

Effiziente Drehstrommotoren mit Kupfer-Druckgussläufern

H. Greiner, Aichwald

Langwierige und aufwändige Forschungsarbeiten in den USA haben dazu beigetragen, dass auch in Europa Motoren mit Leistungen bis zu 37 kW bei 1500 r/min mit Kupfer-Druckgussläufern angeboten werden [1]. Dieser Beitrag beschreibt die Hintergründe dieser Entwicklung, die mögliche Erhöhung des Wirkungsgrades und das Einsparungspotential für den Anwender.

lässt sich für das Potential der Wirkungsgraderhöhung ein Trend nach Bild 2 errechnen. Die veröffentlichten Werte nach [2] bestätigen diesen rechnerischen Trend. Die Messergebnisse nach [1] enthalten noch andere Maßnahmen (bessere Eisenqualität und längeres Blechpaket) zur Optimierung des Wirkungsgrades, wie Bild 4 zeigt und wie aus [11] hervorgeht.

Einen Überblick zur bisherigen und künftigen Entwicklung der Wirkungsgrade von Drehstrom-Käfigläufermotoren gibt Bild 3, das in Anlehnung an [2] erstellt wurde.

1 Verlustanteile

Abgesehen von Zeiten der Kupferknappheit bestehen traditionell die Leiter der Ständerwicklung von Drehstrom-Käfigläufermotoren aus Kupfer, während im Normbereich (bis Achshöhe 315 mm, Bemessungsleistung 132 kW bei 1500 r/min) für den Käfig des Rotors Aluminium im Pressgussverfahren verwendet wird. Die unterschiedliche Wahl der Leiterwerkstoffe ist durch die Technologie einer rationellen Fertigung begründet. Der im Verhältnis 56:35 bessere Leitwert von Kupfer gegenüber Aluminium machte schon immer die Verwendung von vergießbarem Kupfer im Rotor erstrebenswert.

Bild 1a zeigt die typischen Verlustanteile eines 4-poligen Motors mit der Bemessungsleistung 2,2 kW.

Die Stromwärmeverluste im Läufer (Al) betragen 30 %. Dieser nach den Kupferverlusten im Ständer (Cu = 50 %) höchste Anteil bleibt im Leistungsbereich bis 100 kW relativ etwa gleich hoch (Bild 1b) – ist also ein lohnender Ansatzpunkt zur Verbesserung des Wirkungsgrades.

2 Potential der Wirkungsgraderhöhung

Die Stromwärmeverluste im Rotor (z. B. Al = 30 %) können durch Verwendung von Kupfer theoretisch im Verhältnis der Leitwerte 35/56 auf etwa 18 % reduziert werden. Die Verminderung der Gesamtverluste beträgt also in diesem Fall 12 %-Punkte.

In [2] wird über Messungen an Motoren mit Bemessungsleistungen 3...200 kW mit Kupferläufern berichtet. Die Gesamtverluste gingen um 19...12,5 %, im Schnitt also um 14,7 % zurück.

