

Eine runde Sache: Kupferrotoren

Selbst verursachte zusätzliche Spannungs-Oberschwingungen im Messkreis

Stefan Fassbinder

Drehstrom-Asynchronmotoren haben schon sehr hohe Wirkungsgrade [1]. Dennoch sind weitere Steigerungen möglich. Durch Kupfer- statt Aluminiumrotoren spart man einerseits Energie, andererseits verbessert sich auch das Betriebsverhalten des Motors.

Ein optimierter Drehstrommotor, ein HEM (High Efficiency Motor) oder Motor der Wirkungsgradklasse EFF1 [2], enthält prinzipiell nichts Neues. Die Unterschiede bestehen allesamt aus graduellen Verbesserungen der Details, im Wesentlichen aus dem Einsatz mehr Leitermaterials und besseren Magnetwerkstoffs. Dabei gibt es sehr wohl einen Verbesserungsschritt, der den Übergang auf eine andere Technologie darstellt – der jedoch bei den heutigen HEM- und EFF1-Motoren noch gar nicht einmal in großem Stil ausgeschöpft wird. Nichtsdestoweniger ist dessen Potenzial so erheblich, dass dies zusammen mit den anderen Faktoren ohne Schwierigkeiten die Einführung einer kompletten weiteren Stufe, »EFF0« so zu sagen, ermöglichen würde (vergleiche Bild 1 gegenüber Bild 2). Es handelt sich um den Wechsel des Leiterwerkstoffs im Kurzschlussläufer.

Im großtechnischen Einsatz kommen heute nicht mehr als zwei Leiterwerkstoffe vor. Von diesen war Aluminium bisher die selbstverständliche Wahl für gegossene Kurzschlussläuferkäfige, weil es schon bei 660 °C schmilzt, Kupfer als bislang nur theoretische Alternative aber erst bei 1083 °C. Da Kupfer jedoch um 35 % besser leitet, versucht man schon seit einigen Jahren, eine Gussform zu entwickeln, die auch bei den erforderlich werdenden wesentlich höheren Gusstemperaturen eine wirtschaftliche Lebensdauer aufweist [3]. Inzwischen ist dieser Schritt geschafft. Auf der Hannover Messe 2003 hat SEW Eurodrive die ers-

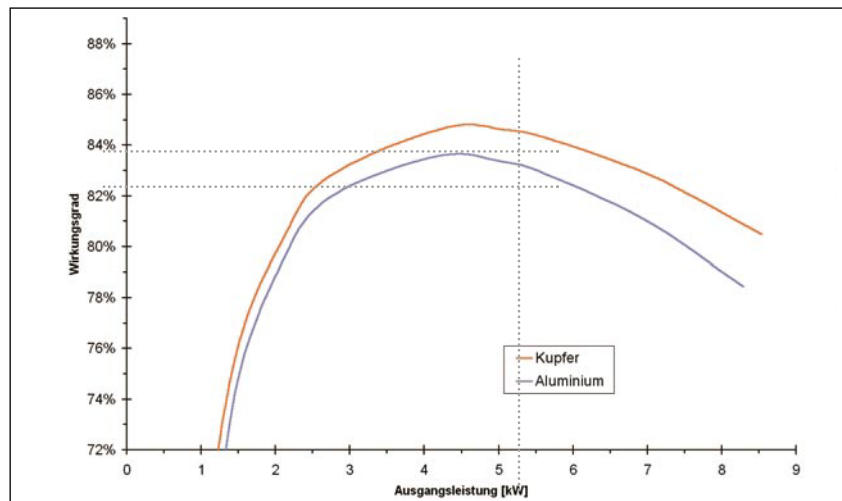


Bild 1: Wirkungsgrad-Vergleich Aluminium- gegen Kupferrotor im sonst gleichen Motor

