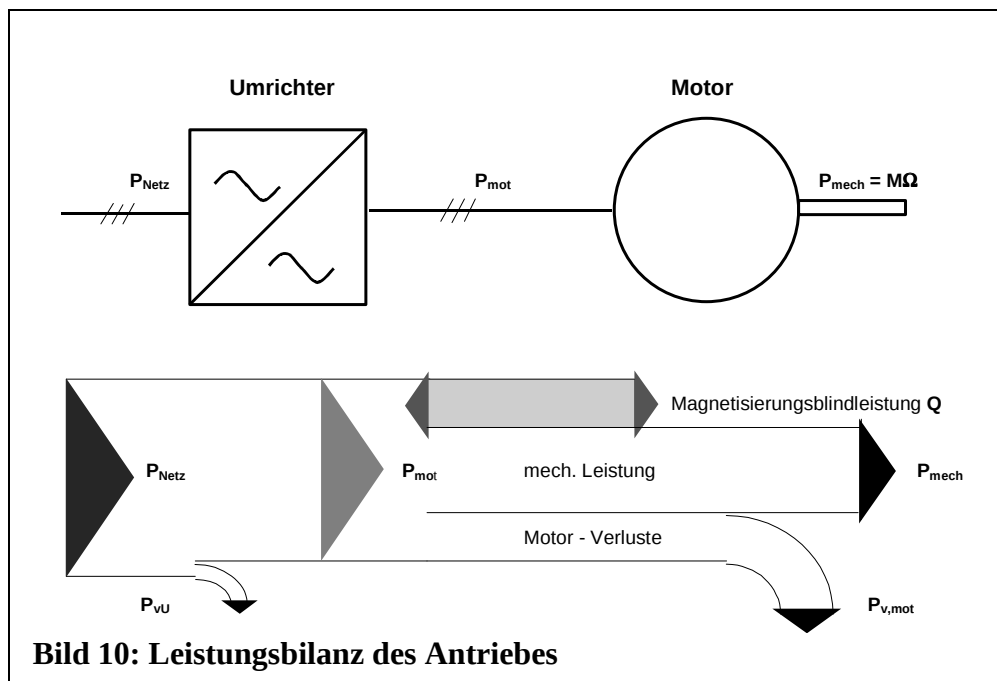
- Hybridmotor mit beidseitiger Polausprägung und Dauermagneterregung im Stator (PMRM): Diese neuerdings im Servomaschinenbereich unter dem Handelsnamen „Dynaserv“ für kleine Leistungen eingesetzten Maschinen stellen eine Kombination aus der dauermagneterregten Maschine mit transversaler Flußführung und dem Schrittmotor dar. Sie gestatten bei entsprechender Ansteuerung eine sehr genaue Positionierung und weisen auch im stromlosen Zustand ein Haltemoment auf. (**Bild 9**)



2.2 Bauleistung des Wechselrichters

Der Wechselrichter stellt für den Motor neben der in mechanische Leistung umzuwandelnden Wirkleistung auch die in der Maschine anfallenden Verluste und die erforderliche Magnetisierungsblindleistung bereit (**Bild 10**).

Die Leistungshalbleiter müssen somit für die gesamte vom Wechselrichter bereitzustellende Leistung bemessen werden, was dazu führt, daß seine Bauleistung stets größer ist als die Leistung des Motors. Da hier Maschinen, die sinusförmige Speisung erfordern und Maschinen, die mit rechteck- oder trapezförmigen Stromverläufen betrieben werden, verglichen werden, kann auf das häufig benutzte Güteprodukt $\eta_{\text{mot}} \cdot \cos \varphi$ nicht zurückgegriffen werden. Vielmehr wird zur Beschreibung des Umrichteraufwandes r_{VA} die



Bauleistung S_{WR} bezogen auf die Nennleistung $P_{\text{mech},n}$ der Maschine benutzt:

$$r_{VA} = \frac{S_{WR}}{P_{\text{mech},n}}$$

Die Bauleistung des Wechselrichters erhält man je nach Schaltungsart zu $S_{WR} = m_s \cdot U_{zk} \cdot \hat{I}_s$ für Wechselrichter in H-Schaltung oder als 4-Quadrantensteller

$$S_{WR} = m_s \frac{U_{zk}}{2 \sin\left(\frac{\pi}{m_s}\right)} \hat{I}_s \text{ für Wechselrichter in Brückenschaltung}$$

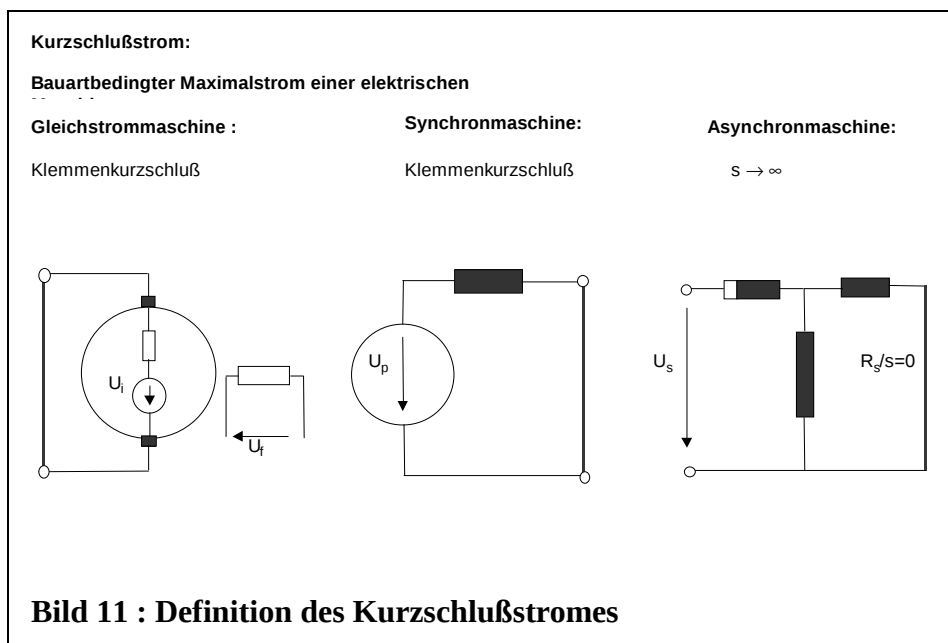
(m_s : Strangzahl, U_{zk} : Zwischenkreisspannung, $\hat{I}_s$: Maximalwert des Strangstromes. Weitere Schaltungen sind in diesem Leistungsbereich nicht üblich und sollen daher hier nicht betrachtet werden.) Es wird deutlich, daß die Bauleistung S_{WR} durch die die Halbleiterauswahl bestimmenden Größen gekennzeichnet ist, womit gleichzeitig die kostenbestimmenden Größen erfaßt sind. Dies ist deshalb wichtig, da die Umrichter Kosten nach wie vor den Hauptanteil der gesamten Antriebskosten ausmachen. Wie aus den Entwürfen hervorgeht, wird dieser Effekt durch die geforderte Überlastbarkeit des Antriebs noch verstärkt.