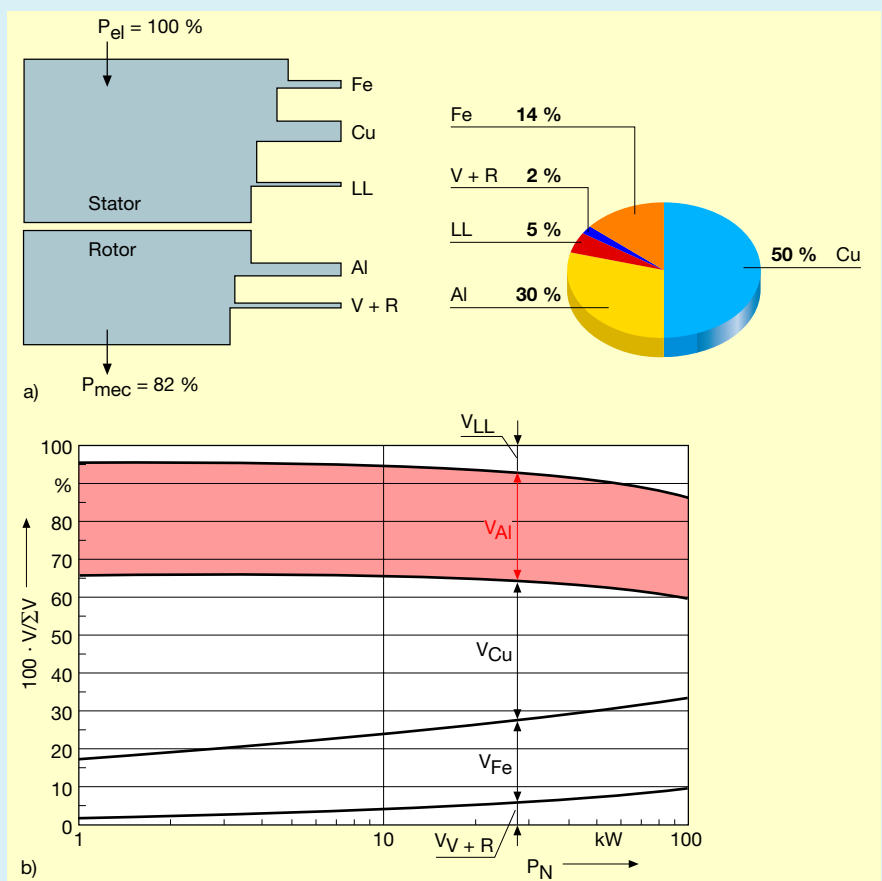
(Unterschiedliche typen- und fabrikatabhängige Auslegungen lassen keine vollständige

Übereinstimmung solcher Vergleichswerte erwarten).

Unter vereinfachenden Annahmen (Potential der Verlustminderung durch Cu-Rotor abhängig von der Bemessungsleistung etwa 20...12 %)

3 „S-Klasse“ der Wirkungsgrade

Über die Klassifizierung der Wirkungsgrade von Drehstrom-Käfigläufermotoren in Nord-



1 Verlustanteile und -aufteilung

a) Verlustanteile bei einem 4-poligen Drehstrom-Käfigläufermotor
Bemessungsleistung 2,2 kW

b) Tendenz der Verlustaufteilung bei 4-poligen Käfigläufermotoren im Bereich der Bemessungsleistungen $P_N = 1 \dots 100$ kW

Erläuterung der Abkürzungen

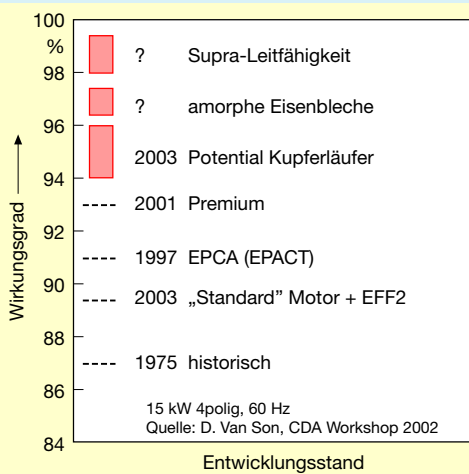
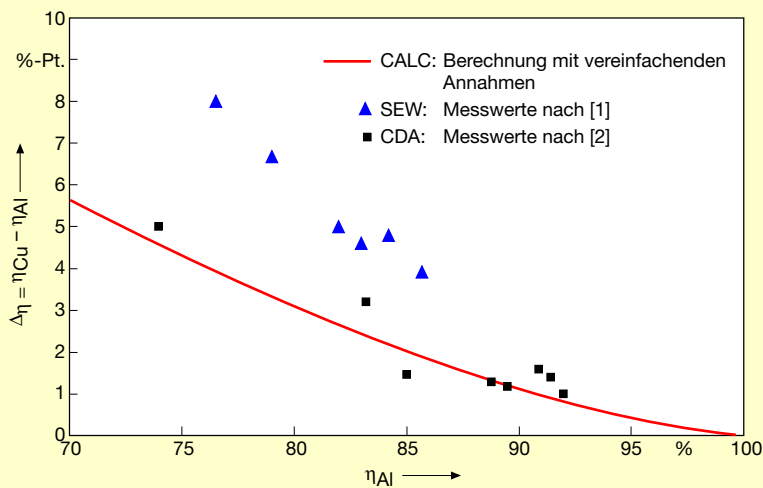
Bilder	Verlustanteil
Fe = V_{Fe}	= Eisenverluste
Cu = V_{Cu}	= Stator-Kupferverluste
Al = V_{Al}	= Rotor-Aluminiumverluste
LL = V_{LL}	= Zusatzverluste (add. load losses)
V+R = V_{V+R}	= Ventilations- und Reibungsverluste

