



## Effizienz- und Einsparpotentiale elektrischer Energie in Deutschland

Perspektive bis 2025  
und Handlungsbedarf

## Autoren

Prof. Dr.-Ing. Egbert Baake, Leibniz-Universität Hannover  
Dipl.-Ing. Michael Bothe, VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut  
Dr.-Ing. Martin Doppelbauer, SEW Eurodrive GmbH & Co KG  
Dr.-Ing. Oliver Drubel, Siemens AG  
Dipl.-Ing. Ralf de la Haye, Hanning GmbH & Co KG, vormals WILO AG  
Prof. Dr.-Ing. Wilfried Hofmann, TU Dresden  
Dr.-Ing. Martin Kleimaier; vormals RWE  
Prof. Dr.-Ing. Axel Mertens, Leibniz-Universität Hannover  
Prof. Dr.-Ing. Peter Mutschler, TH Darmstadt  
Prof. Dr.-Ing. Bernd Oswald, Leibniz-Universität Hannover  
Dipl.-Ing. Eberhard Petri, ECPE  
Dr.-Ing. Ireneusz Pyc, Siemens AG  
Dipl.-Ing. Thomas Raphael, VDE  
Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick, Leibniz-Universität Hannover  
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schröppel, vormals Siemens AG

## Impressum

**VDE** VERBAND DER ELEKTROTECHNIK  
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.

Stresemannallee 15 · 60596 Frankfurt am Main  
Fon 069 6308-0 · Fax 069 6312925  
<http://www.vde.com> · E-Mail: [etg@vde.com](mailto:etg@vde.com)

Gestaltung: Michael Kellermann · Graphik-Design · Schwielowsee-Caputh

März 2008

# **Effizienz- und Einspar- potentiale elektrischer Energie in Deutschland**

**Perspektive bis 2025  
und Handlungsbedarf**

**Studie der  
Energietechnischen Gesellschaft im VDE (ETG)**

**Langfassung**

# Inhaltsverzeichnis

	Seite	
1	Einleitung	7
2	Primärenergie- und Stromverbrauch in Deutschland in den letzten 10 Jahren	10
2.1	Primärenergieverbrauch und Nutzenenergieeinsatz 102.2 Stromverbrauch in den Verbrauchssektoren und Anwendungsgebieten	11
2.2.1	Aufteilung des Stromverbrauchs	11
2.2.2	Entwicklung des Stromverbrauchs in der Vergangenheit	12
3	Internationale Aktivitäten	15
3.1	Kyoto-Protokoll	15
3.2	Europäische Union	17
3.2.1	GRÜNBUCH über Energieeffizienz der Europäischen Kommission (2005)	18
3.2.2	Aktionsplan für Energieeffizienz: ‚Das Potential ausschöpfen‘	18
4	Effizienzpotentiale bei der Stromversorgung	19
4.1	Stromerzeugung	19
4.1.1	Heutige Situation bei der Stromerzeugung	19
4.1.2	Effizienz der Stromerzeugung	20
4.1.3	Energienutzungsgrad der Kraft-Wärme-Kopplung	20
4.1.4	Die CO <sub>2</sub> -freie Energieerzeugung	21
4.1.5	Generatoren	22
4.2	Stromübertragung und -verteilung	23
4.2.1	Ursachen und Art der Netzverluste	25
4.2.2	Transformatoren	27
4.2.3	Einfluss von Spannung und Blindleistung	31
4.2.4	Ausblick	32
5	Spezifische Effizienzpotentiale im Bereich der Stromanwendung	34
5.1	Wirkungsgradverbesserung einzelner Komponenten	34
5.1.1	Motoren	34
5.1.1.1	Kleinantriebe (typisch unter 0,5 kW)	35
5.1.1.2	Drehstrommotoren (typisch 0,5 kW bis 500 kW)	35
5.1.1.3	Großantriebe (typisch über 500 kW)	37
5.1.2	Getriebe	38
5.1.2.1	Getriebe mit abwälzender Verzahnung (Stirnrad, Kegelrad, Planeten)	38
5.1.2.2	Getriebe mit gleitender Verzahnung (Hypoid, Schnecken, Spiroplan)	39
5.1.2.3	Getriebelose elektrische Direktantriebstechnik	39
5.1.3	Umrichter	40
5.1.3.1	Verbreiterung des Einsatzes von umrichtergespeisten Antrieben	41

5.1.3.2	Wirkungsgrad von Umrichtern kleinerer Leistung	41
5.1.3.3	Möglichkeiten zur Verbesserung des Wirkungsgrades	43
5.1.4	Netzteile und externe Stromversorgungen	45
5.1.5	Beleuchtung	47
5.1.5.1	Technologische Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz	48
5.1.5.2	Einsparpotentiale	48
5.2	Energieeinsparung durch Verringerung der Standby-Verluste	51
5.2.1	Beispiele von Einsparmöglichkeiten	51
5.2.2	Haushalte	56
5.2.3	Handel und Gewerbe	57
5.2.4	Beispiele zu technischen Möglichkeiten	58
5.2.5	Beispiele: Einsparpotentiale im Versorgungsgebiet Dortmund	59
5.3	Prozessveränderung und Technologiewechsel	61
5.3.1	Geregelte Industrieantriebe	61
5.3.1.1	Stand der Technik und der Forschung	61
5.3.1.2	Lastkennlinien und Bewegungsvorgänge	62
5.3.1.3	Geregelte Antriebsmotoren	64
5.3.1.4	Branchenspezifische Potentiale (beispielhaft)	65
5.3.1.5	Weitere Innovationspotentiale	68
5.3.2	Pumpen, Lüfter und Rohrleitungen	70
5.3.2.1	Heizungspumpen	70
5.3.2.2	Einfluss des Rohrsystems auf den Gesamtwirkungsgrad	72
5.3.3	Optimierung elektrothermischer Prozesse	76
5.3.3.1	Optimierung vorhandener Prozesse und Anlagen	77
5.3.3.2	Substitution oder Ergänzung konventioneller thermischer Prozesse und Anlagen	79
5.3.3.3	Entwicklung und Einführung neuer energieeffizienter Verfahren	79
5.3.4	Technologiewechsel	80
5.4	Energieeinsparung durch Verhaltensänderung – Schulung und Werbung	81
5.5	Ausblick auf zukünftige Technologien	84
5.5.1	Permanentmagneterregung und Supraleitung	84
5.5.2	Magnetische Werkstoffe	85
5.5.2.1	Weichmagnetische Werkstoffe	85
5.5.2.2	Hartmagnetische Werkstoffe	86
5.5.2.3	Auswirkungen im Elektromaschinenbau	88
5.5.3	Magnetlagertechnik	88
5.5.3.1	Einleitung	88

5.5.3.2	Bekannte Einzelanwendungen	89
5.5.3.3	Perspektiven und Grenzen der Technologie	91
5.5.4	SiC-Technik	92
5.5.4.1	Stand der Technik / Stand der Forschung	93
5.5.4.2	Potentiale und Perspektiven	94
5.5.4.3	Technologiedefizite	95
6	Entwicklung des Stromverbrauchs in Deutschland bis 2015 mit Ausblick auf 2025	96
7	Handlungsbedarf	102
7.1	Maßnahmen zur Energieeinsparung	102
7.2	Ausblick: Einfluss des Strompreises auf den Energieverbrauch	104
8	Anhang	107
8.1	Prognose des Stromverbrauchs	107
8.1.1	Prognose des Stromverbrauchs im Sektor Industrie nach Anwendungsgebieten	107
8.1.2	Prognose des Stromverbrauchs im Sektor Verkehr nach Anwendungsgebieten	109
8.1.3	Prognose des Stromverbrauchs im Sektor Haushalt nach Anwendungsgebieten	110
8.1.4	Prognose des Stromverbrauchs im Sektor GHD nach Anwendungsgebieten	112
8.1.5	Prognose des Stromverbrauchs in den Anwendungsgebieten summiert über alle Sektoren	114
8.2	Ermittlung der Lebenszykluskosten von Antrieben	116
	Erläuterungen zur Life Cycle Cost Berechnung:	117
	Einmal-Kosten	118
	Jährliche Kosten	118
	Umrechnung auf heutige Basis (Present Value ,PV')	119
	Ergebnis	119

# 1 Einleitung

Die Energietechnische Gesellschaft ETG im VDE hat in den letzten Jahren mehrere Studien zur Entwicklung der elektrischen Energieversorgung in Deutschland angefertigt:

- Elektrische Energieversorgung 2020,
- Versorgungsqualität im deutschen Stromversorgungssystem,
- Dezentrale Energieversorgung 2020.

In allen diesen Studien spielten der Stromverbrauch<sup>1</sup> und seine Entwicklung, die Verfügbarkeit der Primärenergieressourcen und die Emission von Umweltgasen – insbesondere CO<sub>2</sub> – eine wichtige Rolle. Das gab Anlass, darüber nachzudenken, welche Möglichkeiten es mit den heute verfügbaren technologischen Mitteln gibt, den Stromverbrauch zu reduzieren, Ressourcen zu sparen und die Umweltbelastung zu vermindern.

Im Jahr 2005 wurde daher in der ETG eine Task Force gegründet mit der Aufgabe, die Potentiale zur Steigerung der Effizienz bei der Anwendung und zur Einsparung von elektrischer Energie zu untersuchen. Das damalige Ziel der Task Force war es zum einen, technologische Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz in den unterschiedlichen Stromanwendungen aufzuzeigen, und zum anderen deren quantitativen Einspareffekt abzuschätzen.

In den Jahren 2006 und 2007 hat die Politik das Thema Energieeffizienz mit hoher Priorität aufgegriffen. Sowohl die EU als auch die Bundesregierung haben Ziele vereinbart, den spezifischen Energieverbrauch zu senken, also die Energieeffizienz zu steigern, und damit die CO<sub>2</sub>-Emissionen einzudämmen. Auf dem Treffen der Regierungschefs der EU am 9. März 2007 in Brüssel wurden konkrete quantitative Ziele bis 2020 vereinbart:

- Steigerung der Energieeffizienz um 20%,
- Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien am Energiemix zur Stromerzeugung auf 20%,
- Reduktion der Treibhausgase um 20%,
- Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energien zur Herstellung von Treibstoff auf 10%.

---

<sup>1</sup> Das Wort Strom wird in dieser Studie als Synonym für elektrische Energie verwendet, da dies – obgleich technisch nicht korrekt – dem allgemeinen Sprachgebrauch entspricht.

Zur Erreichung dieser Ziele sind enorme Anstrengungen erforderlich. Sie sind darauf ausgerichtet, die Importabhängigkeit der EU bei der Primärenergie zu reduzieren und den Temperaturanstieg des Erdklimas zu begrenzen. In ausführlichen Berichten hatte Anfang 2007 das IPCC<sup>2</sup> die Entwicklung des Erdklimas, insbesondere die Entwicklung der Temperatur, unter verschiedenen Bedingungen aufgezeigt und auf die Konsequenzen des CO<sub>2</sub>-Anstiegs in der Atmosphäre hingewiesen.

Die vorliegende Studie der ETG will Wege aufzeigen, wie die Energieeffizienz gesteigert werden kann. Sie beschränkt sich ausschließlich auf den Bereich der Anwendung von elektrischer Energie.

Im Kapitel 2 wird die Entwicklung des Stromverbrauchs in Deutschland in den verschiedenen Sektoren und Anwendungsbereichen in den letzten 10 Jahren beschrieben. Eine simple Approximation zeigt die wahrscheinliche Weiterentwicklung des Stromverbrauchs auf, wenn keine besonderen Anstrengungen zur Steigerung der Effizienz und zur Einsparung elektrischer Energie unternommen werden. Ist das der Fall, dann ist mit einem weiteren Anstieg des Stromverbrauchs in den nächsten Jahren in ähnlicher Größenordnung wie in der nahen Vergangenheit zu rechnen. Der von einigen Optimisten Anfang der 2000er Jahre vorhergesagte Rückgang des Stromverbrauchs<sup>3</sup> ist nicht eingetreten. Trotz schlechter Wirtschaftskonjunktur in den ersten Jahren dieses Jahrhunderts wuchs der Stromverbrauch weiter kontinuierlich.

Im Kapitel 3 wirft die Studie einen kurzen Blick über die deutschen Grenzen und skizziert die internationalen Aktivitäten in Bezug auf Energieverbrauch, CO<sub>2</sub>-Emissionen und Verbesserung der Energieeffizienz. Die Kapitel 4 und 5 untersuchen und beschreiben die heute schon verfügbaren technologischen Mittel zur Steigerung der Stromeffizienz sowohl im Erzeugungs- als auch im Verbrauchsbereich. Im Bereich der Stromanwendung werden Effizienzpotentiale aufgezeigt, die durch Verbesserung der Komponenten und der Prozesse, durch Technologiewechsel und durch Reduzierung der Stand-by-Verluste realisiert werden können. Ein Ausblick auf zukünftige Technologien am Ende des Kapitels 5 zeigt weitere Steigerungsmöglichkeiten auf.

---

2 Intergovernmental Panel on Climate Change: Climate Change 2007: The Physical Science Basis.

3 Fishedick, M.; Nitsch, J. u.a.: Langfristszenarien für eine nachhaltige Energieversorgung in Deutschland. Untersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes.



Die wahrscheinliche Entwicklung des Stromverbrauchs bis zum Jahr 2015 mit einem Ausblick auf 2025 wird im Kapitel 6 beschrieben. Dazu werden quantitativ die Effizienzsteigerungspotentiale in den verschiedenen Stromanwendungsbereichen der Verbrauchssektoren Industrie, Verkehr, Haushalt und Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) auf der Basis der im Kapitel 5 beschriebenen technologischen Fortschritte abgeschätzt. Die Stromanwendung wird dabei unterteilt in die Bereiche Prozesswärme, Raumwärme, mechanische Energie, Beleuchtung und Informations- und Kommunikationsanwendungen (I&K). Die Prognose auf 2015 bzw. 2025 schließt neben den Verbesserungen in der Stromeffizienz, d.h. des Rückgangs des Stromverbrauchs in der jeweiligen Anwendung bei gleicher Funktionalität, auch die mengenmäßigen Veränderungen an Geräten, Systemen und Anlagen in den jeweiligen Zeitabschnitten, die Veränderung des Strombedarf eines Gerätes oder Systems durch Veränderung des Leistungsumfangs und neue Stromanwendungen (z.B. Antrieb von Wärmepumpen) ein. Das bedeutet u.a., dass in Teilgebieten der Stromanwendung trotz verbesserter Stromeffizienz der absolute Stromverbrauch deutlich weiter steigt, wenn die Menge an Geräten und Anlagen wächst. Wenn das Ziel der Politik die Reduzierung des Verbrauchs an elektrischer Energie ist, dann kann das auch heißen, die Menge an stromverbrauchenden Geräten und Anlagen einzuschränken. Hier kann potentiell ein Konflikt mit den wirtschaftlichen Interessen des Landes entstehen!