2.3 Dynamisches Verhalten

Auf der elektrischen Seite ist unter dem dynamischen Verhalten die Zeit bis zum Aufbau des Drehmomentes in der Maschine - die Momentenanregelzeit - zu verstehen. Sie wird im wesentlichen durch die wirksamen Induktivitäten der Maschine und die im Wechselrichter je nach Betriebspunkt vorhandene Spannungsreserve bestimmt. Bei der Asynchronmaschine ist dies die Streuinduktivität, bei der Synchronmaschine die synchrone Reaktanz, je nach Maschinenbauart und Steilheit der Ansteuerung durch transiente oder subtransiente Effekte reduziert. Wesentliche Einflußziffer für das dynamische Verhalten ist das Produkt aus Speisefrequenz und relativem Kurzschlußstrom. Die Definition des Kurzschlußstromes für die einzelnen Maschinenarten kann **Bild 11** entnommen werden.

Durch entsprechende Überdimensionierung des Umrichters kann natürlich auch einer Maschine mit großer Induktivität eine hervorragende Dynamik eingeprägt werden. Da je nach Anwendungsfall die dynamischen Forderungen stark variieren können, wurde für die vergleichenden Betrachtungen daher nur die **wirksame Stranginduktivität** als Maß für die erreichbare Dynamik herangezogen.

Mit dem Aufbau des Drehmomentes wird der Antrieb dann auf die vorgegebene Drehzahl beschleunigen.



Aus der Bewegungsgleichung folgt somit als weitere Kenngröße für das dynamische Verhalten das **Massenträgheitsmoment des Rotors**.

Im Gegensatz zu anderen Antrieben spielt der **Feldschwächbereich** bei diesen Anforderungen nur eine untergeordnete Rolle, kann jedoch in Sonderfällen bedeutsam sein. Die Möglichkeit zur Feldschwächung ist deshalb bei den qualitativen Kriterien aufgeführt.

2.4 Momentenüberlastbarkeit

Das wesentliche Kriterium, das sowohl für den Motor als auch für den Umrichter die Mindestanforderungen festlegt, ist die Momentenüberlastbarkeit.

Für die Maschine bedeutet dies eine entsprechende Überdimensionierung des magnetischen Kreises, wobei bezüglich der Erwärmung die thermische Trägheit des Motors ausgenutzt werden kann, eine Überdimensionierung der Wicklung also nicht unbedingt erforderlich ist. Bei dauermagneterregten Maschinen muß zusätzlich darauf geachtet werden, daß die Magnete durch die Ankerrückwirkung nicht geschädigt werden. Dies führt zwangsläufig zu höherem Aufwand an Magnetmaterial als man es von herkömmlichen Antrieben her gewöhnt ist.

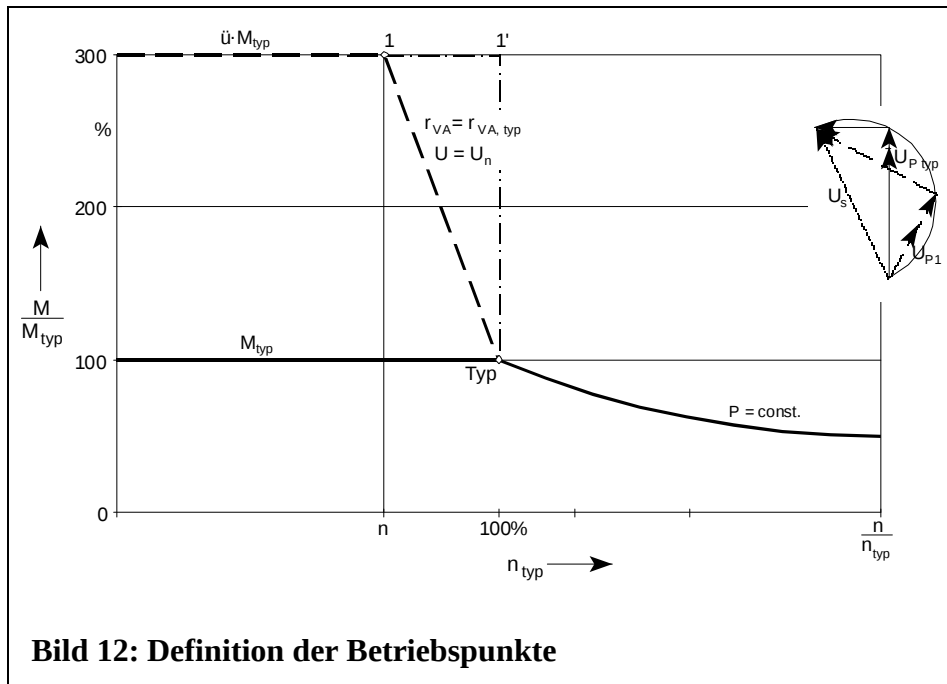


Bild 12: Definition der Betriebspunkte

Setzt man für die grundsätzlichen Betrachtungen in erster Näherung sinusförmige Größen voraus, ist die Wechselrichterscheinleistung durch den Phasenwinkel φ zwischen Strangstrom und Strangspannung des Motors bestimmt, so daß sich zusammen mit dem Wirkungsgrad η die bekannte Dimensionierungsvorschrift

$$P_{Wr} = \frac{P_{mech,max}}{\eta \cdot \cos \varphi}$$

für den Wechselrichter ergibt. Die Betrachtungen in dieser Studie beschränken sich auf die in diesem Leistungsbereich üblichen Standard-Umrichter in DB6 Schaltung, H-Schaltung oder mit je einem

4 Quadrantensteller pro Phase. Sie beschreiben jedoch die grundsätzlichen Anforderungen an die Umrichterauslegungen.

Die Umrichter werden in diesem Leistungsbereich mit IGBT Halbleiterschaltern ausgerüstet, die thermisch nicht überlastbar sind. Somit bedeutet dies, daß die Mindestschaltleistung des Umrichters sich aus dem Produkt aus Maximalstrom bei Überlast und maximaler Betriebsspannung ergibt. Zur Befriedigung zusätzlicher Dynamikforderungen im Überlastbereich ist die Schaltleistung dann weiter entsprechend der erforderlichen Spannungsreserve zu erhöhen.