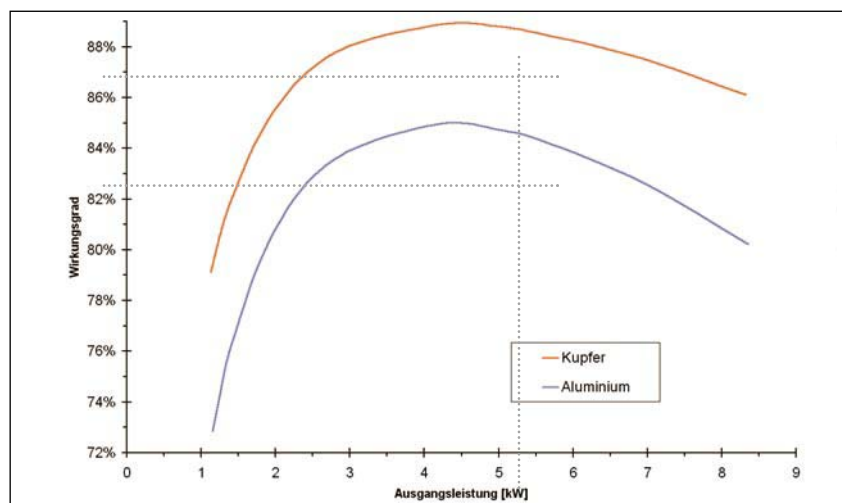


Bild 2: Wirkungsgrad-Vergleich eines einfachen EFF3-Motors gegenüber optimiertem Motor mit Kupferrotor

ten Motoren-Baureihen mit diesen neuartigen Rotoren vorgestellt [4] (Bilder 3 und 4). Die bessere Leitfähigkeit des Kupfers trägt zur Senkung der Verluste bei, bietet jedoch noch weitere Vorteile. Um diese richtig einordnen zu können, folgen zunächst einige grundsätzliche Überlegungen zum Verhalten von Drehstrom-Asynchronmaschinen.

Vorversuch 1: Geringere Eisenverluste

Eisen erreicht bei 770 °C seinen Curie-Punkt, an dem die ferromagnetische Eigenschaft zusammenbricht. Das Eisen eines gegossenen Dynamoblechs (Bild 5)

wurde bei der Herstellung über 770 °C erhitzt.

Diese Erwärmung des Eisens über den Curie-Punkt wirkt sich für den Motor vorteilhaft aus. Entsprechende Versuche zeigten [5]: Die Eisenverluste werden eher kleiner als größer (Bild 6), und die Magnetisierbarkeit nimmt zu statt ab, wenn die Temperatur nicht allzu hoch ist (Bild 7). Weitere Versuche ergaben, dass die hohe Temperatur nicht tief in das Eisen eindringt. Schließlich beträgt die Wärmeleitfähigkeit des Eisens kaum 1/10 derer von Kupfer. Somit leitet das Kupfer die Wärme wesentlich schneller nach außen ab, als sie in das Eisen eindringt.

Dipl.-Ing. Stefan Fassbinder,
Deutsches Kupferinstitut, Düsseldorf

Vorversuch 2: Geringeres Anlaufmoment

Das Anlaufmoment ist bei Drehstrom-Asynchronmotoren bedeutend kleiner als das maximale Drehmoment, das erst kurz unterhalb der Nenn Drehzahl erreicht wird.

Der Unterschied steigt mit der Größe des Motors (größerer Motor = im Verhältnis geringere ohmsche Verluste). Hätte der Läufer überhaupt keine ohmschen Verluste, so würde sich zwischen den umlaufenden Magnetfeldern von Ständer und Läufer ein Winkel von genau 90° ausbilden, und die Kraft hätte überhaupt keine Komponente mehr in tangentialer Richtung, sondern würde nur noch in radialer Richtung wirken, also zum Drehmoment nichts beitragen. Deshalb ist ein gewisser ohmscher Anteil notwendig, obwohl er andererseits Verluste erzeugt.

Während des Motor-Hochlaufs nimmt die Frequenz des Läuferstroms immer weiter ab, und damit sinkt auch der induktive Anteil der Impedanz im Läufer. Im Verhältnis gewinnt damit der absolut gleich bleibende ohmsche Anteil an Bedeutung, und der Phasenwinkel wird kleiner, mit ihm also auch der Winkel zwischen Ständer- und Läuferfeld. Das Drehmoment nimmt zu, obwohl die Ströme in Ständer- und Läuferwicklung abnehmen. Im Nenn-Betriebspunkt bei z. B. 2940 min^{-1} , was nur noch um 60 min^{-1} , also 1 s^{-1} , unter der Synchron Drehzahl

liegt, beträgt die Frequenz des Läuferstroms nur noch 1 Hz. Der induktive Anteil der Impedanz, die Reaktanz, spielt nun kaum noch eine Rolle. Die Kraft, wenn auch bei dem jetzt kleiner gewordenen Strom kleiner, wirkt nun aber fast ausschließlich in tangentialer Richtung, und fast alle Magnetkraft wird wirklich in Drehmoment umgesetzt.