Den Erkenntnissen des Abschnitts 6 folgend wird im Kapitel 7 der Handlungsbedarf aufgezeigt, um die notwendige Steigerung der Stromeffizienz auch in der Praxis zu erreichen. Dabei wird auch darauf eingegangen, wie der trotz wesentlicher Verbesserung der Energieeffizienz in dieser Studie prognostizierte weiter steigende Strombedarf doch reduziert werden könnte.

## 2 Primärenergie- und Stromverbrauch in Deutschland in den letzten 10 Jahren

### 2.1 Primärenergieverbrauch und Nutzenenergieeinsatz

Der Primärenergieverbrauch weist in Deutschland im letzten Jahrzehnt einen kontinuierlichen Rückgang auf. Im Jahr 2005 wurde Primärenergie in einem Wert von 14.236 PJ oder 3.954 TWh verbraucht<sup>4</sup>. Bild 1 zeigt den Energiefluss in Deutschland von der Primärenergie über die Endenergie bis hin zur Nutzenergie auf. Von den 14.236 PJ Primärenergie gehen durch Umwandlungsverluste bei der Erzeugung von Endenergie 28% verloren und durch energetische Verluste in den Verbrauchssektoren nochmals 30%. Weitere 8% der Primärenergie werden in nicht-energetischen Prozessen, z.B. in der chemischen Industrie eingesetzt. Damit wird – abgesehen von der nichtenergetischen Nutzung – nur ca. ein Drittel der Primärenergie unmittelbar in den Anwendungsbereichen nutzbringend eingesetzt!

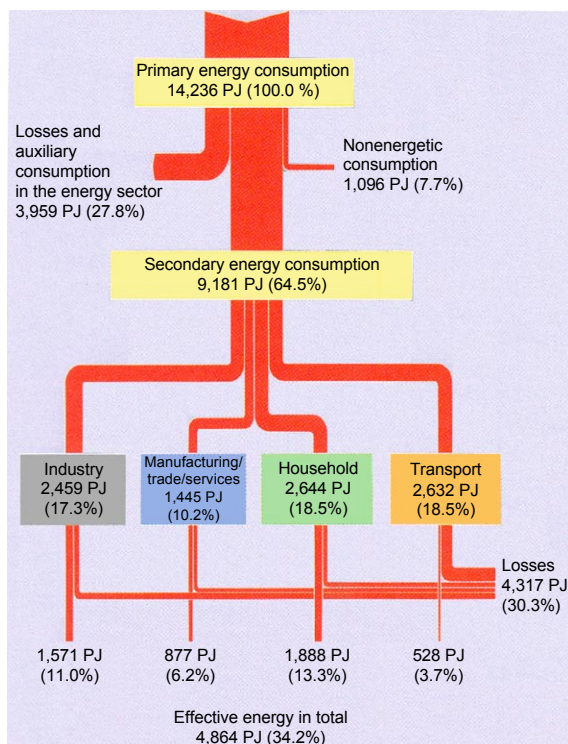


Bild 1 Energieflussbild  
Deutschland 2005

In den Bildern 2 und 3 werden der Endenergie- und der Nutzenenergieverbrauch differenziert nach Verbrauchssektoren und Anwendungsgebieten nochmals näher analysiert. Die Differenzierung nach Verbrauchssektoren und Anwendungsgebieten wurde aus dem jährlich erscheinenden Bericht der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen übernommen. In allen nachfolgenden Darstellungen, Berechnungen und Prognosen wird dieses Ordnungsschema beibehalten.

Die Sektoren Industrie, Verkehr und Haushalt verbrauchen jährlich etwa gleichviel Endenergie mit einem Wert von ungefähr 2.500 PJ bzw. 700 TWh, der Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung (GHD) mit 1.500 PJ bzw. ca. 400 TWh deutlich weniger. Im Sektor Industrie dominiert der Energieeinsatz für Prozesswärme, gefolgt von der mechanischen Energie, d.h. den Antrieben. Im Verkehrssektor nutzen die Fahrzeugantriebe den weit überwiegenden Teil

der Endenergie, wobei allerdings festgestellt werden muss, dass ein wachsender Anteil nicht zur Fortbewegung selbst genutzt wird, sondern für Komforterhöhung in Form von Klimaanlage, elektronischen Steuerungs- und Anzeigesystemen, Stand- oder Sitzheizung. Im Haushalt dagegen steht der Energieeinsatz für die Raumheizung mit 75%

4 BWK 57 (2007) Nr. 5.

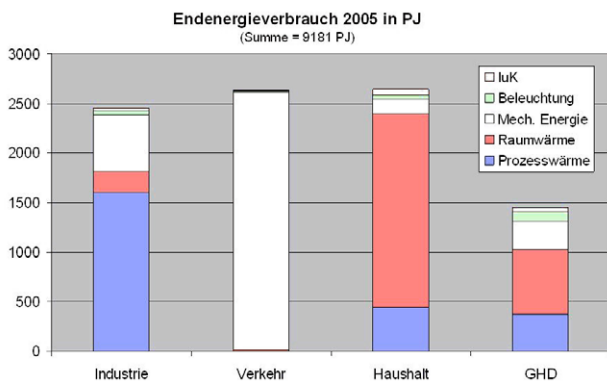


Bild 2 Endenergieverbrauch

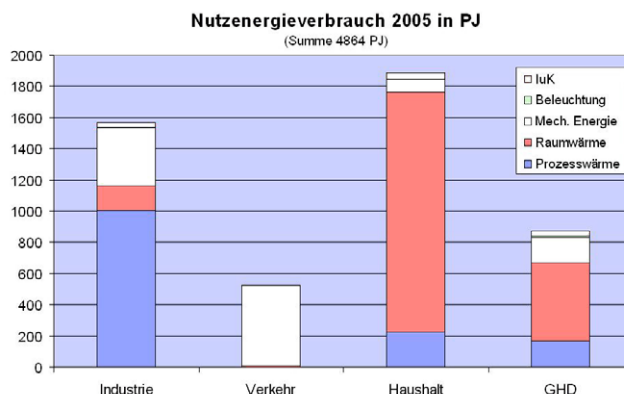


Bild 3 Nutzenergieverbrauch

des Gesamtverbrauchs an erster Stelle, während im Sektor GHD eine stärkere Gleichverteilung des Energieeinsatzes in den Anwendungsbereichen zu beobachten ist.

Die Verluste beim Einsatz der Endenergie belaufen sich auf 30 bis 50% abhängig vom jeweiligen Anwendungsbereich und der verwendeten Technologie, wie der Vergleich der Bilder 2 und 3 zeigt.

Markante Ausnahmen bilden der Verkehrssektor mit den mechanischen Antrieben und die Beleuchtungsanwendungen. In diesen Bereichen beträgt der Nutzungsgrad im Durchschnitt nur 20% bzw. sogar nur 5 bis 10%. Der Großteil der Endenergie wird als Wärme emittiert.

## 2.2 Entwicklung des Stromverbrauchs in der Vergangenheit

### 2.2.1 Aufteilung des Stromverbrauchs

Die Untersuchungen dieser Studie zum Einsparpotential an Energie in den jeweiligen Anwendungsbereichen beziehen sich ausschließlich auf den Sekundärenergieträger Strom. Ausgehend von den Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen wurde die Entwicklung des Stromverbrauchs in den Verbrauchssektoren Industrie, Verkehr, Haushalt und GHD sowie den Anwendungsbereichen Prozesswärme, Raumwärme, mechanische Energie, Beleuchtung und Information und Kommunikation näher untersucht. Die Bilder 4 und 5 zeigen die Entwicklung des Gesamtstromverbrauchs differenziert nach Verbrauchssektoren und Anwendungsgebieten. Eine Approximation nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate zeigt für den Zeitraum von 1994 bis 2005 eine durchschnittliche Steigerungsrate im Stromverbrauch von 1,6% pro Jahr auf. Der größte Verbraucher in 2005 war die Industrie mit 45% gefolgt von den Haushalten und dem Sektor GHD. Der Verkehrssektor spielt im Stromverbrauch mit ca. 3% eine untergeordnete Rolle, da ihm im Wesentlichen nur die elektrischen Bahnen zugeordnet sind, nicht aber z.B. die Straßenbeleuchtung, die bei GHD erfasst wird.

Stromverbrauch in TWh nach Sektoren

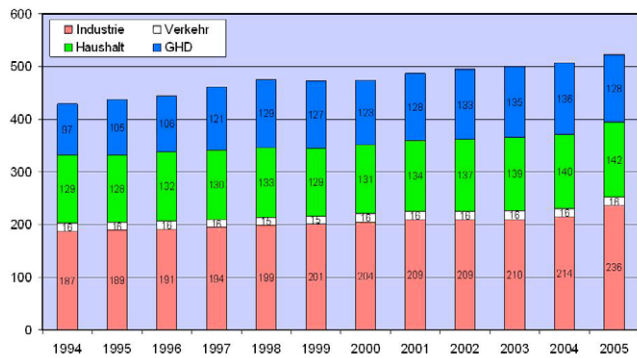


Bild 4 Stromverbrauchsentwicklung nach Sektoren

Stromverbrauch in TWh nach Anwendungsgebieten

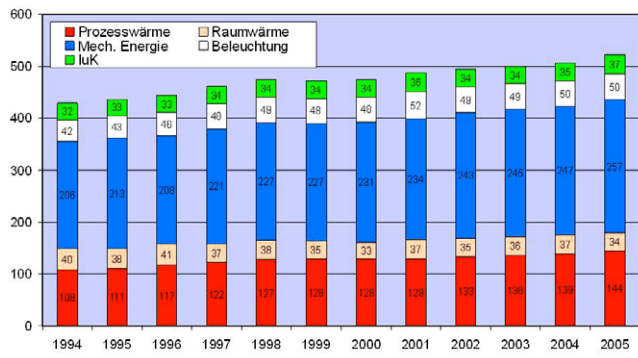


Bild 5 Stromverbrauchsentwicklung nach Anwendungsgebieten

Die Analyse des Stromverbrauchs nach Anwendungsgebieten zeigt, dass die Hauptstromverbraucher die elektrischen Antriebe (= Erzeugung von mechanischer Energie) sind mit nahezu 50% Anteil. An zweiter Stelle mit 27% folgt der Bereich der Prozesswärme, wie sie beispielsweise in industriellen Prozessen, aber auch im Haushalt zum Einsatz kommt. Der Stromverbrauch für die Bereiche Raumwärme, Beleuchtung und für die Informations- und Kommunikationsgeräte und -anlagen liegt jeweils unter 10%.

## 2.2.2 Entwicklung des Stromverbrauchs in der Vergangenheit

Als Basis für die Abschätzung des Stromverbrauchs in der Zukunft bei Berücksichtigung zukünftiger Einsparpotentiale ist es hilfreich, die Entwicklung des Stromverbrauchs in der Vergangenheit zu analysieren. In den Änderungsraten im Stromverbrauch des letzten Jahrzehnts stecken technologische Entwicklungsschritte, Nutzerverhalten und deren Veränderungen, aber auch wirtschaftliche Entwicklungen wie Wachstum und Niveau des Lebensstandards. Die Änderungsraten im Stromverbrauch in den vergangenen 10 Jahren summieren somit all diese Effekte. Da die Ursachen für diese Änderungsraten nicht schlagartig verschwinden, sondern vielmehr im Mittel auch weiterhin bestehen, müssen sie auch Ausgangspunkt für Prognosen sein.

Auf der Basis des Zahlenwerks der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen wurden daher für den Zeitraum von 1994 bis 2004 die durchschnittlichen jährlichen Änderungsraten im Stromverbrauch für alle Sektoren und Anwendungsgebiete durch Approximation nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt. In den Bildern 6 bis 9 ist die Entwicklung der Stromverbrauch in den vier betrachteten Sektoren aufgezeigt, die Approximation in Form einer Trendlinie eingetragen und der Funktionsverlauf angegeben. Die entsprechenden Grafiken für die jeweiligen Anwendungsbereiche der vier Sektoren sind im Anhang zusammengestellt.

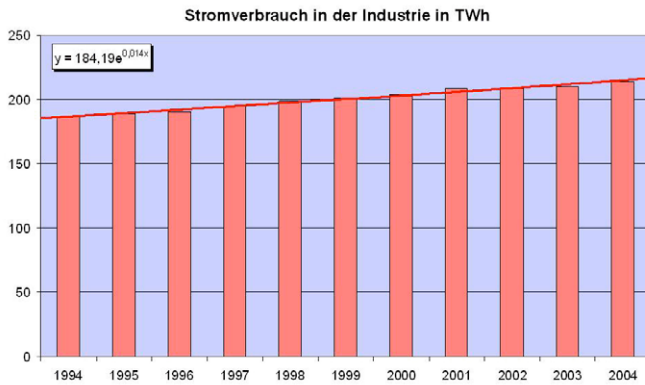


Bild 6 Stromverbrauchsentwicklung in der Industrie

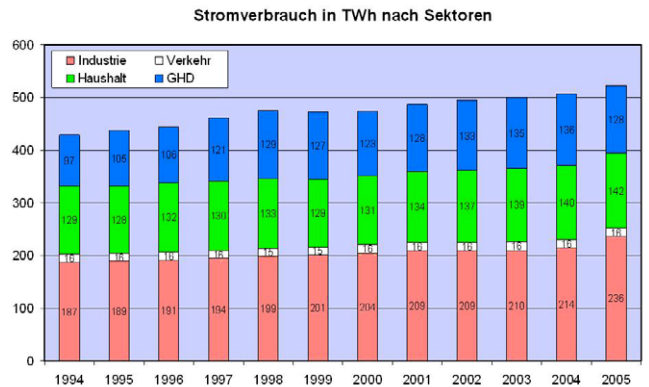


Bild 7 Stromverbrauchsentwicklung im Verkehr

Der Verlauf des Stromverbrauchs in der Industrie zeigt einen sehr stetigen Verlauf mit einer mittleren Steigerungsrate von 1,4% über das letzte Jahrzehnt. Konjunkturelle Schwankungen sind hier ausgemittelt. Die Steigerungsrate entspricht in ihrer Tendenz der Ausweitung der Produktion. Deren Steigerung ist aber nicht proportional zur Steigerung des Stromverbrauchs. Vielmehr ist sie schneller gewachsen als der Stromverbrauch, was auf eine Effizienzsteigerung in der Produktion hinweist.

Im Verkehrssektor ist der Verlauf in Bild 7 geprägt durch Diskretisierungseffekte auf Grund des geringen Volumens. Tendenziell ist eine minimale Steigerung (0,2%) festzustellen. Bezogen auf den Gesamtstromverbrauch ist das Volumen von ca. 15 TWh für den Verkehr untergeordnet (3%). Hauptverbraucher ist die Deutsche Bahn.