Befindet sich die Maschine bei Nennbetrieb auf dem Typenpunkt (**Bild 12**), so verursacht im Überlastfall der höhere Maschinenstrom bei allen Maschinenvarianten einen erhöhten Spannungsabfall an den Widerständen und Reaktanzen der Maschine. In **Bild 12** ist dieser Zusammenhang für das Beispiel einer dauermagneterregten Maschinen in dem kleinen Zeigerdiagramm dargestellt. Dies ist nur möglich, wenn entweder die Spannung erhöht wird oder bei konstanter Spannung – Betrieb an der Spannungsgrenze, $U = U_n$ – die Drehzahl im **Betriebspunkt 1** auf die Drehzahl n_1 abgesenkt wird. Die Bauleistung des Umrichters entspricht dann der für den Typenpunkt erforderlichen Auslegung. Soll dagegen die Drehzahl auch unter Überlast konstant gehalten werden – Betriebspunkt 1' – oder steht ein Umrichter mit entsprechend großer Regelreserve für beispielsweise

erhöhte Dynamik zur Verfügung, so können kurzzeitig sowohl der **Betriebspunkt 3** mit der erhöhten Drehzahl n_3 und

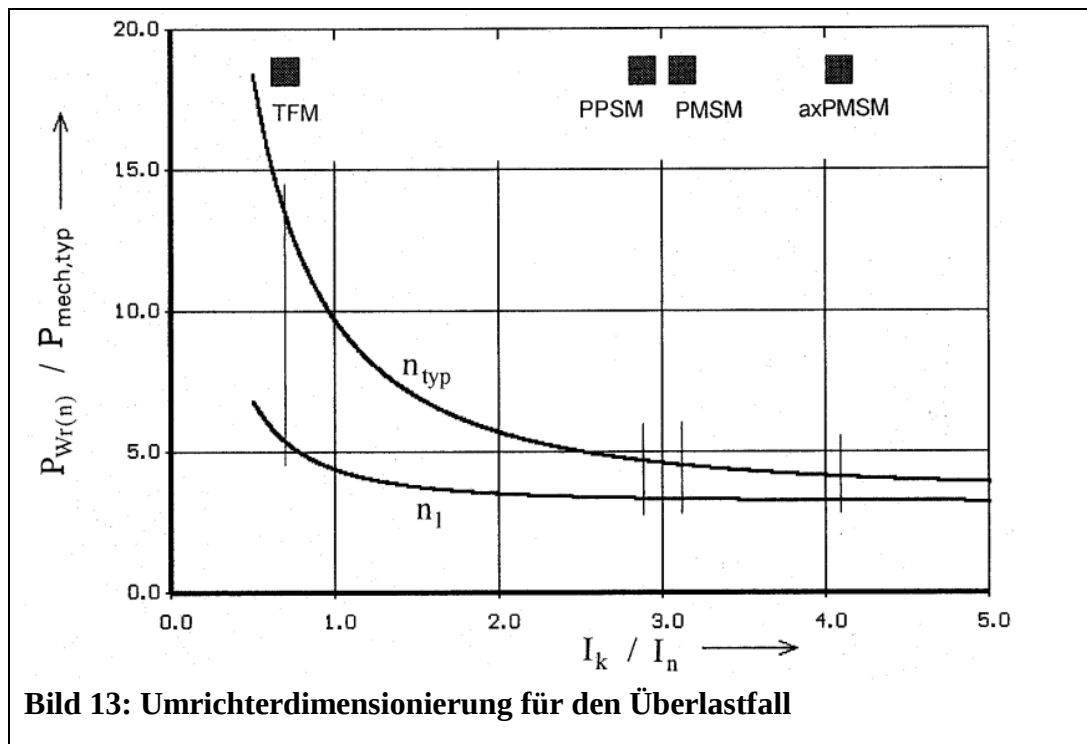
unter Überlast der **Betriebspunkt 2** mit der Drehzahl n_2 angefahren werden. Es zeigt sich, daß für die Bemessung des Umrichters für den Überlastfall wiederum der Kurzschlußstrom die dominierende Größe ist.

Für pollagegeregelter Maschinen ist die Drehzahl, bei der unter Überlast die Spannungsgrenze erreicht wird, auf einfache Weise mit Hilfe des Zeigerdiagrammes bestimmbar. Die Auswertung der zugehörigen Gleichungen führt zu der in den **Bild 13** dargestellten Grafik, die am Beispiel sinusförmiger Speisung die erforderliche Überdimensionierung des Umrichters veranschaulicht, je nachdem, ob die Drehzahl n_{typ} gehalten werden soll oder ein Drehzahlabfall auf n_1 zugelassen wird.

Die Überlastungen wurden zwischen $\bar{u} = 1 \dots 4$ und der relative Kurzschlußstrom von sehr „weichen Maschinen“ ($I_k / I_n = 0.5$) bis zu „harten Maschinen“ ($I_k / I_n = 5$) variiert. Es wird deutlich, daß der minimale Aufwand bei Maschinen mit verschwindend kleiner Reaktanz ($I_k / I_n \rightarrow \infty$) auftritt. Bei ihnen ist der Scheinleistungsbedarf gleich dem $\bar{u}$ -fachen der mechanischen Leistung.

Der mit Überlast mögliche Drehzahlbereich ist erwartungsgemäß bei Maschinen mit relativ großer Reaktanz, d.h. kleinem Kurzschlußstrom, eingeschränkt. Gerade diese „weichen“ Maschinen eignen sich jedoch besonders gut für einen **Feldschwächbetrieb** durch Phasenregelung des Ständerstromes. Es bleibt festzuhalten, daß sich offenbar die Forderungen nach hoher Überlastbarkeit und hohem Feldschwächbereich nicht gleichzeitig erfüllen lassen.