Man benötigt also einen gewissen Widerstand in der Kurzschlusswicklung des Läufers. Durch den Einsatz von Kupfer statt Aluminium sinkt aber der Widerstand – und daher auch das Anlaufmoment. Eine Messung an einem Motor von 5,5 kW erbrachte allerdings lediglich einen Abfall von 90 Nm auf 85 Nm. Erfordert die Anwendung jedoch ein sehr hohes Anlaufmoment, so

muss man die Nutenform so verändern, dass durch Stromverdrängung während des Hochlaufs nur ein Teil des Querschnitts wirksam und der Widerstand damit höher wird. Nach dem Hochlauf ist die Frequenz dann wieder so gering, dass keine Stromverdrängung mehr eintritt, und der Querschnitt wird voll wirksam.

Der Anlaufstrom entspricht bei dem 5,5-kW-Versuchsmotor dem 7,5-fachen Nennstrom mit Kupferrotor, mit Aluminiumrotor dem 6,5-fachen Nennstrom.

Vorteil 1: Mehr Drehmoment, mehr Leistung

Bei Nenndrehzahl haben Kupferrotor-Motoren ein deutlich höheres Drehmoment als Aluminium-Motoren. Man kann diesen Vorteil in Form höheren Drehmoments oder höherer Drehzahl nutzen (Bild 8). Im ersten Fall erfordert die entsprechend größere mechanische Leistungsabgabe auch eine entsprechende Zunahme der elektrischen Leistungsaufnahme. Man nutzt den Vorteil des Kupferrotors in diesem Fall nicht als verminderten Verlust, sondern als erhöhte Leistungsdichte, also als geringere Baugröße oder mehr Leistung bei gleicher Baugröße¹⁾.

Normalerweise wird man nicht diesen Weg gehen, sondern die Drehzahl etwas erhöhen und wieder näherungsweise bei gleichem Strom und gleicher Leistung landen (Bild 9), da es sich in der Regel um den Austausch eines (defekten) Motors an einer bestehenden Last handelt. Hierbei haben einige Anwender die Erfahrung gemacht, dass ein HEM, besonders der mit Kupferrotor, mehr Energie statt weniger verbraucht. Das ist zwar richtig, lässt aber unberücksichtigt, dass der optimierte Motor,

¹⁾ Bei allen Berechnungen und Überlegungen wurde vorsichtshalber von Cu97 ausgegangen, also einem Kupfer mit einer Leitfähigkeit von 97 % IACS (international annealed copper standard – »annealed« = weichgeglüht). Als 100 % Leitfähigkeit des reinen Kupfers sind nach IACS 57 MS/m angegeben. Da es auch technische Kupfersorten bzw. -reinheiten mit 58 MS/m gibt, kann die Leitfähigkeit also auch ein paar Punkte über 100 % liegen, doch weil sich beim Gießen eines Rotors eventuell etwas Eisen und andere Verunreinigungen im Kupfer lösen können, wird angenommen, der fertige Läufer habe nur 97 % IACS. Dieser Mindestwert ist durch ein spezielles Pulver gewährleistet, das vor dem Gießen in den Rotor gefüllt wird und beim Gießen verdampft oder sich zersetzt.



Bild 3: Inzwischen in fast jeder Ausführung verfügbar: Kupferrotoren

da er etwas schneller läuft, auch mehr Leistung abgibt. Der Wirkungsgrad liegt trotzdem höher – gewöhnlich auch der des gesamten Prozesses. Der Unterschied der Drehzahl bleibt sehr gering, weswegen er sich fast nur bei Lasten mit quadratischer Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie bemerkbar macht. Zu beachten ist in Bild 9, dass dort der Maßstab der x-Achse (Drehzahl) stark gespreizt ist, der der y-Achse (Drehmoment) jedoch nicht.