nach IEC

P_{FE}
$(I^2 R)_s$
$(I^2 R)_r$
P_{LL}
P_f

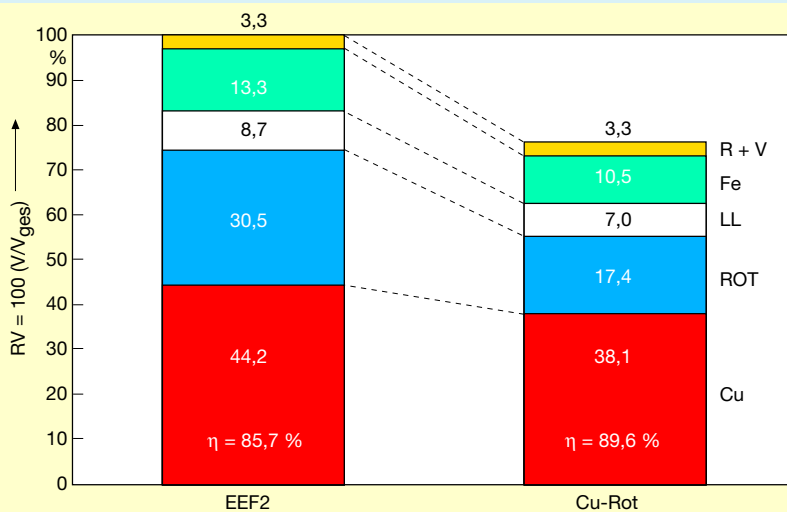
Autor

Obering. Helmut Greiner, Aichwald, war Mitglied in verschiedenen DKE- und IEC-Gremien und ist heute als beratender Ingenieur tätig.



▲ ② Potential der Wirkungsgraderhöhung durch Verwendung von Kupfer statt Aluminium im Druckgussläufer

◀ ③ Entwicklung der Katalog-Wirkungsgrade von Drehstrom-Käfigläufermotoren Bemessungsleistung 15 kW, 4polig, 60 Hz



④ Vergleich der Verlustanteile bei Motoren mit hohem Wirkungsgrad (EFF2) mit Kupferläufer und weiterer Optimierung (Cu-Rot)

Cu: Ständerwicklung; Rot: Rotorwicklung; LL: Zusatzverluste; Fe: Eisenverluste
R+V: Reibung und Ventilation

Quelle: [10]

amerika [3] und Europa [4] wurde in dieser Zeitschrift schon ausführlich berichtet. Der in den USA gesetzlich in EPCA (=EPACT) seit 1999 vorgeschriebene, relativ hohe Stand wurde inzwischen seit 2001 auf freiwilliger Basis durch eine Initiative von CEE (Consortium for Energy Efficiency) und NEMA (National Electrical Manufacturers Association) unter der Be-

zeichnung „Premium Efficiency“ überboten. Diesen hohen Stand erreichen oder übertreffen Motoren mit Kupfer-Druckgussläufern nur, wenn sie durch zusätzliche Maßnahmen in Richtung Wirkungsgrad optimiert werden. Sie erhalten dann das Prädikat „Super-Premium“. Bei den nachfolgenden Vergleichen ist zu beachten, dass die Angaben für EFF1 und nach