Der Verbrauchsverlauf im Haushalt zeigt eine kontinuierliche Steigerung, die allerdings Schwankungen unterlegen ist. Die Ursachen dafür können sowohl klimabedingt (Heizung), aber auch konjunkturbedingt sein. In der Tendenz ist eine Steigerung von einem knappen Prozent pro Jahr (0,85%) zu beobachten.

Weit überproportional ist der Stromverbrauch im Bereich GHD gestiegen. Im letzten Jahrzehnt betrug der jährliche Wert im Mittel über 3,1%. Hier spielt sicher eine kontinuierliche Ausweitung der Büro- und Verkaufsflächen eine große Rolle, aber auch die Steigerung des Komfortniveaus der Einrichtungen. Zudem wird in dieser Steigerung auch die generelle Zunahme der Wirtschaftstätigkeiten in diesem Sektor gespiegelt.

Innerhalb der einzelnen Sektoren weisen einige Anwendungsbereiche starke Abweichungen vom Trend des Sektors auf. In der Industrie stieg die Prozesswärme mit 2,1% pro Jahr wesentlich schneller als der Sektorwert von 1,4%. Die mit Strom erzeugte Raumwärme hat keine große Bedeutung und verharrt auf niedrigem Niveau.

Sehr differenziert ist die Situation im Haushalt. Abweichend vom Mittelwert von 0,85% wuchs der Bereich Prozesswärme mit 1,7% ebenso

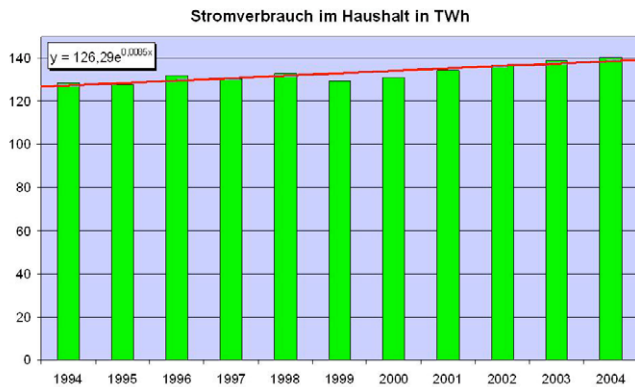


Bild 8 Stromverbrauchsentwicklung im Haushalt

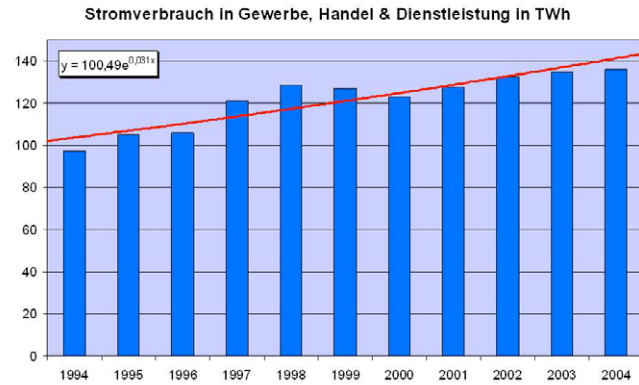


Bild 9 Stromverbrauchsentwicklung in Gewerbe, Handel und Dienstleistung

wie der Bereich zur Erzeugung von mechanischer Energie. Die stromerzeugte Raumwärme fällt jährlich im Verbrauch mit durchschnittlich 1,5%. Der Stromverbrauch von Informations- und Kommunikationsgeräten stieg mit knapp 1% eher verhalten.

Im Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung lag die Steigerungsrate des Stromverbrauchs zur Erzeugung von Prozesswärme und zur Versorgung von Antrieben mit 4% über dem Sektordurchschnitt von 3%. Der Stromverbrauch für Raumwärme nahm jährlich mit 1% ab, der Bedarf für Beleuchtung bewegte sich im Durchschnitt des Sektors. Interessanterweise lag der Stromverbrauch der Informations- und Kommunikationsgeräte mit 0,9% jährlicher Steigerungsrate deutlich unter dem Durchschnitt.

## 3 Internationale Aktivitäten

### 3.1 Kyoto-Protokoll

Das Kyoto-Protokoll ist ein 1997 beschlossenes Zusatzprotokoll zur Ausgestaltung der Klima-Rahmenkonvention (UNFCCC) der Vereinten Nationen für den Klimaschutz. Das bis zum Jahr 2012 gültige Abkommen schreibt verbindliche Ziele für die Verringerung des Ausstoßes von klimawirksamen Emissionen (maßgeblich das aus Verbrennungsprozessen stammenden  $\text{CO}_2$ ) vor. Inzwischen sind 168 Staaten dem Kyoto-Protokoll beigetreten, haben es ratifiziert oder dem Protokoll zugestimmt. Die USA haben das Kyoto-Protokoll zwar unterschrieben,

aber nicht ratifiziert.<sup>5</sup> Die Vertragsstaaten haben das Ziel, ihre Treibhausgasemissionen bis zum Jahre 2012 um durchschnittlich 5,2% unter das Niveau von 1990 zu senken. Für die EU ist eine Senkung der Emissionen um 8% unter den Stand von 1990 vorgesehen. Die EU hat gemäß einer EU-internen Lastenverteilung im Juni 1998 die Reduktionsverpflichtungen der EU-Mitgliedsstaaten (bezogen auf die Emissionen von 1990) wie in Tabelle 1 angegeben aufgeteilt.

Land	Basisjahr-Emissionen in Mio. t CO <sub>2e</sub>	2003 in Mio. t CO <sub>2e</sub>	absolute Veränderung 2003/Basisjahr	prozentuale Veränderung 2003/Basisjahr	Kyoto-Ziel 2008 – 2012
Belgien	146,8	147,7	0,9	0,6	-7,5
Dänemark	69,6	74	4,4	6,3	-21
Deutschland (*)	1.216,1	993,9	-222,2	-18,3	-21
Finnland	70,4	85,5	15,1	21,5	0
Frankreich	568	557,2	-10,8	-1,9	0
Griechenland	111,7	137,6	25,9	23,2	25
Großbritannien	751,4	651,1	-100,3	-13,3	-12,5
Irland	54	67,6	13,6	25,2	13
Italien	510,3	569,8	59,5	11,6	-6,5
Luxemburg	12,7	11,3	-1,4	-11,5	-28
Niederlande	213,1	214,8	1,7	0,8	-6
Österreich	78,5	91,6	13,1	16,6	-13
Portugal	59,4	81,2	21,8	36,7	27
Schweden	72,3	70,6	-1,7	-2,4	4
Spanien	286,1	402,3	116,2	40,6	15
<b>EU-15</b>	<b>4,252,5</b>	<b>4,179,6</b>	<b>-72,9</b>	<b>-1,7</b>	<b>-8</b>

Tab. 1 Kyoto-Ziele und tatsächliche Entwicklung der Emission von Treibhausgasen in der EU (EU-15) <sup>6</sup>

Tatsächlich erwarten die Vereinten Nationen für das Jahr 2010 um 11% höhere Emissionen als im Referenzjahr 1990. Die wesentlichen Industriestaaten werden ihre Emissionen bis zum Jahr 2010 voraussichtlich um 20% gegenüber dem Referenzjahr erhöhen. Deutschland will seine Emissionen um 21% reduzieren. Dies ist maßgeblich auf Strukturwandel und Desinvestitionen insbesondere auch in der besonders schadstoffintensiven ostdeutschen Industrie nach der Wiedervereinigung zurückzuführen.<sup>7</sup>

5 Wikipedia; 20.12.2006

6 BMWT, 2006, S. 43; annual inventory of greenhouse effect; \*Für Deutschland Daten aus 2004 angegeben

7 Wikipedia; 20.12.2006

Mit der Bezeichnung Post-Kyoto-Prozess werden gegenwärtig laufende Verhandlungen zur zukünftigen Klimaschutzpolitik bezeichnet, die eine über das Jahr 2012 hinausgehende völkerrechtlich verbindliche Regelung zur Reduktion von Treibhausgasen ergeben sollen. Der Prozess wird vor allem auf den jährlich stattfindenden Klimarahmenkonferenzen vorangetrieben, auf denen sich die Unterzeichnerstaaten der Klimakonvention der Vereinten Nationen wie auch die Mitglieder des genannten Kyoto-Protokolls treffen.

Um dramatische Schäden zu vermeiden, muss der Temperaturanstieg dauerhaft auf maximal 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau begrenzt werden. Um das 2°C-Ziel einzuhalten, ist es notwendig, die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre bei 400 parts per million (ppm) CO<sub>2</sub>-Äquivalente zu stabilisieren. Dies bedeutet: Der Anstieg der globalen Emissionen muss in den nächsten 10 bis 20 Jahren gestoppt werden.

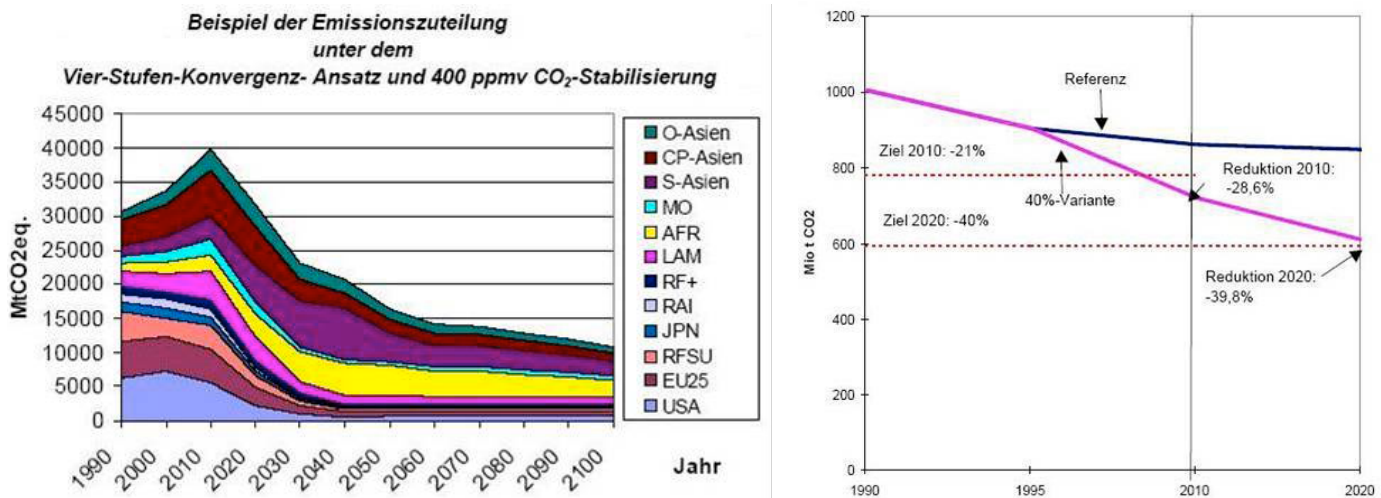


Bild 10 Emissionszuteilung weltweit<sup>8</sup> und Emissionsreduzierung Post-Kyoto für Deutschland<sup>9</sup>

Anschließend müssen die Emissionen bis 2050 auf unter die Hälfte des heutigen Niveaus und ein Viertel des Business-as-usual-Trends (das sind knapp 20% Emissionsanstieg pro Dekade) sinken. Die Gerechtigkeit gegenüber den sich entwickelnden Ländern gebietet, dass die Emissionen der Industriestaaten bis 2050 überproportional um 80% gegenüber dem Ausgangsniveau von 1990 zurückgehen müssten.<sup>10</sup> Die Grafik zeigt u.a., dass die USA und die EU 25 ihre Treibhausgasemissionen bis 2040 auf weniger als ein Viertel des heutigen Wertes senken müssten, falls im Rahmen eines Mehrstufenansatzes eine Stabilisierung der Kohlendioxid-Konzentration bei 400 ppm erreicht werden soll.

8 UBA; 10/2005; S. 171

9 UBA; 10/2005; S.

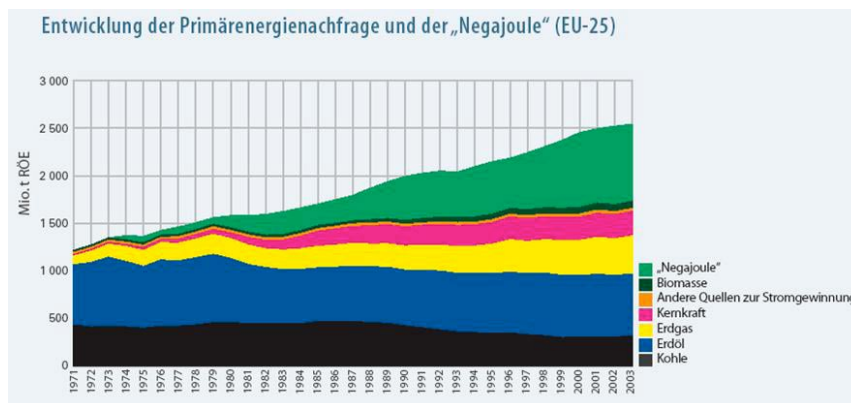
10 UBA; 2005; S. 17



## 3.2 Europäische Union

Mit rund 450 Mio. Verbrauchern und einem jährlichen Gesamtenergieverbrauch von 1.637 Mio. t Rohöl-Äquivalent (EU-25, 2005)<sup>11</sup>, d.h. 3,5 Tonnen Rohöl pro Kopf und Jahr, ist die Europäische Union der weltweit zweitgrößte Energiemarkt.<sup>12 13</sup> Die Verbesserung der Energieeffizienz wird von der Europäischen Kommission als eine „Energieressource“ („Negajoule“) angesehen.

Bild 11 Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der eingesparten Energie<sup>14</sup>



Entsprechend der Verpflichtungen nach dem Protokoll von Kyoto möchte die europäische Politik durch die Verbesserung der Energieeffizienz ihren Beitrag zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und damit zur Begrenzung des Klimawandels leisten:

- Reduzierung der klimawirksamen Treibhausgase (u.a. CO<sub>2</sub>-Emissionen) des Energieverbrauchs bis zum Jahre 2012 um 8% gegenüber 1990<sup>15</sup>.
- Reduzierung der klimawirksamen Treibhausgase (u.a. CO<sub>2</sub>-Emissionen) des Energieverbrauchs bis zum Jahre 2020 um 20% gegenüber 1990 (780 Mio. t CO<sub>2</sub>/Jahr; 390 Mio. t Rohöl-Äquivalent/Jahr)<sup>16</sup>.
- In der Diskussion: Reduktion der klimawirksamen Treibhausgase
  - bis zum Jahre 2020 um 40% gegenüber 1990,
  - bis zum Jahre 2050 um 80% gegenüber 1990<sup>17</sup>.