Vorteil 2: Einfachere Gestaltung des Läufers

Obwohl Kupfer mit 100 % IACS »nur« um die Hälfte besser leitet als Aluminium, hat man bei den mit Cu97 gegossenen Läufern eine um mehr als dies höhere Leitfähigkeit gemessen als bei entsprechenden Aluminiumläufern. Das liegt daran, dass Aluminium sich nicht so gut vergießen lässt wie Kupfer, da es Lunker und Fehlstellen bildet. Außerdem handelt es sich meist um eine Legierung, die »nur« 99,5 % Aluminium enthält. Dies ist zur Verbesserung der mechanischen Festigkeit erforderlich, wirkt sich jedoch auf die Leitfähigkeit wie eine Verunreinigung aus, also nachteilig.

Als weitere Nebenwirkung können die genannten Fehlstellen im Aluminiumguss zu Unwuchten führen. Beim Kupferrotor kann man daher nicht nur auf die Kühl-

rippen verzichten, weil weniger Wärme abzuführen ist, sondern auch auf das Auswuchten, wenn man den Motor nicht an nennenswert höheren Frequenzen als Netzfrequenz betreibt. Kupferrotoren (Bild 3, 4) haben gegenüber Aluminium eine stark vereinfachte Gestalt. Diese wiegt einen Teil des Mehrpreises für den deutlich teureren Leiterwerkstoff wieder auf. Außerdem muss man, da aufgebrauchte Produkte heute vermehrt wiederverwertet und in Stoffkreisläufe eingegliedert werden, vom Mehrpreis den Schrottwert abziehen. Vor allem elektromagnetische Betriebsmittel, die im Wesentlichen aus leicht trennbarem Kupfer und Eisen bestehen, stellen nach Ablauf ihrer – oft langen – Nutzungsdauer keinen Abfall, sondern eine begehrte Rohstoffquelle dar.

Kupfer zählt schon allein auf Grund seiner Dichte von 8,9 kg/dm³ zu den Schwermetallen, während das Leichtmetall Aluminium eine Dichte von 2,7 kg/dm³ hat. Ein Kupferrotor ist somit deutlich schwerer als ein Aluminiumrotor, und vor allem das Trägheitsmoment liegt höher, weil das Mehr an Masse ganz außen am Umfang des Läufers angeordnet ist. Dies muss man unter Umständen bei der Einstellung des Regelverhaltens eines Umrichters berücksichtigen, und in extremen Situationen kann es auch das Aus für den Kupferläufer bedeuten, nämlich bei Anwendungen wie

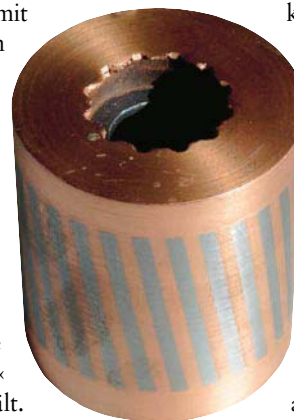


Bild 4: Die Gestalt konnte überarbeitet und dabei gegenüber Aluminiumläufern vereinfacht werden

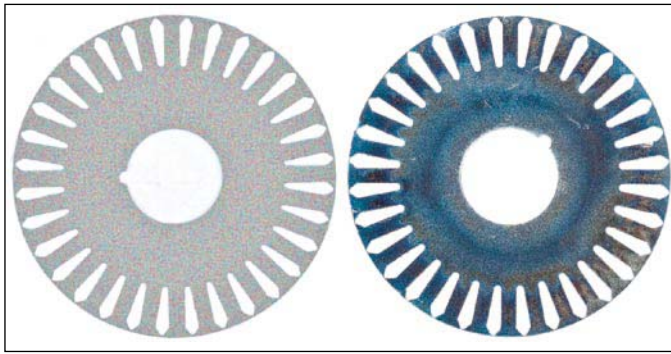


Bild 5: Ansicht eines Rotorbleches vor dem Einbau (links) und nach einem Gießversuch mit Kupfer (rechts)

Werkzeugmaschinen, wo extrem häufig, eventuell jede s, angehalten oder re-versiert werden muss. Ein hinreichend schnelles Anhalten und Beschleunigen ist dann unter Umständen gar nicht mehr möglich. Zumindest aber zehrt es die eingesparte Energie wieder auf.