Ebenfalls ist in **Bild 13** bereits eine grobe Einordnung der in dieser Studie untersuchten Synchron-

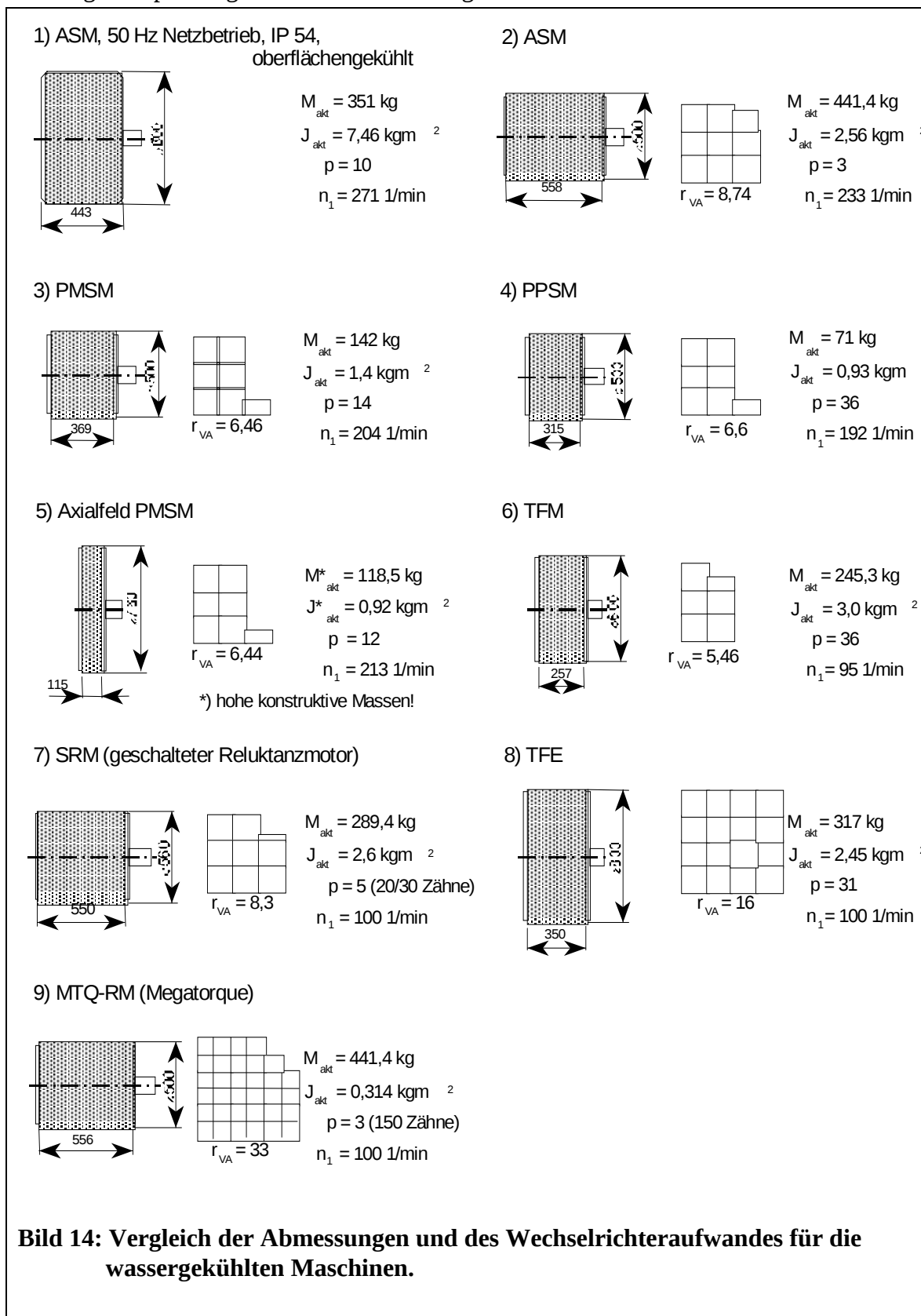


maschinenkonzepte wiedergegeben.

3 Ergebnisse der Untersuchungen

Die Untersuchungen zeigten, daß bezüglich der Kühlung die Trends bei allen Maschinen gleich sind, so daß es für relative Aussagen genügt, Maschinen einer Kühlungsart untereinander zu vergleichen. Daher wurden alle vergleichenden Betrachtungen für wassergekühlte Maschinen mit einem um den Stator gelegten Kühlmantel angestellt. Diese weisen naturgemäß die geringsten Abmessungen auf und dürften damit für den praktischen Einsatz am wahrscheinlichsten in Frage kommen. Die in **Bild 14** zusammengestellte Übersicht über die Abmessungen der Entwürfe und den

Aufwand für den Wechselrichter veranschaulicht die zum Teil erheblichen Unterschiede gegenüber der als Vergleichspunkt gewählten oberflächengekühlten ASM für Netzbetrieb und auch die



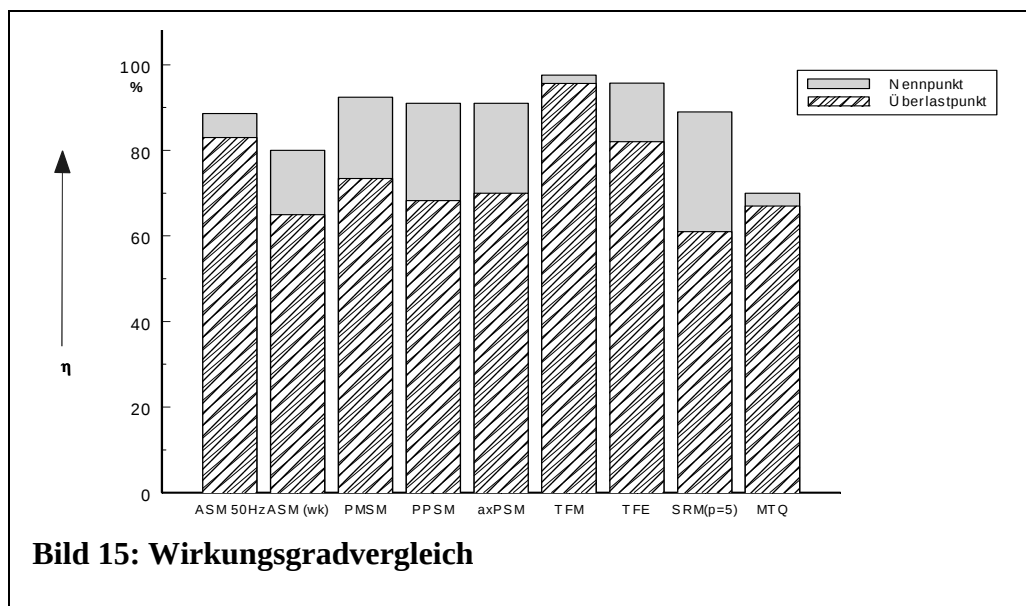
Variationsbreite der umrichter gespeisten Entwürfe untereinander.