Der aktuelle Aktionsplan für Energieeffizienz der EU zielt darauf ab, Energieeinsparungen in Höhe von 20% zu erreichen. Dazu soll die Energieintensität jährlich um 3,3% verringert werden. Für die einzelnen Sektoren ergeben sich damit die in Tabelle 2 beschriebenen Einsparziele.

11 EUROSTAT 27.10.2006

12 EC; GRÜNBUCH; 2006,S. 4

13 EUROSTAT; Pressemitteilung vom 21.09.2006

14 EC, ActionPlan EE; 16.10.2006; S. 5

15 Kyoto-Protokoll

16 EU-Grünbuch; EU-Aktionsplan für Energieeffizienz

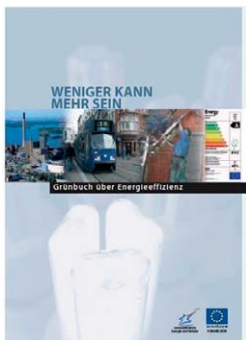
17 Diskussion zum „Post-Kyoto-Prozess“

Tab. 2 Energie-Einsparziele der EU nach Sektoren<sup>18</sup>

Wirtschaftszweig	Energieverbrauch (Mio. t R6E) 2005	Energieverbrauch (Mio. t R6E) 2020 (bei „Business as usual“)	Energieeinsparpotenzial 2020 (Mio. t R6E)	Energieeinsparpotenzial 2020 insgesamt (%)
Haushalte	280	338	91	27 %
Geschäftsgebäude (Tertiärsektor)	157	211	63	30 %
Verkehr	332	405	105	26 %
Verarbeitende Industrie	297	382	95	25 %

### 3.2.1 GRÜNBUCH über Energieeffizienz der Europäischen Kommission (2005)<sup>19</sup>

Das „Grünbuch über Energieeffizienz“ der Europäischen Kommission („Weniger kann mehr sein“) beschreibt in seiner endgültigen Fassung vom 22. Juni 2005 die Notwendigkeit sowie sektorenspezifische Maßnahmen zur Stärkung und Förderung der Energieeffizienz auf allen Ebenen Europas. Ziel ist eine Senkung des aktuellen Energieverbrauchs in der EU bis zum Jahr 2020 um 20% (d.h. 14 Jahre lang durchschnittlich jährlich 1,5% pro Jahr Energieeinsparung), um damit den Verbrauchswert von 1990 wiederzuerlangen.<sup>20</sup>



Potenzielle Einsparungen in Mio. t R6E	2020 Konsequente Umsetzung bestehender Regelwerke	2020+ Umsetzung zusätzlicher Maßnahmen
Gebäude: Heizung/Kühlung	41	70
Elektrische Geräte	15	35
Industrie	16	30
Verkehrswesen	45	90
Kraft-Wärme-Kopplung	40	60
Sonstige Energieumwandlung usw.	33	75
<b>Gesamte Energieeinsparung</b>	<b>190</b>	<b>360</b>

Bild 12 Potenzielle Energieeinsparungen in der EU<sup>21</sup>

### 3.2.2 Aktionsplan für Energieeffizienz: ‚Das Potential ausschöpfen‘

Zum 19. Oktober 2006 wurde der schon angekündigte „Aktionsplan für Energieeffizienz“ veröffentlicht. Ziel ist die Realisierung einer Primärenergieeinsparung von 20% bis zum Jahr 2020 bezogen auf den vorhergesagten Energieverbrauch (business as usual). Der Aktionsplan beschreibt dazu sechs Maßnahmenbereiche mit einem Zeitplan und benennt explizit zehn Maßnahmen mit hoher Priorität.

18 EC, ActionPlan EE; 16.10.2006; S. 7

19 Green Paper; Towards a European strategy for the security of energy supply

20 EC, Grünbuch EE; 2005; S.40

21 EC, Grünbuch EE; 2005; S. 32

## 4 Effizienzpotentiale bei der Stromversorgung

### 4.1 Stromerzeugung

Der Energiebedarf des Menschen ist im Laufe seiner Entwicklungsgeschichte immer weiter gestiegen. Während die Energie zu Beginn nur zur Stillung der eigentlichen Grundbedürfnisse – Wärme und Nahrung – benötigt wurde, ist der gestiegene Bedarf in den letzten 100 Jahren vor allem eine Folge der zunehmenden Lebensqualität, die wiederum ohne die Verfügbarkeit elektrischer Energie undenkbar ist.

Jeder Schritt in der Prozesskette von der Erzeugung über den Transport und die Verteilung bis zur Nutzung elektrischer Energie ist jedoch – ebenso wie bei der Nutzung anderer Energien – mit unerwünschten Nebenwirkungen verbunden, vor allem bei der Erzeugung aus fossilen Brennstoffen mit der Emission großer Mengen von CO<sub>2</sub>. Das Ziel, CO<sub>2</sub>-Emissionen zu vermeiden, erfordert, dass die bisher erreichte Effizienz bei Erzeugung, Übertragung und Nutzung von Strom nicht ausreicht und alle technisch erreichbaren Einsparpotentiale genutzt werden müssen.

#### 4.1.1 Heutige Situation bei der Stromerzeugung

Während der Bedarf an Primärenergie seit 1990 in etwa stagniert, ist der Bedarf an Strom seitdem um über 30% gestiegen. Fossile Brennstoffe bilden heute das Rückgrat der Energieversorgung, ebenso wie in der Vergangenheit und der absehbaren Zukunft. Dies gilt auch für die zur Stromerzeugung genutzten Energien. Hier trägt Kohle 44%, Erdgas 12% und die Kernenergie 27% bei. Zu den verbleibenden Anteilen liefern die erneuerbaren Energien 12%. Die restlichen 5% teilen sich Öl, Pumpspeicher und Sonstige.

In den letzten Jahren ist der Anteil der erneuerbaren Energien deutlich gestiegen, was eine Folge des rasanten Zubaus von Windenergieanlagen ist. Die Stromerzeugung mit Windkraft beträgt heute 5% und hat damit den höchsten Anteil innerhalb der erneuerbaren Energieträger. Die Leistungszunahme durch neu installierte Windanlagen ist jedoch in den vergangenen drei Jahren auf durchschnittlich rund 2 GW/a zurückgegangen, im Vergleich zu nahezu 3 GW/a in den davor liegenden drei Jahren. Der Zubau wird sich jedoch auf hohem Niveau stabilisieren. Mit den technischen Fortschritten zur Nutzung fossiler Brennstoffe wurde erreicht, dass Strom heute sehr viel effizienter erzeugt werden kann als vor Jahren. Stand der Technik bei den Wirkungsgraden sind gegenwärtig 43 bis 45% bei Braunkohle, 46 bis 48% bei Steinkohle und 58 bis 60% bei Erdgas mit GUD-Technik. Die Weiterentwicklungen zielen auf Werte von bis zu 55% bei Kohle und bis zu 65% bei Erdgas mit GUD-Technik.

### 4.1.2 Effizienz der Stromerzeugung

Wie bereits erwähnt, werden fossile Energieträger auf absehbare Zeit das Rückgrat der Stromerzeugung bleiben. Damit bleibt auch die Tatsache, dass fossil befeuerte Kraftwerke CO<sub>2</sub>-Emittenten sind und das Klima zusätzlich belasten. Deshalb kommt der Effizienzsteigerung eine besonders große Bedeutung zu.

Für die Verbesserung der Wirkungsgrade der Komponenten sind die beiden Parameter Druck und Temperatur die zentralen Stellhebel. Die Höhe dieser beiden Parameter hängt vor allem von neuen Werkstoffkonzepten ab.

Realistische Werte für den Wirkungsgrad von Braunkohlekraftwerken bis zum Jahr 2020 liegen bei mehr als 50%, der entsprechende Wert für Steinkohlekraftwerke beträgt 53%. Bei der GUD-Technik sind bis 2020 Werte von mehr als 63% realistisch.

Die Entwicklung neuer Turbinenwerkstoffe für noch höhere Drücke über 300 bar und Temperaturen über 700°C, die in so genannten ultra-überkritischen Dampf-Turbosätzen eingesetzt werden, ist bereits mit entsprechenden Forschungsprogrammen im Gange. Heute lässt sich jedoch schon absehen, dass in den nächsten Jahren die Werkstofftechnik an ihre Grenzen stößt und die Weiterentwicklung der Wirkungsgrade ihr Maximum erreicht.

Von den Effizienzverbesserungen wird die Stromerzeugung profitieren, denn als Folge der alternden Kraftwerke und der wachsenden Stromnachfrage kann bis 2020 eine Leistungslücke von rund 55 GW entstehen. Diese muss durch den Bau neuer Kraftwerke geschlossen werden, die sehr viele höhere Wirkungsgrade aufweisen als die zu ersetzenden Anlagen. Hinzu kommt, dass bei einem vorzeitigen Ausstieg aus der Kernenergie weitere 21 GW ersetzt werden müssen, was sich jedoch negativ auf die Energie- und CO<sub>2</sub>-Bilanz auswirken würde.

Der Ersatzbedarf stellt einerseits eine große Herausforderung dar, bietet aber auch gleichzeitig die Chancen, die Zukunft der Stromversorgung in Bezug auf Ökologie, Technologie und Wirtschaftlichkeit zu optimieren. Je nach Randbedingungen werden dadurch Minderungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen 30 und 60% erzielt.

### 4.1.3 Energienutzungsgrad der Kraft-Wärme-Kopplung

Bei der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme wird der Brennstoff mit Nutzungsgraden bis zu 100% im Idealfall sehr viel effizienter eingesetzt als bei der getrennten Erzeugung der Energieformen.

Voraussetzung dafür ist jedoch, dass der Bedarf an Wärme in Form von Heißwasser oder Prozessdampf auch langfristig gesichert und der Transport zum Verbraucher wirtschaftlich ist.

Der Anteil des KWK-Stroms liegt heute im Jahresmittel bei knapp 10% der Gesamterzeugung, in einigen Städten jedoch bei über 50%. Im Jahresverlauf verändert sich der Anteil zwischen Werten um 5% im Sommer und um 15% im Winter. Die installierte Leistung von KWK-

Anlagen beträgt derzeit 21 GW und könnte aus technischer und wirtschaftlicher Sicht um das Vier- bis Fünffache ausgebaut werden, was mehr als 50% der Gesamtstromerzeugung entspräche. Werte in dieser Größenordnung werden schon heute in Dänemark, den Niederlanden und Finnland erreicht.

Gute Chancen für den KWK-Ausbau bietet neben den klassischen Sektoren Fernwärme und Industrie die Areal- und Objektversorgung durch Energiedienstleister. Für die Zunahme des KWK-Stroms bis 2020 wird ein Wert von 50% als realistisch betrachtet, so dass ein nur geringer Teil des genannten Potentials genutzt wird.

Die durchschnittlichen Nutzungsgrade der Primärenergie liegen beim KWK-Prinzip üblicherweise im Bereich von 50 bis 80%, im Vergleich zu den Werten von 35 bis 60% bei der reinen Stromerzeugung. Einsparungen von bis zu 50% des jeweiligen Brennstoffs und damit der CO<sub>2</sub>-Emissionen sind also möglich, wenn eine Verdrängung ausschließlich fossiler Stromerzeugung unterstellt wird. In der Praxis werden Einsparungen von 15 bis 30% erwartet.

#### 4.1.4 Die CO<sub>2</sub>-freie Energieerzeugung

Kohle erzeugt zwar hohe Emissionen, ist aber preiswert und reichlich vorhanden. Europa und insbesondere Deutschland verfügen über große Kohlereserven und können somit die Importabhängigkeit entschärfen. Im Vergleich zu Erdgas kann Kohle preislich eine deutlich stabilere Bilanz aufweisen.

Als Folge des hohen Anteils fossiler Brennstoffe an der Stromerzeugung stellt sich die Frage nach den technologischen Optionen zur Minderung der Emissionen. Neben den hoch effizienten überkritischen Dampfkraftwerken gibt es generell folgende Optionen:

- Luftreinigungssysteme für Kohlekraftwerke
- Kohlebefeuerte IGCC-Kraftwerke mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung vor der Verbrennung
- Dampfkraftwerke mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung nach der Verbrennung als Neuanlagen- oder Nachrüstungslösung.

Emissionsarme oder gar emissionsfreie Kraftwerke auf Basis von Kohle sind bereits heute machbar. Die CO<sub>2</sub>-Abtrennung im Rauchgas nach der herkömmlichen Verbrennung von Kohle ist heute bereits verfügbar, sie ist aber mit einer Wirkungsgradeinbuße von rund 10% für die Gasreinigung und CO<sub>2</sub>-Verdichtung verbunden. Zwei zukunftsweisende Konzepte sind die Oxyfuel und Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) genannten Verfahren.

Beim Oxyfuel-Verfahren wird der Brennstoff Kohle nicht mit Luft, sondern mit reinem Sauerstoff verbrannt. Das verringert die Rauchgasvolumina und wird damit auch die CO<sub>2</sub>-Abscheidung wesentlich erleichtern. Dagegen spricht allerdings, dass die Gewinnung von reinem Sauerstoff einen hohen Energieeinsatz erfordert und somit insgesamt eine Wirkungsgradeinbuße von etwa 8% für die Aufbereitung und Verdichtung

von CO<sub>2</sub> bringt. Daneben gibt es beim Oxyfuel-Verfahren weitere technische Aspekte zu klären, um es zur Marktreife entwickeln zu können. Bei der IGCC-Technik wird das Kohlendioxid vor der Verbrennung abgetrennt. Dies erfolgt im gasförmigen Zustand der Kohle, der eine leichtere Abscheidung der Schadstoffe ermöglicht. Nach der Gasreinigung wird das Synthesegas im sog. Shiftreaktor in Kohlendioxid und Wasserstoff umgewandelt. Das CO<sub>2</sub> lässt sich dann durch chemische Absorption leicht entfernen, und der Wasserstoff wird in einer Gasturbine genutzt. Trotz der hohen Wirkungsgradeinbußen im Gasprozess erreicht das Verfahren einen Gesamtwert von etwa 42% und damit beinahe das Wirkungsgradniveau heutiger Kohlekraftwerke. Die CO<sub>2</sub>-Abtrennung nach dem IGCC-Prozess hat auch Kostenvorteile gegenüber dem Oxyfuel-Verfahren.

Ein weiterer Vorteil ist, dass der Prozess der integrierten Kohlevergasung technisch weitgehend erforscht und erprobt ist. Zum Beispiel hat Siemens seit 1960 weltweit fünf IGCC-Projekte erfolgreich realisiert. Darunter haben zwei Anlagen auf Kohlebasis besonders hohe Leistungen erzielt: Buggenum in den Niederlanden und Puertollano in Spanien. Buggenum hat seit 1994 bis heute etwa 49.000 Betriebsstunden absolviert. Eine solch hohe Verfügbarkeit wurde bisher von keinem anderen IGCC erreicht. Puertollano ist mit 300 MW Leistung und 45% Wirkungsgrad derzeit das weltweit größte IGCC seiner Art.