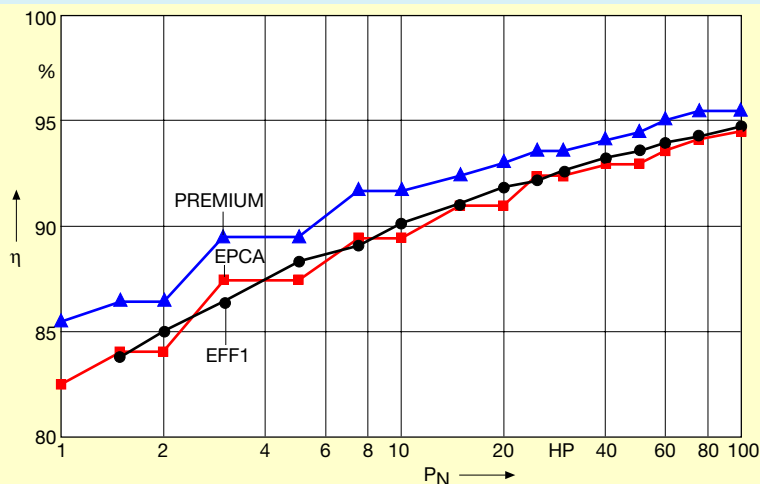
Tafel 1 Vergleich der Wirkungsgrade bei einigen ausgewählten Bemessungsleistungen P_N , 4-polig (1800 U/min), 60 Hz, TEFC (entspricht IP54)

P_N [PS]	P_N [kW]	NEMA Tab. 12-10	EPCA § 431.42	CEMEP EFF1	NEMA/CEE Premium	CU-Läufer nach [1]	CU-Läufer nach [2]
1,5	1,1	84,0	84,0	83,8	86,5	84,5	–
2	1,5	84,0	84,0	85,0	86,5	85,7	–
3	2,2	87,5	87,5	86,4	89,5	87,0	–
7,5	5,5	89,5	89,5	89,2	91,7	89,6	–
15	11	91,0	91,0	91,0	92,4	–	90,7
30	22	92,4	92,4	92,6	93,6	–	–
40	30	92,4	92,4	93,2	93,6	–	90,1
50	37	93,0	93,0	93,6	94,5	–	–
100	75	94,5	94,5	94,7	95,4	–	–
200	150	95,0	95,0	–	96,2	–	–

NEMA 12-10 = EPCA (EPACT) = EER CSA C390

NEMA/CEE: Vereinbarung vom 20.06.2001 (www.cee1.org)

CEMEP: Vereinbarung der Motorhersteller mit der EU



5 Vergleich von Wirkungsgradklassen in Europa und Nordamerika Frequenz 50 bzw. 60 Hz beachten!

EFF1 hoher Wirkungsgrad nach CEMEP-Vereinbarung

EPCA gesetzlich gefordert in USA und Kanada

PREMIUM freiwillige Vereinbarung NEMA/CEE



6 Geschmolzenes Kupfer wird in die vorgewärmte Gussform gegossen

Fotos: Formcast Inc



7 Querschnitt durch einen Druckgussläufer

Das flüssige Kupfer muss die relativ engen und langen Nuten im Rotor lunkerfrei füllen

[1] für 50 Hz gelten, während die nordamerikanischen Festlegungen den 60-Hz-Vorteil haben.

Tafel 1 erlaubt einen Vergleich für einige ausgewählte Bemessungsleistungen und Bild 5 zeigt den Vergleich im Leistungsspektrum 1...100 PS.