Dies sind jedoch Einzelfälle. In der Regel liegt nämlich in der größeren Masse eher ein Vorteil, weil der Motor länger überlastbar ist. Zwar hat Aluminium mit $900 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ eine wesentlich höhere Wärmekapazität als Kupfer mit

$380 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$, doch auf das Volumen bezogen sind es $2,43 \text{ kJ}/(\text{dm}^3\cdot\text{K})$ für Aluminium gegenüber $3,39 \text{ kJ}/(\text{dm}^3\cdot\text{K})$ für Kupfer, dessen Einsatz somit eine um 40 % längere Überlastbarkeit gewährt. Zum Zustand »Überlast« zählt in diesem Sinne auch der Hochlauf-Vorgang mit dem 7,5-fachen Nennstrom. Die Verlustleistung im Läufer steigt somit auf mehr als das 50-fache derer des Nenn-Betriebspunkts, weswegen bei manchen Anwendungen ein (eventuell außerplanmäßig)

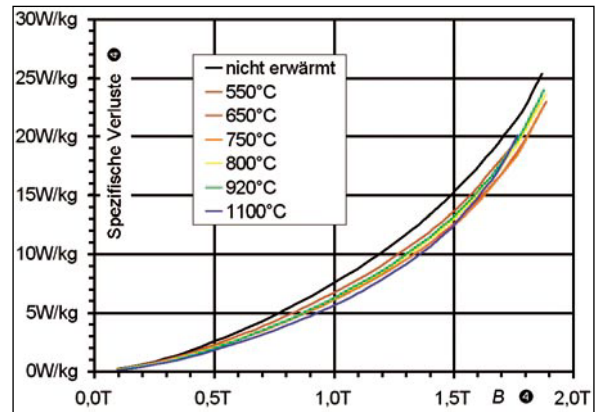


Bild 6: Einfluss der hohen Gießtemperatur des Kupfers auf das Läuferblech: Die Eisenverluste werden geringer...

abgeschalteter, noch betriebswarmer Motor mit Aluminiumläufer erst nach einer vorgegebenen Abkühlzeit wieder zugeschaltet werden darf, was bei heutigen Produktionsprozessen unverhältnismäßig teuer werden kann. Der Kupferläufer jedoch ist eher in der Lage, die übermäßige Verlustwärme zu speichern, ohne Schaden zu nehmen oder zu verursachen, und diese Wärme nach dem Hochlauf allmählich wieder abzugeben.

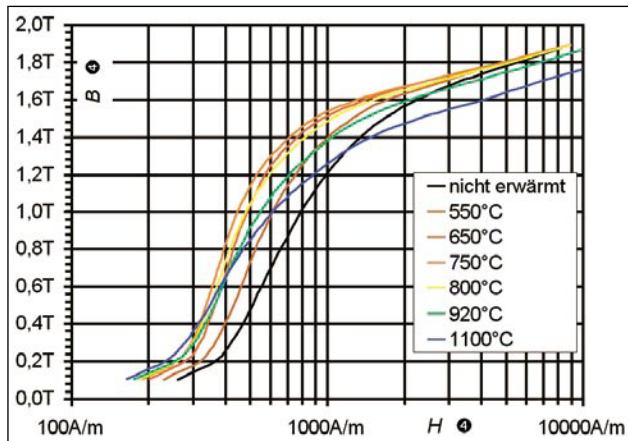


Bild 7: ... und die Magnetisierbarkeit wird besser

Vorteil 3: Extreme Bedingungen und Sondermotoren

Bisher realisierte man HEM- und EFF1-Motoren üblicherweise mit Aluminiumläufern. Der Kupferläufer weist aber genau dann besondere Stärken auf, wenn dies noch nicht ausreicht, wenn also

- die Energiepreise recht hoch liegen,
 - elektrische Energie nur sehr begrenzt verfügbar ist oder
 - der Abfuhr der Verlustwärme ungewöhnliche Hindernisse im Weg stehen.
- So hat der Kupferrotor die Herstellung bestimmter wasserdicht gekapselter Motoren erst ermöglicht. Bei Betrieb des Motors ausschließlich unter Wasser wären optimale Kühlungs-Bedingungen gegeben. Da jedoch diese Motoren zwar dicht gekapselt, aber nicht unbedingt oder nicht ausschließlich zum Einsatz unter Wasser bestimmt waren, hat die Kapselung die Wärmeabfuhr stark gehemmt. Bei Aluminiumläufern hat die Ständerwicklung eine um 5 K höhere Temperatur als bei Kupferläufern, im Rotor beträgt der Unterschied 15 K – mit allen Folgen für die Lebensdauer, die sich gemäß Faustregel je 10 K Temperaturerhöhung