Beide Kraftwerke demonstrieren also, dass ein kohlebasierter Kombikraftwerksprozess grundsätzlich machbar ist. Bis zur Umsetzung einer IGCC-Anlage mit CO<sub>2</sub>-Abtrennung müssen aber noch Konzepte entwickelt werden, die relativ niedrige Investitionskosten, hohe Verfügbarkeit und wasserstofftaugliche Gasturbinen sicherstellen. Aktuell plant RWE, ein CO<sub>2</sub>-freies Großkraftwerk auf Basis von Kohlevergasung zu bauen.

#### 4.1.5 Generatoren

Der weit überwiegende Teil elektrischer Energie wird in thermischen Kraftwerken durch sog. Turbogeneratoren erzeugt. Tabelle 3 gibt einen Überblick über den derzeitigen und den erreichbaren Wirkungsgrad sowie über die derzeit weltweit pro Jahr produzierte Gesamtleistung.

Leistungs- klasse (kW)	Dominierender Maschinentyp	Drehzahl	Weltweite Gesamt- Leistung (GW/a) der Neuproduktion	gesamtkosten- optimierter Wirkungsgrad	möglicher Wir- kungsgrad
30000 bis 150000	kleine Turbo- generatoren	3000	30	98,2%	98,4%
100000 bis 350000	luftgekühlte Turbo- generatoren	3000	30	98,6%	98,9%
200000 bis 900000	gasgekühlte Turbo- generatoren	3000	20	98,9%	99,1%
500000 bis 2000000	wassergekühlte Turbogeneratoren	1500	5	98,8%	99,4%
		3000	15	98,7%	99,2%

Tab. 3 Wirkungsgrad von Turbogeneratoren

Da Luft- bzw. Gasreibungsverluste die Gesamtverluste wesentlich beeinflussen, lassen sich Verbesserungen bei luftgekühlten Generatoren im Wesentlichen durch eine Verbesserung der Kühlung erzielen. Hierzu bieten sich strömungsoptimierte Bauteile und vergrößerte Kühloberflächen an. Aufgrund des ohnehin schon sehr hohen Wirkungsgrads lassen sich auch mit größten Anstrengungen nur noch geringe Verbesserungen des Wirkungsgrads erzielen, die sich trotzdem auf bis zu etwa 300 MW einsparbarer Verlustleistung summieren.

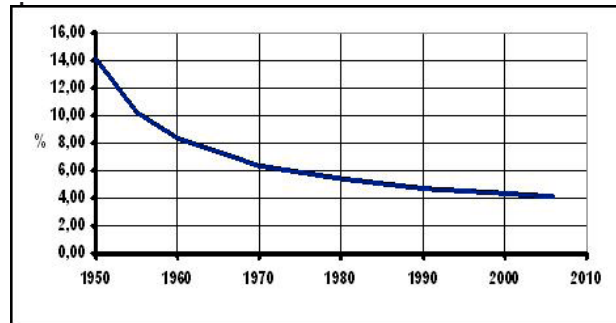
## 4.2 Stromübertragung und -verteilung

Die Netze der unterschiedlichen Spannungsebenen dienen dazu, den in Kraftwerken erzeugten Strom bis zum Endverbraucher zu übertragen bzw. zu verteilen. Mit Hilfe eines leistungsfähigen Netzes über alle Spannungsebenen können die verschiedensten zentral oder dezentral verfügbaren Primärenergieträger erschlossen werden. Der damit mögliche Energiemix und ein funktionsfähiger Stromhandel sind die Voraussetzung für niedrige und stabile Strompreise. Entsprechend der jeweiligen Erzeugungs- bzw. Lastsituation variieren die Lastflüsse und somit auch die Netzverluste. In der Vergangenheit war man bestrebt, neue Kraftwerke möglichst in der Nähe der Lastzentren zu errichten. Die heutigen Übertragungsnetze, in die fast alle großen Kraftwerke einspeisen, sind daher für eine verbrauchsorientierte Stromerzeugung konzipiert. Große Stromtransporte waren in der Vergangenheit eher die Ausnahme und wurden überwiegend zur gegenseitigen Störungshilfe in Anspruch genommen.

Während der Wiederaufbauphase nach dem 2. Weltkrieg und der sich anschließenden rasanten wirtschaftlichen Entwicklung konnten der erforderliche Kraftwerks- und Netzausbau kaum mit der steigenden Energienachfrage von Industrie und Gewerbe Schritt halten. Kraftwerksneubauten in der Nähe von Ballungszentren, großzügige Netzinvestitionen sowie eine zunehmende Verkabelung der Nieder- und

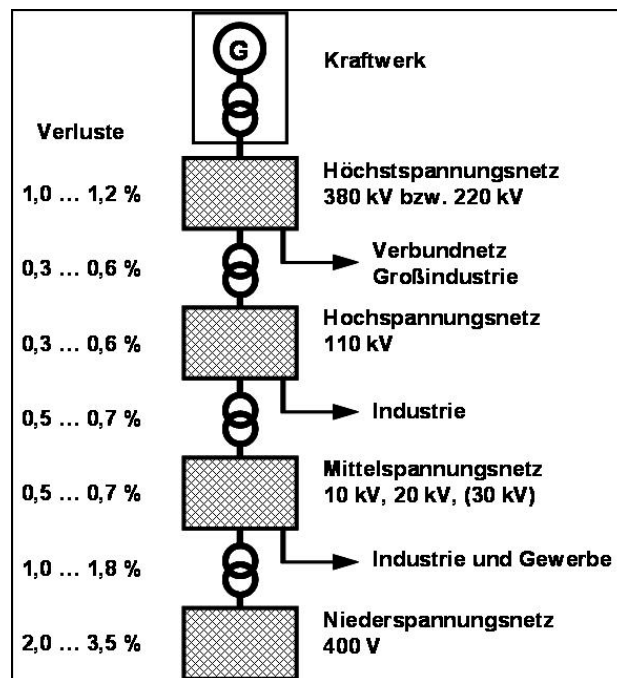
Mittelspannungsnetze und der Einsatz der jeweils fortschrittlichsten Technologien haben dazu beigetragen, dass die gesamten Netzverluste bei der öffentlichen Stromversorgung in Deutschland von 1950 bis heute von 14% auf etwa 4% – trotz deutlich gestiegenem Strombedarf – gesenkt werden konnten (Bild 13). Damit gehört Deutschland heute zu den Ländern mit den effizientesten Stromnetzen weltweit.

Bild 13 Entwicklung der Netzverluste in Deutschland



Die Netzverluste in den einzelnen Spannungsebenen sind insbesondere abhängig von der jeweiligen Belastung und damit tages- und jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Die Darstellung in Bild 14 kann

Bild 14 Netzstruktur und Aufteilung der Netzverluste auf die unterschiedlichen Netzebenen (Stand 2006)



daher nur einen Anhaltspunkt für die Verteilung der Netzverluste auf die einzelnen Spannungsebenen und die Transformatoren (Umspanner) zwischen den Spannungsebenen geben. Erwartungsgemäß treten die höchsten Verluste im Niederspannungsnetz auf. So hat z.B. ein Industriekunde, der seine Energie direkt aus dem 110-kV-Netz bezieht, bezogen auf seinen Strombezug nur etwa 2% Verluste verursacht, wogegen man für einen Privatkunden, der seinen Strom dem Niederspannungsnetz entnimmt, im Mittel mit etwa 8% Verlusten rechnen muss.



### 4.2.1 Ursachen und Art der Netzverluste

Bei den Verlusten ist zu unterscheiden zwischen stromabhängigen und spannungsabhängigen Verlusten. Die stromabhängigen Verluste (Stromwärmeverluste) treten in den ohmschen Widerständen der Netzbetriebsmittel (Leitungen, Transformatoren etc.) auf. Diese Verluste sind – wie der Name schon sagt – abhängig von der Höhe des Stromes und nehmen mit diesem quadratisch zu; eine Verdoppelung des Stroms vervierfacht also die Verluste. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass sich das Leitermaterial bei höherer Belastung stärker erwärmt, wodurch der Leiterwiderstand ansteigt und die Verluste damit nochmals erhöht werden. Gesenkt werden können diese Verluste durch ein Leitermaterial mit einem möglichst geringen spezifischen ohmschen Widerstand (Kupfer ist hierbei deutlich besser als Aluminium) und durch einen möglichst großen Leiterquerschnitt. Neben dem reinen Gleichstromwiderstand sind bei Wechselstrom insbesondere bei großen Querschnitten noch Skin- und Proximity-Effekte zu betrachten, die zu einer Erhöhung des wirksamen Widerstandes

Tab. 4 Anhaltswerte für die Verluste von Freileitungen und Kabeln bei maximaler Dauerlast

Spannung kV	Typ	Material und Leiterquerschnitt mm <sup>2</sup>	Vollast (dauernd) MVA	Leiterverluste bei Vollast kW/km	Bewehrungsverluste kW/km	Ableitverluste kW/km
0,4	PVC-Kabel	Cu 120	0,18	37	–	–
0,4	PVC-Kabel	Al 150	0,19	56	–	–
10	VPE-Kabel	Cu 120	6,3	78	–	0,01
10	VPE-Kabel	Al 185	6,2	82	–	0,01
20	VPE-Kabel	Cu 95	11	78	–	0,02
20	VPE-Kabel	Al 150	11	82	–	0,02
20	Freileitung	Al/St 120/20	14	120	–	–
110	Gasaußendruck	Cu 240	70	36	5	3,5
110	Gasaußendruck	Cu 800	100	28	13	6,0
110	VPE	Cu 240	80	53	4	0,5
110	VPE	Cu 800	135	50	12	0,7
110	Freileitung	Al/St 265/35	130	190	–	1,0
380	Freileitung	4 x Al/St 265/35	1800	750	–	2,0

beitragen. Zur Reduzierung dieser Effekte wird der Leiter in gegeneinander isolierte Teilstücke unterteilt (z.B. sog. Milliken-Leiter bei Kabeln). Bei Kabeln sind weiterhin noch Mantel- und Bewehrungsverluste zu berücksichtigen. Bei längeren Kabelstrecken lassen sich die Mantelverluste durch Auskreuzen der Kabelmäntel (Cross-Bonding) reduzieren. Anhaltswerte für Leitungsverluste sind in Tabelle 4 aufgelistet. Bei Kabeln ist zu berücksichtigen, dass aufgrund einer nur begrenzt zulässigen Bodenerwärmung (Bodenaustrocknung) die pro System übertragbare Leistung deutlich abnimmt, wenn mehrere Systeme in einem gemeinsamen Kabelgraben verlegt werden. Die Verluste sind dann je System bei der geringeren Leistung natürlich entsprechend kleiner.

Anhaltswerte für die stromabhängigen Verluste von Transformatoren (Kupferverluste) sind in Tabelle 5 enthalten. Daraus wird ersichtlich, dass Transformatoren heute zu den effizientesten Betriebsmitteln gehö-

ren. Selbst bei Vollast hat ein großer Netztransformator heute weniger als 0,3% Gesamtverluste. Da Netztransformatoren jedoch äußerst selten die volle Leistung übertragen müssen, sind die auftretenden Verluste (abgesehen vom Fall sehr geringer Leistung) noch deutlich kleiner. Den Freiheitsgraden bei der Leiterauswahl werden durch die Verarbeitbarkeit und die Wirtschaftlichkeit Grenzen gesetzt. Bei Transformatoren sind zusätzlich noch die vorgegebenen Einbaumaße und ggf. Transportbeschränkungen zu beachten. Bei der Wirtschaftlichkeitsanalyse wird eine sog. Verlustbewertung durchgeführt, bei der die während der Lebensdauer des betrachteten Betriebsmittels zu erwartenden akkumulierten Verluste monetär bewertet und zusammen mit den reinen Investitionskosten zur Entscheidungsfindung herangezogen werden. Daraus lässt sich dann eine sog. wirtschaftliche Stromdichte bestimmen, für die das Betriebsmittel ausgelegt werden sollte. Die o.g. quadratische Abhängigkeit von der Belastung und deren Prognose über die hohe Lebensdauer dieser Betriebsmittel (30 bis 40 Jahre) zusammen mit der Unsicherheit der für die Verlustbewertung erforderlichen Strompreisentwicklung über diesen Zeitraum verdeutlichen die Problematik dieses Ansatzes. Meistens werden Netzbetriebsmittel im ungestörten Netzbetrieb deutlich unterhalb der maximal zulässigen Dauerströme betrieben. Kurzfristig (für die Dauer von einigen Stunden) sind im Allgemeinen aber auch höhere Ströme zulässig. Insbesondere bei Kabeln werden eher dickere Leiterquerschnitte gewählt, da die Kabelmehrkosten gegenüber den Verlegekosten in der Regel eine untergeordnete Rolle spielen.

Tab. 5 Anhaltswerte für die Verluste von Transformatoren bei maximaler Dauerlast (Bemessungsleistung)

Umspannung kV/kV	Nennleistung MVA	Kupferverluste bei Vollast kW	Leerlaufverluste kW	Effizienz bei Vollast %
380 / 110	350	800	120	99,73
110 / 10	30 <sup>1)</sup>	100	13	99,62
110 / 10	30 <sup>2)</sup>	80	7	99,71
10 / 0,4	0,400 <sup>1)</sup>	4,60	0,55	98,71
10 / 0,4	0,400 <sup>2)</sup>	3,85	0,43	98,93
10 / 0,4	0,250 <sup>1)</sup>	3,25	0,39	98,54
10 / 0,4	0,250 <sup>2)</sup>	2,75	0,30	98,78
1) Standardausführung 2) verlustreduzierte Ausführung				

Im Gegensatz zu den stromabhängigen Verlusten sind die spannungsabhängigen Verluste nicht von der Belastung abhängig. Sie entstehen, sobald ein Betriebsmittel am Netz ist, in der Regel also während 8760 Stunden im Jahr. Abgesehen von der Strompreisentwicklung sind diese daher relativ einfach wirtschaftlich zu bewerten. Zu den spannungsabhängigen Verlusten gehören Ableitverluste (dielektrische Verluste), bedingt durch nicht-ideale Isolierwerkstoffe. Bei Hoch- und Mittelspannungskabeln konnten diese Verluste durch den Übergang von Papier-Masse-Isolation auf Kunststoff (VPE) etwa um den Faktor 10 gesenkt werden. Bei Niederspannungskabeln spielen sie aufgrund der geringen

Spannung praktisch keine Rolle. Zu den Ableitverlusten zählen auch die Koronaverluste bei Freileitungen im Hoch- und Höchstspannungsnetz. Durch die Wahl geeigneter Bündelleiter sind diese aber bei einer gesamthaften Verlustbetrachtung bedeutungslos. Anhaltswerte hierfür sind ebenfalls in Tabelle 4 enthalten.