4 Problem Druckgussform

Aluminium schmilzt bei 660 °C, Kupfer benötigt 1083 °C. Druckgussformen aus hochwertigem Stahl, wie sie für Aluminium verwendet werden (Schmelzpunkt ≈1450 °C), sind

zur Verarbeitung von Kupfer völlig ungeeignet. Eine rationelle Serienproduktion von Kupfer-Druckgussläufern ist nur möglich, wenn thermisch beständige Formen entwickelt werden können.

In den USA begann vor etwa drei Jahren die der Kupferindustrie nahestehende „Copper Development Association (CDA)“ ein Forschungsprogramm, das vom „Department of Energy (DOE)“ der Regierung finanziell gefördert wurde. Die technologischen Probleme bei dieser Entwicklung werden aus einer Präsentation (www.copper-motor-rotor.org, Demonstration Meeting Presentation Jan. 2002) deutlich, aus der auch die Bilder 6 und 7 entnommen sind.

Nach einer anfänglichen Standzeit der Druckgussformen von nur fünf „shots“ wurden inzwischen durch Verwendung von hochwärmebeständigem Material Lebensdauern erreicht, die für Versuchs- und Kleinserien ausreichen. Bis zum angestrebten, wirtschaftlichen Ziel von 20000 Abgüssen pro Form ist noch weitere Forschungsarbeit notwendig, zu deren Finanzierung nun aber das „Henne-Ei-Dilemma“ besteht: Die Hersteller erwarten Verkaufszahlen – die Anwender attraktive Angebote.

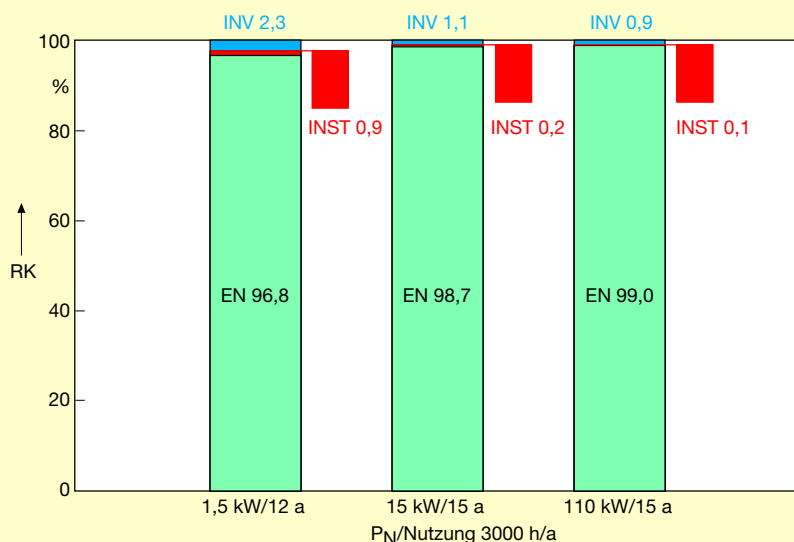
Der Bericht [2] fokussiert die thermischen Probleme auf die Lebensdauer der Druckgussform. In einer anderen Studie werden auch die Rückwirkungen der hohen Kupfertemperaturen auf die Qualität der Dynamobleche erwähnt. Da ein Ausglühen der Rotorbleche mit entsprechender Minderung der magnetischen Eigenschaften befürchtet wurde, mussten die Rotoren sofort nach dem Gießen mit Wasser gekühlt werden, sodass die Stäbe schrumpfen und damit die Eisenbleche weniger ausglühen. Die Versuche ergaben einen geringen Effekt dieser Art bei den größeren Objekten und einen messbaren Anstieg der Eisenverluste bei den Rotoren für Motoren kleinerer Leistungen.

Aus der im Vergleich zu Alu-Druckguss bemerkenswert geringen Unwucht von Kupfergussrotoren wird geschlossen, dass die Lunkerbildung gering ist.