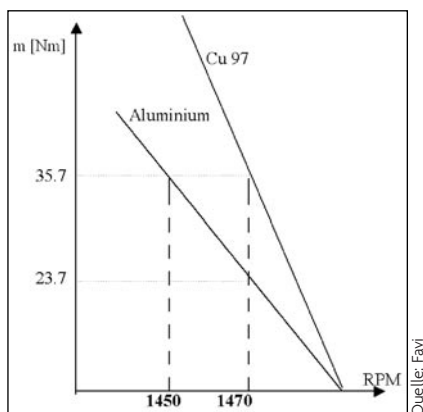


Bild 8: Vergrößerung des Drehmoments bzw. der Drehzahl

halbiert. Dies kann bei einer solchen teuren und unter Umständen schwer zu ersetzenden Spezialmaschine den entscheidenden Faktor ausmachen.

Ein Frequenzumrichter spart mehr Energie ein als ein besserer Motor

Nach Berechnungen des ZVEI [6] würde sich durch den Einsatz von Stromrichtern überall dort, wo dies angebracht wäre, eine Einsparung von 8 % des industriellen Stromverbrauchs erzielen lassen. Der Einsatz von Motoren der Effizienzklasse EFF1 überall dort, wo dies von der Betriebsdauer und der Auslastung her lohnend wäre, brächte noch einmal 1,4 %. Dies entspräche für sich allein jedoch schon einer jährlichen Einsparung von 27 TWh Strom in der EU [7], also bei derzeitigen Strompreisen etwa 1...2 Mrd. €.

Für die Umrichter liegt das Potenzial noch entsprechend höher, doch sind hier auch die Investitionskosten ungefähr im gleichen Verhältnis höher. Schließlich lohnt sich der Kupferläufer beim Betrieb am Stromrichter noch eher als beim Betrieb direkt am Netz, denn die Spannung am Ausgang eines Umrichters ist meist schlechter als die im Netz, weil die Erzeugung einer sinusförmigen variablen Spannung nur unvollkommen gelingt [8]. Dies erhöht die Verluste im Motor. Der Unterschied zwischen einem guten und einem schlechten Motor wird hierdurch noch größer.

Literatur

- [1] Stefan Fassbinder: »Sparen mit dem Sparmotor«. »de« 23/2001, S. 45, und 24/2001, S. 37
- [2] <http://www.zvei.org/antriebe/default.htm>
- [3] www.copper-motor-rotor.org

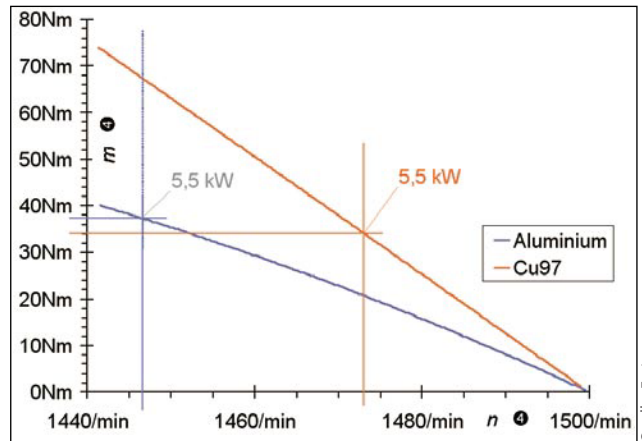


Bild 9: Arbeitspunkte gleicher Abgabeleistung (5,5 kW) mit Kupfer- und Aluminiumrotor

- [4] http://www.sew.de/deutsch/10_suche/index_suche.htm
- [5] Genaueres unter: www.favi.com/rotor
- [6] Elektrische Antriebe – Energiesparmotoren: Kosteneinsparung statt Regulierung. ZVEI, 2., geänderte Auflage, November 2001
- [7] Energy efficient motor driven systems. Positionspapier des ECI, der Katholieke Universiteit Leuven, der Universidade do Coimbra und des Fraunhofer Instituts ISI, Brüssel, 2004. Demnächst auch in deutscher Sprache verfügbar
- [8] Stefan Fassbinder: »Netzstörungen durch passive und aktive Bauelemente«, VDE Verlag, Berlin / Offenbach 2002, S. 166