Zu den spannungsabhängigen Verlusten können auch die Magnetisierungsverluste bei Transformatoren (auch Leerlaufverluste oder Eisenverluste genannt) gezählt werden, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

Zu den Netzverlusten kann letztendlich auch der Eigenbedarf der Anlagen gezählt werden, wie z.B. für Schutz- und Leittechnik, Batterien zur Notstromversorgung, Heizung usw. Dieser Anteil ist vergleichsweise jedoch sehr gering.

### 4.2.2 Transformatoren

Transformatoren werden in der Technik in vielfältiger Form im Leistungsbereich von einigen Watt bis mehreren Hundert Megawatt eingesetzt. Nach der Leistung unterscheidet man zwischen Kleintransformatoren und Leistungstransformatoren. Die Leistungstransformatoren unterteilt man noch in Drehstrom- und Einphasentransformatoren. Drehstromtransformatoren kommen in größerer Anzahl in den Netzen der elektrischen Energieversorgung als Maschinen- oder Blocktransformatoren, Netzkuppeltransformatoren oder Verteiltransformatoren vor. Daneben werden sie in Stromrichteranlagen und in der Industrie zur Spannungsanpassung eingesetzt. Einphasentransformatoren werden bei der Bahnstromversorgung benötigt und als kleinere Einheiten in Sonderbauformen als Spannung- und Stromwandler in großer Stückzahl eingesetzt.

Mit wachsender Leistung nimmt die Stückzahl der eingesetzten Transformatoren naturgemäß ab, da die Mehrzahl der Anwendungen im kleinen und mittleren Leistungsbereich liegt.

Tabelle 6 zeigt diese Tendenz am Beispiel der in deutschen Energieversorgungsnetzen eingesetzten Transformatoren.

	<b>Mittelspannung 6 bis 60 kV</b>	<b>Hochspannung 60 bis 220 kV</b>	<b>Höchstspannung 220 und 380 kV</b>	<b>Gesamt</b>
Anzahl	557 500	7 400	1 100	566 000
Bemessungsscheinleistung in MVA	268 000	257 000	311 000	836 000

Tab. 6 Anzahl und Bemessungsleistung von Transformatoren nach Spannungsebenen (Oberspannung)<sup>22</sup>

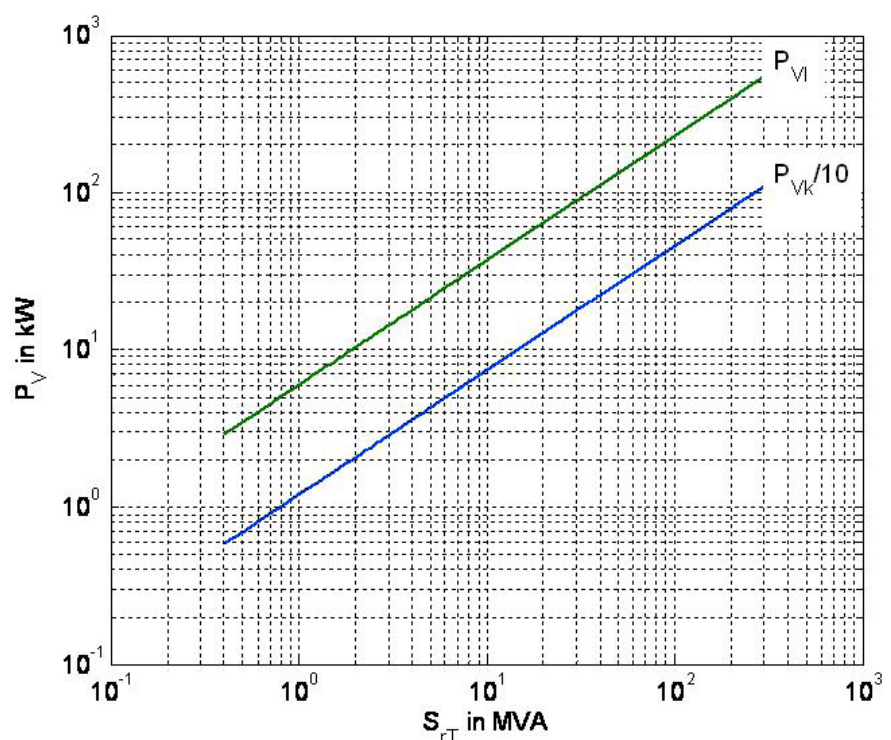
<sup>22</sup> Quelle: VDEW, VDN

Die Verluste der Transformatoren setzen sich wie die anderer Betriebsmittel auch aus den spannungsabhängigen Leerlauf- und den stromabhängigen Kurzschlussverlusten zusammen. Die Leerlaufverluste hängen nur von der Spannung (und Frequenz) ab und fallen in voller Höhe ständig an, sobald der Transformator im Betrieb ist. Die Kurzschlussverluste hängen quadratisch vom Strom (und der Frequenz) und somit vom Belastungszustand ab. Daneben treten noch sog. Zusatzverluste auf, die durch Streuflüsse in metallischen Teilen und Wicklungen entstehen und ca. 15% der Gesamtverluste ausmachen.

Das Bild 15 zeigt Richtwerte für die Leerlauf- und Kurzschlussverluste in Abhängigkeit von der Bemessungsscheinleistung.

Die Leerlaufverluste setzen sich aus den Hysterese- und Wirbelstromverlusten zusammen. Hier wurden in der Vergangenheit die größten technologischen Fortschritte erzielt. Der Werkstoff ist hierbei kornorientiertes, kaltgewalztes Blech. Geringe Wirbelstromverluste konnten durch Verringerung der Blechdicke von 0,35 mm auf heute 0,23 mm und einen hohen Siliziumanteil erreicht werden. Zudem können die Bleche noch mechanisch geritzt oder gelasert werden. Die Hystereseverluste konnten durch den Einsatz sog. Hi-B-Bleche mit verbesserter Kornorientierung und eine spezielle Beschichtung der Bleche gesenkt werden. Eine optimierte Formgebung des Kerns und eine Schichtung der Bleche in der sog. Step-Lap-Technik haben außerdem zur Verlustreduzierung beigetragen. Insgesamt konnten so die Leerlaufverluste bei Transformatoren im Laufe der letzten 40 Jahre etwa auf ein Drittel gesenkt werden. Neben dem Effekt der Verlustreduzierung hat diese Entwicklung auch zu einer deutlichen Absenkung der Transformatorgeräusche beigetragen. Anhaltswerte für die Leerlaufverluste von Transformatoren sind in Tabelle 5 aufgelistet.

Bild 15 Leerlauf(PVI)- und Kurzschlussverluste (PVk) als Funktion der Bemessungsscheinleistung



Der Wirkungsgrad der Transformatoren hängt vom Belastungszustand, dem Leistungsfaktor  $\cos\varphi$ , der Belastung und vom Verlustverhältnis (Verhältnis von Leerlauf- zu Kurzschlussverlusten im Bemessungsbetrieb) ab. Der maximale Wirkungsgrad ergibt sich nach der Beziehung

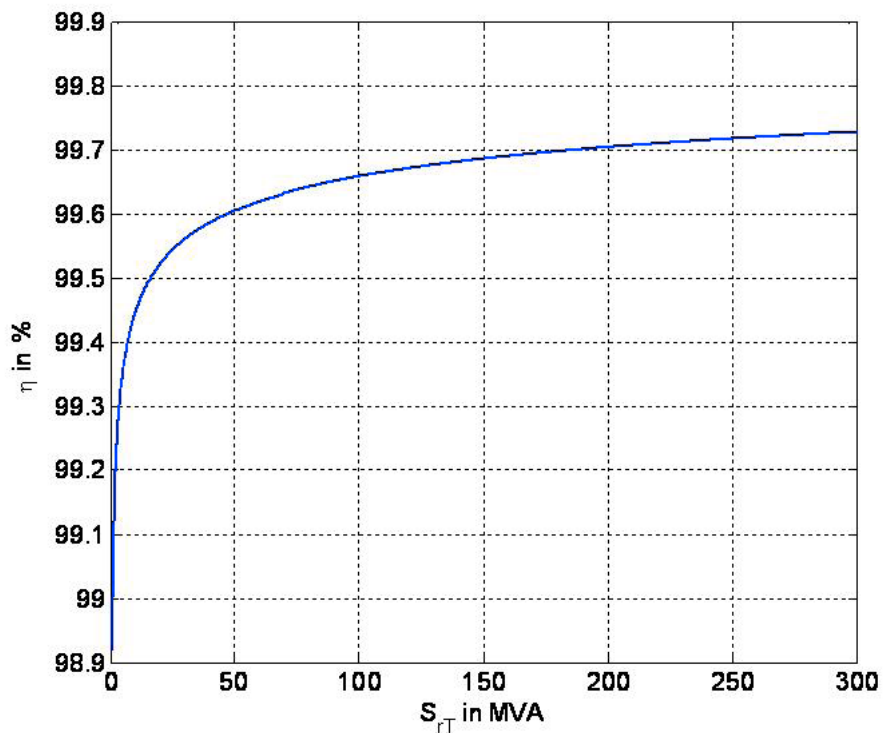
$$\eta_{\max} = 1 - 2a \frac{r_T}{\cos\varphi}$$

wobei  $a$  das Verlustverhältnis und  $r_T$  der bezogene Wicklungswiderstand sind. Er stellt sich bei der optimalen Belastung ein.

Für  $a = 1$  und  $\cos\varphi = 1$  liegt demnach der maximale Wirkungsgrad im Bemessungsbetrieb. Wird der Transformator überwiegend im Teillastbereich betrieben, so lohnt es sich, einen Typ mit einem Verlustverhältnis kleiner eins einzusetzen, weil sich mit kleiner werdendem Verlustverhältnis der maximale Wirkungsgrad zu kleineren Strömen hin verschiebt.

Mit steigender Leistung gewinnt die Verlustbewertung bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung an Bedeutung. Transformatoren werden deshalb so dimensioniert, dass mit wachsender Leistung auch der Wirkungsgrad zunimmt, was natürlich mit einem höheren konstruktiven und materiellen Aufwand verbunden ist. Das Bild 16 zeigt diese Tendenz für die Leistungstransformatoren der Energieversorgung. Die Wirkungsgrade von Transformatoren mit einer Bemessungsleistung von mehr als 1 MW sind bereits größer als 99%.

Bild 16 Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Bemessungsleistung bei  $a = 0,18$



Als Beispiel sei ein Transformator mit einer Bemessungsleistung von 1600 kVA angeführt. Die Leerlauf- und Kurzschlussverluste betragen  $P_{VI} = 1,56 \text{ kW}$  und  $P_{Vk} = 11,9 \text{ kW}$ . Damit ergibt sich ein Wirkungsgrad bei Bemessungsbetrieb und  $\cos\varphi = 1$  von  $\eta = 99,16\%$ .

In der oberen Leistungsklasse ist das Potential zur weiteren Wirkungsgraderhöhung praktisch ausgereizt, zumal der Aufwand hierfür überproportional in die Investitionskosten eingehen würde. Wenn bei den bereits sehr hohen Wirkungsgraden überhaupt noch Spielraum für eine weitere Steigerung des Wirkungsgrades besteht, so liegt das Potential dafür bei der Masse der Transformatoren der unteren und mittleren Leistungsklasse. In der Tabelle 7 sind die Verlusteinsparungen grob abgeschätzt, die sich bei angenommenen Wirkungsgradsteigerungen in den verschiedenen Leistungsklassen ergeben. Dazu wurde aus den Zahlen der Tabelle eine mittlere Leistung für die Spannungsebenen ermittelt. Die Verlusteinsparung ergibt sich dann einfach aus der Wirkungsgradsteigerung in Prozent geteilt durch 100 multipliziert mit der mittleren Bemessungsleistung und der Anzahl der Transformatoren dieser Leistungsklasse. Die Verlusteinsparungen in Tabelle 7 gelten für den Bemessungsbetrieb. Tatsächlich sind die Transformatoren im Netzbetrieb schon aus Redundanzgründen nie voll ausgelastet, so dass die tatsächlichen Verlusteinsparungen geringer sind.

	<b>Mittelspannung 6 bis 60 kV</b>	<b>Hochspannung 60 bis 220 kV</b>	<b>Höchstspannung 220 und 380 kV</b>
Anzahl	557 500	7 400	1 100
Mittlere Bemessungsscheinleistung	0,4 MVA	40 MVA	400 MVA
Mittlerer Wirkungsgrad			
Wirkungsgradsteigerung	0,1%	0,05%	0,025%
Verlusteinsparung bei Vollast	223 MW	148 MW	110 MW

Tab. 7 Verlusteinsparung bei der Wirkungsgradverbesserung von Leistungstransformatoren

Zusammenfassend ist einzuschätzen, dass das Energiesparpotential bei Leistungstransformatoren durch konstruktive Maßnahmen oder den Einsatz anderer Materialien für den Eisenkern und die Wicklungen gering ist. Die Eigenschaften der eingesetzten Transformatorbleche, die Gestaltung des Eisenkernes, die Ausführung und Anordnung der Wicklungen und Maßnahmen zur Verringerung der Zusatzverluste sind in den letzten Jahrzehnten so verbessert und optimiert worden, dass angesichts des ohnehin schon sehr hohen Wirkungsgrades von über 99% keine relevanten Wirkungsgradverbesserungen zu erzielen sind. Das eigentliche Energieeinsparpotential der Leistungstransformatoren liegt auf der betrieblichen Seite. Durch Wahl des für die Betriebsart (Vollast- oder Teillastbetrieb) optimalen Verlustverhältnisses bei der Anschaffung des Transformators oder einen wirtschaftlichen Parallelbetrieb lassen sich auch ohne konstruktive Wirkungsgradverbesserung erheblich Energieeinsparungen erzielen.

### 4.2.3 Einfluss von Spannung und Blindleistung

Um die gleiche Leistung zu übertragen, werden bei gleichem Leiterquerschnitt der Strom und damit die Verluste umso kleiner, je höher die Spannung ist. Aus diesem Grund werden hohe Leistungen, wie sie bei großräumigen Energietransporten erforderlich sind, in der Höchstspannungsebene (380 kV) übertragen. Auch in den Verteilungsnetzen ist also ein 20-kV-Netz bei gleichen Leistungen und Leiterquerschnitten verlustärmer als ein 10-kV-Netz. Da es praktisch unmöglich ist, bestehende Netze auf eine höhere Spannungsebene umzustellen, nutzt man den Spielraum der zulässigen Spannungsgrenzen aus und betreibt die Netze möglichst nahe an der oberen Grenze, um die Verluste zu minimieren.