5 Marktchancen für Motoren mit höchstem Wirkungsgrad

Staat und Energiewirtschaft haben in Nordamerika zunächst jahrzehntelang die Verwendung von energieeffizienten Motoren (EEM) gefördert [3, 5]. Nachdem solche Motoren dann 1997 durch EPCA vorgeschrieben wurden (Bild 3), blieb das Thema ein „Selbstläufer“, wie die freiwillige Entwicklung der Premium-Klasse und der Kupfer-Druckguss-Technologie zeigt.

Es darf angenommen werden, dass für die nordamerikanischen Anwender bei ihrer Kaufentscheidung die Ökonomie eine Hauptrolle und die Ökologie eine Nebenrolle spielt.



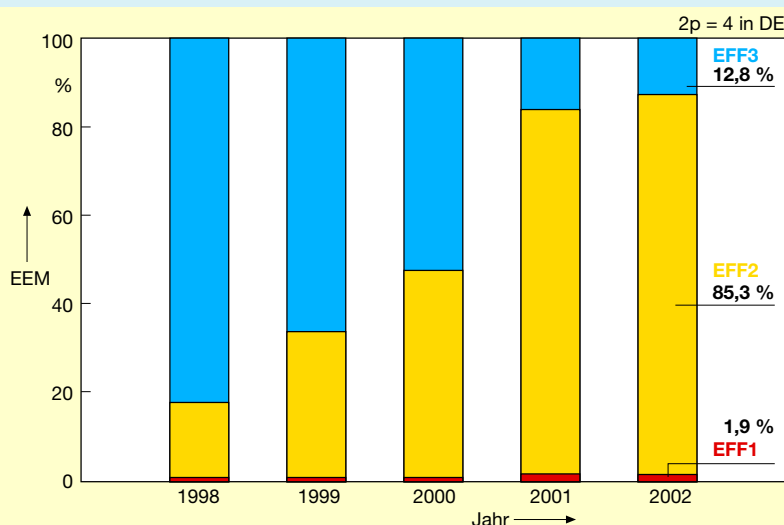
8 Über die statistische erreichbare Lebensdauer (12/15/20 Jahre bei 1,5/15/110 kW Bemessungsleistung) fallen die Beschaffungskosten nicht mehr ins Gewicht

EN: Energie; INST: Installation und Wartung; INV: Investition Motor

Polzahl	EFF3	EFF2	EFF1	Stückzahl
4	16,1 %	80,5 %	3,4 %	1.944.202
2	15,9 %	78,1 %	6,0 %	1.131.331

Tafel 2 Europa-Produktion 2001

EFF1: hoher Wirkungsgrad
EFF2: verbesserter Wirkungsgrad
EFF3: durchschnittlicher Wirkungsgrad



9 Marktentwicklung der 4-poligen Motoren EFF1, EFF2 und EFF3 in Deutschland nach einer Statistik des ZVEI [7]

Die Anwender akzeptieren den Mehrpreis für den EEM, weil sich dieser Aufwand bei einer gewissen täglichen Mindest-Laufzeit schon bald und sicherlich innerhalb der Gebrauchsdauer eines Motors amortisiert. Der Anteil der Energiekosten an den gesamten Betriebskosten eines Antriebes wird häufig unterschätzt. Für übliche Betriebsverhältnisse lässt sich errechnen: Energiekosten pro Jahr etwa gleich dem fünffachen Motorpreis. Eine beachtenswerte Berechnung ist in [6] angestellt: Danach ergeben sich bei einer Nutzungsdauer von 3000 h/a und bei der statistischen Lebensdauer von Elektromotoren die in Bild 8 dargestellten Kostenanteile.

Dieser Aspekt wird von den deutschen und europäischen Entscheidungsträgern beim Motorkauf offenbar weniger gewürdigt als in Nordamerika.

Im Jahresbericht des Herstellerverbandes ZVEI [7] wird bezüglich der Akzeptanz von Motoren mit „**hohem Wirkungsgrad**“ (EFF1) eine ermutigende Zwischenbilanz gezogen (Tafel 2).