Während die Hauptabmessungen der Maschinen direkt angegeben sind, ist der Wechselrichteraufwand symbolisch durch die Anzahl von Kästchen mit $r_{VA} = 1$ dargestellt. Im Idealfall wären also bei einer Überlastbarkeit von $\ddot{u} = 3$ auch 3 Kästchen zu erwarten. Zusätzlich angegeben sind weiterhin die Gewichte des aktiven Materials, die Massenträgheitsmomente und die Drehzahl n_1 , die unter

Überlast erreicht wird. Man erkennt, daß infolge des hohen Drehmomentes selbst bei Wasserkühlung alle Maschinenentwürfe größer oder gleich der IEC Baugröße 250 ausfallen. Die oberflächengekühlte ASM für Netzbetrieb erreicht sogar Baugröße 400. Insgesamt sind drei **wesentliche Ergebnisse** abzulesen:

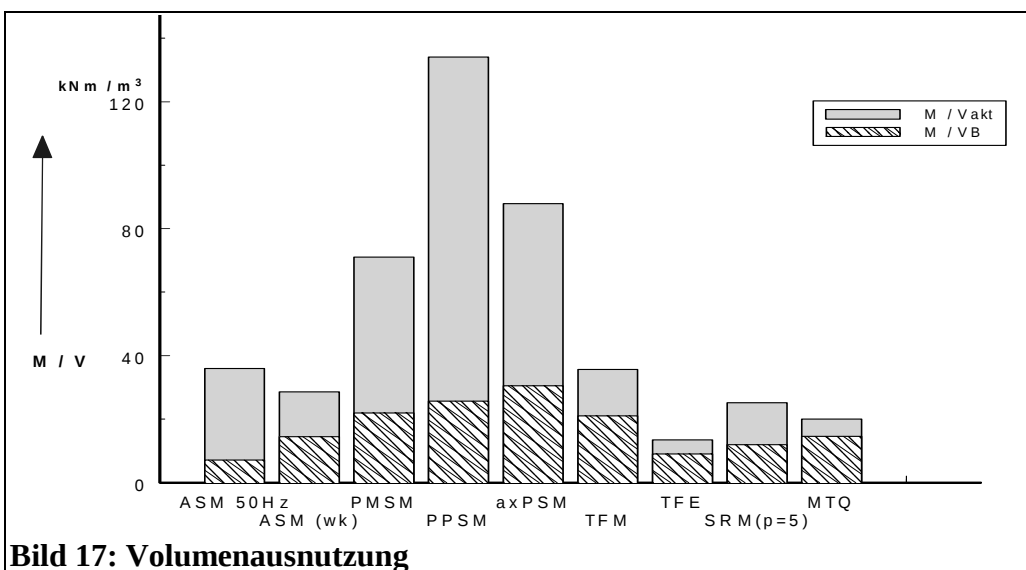
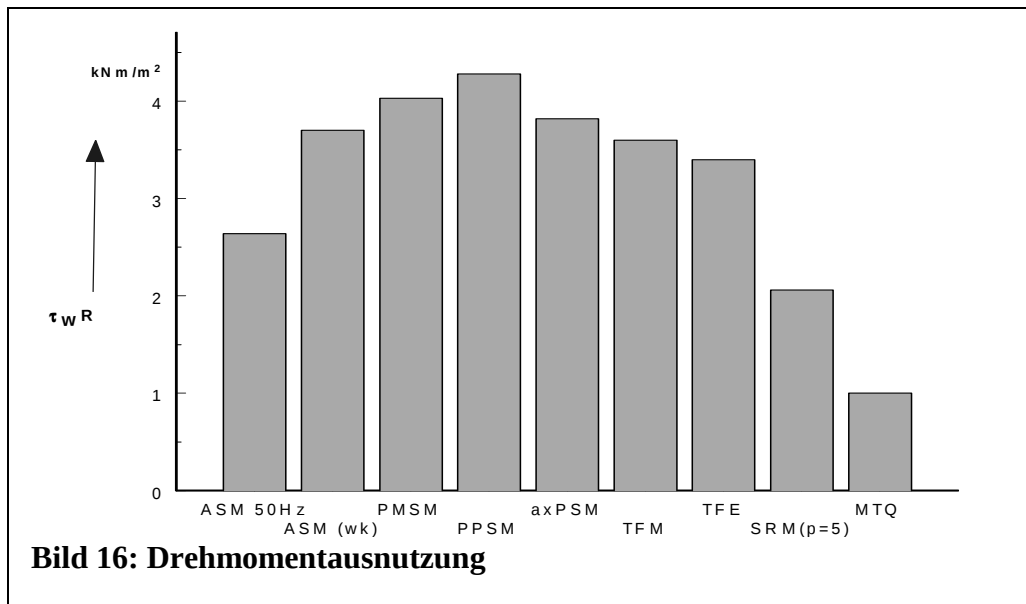
1. Entscheidend für Gewicht und Abmessungen der Maschine ist die geforderte Überlast, die die Auslegung des magnetischen Kreises bestimmt. Das Kühlverfahren beeinflusst dagegen als Sekundäreffekt nur die Wicklungsabmessungen und das Kupfergewicht der Maschine.
2. Insgesamt weist die Gruppe der dauermagneterregten Maschinen (**Pos. 3 bis 6**) nicht nur die geringsten Abmessungen und Gewichte auf, sondern auch den geringsten Aufwand für den Wechselrichter.
3. In der Gruppe der Reluktanzmaschinen (**Pos. 7 bis 9**) zeigt sich, daß die erhebliche Streuung insbesondere der hochpoligen, vom Schrittmotor abgeleiteten Konzepte, zu ungünstigen Abmessungen und drastischem Aufwand im Wechselrichter führt. Die günstigsten Ergebnisse konnten noch mit einer 10 poligen SRM erreicht werden. Das Hybridmotorenkonzept weist dagegen so ungünstige Wachstumsgesetze auf, daß ein Entwurf für diese Leistung nicht mehr sinnvoll erschien.