Im Gegensatz zu Gleichstrom ist bei Wechselstrom neben Wirkleistung auch noch die sog. Blindleistung zu erzeugen und zu übertragen. Induktive Verbraucher, also insbesondere solche mit Wicklungen wie z.B. Motoren, Transformatoren oder Drosselspulen, verbrauchen Blindleistung. Kapazitive Verbraucher, also Kondensatoren, erzeugen Blindleistung. Auch Stromleitungen lassen sich im Ersatzschaltbild – neben den ohmschen Widerständen – durch Induktivitäten und Kapazitäten nachbilden. Dabei gilt, dass die in den Leitungskapazitäten erzeugte Blindleistung von der Spannung abhängig ist, wohingegen die in den Leitungsinduktivitäten verbrauchte Blindleistung vom Strom abhängig ist. Bei einem bestimmten Strom kann eine Leitung auch gerade soviel Blindleistung erzeugen wie verbraucht wird. Die zugehörige Übertragungsleistung einer Leitung bezeichnet man als natürliche Leistung. Ist der Strom höher, verhält sich die Leitung wie eine Induktivität; sie verbraucht als Blindleistung. Ist der Strom kleiner, so verhält sie sich wie eine Kapazität und erzeugt Blindleistung. Im Gegensatz zu Freileitungen haben Kabel eine sehr hohe Kapazität, so dass dort in der Regel mehr Blindleistung erzeugt als verbraucht wird. Bei Hochspannungskabeln (> 110 kV) ist sogar immer nur eine Blindleistungserzeugung möglich, da die natürliche Leistung größer ist als die thermische Grenzleistung. Freileitungen sind hingegen bei typischer Leitungsbelastung in der Regel Blindleistungsverbraucher.

Um einen stabilen Netzbetrieb zu gewährleisten, muss genau so viel Blindleistung erzeugt werden, wie verbraucht wird. Die Kraftwerksgeneratoren können hierfür durch eine entsprechende Regelung so gesteuert werden, dass sie außer der Wirkleistungserzeugung in gewissen Grenzen auch noch Blindleistung erzeugen oder aber auch verbrauchen können. Reichen die Erzeugungsmöglichkeiten der Generatoren nicht aus, so sind in den Netzen zusätzlich Kondensatorbänke oder sog. statische Blindleistungskompensatoren zu installieren. Dies ist bei langen, stark belasteten Übertragungsstrecken, z.B. in Großbritannien oder den USA erforderlich. Erzeugen die Netze zuviel Blindleistung, z.B. bei schwacher Belastung in der Nacht, so können zusätzlich Drosselspulen ans Netz geschaltet werden.

Die Übertragung von Blindleistung in den Netzen ruft an den ohmschen Widerständen der Leitungen und Transformatoren zusätzliche Verluste hervor. Daher ist man bestrebt, die Blindleistung möglichst dort zu kompensieren, wo sie entsteht. Dies ist insbesondere bei Kunden mit einem hohen Anteil an induktiven Verbrauchern (z.B. Motoren, Induktionsöfen etc.) sinnvoll. Derartige Kunden setzen hierfür Kompensationsanlagen ein, um möglichst nur Wirkleistung aus dem Netz zu beziehen. Neben einer Verlustreduzierung hat dies zusätzlich den wirtschaftlichen Vorteil, dass die Betriebsmittel der Kundenanlagen (Leitungen, Transformatoren) für geringere Leistungen ausgelegt werden können. Die durch die Blindleistung hervorgerufenen Zusatzströme begrenzen auch die mögliche Übertragungsentfernung, insbesondere bei Hoch- und Höchstspannungskabeln mit ihren konstruktionsbedingt hohen Kabelkapazitäten. Trotz der Verwendung von VPE als Isoliermaterial wird der Blindstrom ab einer gewissen Kabellänge dort so hoch, dass praktisch keine Wirkleistung mehr übertragen werden kann.

#### 4.2.4 Ausblick

Potential zur weiteren Verlustreduzierung bietet der Einsatz der sog. Supraleitung. Gewisse Werkstoffe haben die Eigenschaft, dass sie bei sehr tiefen Temperaturen keinen ohmschen Widerstand mehr haben. Damit lassen sich z.B. Kabel oder auch Transformatoren fertigen. Erste Prototypen von Kabeln werden derzeit in verschiedenen Ländern im Netzbetrieb getestet. Natürlich ist auch zum Kühlen der Leiter auf die erforderliche geringe Temperatur (ca.  $-200^{\circ}\text{C}$ ) Energie erforderlich. Trotzdem ergibt sich dabei eine deutlich positive Energiebilanz, insbesondere dann, wenn die Kabel ständig mit voller Leistung betrieben werden. Mit solchen Kabeln könnten zukünftig dann in Mittelspannung so hohe Leistungen übertragen werden, wie es heute nur mit 110-kV-Kabeln möglich ist. Positiver Nebeneffekt wäre dabei ggf. die Einsparung einer Umspannung (Transformator) mit den zugehörigen Verlusten. Für den Einsatz in der Niederspannung kommt diese Technik allerdings aufgrund des Kühlaufwands nicht in Frage.

Zur Verringerung der Verluste bei Ortsnetztransformatoren (Mittelspannung auf Niederspannung) werden schon seit vielen Jahren die Einsatzmöglichkeiten von sog. amorphen Metallen als Werkstoff für den Kern untersucht. Aufgrund des spröden Materials könnte ein derartiger Kern nicht mehr aus Einzelblechen geschichtet, sondern müsste aus Bändern gewickelt werden. Dies würde zu sehr aufwändigen Fertigungsverfahren, deutlich größerem Bauvolumen, erhöhtem Geräuschpegel und erheblich höheren Kosten führen. Amorphe Metalle bieten insbesondere Vorteile bei höheren Frequenzen. Bei Anwendungen in der öffentlichen Stromversorgung (50 Hz) dürften sie sich vermutlich aus den genannten Gründen nicht durchsetzen.

Aus der Tatsache, dass die heute dem Niederspannungsnetz entnommene Energie ca. 8% Verluste verursacht, wird der Anreiz zur dezen-



tralen Stromerzeugung – z.B. durch PV- und KWK-Anlagen möglichst nahe beim Verbraucher – ersichtlich. Mit zunehmender dezentraler Stromerzeugung ist daher zu erwarten, dass die Netzverluste in den Verteilungsnetzen weiter abnehmen werden. Allerdings kann eine übermäßige dezentrale Erzeugung mit der Notwendigkeit der Weiterverteilung der dezentral erzeugten Energie – ggf. bis zur nächsten Spannungsebene – die Verluste auch wieder ansteigen lassen.

Die Strommarkt-Liberalisierung hat zu gravierenden Änderungen der Lastflüsse im deutschen und europäischen Verbundnetz geführt. Inzwischen treten regelmäßig weiträumige Transporte großer Leistungen auf. Den Lastflüssen von Norden nach Süden, bedingt durch Windenergieeinspeisung, überlagern sich durch den Stromhandel Lastflüsse von Ost nach West oder umgekehrt. Mit der Zunahme Leitungsbelastung und der Übertragungsentfernung im Verbundnetz ist dort in Zukunft wieder mit steigenden Netzverlusten zu rechnen.

Da der Strom sich von selbst den Weg des geringsten Widerstandes sucht – bei gleichzeitig minimalen Verlusten – ist mit Zunahme der Übertragungsaufgaben im Verbundnetz damit zu rechnen, dass gewisse Leitungen überlastet werden könnten, wohingegen Parallelzweige noch freie Übertragungskapazitäten hätten. Um dies zu vermeiden und um die zu übertragende Leistung besser auf die vorhandenen Leitungen aufzuteilen, wird der Einsatz von sog. FACTS (Flexible AC Transmission Systems) zur Leistungssteuerung erwogen. Neben den Zusatzverlusten, die diese Systeme – in der Regel leistungselektronische Stellglieder – selbst verursachen, würde dies auch im übrigen Netz zu höheren Verlusten führen, da Leistung auf Leitungen mit einem höheren Widerstand verlagert wird.

Bei Begrenzung übermäßigen Stromhandels kann insgesamt jedoch auch in zukünftig noch mit einer weiteren Verringerung der Netzverluste gerechnet werden, wenn auch die Reduktionseffekte nicht mehr so deutlich ausfallen dürften wie in der Vergangenheit.

## 5 Spezifische Effizienzpotentiale im Bereich der Stromanwendung

### 5.1 Wirkungsgradverbesserung einzelner Komponenten

#### 5.1.1 Motoren

Elektrische Antriebe teilt man üblicherweise in die drei Klassen Kleinmotoren, Industriemotoren (Niederspannungs-Drehstrommotoren) und Hochspannungsmotoren (Großantriebe) auf. Die marktüblichen Motor-technologien der Klassen unterscheiden sich deutlich voneinander.

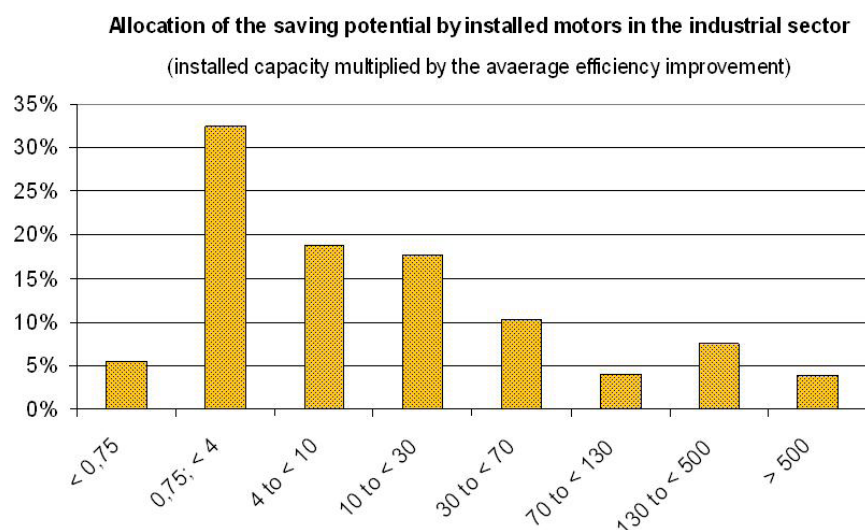
Die Leistungsgrenzen sind nicht scharf abgegrenzt, liegen aber in der Größenordnung bei 0,5 bis 1 kW und bei 500 bis 1000 kW.

Von der Stückzahl überwiegen Kleinmotoren deutlich mit einer Jahresproduktion von über 160 Mio. Stück in Deutschland. Es folgen die Niederspannungsmotoren mit rund 4,4 Mio. Stück und die Großantriebe mit rund 7.600 Stück. Auch beim Umsatz liegen die Kleinantriebe mit 2400 Mio. € vor Drehstrommotoren (1600 Mio. €) und Großantrieben (260 Mio. €). Zum Vergleich beträgt der Umsatz mit Frequenzumrichter (elektronische Drehzahlsteller) aus deutscher Produktion rund 1300 Mio. € (etwa 1,1 Mio. Stück)<sup>23</sup>.

Bei der Summe der Antriebsleistung (Summe der Bemessungsleistung aller in einem Jahr neu produzierten Motoren) führen die Drehstrommotoren (runde 14 GW) knapp vor den Kleinantrieben (13 GW). Die Großantriebe folgen mit deutlichem Abstand (5 GW).

Bei den Drehstrommotoren liegt der Verbrauchsschwerpunkt im Leistungsbereich 1,1 bis 37 kW. Die überwiegende Stückzahl der Kleinmotoren wird im Automobil und in Haushalten eingesetzt. Außerdem werden Kleinantriebe meist mit kurzen Einschalt Dauern betrieben,

Bild 17 Effizienzpotential von Niederspannungs-drehstrommotoren



Sources: 1. SAVE-Report "Improving the Penetration of Energy Efficient Motors and Drivers"  
2. CEMEP calculations

23 Statistisches Bundesamt / ZVEI, Zahlen für 2005

während Niederspannungsmotoren typischerweise auf beträchtliche Betriebszeiten kommen. Deshalb spielen Kleinantriebe für den Verbrauch von stationär erzeugter elektrischer Energie eine untergeordnete Rolle. Das mit Abstand größte Potential zur Einsparung liegt also bei den Niederspannungs-Drehstrommotoren (Bild 17).

#### 5.1.1.1 Kleinantriebe (typisch unter 0,5 kW)

Typische Anwendungen außerhalb des Automobils sind Medizintechnik (Pumpen, Bohrer), Bürogeräte (Kopierer, Drucker, Scanner), Heizung-Lüftung-Klimatechnik (Ventilsteuerungen, Kleinpumpen), Maschinenmarkt (Format- und Anschlagverstellung, Werbungstafeln), Warenautomaten (Getränke, Warenausgabe, Geldautomaten, Recycling), Küchengeräte und Elektrowerkzeuge.

Kleinantriebe werden überwiegend mit Gleichspannungen zwischen 6 und 48 V oder mit einphasiger Wechselspannung bis 230 V betrieben. Hauptsächlich werden einphasige Induktionsmaschinen, Synchronmaschinen und bürstenbehaftete Gleichstrommaschinen eingesetzt, wobei der Markt sich derzeit von den Induktionsmaschinen hin zu Gleichstrommotoren bewegt, denn Leistungsgewicht und Wirkungsgrad dieser Antriebe sind deutlich besser.

Permanentmagneterregte Motoren (bürstenlose Gleichstrom- bzw. EC-Motoren) haben einen weiter verbesserten Wirkungsgrad gegenüber bürstenbehafteten DC-Motoren, sind aber auch teurer und daher nicht so verbreitet.

Der Wirkungsgradbereich von Kleinmotoren reicht von 5% bei Spaltpolmotoren für Warmwasserumwälzung über 40 bis 75% bei Einphasen-Induktions- und Universalmotoren bis hin zu 70 bis 85 % bei permanenterregten Gleichstrommotoren oder EC-Motoren. Dabei werden für viele Anwendungen nach wie vor Motoren mit schlechtem Wirkungsgrad aufgrund ihrer geringeren Anschaffungskosten eingesetzt, obwohl hochwertigere Motoren sowohl verfügbar als auch (vor allem bei hoher Betriebsdauer wie z.B. in der Heizungs- und Klimatechnik) wirtschaftlich sind.