Motoren mit „**verbesserter Wirkungsgrad**“ (EFF2) lösen zwar weitgehend die früheren Motoren mit „**durchschnittlichem Wirkungsgrad**“ (EFF3) ab, weil diese Ausführung weitgehend standardmäßig im Katalog angeboten wird. Für die etwas teureren

EFF1-Motoren besteht aber kaum Nachfrage (Bild 9).

Die nur zögernde Nutzung der Einsparpotentiale durch Verwendung von Energie sparen den Antriebssystemen lässt sich zum Teil dadurch erklären, dass die Entscheidungen – vor allem beim Hersteller einer Anlage – vorwiegend von den Kosten der Investition geprägt werden. Hierzu ein Zitat aus [6]: „**Einer der Hauptgründe dürfte sein, dass Käufer und Nutzer von Antriebskomponenten oder ganzen Maschinen in der Regel unterschiedlichen Abteilungen angehören. Die Entscheidungsträger im Einkauf orientieren sich vorrangig am eigenen Beschaffungsbudget und verzichten auf die spätere Einsparung von Betriebskosten, da diese für die eigene Leistungsbeurteilung nachrangig sind. Außerdem haben Investitionen in Energieeinsparmaßnahmen gewöhnlich eine geringere Priorität als andere Maßnahmen. Solche Ausgaben dienen nicht der Aufrechterhaltung des Geschäftsbetriebes. Ihre Unterlassung hat keine nachteiligen Folgen für die Gegenwart. In der überwiegenden Mehrheit geht der Motor oder der komplette elektrische Antrieb zudem nicht direkt an den Endkunden, sondern als Zulieferung an den Weiterverarbeiter, in der Regel den Maschinenbauer. Für diesen ist der Energieverbrauch der fertigen Maschine ebenfalls zunächst nachrangig. Seine Kunden orientieren sich vorrangig am Preis der Maschine und nicht an ihren Energiekosten.**“

Auch die Leser des **ep** können die Entscheidung beim Kauf eines Elektromotors direkt oder indirekt beeinflussen und sollten ihre Fachkenntnis einbringen.

Literatur

- [1] N.N.: Energiesparmotoren. Presse-Service der Fa. SEW-EURODRIVE (2003).
- [2] N.N.: Copper motor rotors tackle a life or die question. Energy matters, Spring 2002.
- [3] Greiner, H.: Energiesparende Elektromotoren in der Diskussion. Elektropraktiker, Berlin 49 (1995)8.
- [4] Greiner, H.: Energie sparende Elektromotoren und Antriebssysteme. Elektropraktiker, Berlin 56(2002)3.
- [5] Greiner, H.: Energie sparen mit Getriebemotoren. Sonderdruck SD 3401 der Danfoss Bauer GmbH.
- [6] Auinger, H.; Kühnemund, G.: Energiesparmotoren: Kosteneinsparung statt Regulierung. Broschüre des ZVEI, Fachverband Elektrische Antriebe (2000).
- [7] Blas, W.; Sattler, B.: Energieeffizienz in der Antriebstechnik. Jahresbericht 2002 des ZVEI, Fachverband Automation/Elektrische Antriebe.
- [8] Brush, E. F.; Cowie, J. G.; Peters, D. T.; Van Son, D. J.: Die-cast copper motor rotors: Motor test results, copper compared to aluminum. www.copper-motor-rotor.org. EEMODS. Motor Test Results Sept. 2002.
- [9] energyefficiency.jrc.cec.eu.int/motorchallenge/ Detaillierte Informationen sowie Teilnahmebedingungen zum MPC der EU.
- [10] Doppelbauer, M.: Energiesparmotoren mit CU-Druckgussläufer und Zusatznutzen. KEM Digest 50, Juni 2003.
- [11] Doppelbauer, M.: Energiesparmotoren – Technik und politische Hintergründe. Vortrag an der TU Darmstadt am 11.07.2003.