Eine weitere Differenzierung der Ergebnisse erhält man durch die Betrachtung des Wirkungsgrades (**Bild 15**) und der Ausnutzungsziffern für das Drehmoment (**Bild 16**) und das Volumen (**Bild 17**). Beim Wirkungsgrad zeigt sich, daß zum einen die Maschinen mit hoher Überlastdrehzahl n_1 (ASM, PMSM, PPSM) infolge der erhöhten Stromaufnahme entsprechende Verluste aufweisen. Die Maschinen mit kleinem Kurzschlußstrom weisen prinzipbedingt eine günstigere Tendenz auf (TFM),

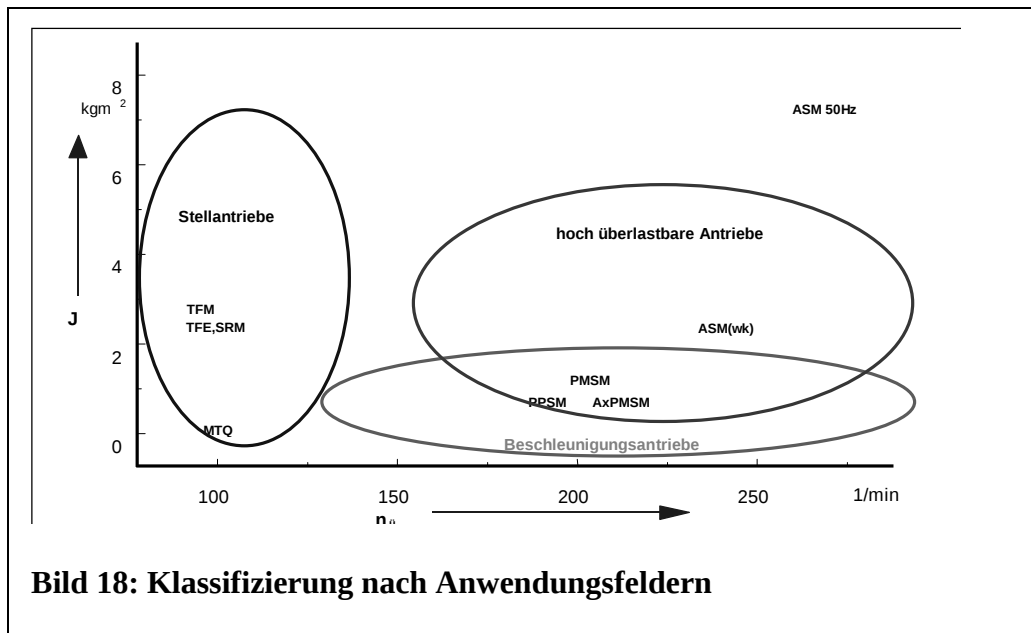


solange sie nicht wegen der Einhaltung der Überlastforderung hochgesättigt werden müssen, wie es z.B. bei SRM und MTQ der Fall ist. Die Transversalflußmaschine kommt hier mit Abstand auf die besten Werte. Bei der hochpoligen Kanteneffekt-Reluktanzmaschine (MTQ) dagegen ist der insgesamt schlechte Wirkungsgrad eine Folge der erheblichen Streuung des hochpoligen Magnetkreises und der erforderlichen hohen Sättigung. Da jeder Entwurf stets ein Kompromiß zwischen widerstreitenden Forderungen ist, könnte man alternativ natürlich eine weniger hoch gesättigte Auslegung des Magnetkreises wählen, kommt dann aber zu sehr unpraktikablen Abmessungen.

Bei der Drehmomentausnutzung (**Bild 16**) liegen die dauermagneterregten Maschinen mit direkt am Luftspalt liegenden Magneten (Flachmagnetbauweise) vorne, dicht gefolgt von Asynchronmaschine und Transversalflußmotor. Dies ist i.w. auf den hier möglichen großen drehmomentbildenden Radius zurückzuführen. Die Reluktanzkonzepte weisen prinzipbedingt einen geringeren Drehschub auf, so daß hier mit geringeren Werten gerechnet werden muß. Nur bei der statorerregten Transversalflußmaschine (TFE) kann dieser Nachteil durch einen günstigeren drehmomentbildenden Radius kompensiert werden.



Die Ausnutzung des Bauvolumens (**Bild 17**) wurde sowohl bezüglich des aktiven Materials als auch bezüglich des von der Maschine eingenommenen Bruttovolumens betrachtet. Die beste Aktivmaterialausnutzung weisen hier die dauermagneterregten Maschinen in Flachmagnetbauweise auf. Dies liegt an den durchweg kleinen Polteilungen und den dadurch möglichen geringen Jochabmessungen. Spitzenreiter ist hier die PPSM. Betrachtet man dagegen die Ausnutzung des umbauten Raumes, liegen die Werte aller Maschinen deutlich dichter beieinander. Die Reluktanzmaschinen schneiden hierbei besonders schlecht ab, obwohl bereits bezüglich des Wirkungsgrades Kompromisse eingegangen wurden (s.o.). Bei den Maschinen mit einer großen Differenz zwischen den beiden Volumenausnutzungsziffern wird somit ein konstruktives Optimierungspotential erkennbar, das beispielsweise durch Wirkflächenfaltung genutzt werden könnte.



Eine Betrachtung der Entwürfe bezüglich Trägheitsmoment und Überlastdrehzahl liefert die in **Bild 18** dargestellte Zuordnung zu den Anwendungsfeldern. Man erkennt sehr deutlich die Gruppierung der Maschinen mit hohem Kurzschlußstrom im Bereich der Beschleunigungsantriebe bzw. der hoch überlastbaren Antriebe, während die Maschinen mit kleinem Kurzschlußstrom eher im Bereich der Stellantriebe angesiedelt sind. Etwas abgesetzt hiervon ist die hochpolige Reluktanzmaschine (MTQ), die sich durch ein sehr kleines Rotorträgheitsmoment auszeichnet. Das andere Extrem stellt die hochpolige netzgespeiste Asynchronmaschine dar, die infolge der Speisung aus dem starren Netz den geringsten Drehzahleinbruch aufweist.

Somit kann an dieser Stelle festgehalten werden, daß die Forderungen der Basisspezifikation am besten mit den dauermagneterregten Maschinen befriedigt werden können.

- Diese weisen die günstigsten Ausnutzungsziffern und die kleinsten Abmessungen auf und
- erfordern den geringsten Umrichteraufwand.

In dieser Gruppe ist **für die PPSM** festzuhalten:

- Beste Ausnutzung des Aktivmaterials
- Kleinstes Trägheitsmoment
- Einfach herstellbare Wicklung mit kleinen Wickelköpfen
- Konventionelle Fertigungstechnologie für das Blechpaket
- Ausnutzung des Bauvolumens verbesserungsbedürftig
- Drehmomentschwankung und Wirkungsgrad sind optimierbar

Die qualitativ nahezu gleichwertige **Scheibenläufermaschine (axPMSM)** weist ebenfalls

- gute Ausnutzungsziffern auf, hat aber auch wegen der Scheibenstruktur
- einen hohen Anteil an konstruktionsbedingter Masse und Trägheitsmoment.
- Die Möglichkeiten zur Verbesserung des Bauvolumens sind bereits ausgeschöpft und
- die Fertigungstechnologie für die Scheibenstatoren ist aufwendiger. Ebenfalls stark von der Fertigungstechnologie abhängig ist der Drehmomentenripple (Nutform).

Weitere anwendungsspezifische Optimierungsmöglichkeiten ergeben sich aus der Wahl der Strom - Zeit - Verläufe bei Umrichterspeisung. Diese können beispielsweise ohne Überlastung des Wechsel-

richters so gewählt werden, daß sich eine höhere Momentenausbeute ergibt, wenn die Maschine es thermisch zuläßt [2] oder aber – insbesondere bei Maschinen mit höherem Anteil an Reluktanzkräften – auch so gewählt werden, daß die Verluste minimal werden [3].

4 Weiterentwicklung

Wünschenswert wäre natürlich die **Abdeckung aller drei Aufgabenfelder** mit einem, baukastenartig modifizierbaren, Maschinenkonzept. Dies erfordert eine Maschine mit geringem Trägheitsmoment, hohem Kurzschlußstrom und geringem Bauvolumen. Das größte Entwicklungspotential für diese Aufgabe ist nach unserer Auffassung bei der polyphasigen Synchronmaschine zu finden.

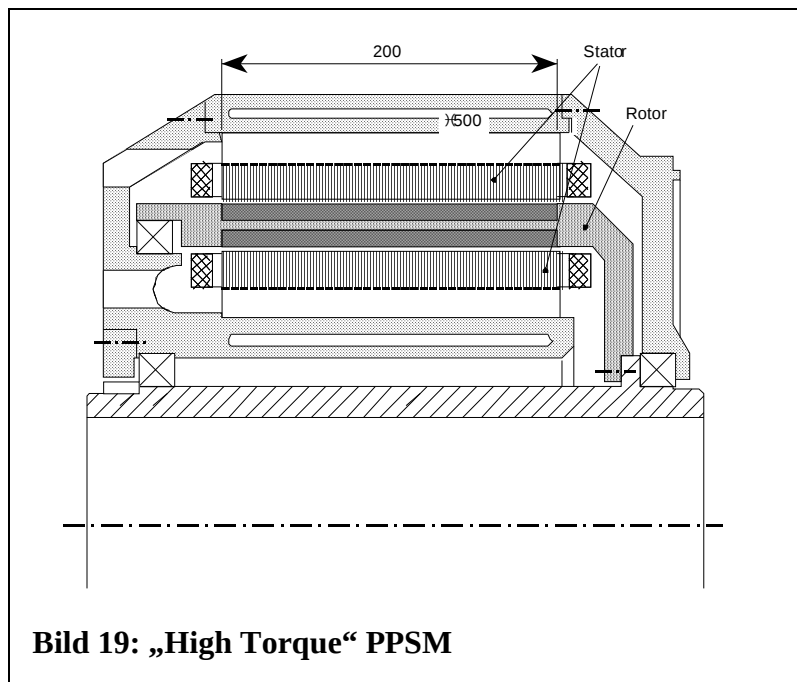


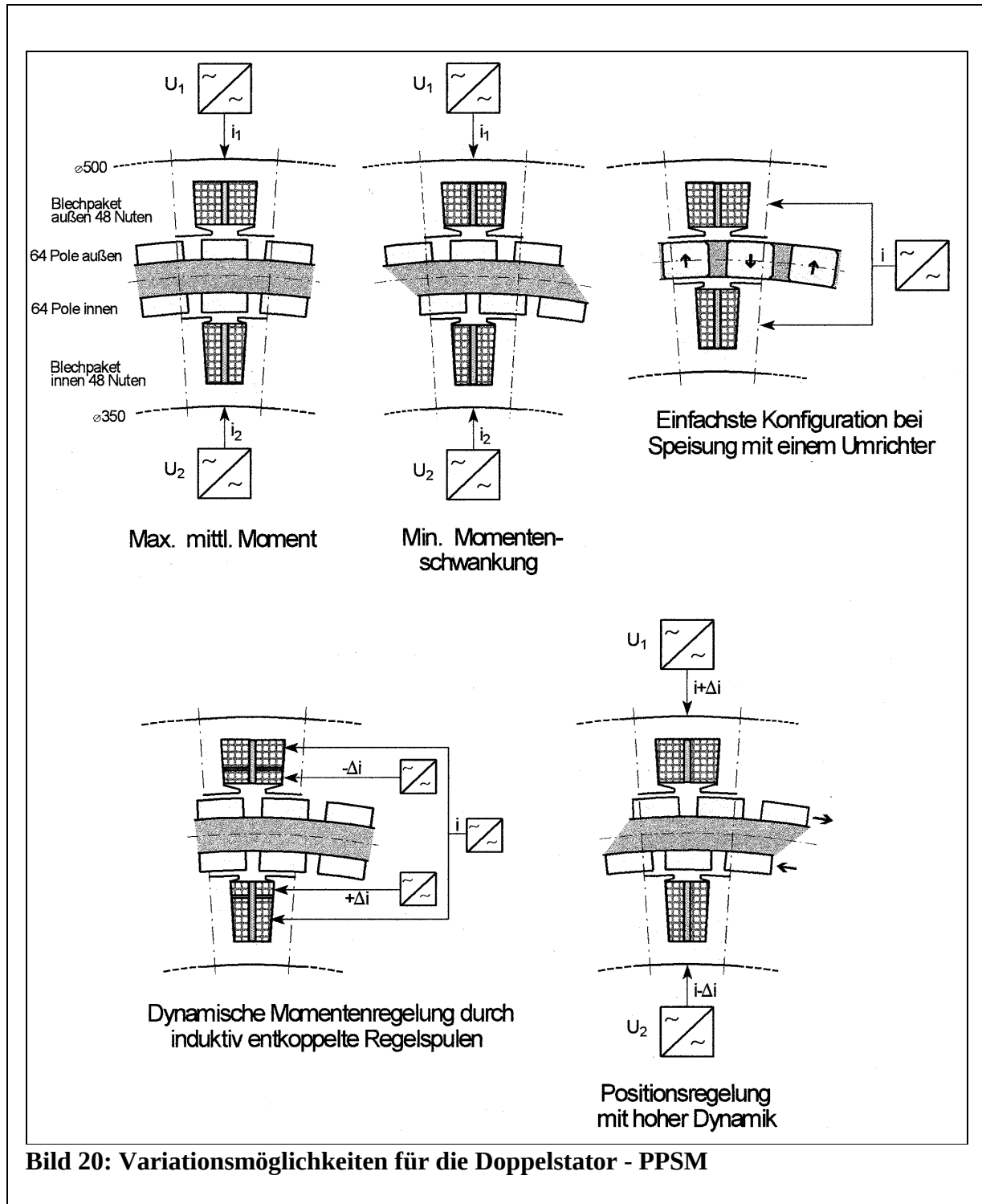
Bild 19: „High Torque“ PPSM

Zur Darstellung dieser Möglichkeiten wurde der in **Bild 19** dargestellte Vorschlag erarbeitet, der eine PPSM mit einfach gefalteter Wirkfläche zeigt. Diese Maßnahme führt zu einer drastischen Verbesserung der Ausnutzung des Bauvolumens, d.h. die Länge des Maschinenentwurfes in **Bild 14** würde sich nahezu halbieren.

Unter Ausnutzung der Vorteile dieses Konzeptes kann das vorhandene Bauvolumen durch die glockenförmige Rotorkonstruktion und den innen und außenliegenden Stator wesentlich besser genutzt werden. Die Hohlwellenbauweise gestattet dabei eine raumsparende Integration in die Arbeitsmaschine. Je nach Anordnung der Dauermagnete auf dem Rotor dient das Rotorjoch als magnetischer Rückschluß, d.h. beide Staturen sind als unabhängige Teilmaschinen aufzufassen, oder nur als Träger der Permanentmagnete, d.h. beide Staturen sind magnetisch gekoppelt. Das Rotorträgheitsmoment variiert dabei leicht, bleibt aber insgesamt minimal.

Je nach Anordnung der Dauermagnete gewinnt man eine Reihe von Freiheitsgraden, die Speisung der beiden Staturen anwendungsabhängig zu variieren. Eine Auswahl dieser Möglichkeiten ist in **Bild 20** dargestellt.

So könnte das Magnetsystem unabhängig von den Optimierungsmöglichkeiten, die durch Wahl des Polbedeckungsfaktors und die Gestaltung der Statorpole gegeben sind, zusätzlich durch die konstruktive Anordnung der Dauermagnete und der Staturen zueinander sowohl für maximales mittleres Moment oder auch für minimale Momentenschwankung optimiert werden. Die Umrichterspeisung und die Wicklungsverschaltung kann zwischen der einfachsten Variante mit einem Umrichter und Varianten mit mehreren Umrichtern für höhere Dynamik oder genaue Positionsregelung variiert werden.



Für dynamische Positionieraufgaben können die Statoren auch gegenläufig angesteuert werden, wodurch eine Differenzregelung ermöglicht wird, die zu einer Verdoppelung der Dynamik gegenüber einer einfach angesteuerten Maschine führen würde. Je nachdem, welche Regelreserve benötigt wird, ist das Nenndrehmoment der Maschine natürlich entsprechend zu reduzieren.

5 Zusammenfassung

Für den Einsatz als „High Torque“ Maschinen, d.h. Maschinen mit kleinen Drehzahlen und hoher Momentenüberlastbarkeit, geeignete Antriebskonzepte wurden anhand von vereinfachten Maschinenentwürfen und mit Hilfe zusätzlicher numerischer Feldberechnungen untersucht. Dabei

wurde von einer Basispezifikation ausgegangen, die den heute bei Servoantrieben üblichen Leistungsbereich deutlich überschreitet.

Die Untersuchungen zeigen, daß insbesondere der Kurzschlußstrom des Motors ein dimensionierender Parameter sowohl für die Dynamik als auch für das geforderte Überlastmoment ist. Hiervon hängt gleichzeitig auch die Bemessung des speisenden Wechselrichters ab, der um so größer ausfällt, je kleiner der Kurzschlußstrom der Maschine ist.

Insgesamt weisen die dauermagneterregten Maschinen mit direkt am Luftspalt angeordneten Magneten die günstigsten Eigenschaften bezüglich Bauvolumen und Umrichteraufwand auf. Besonders attraktiv wegen ihres Optimierungspotentials ist die polyphasige permanentmagneterregte Synchronmaschine, deren Möglichkeiten, einen für unterschiedliche Aufgabengebiete flexibel anpaßbaren „High Torque“ Antrieb aufzubauen, aufgezeigt werden.

6 Literatur

- [1] W.R.Canders, F.Laube, H.Mosebach, „Vorstudie Technologien und Grenzen von „High Torque“ Antrieben“, Abschlußbericht zum FVA Forschungsvorhaben 352, FVA Forschungsheft 586, Juli 1999
- [2] H.Mosebach, W.R.Canders, „Average thrust of permanent magnet excited linear synchronous motors for different stator current waveforms“, Proc. ICEM '98, 2.-4. Sept.1998, Istanbul, Turkey
- [3] H.May, W.R.Canders, R.Palka, „Loss reduction in synchronous machines by appropriate feeding patterns“, Proc. ICEM '98, 2.-4. Sept.1998, Istanbul, Turkey