#### 5.1.1.2 Drehstrommotoren (typisch 0,5 kW bis 500 kW)

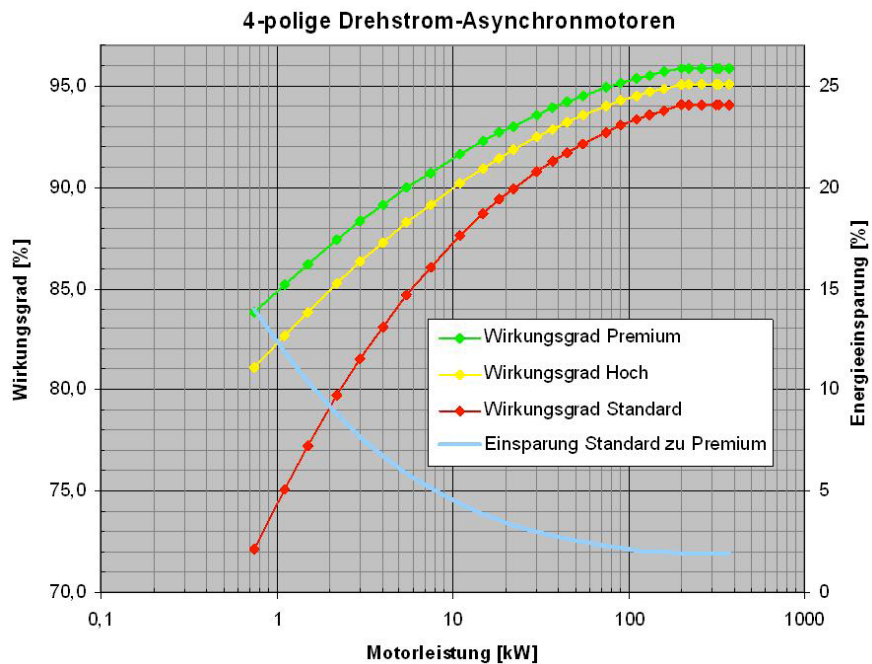
Diese Motoren werden ganz überwiegend als dreiphasige Induktionsmaschinen mit Käfigläufern gebaut. Aufgrund der hohen Verbreitung und der hohen Stückzahlen stehen Kostenaspekte stark im Vordergrund. Anwendungsbereiche sind Pumpen, Kompressoren, Lüfter und alle Arten der Fördertechnik (horizontal wie vertikal). Viele dieser Antriebe erreichen hohe Betriebsstundenzahlen bei hoher spezifischer Auslastung.

Je nach Leistungsbereich sind Wirkungsgrade von rund 70% bis zu rund 95% marktüblich. Der Wirkungsgrad wird international eingeteilt in die vier Klassen Niedrig (eff3), Standard (eff2), Hoch (eff1) und Premium,

wobei die Premium-Klasse in Europa gerade erst in der Markteinführung ist.

Über 90% der heute verkauften Antriebe entsprechen dem Wirkungsgrad der Standardklasse (eff2). Die folgende Grafik zeigt die leistungsabhängigen Wirkungsgrade und das theoretische Einsparpotential in Prozent der aufgenommenen elektrischen Leistung im Vergleich von Standard zu Premium.

Bild 18 Wirkungsgradklassen bei Standardmotoren



Man darf nicht vergessen, dass Elektromotoren in erster Linie Energiewandler sind, d.h. elektrische Energie wird in mechanische Energie umgesetzt. Nur ein kleiner Teil der aufgenommenen elektrischen Energie sind Verluste und nur diese lassen sich durch die Konstruktion des Motors beeinflussen.

Deshalb sind die Energieeinsparungen auch nur für Motoren kleiner Leistung signifikant (zwischen 10 und 15%). Bei Motoren ab rund 100 kW liegen die Einsparpotentiale so niedrig (2% oder weniger), dass die Bedeutung auf den Gesamtenergieverbrauch weitgehend zu vernachlässigen ist.

Die Herstellkosten steigen pro Wirkungsgradklasse um etwa 10 bis 20% an. Der Sprung von Standard zu Premium bedeutet also runde 30% Mehrkosten. Die Erfahrungen in Europa und in anderen Ländern (USA, Kanada, Australien) haben deutlich gezeigt, dass eine wesentliche Marktverschiebung in diesem Sinne nur durch politische Unterstützung (finanzielle Anreize oder gesetzliche Vorgaben) zu erreichen ist. Vor allem bei den Motoren im Leistungsbereich bis etwa 10 kW, welche in Summe den größten Anteil am Energieverbrauch haben, wäre eine weitere Verbesserung des Wirkungsgrades über die Premium-Klasse hinaus möglich. Dies wird in den USA bereits diskutiert (Super-Pre-

mium). Untersuchungen von Herstellern und Forschungseinrichtungen zeigen deutlich, dass eine technisch und wirtschaftlich sinnvolle Lösung für Super-Premium Motoren mit der heute marktüblichen Technologie der Induktionsmotoren (Käfigläufer) nicht vorstellbar ist. Die Herstellkosten würden nochmals überproportional ansteigen. Vor allem aber würden sich die Motoreigenschaften (Baugröße, Gewicht, Rotorschwingmasse) so sehr verschlechtern, dass die Antriebe in vielen Anwendungen gar nicht mehr einsetzbar wären.

Andere, besser geeignete Technologien sind gut bekannt und in kleinen Stückzahlen bereits in den Markt eingeführt. Hierbei werden die Motoreigenschaften durch den Einsatz von Permanentmagneten verbessern. Allerdings können diese Motoren nicht oder nur mit erheblichen Einschränkungen direkt am Versorgungsnetz betrieben werden. Zum Anlauf und zur Regelung wird daher zusätzliche Leistungselektronik (Frequenzumrichter, Anlaufsteller o.ä.) benötigt, welche die Gesamtkosten des Antriebs deutlich erhöht und im Vergleich zu einem direkt netzgespeisten Motor zusätzliche Verluste hervorruft. Man muss aber berücksichtigen, dass heute sowieso schon mehr als ein Viertel aller neu verkauften Niederspannungs-Drehstrommotoren an Frequenzumrichtern betrieben werden (mit stark steigender Tendenz).

Die Einführung einer Super-Premium-Motorenklasse für Antriebe im Leistungsbereich zwischen rund 0,1 und rund 10 kW wäre also mit neuer Technologie durchaus ökonomisch und technisch sinnvoll realisierbar. Auch hier ist eine wesentliche Marktverschiebung aber nur bei klarer politischer Unterstützung zu erwarten.

Außerdem führen drehzahlregelbare Antriebe in vielen Applikationen zu wesentlich höheren Einsparungen, als mit neuen Motortechnologien jemals denkbar sind. Auf die optimale Anpassung des Antriebs an den Arbeitsprozess muss daher der Schwerpunkt zukünftiger Aktivitäten gelegt werden (siehe Abschnitt 5.3).

### 5.1.1.3 Großantriebe (typisch über 500 kW)

Großmotoren werden nicht in Serie hergestellt, sondern individuell zwischen Kunden und Lieferanten verhandelt. Einsatzbereiche sind Großförder- und Verladeanlagen, Schiffsbau, Mühlen, aber auch Kompressoren und Pumpen in der Öl-, Gas- und Chemieindustrie oder in Kraftwerken.

Derzeit fordert der Markt meist Produkte mit möglichst niedrigen Preisen, guten Lieferzeiten und ausgezeichneter Qualität. Eine getrennte Evaluierung der Motorverluste findet fast ausschließlich im Endkundengeschäft der Öl- und Gasbranche sowie bei den Energieversorgern statt, da die Stromkosten dort einen wesentlichen Teil der Betriebskosten der Anlage ausmachen.

Daher ergibt sich der heute vorherrschende Wirkungsgrad oftmals als Ergebnis möglichst hoher Leistungsdichten bei niedrigen Material- und

Fertigungskosten oder spezieller technischer Forderungen wie einem niedrigen Anlaufstrom oder einer hohen Überlastbarkeit. Trotzdem haben Motoren dieser Leistungsklasse schon aus physikalischen Gründen einen sehr hohen Wirkungsgrad von 95% oder mehr. Der Raum für weitere Verbesserungen ist daher im Vergleich zu Standardmotoren erheblich kleiner. Daher sind im Bereich der Großantriebe wesentliche zusätzliche Impulse zur Energieeinsparung in der Zukunft nicht mehr möglich.

Einen Überblick über derzeitige erreichte und bei entsprechender Optimierung mögliche Wirkungsgrade gibt Tabelle 8. Die Angaben zur Gesamtleistung der neu produzierten Motoren sind Schätzwerte für die Jahre 2005/2006. Sie können je nach Marktlage sowie nach Marktverteilung in den einzelnen Branchen deutlich variieren. Würden elektrische Großmotoren nur noch mit optimiertem Wirkungsgrad eingesetzt, ließen sich weltweit etwa 200 MW Verlustleistung einsparen.

Leistungs- klasse (kW)	Dominierender Maschinentyp	Drehzahl bei 50 Hz	Weltweite Gesamt- leistung (GW/a) der Neuproduktion	Gesamtkosten optimierter Wirkungsgrad (%)	möglicher Wirkungsgrad (%)
200 bis 1000	Niederspannungs- induktionsmotoren	750	1	95,2 - 96,6	95,7 - 97,1
		1000	2	95,8 - 97,1	96,3 - 97,6
		1500	5	96,0 - 97,1	96,5 - 97,6
		3000	1	96,0 - 97,4	96,5 - 97,9
800 bis 1500	Rippengekühlte Hochspannungsinduktions- motoren	750	2	96,8	97,1
		1000	2	96,8	97,2
		1500	4	97,0	97,5
		3000	2	96,9	97,3
1000 bis 20000	Modular gekühlte Hochspannungs- induktionsmotoren	<750	3	94,0 - 95,0	95,0 - 96,0
		1000	2	96,9 - 98,0	97,2 - 98,2
		1500	3	97,0 - 98,2	97,4 - 98,4
		3000	2	97,3 - 97,8	97,6 - 98,0
1000 bis 8000	Induktionsmotoren mit Schleifringläufer	<750	<0.5	anwendungsspezi- fisch	
		1500	8	97,1 - 97,5	97,3 - 97,7

Tab. 8 Leistungsbereich von  
Großmotoren

## 5.1.2 Getriebe

### 5.1.2.1 Getriebe mit abwälzender Verzahnung (Stirnrad, Kegelrad, Planeten)

Der Wirkungsgrad dieser Getriebe ist generell sehr hoch. Verluste entstehen in der Verzahnung, durch Reibung der Dichtungen und das Planschen des Schmieröls (abhängig von der Eintriebsdrehzahl). Pro Getriebestufe lassen sich Übersetzungen von rund 4 bis 10 realisieren. Für eine typische Abtriebsdrehzahl von 60 /min mit Antrieb durch einen Drehstrommotor (1500 /min) wird ein zweistufiges Getriebe benötigt,

das einen Wirkungsgrad in einer Größenordnung von 95% aufweist. Noch kleinere Drehzahlen lassen sich durch zusätzliche Getriebestufen realisieren, wobei der Wirkungsgrad dabei nur wenig sinkt. Potentiale zur Energieeinsparung sind bei diesen Produkten kaum auszumachen.

### 5.1.2.2 Getriebe mit gleitender Verzahnung (Hypoid, Schnecken, Spiroplan)

Durch die gleitende Verzahnung ergeben sich drehzahl- und übersetzungsabhängig deutlich höhere Verluste als bei Getrieben mit rein abwälzender Verzahnung. Dabei kann der Wirkungsgrad unter Umständen bei 50% oder weniger liegen. Da diese Getriebe vor allem bei hohen Untersetzungen (und damit niedrigen Abtriebsdrehzahlen) in der Regel kostengünstiger als stirnradverzahnte Getriebe sind, haben sie einen hohen Marktanteil. Technologisch ließen sie sich aber ohne weiteres durch Kegelradgetriebe ersetzen. Aufgrund der Kostenproblematik wird dies in großem Umfang nur mit politischem Druck durchsetzbar sein.

### 5.1.2.3 Getriebelose elektrische Direktantriebstechnik

Im Gegensatz zum Elektromotor, der Drehmoment erzeugt und dessen Leistung mit kleinerer Drehzahl daher immer mehr abnimmt, ist das Getriebe ein Drehmomentwandler: Die Leistung bleibt auch bei kleinsten Drehzahlen (d.h. höchsten Untersetzungen) nahezu konstant (ausgenommen Getriebe mit gleitender Verzahnung).

Das Drehmoment eines Elektromotors hängt neben einigen inneren Größen (Stromdichte, magnetische Induktion), die jeweils für eine bestimmte Motorentechnologie weitgehend konstant sind, vor allem vom elektromagnetisch aktiven Rotorvolumen ab. Schon bei halber Drehzahl muss ein Motor gleicher Leistung also rund doppelt so groß sein und wird dann auch etwa doppelt so schwer und doppelt so teuer. Aber auch der Wirkungsgrad von sehr langsam laufenden Direktantrieben ist schlecht verglichen mit der Kombination aus schnell laufendem Motor und Untersetzungsgetriebe, denn die hauptsächlichsten Verluste kleiner und mittelgroßer Motoren hängen unmittelbar vom Strom ab und damit letztlich vom Drehmoment und weniger vor der Drehzahl in Form der Eisen- und Reibungsverluste. Bei kleiner Drehzahl und vollem Drehmoment bleibt der Strom weitgehend konstant. Deshalb gehen die Verluste unterproportional zur Abgabeleistung zurück und der Wirkungsgrad sinkt.

Der Ersatz von Untersetzungsgetrieben durch elektrische Direktantriebstechnik kann also nur bei relativ hohen Drehzahlen (in der Größenordnung über etwa 500/min) oder bei sehr niedrigen Drehmomenten wirtschaftlich und energetisch sinnvoll sein. Beim Ersatz von Übersetzungsgetrieben durch schnell laufende Direktantriebstechnik kann dagegen meist eine deutliche Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads erreicht werden. Zusätzlich sinken dabei die Motorgröße und damit der Materialeinsatz.

Hinzu kommen natürlich solche Anwendungen, bei denen man die teils negativen Eigenschaften von Getrieben (Lebensdauer, Schmierungsbedarf, Geräusche, Vibrationen, Spiel etc.) nicht gebrauchen kann und deshalb bereit ist, insgesamt einen höheren Preis zu bezahlen.

Ein signifikanter Beitrag zur Energieeinsparung ist aus der Direktantriebstechnik daher auch in Zukunft nicht zu erwarten.

### 5.1.3 Umrichter

Umrichter dienen zur verlustarmen und schnell steuer- und regelbaren Umformung elektrischer Energie durch Schalten mit elektronischen Mitteln. Hauptanwendungsgebiete sind drehzahlveränderliche Antriebe, wobei die im vorangegangenen Kapitel angesprochenen Motoren mit zum Einsatz kommen. Darüber hinaus finden Umrichter in den verschiedensten Gebieten der elektrischen Energie- und Automatisierungstechnik Anwendung, so z.B. zur Umformung der durch regenerative Quellen wie Photovoltaik oder drehzahlvariable Windturbinen erzeugten elektrischen Energie zum Zwecke der Einspeisung in das Energieversorgungsnetz. Ähnlich wie bei den zuvor besprochenen Motoren reicht das Spektrum der Umrichterleistungen von vielen 100 MW (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) bis zu wenigen Watt. Eine spezielle Ausprägung der Umrichter wird in dem späteren Abschnitt über *Netzteile* behandelt.

Da die elektrischen Antriebe einen wesentlichen Anteil an der Nutzung elektrischer Energie beanspruchen, stellen sie bei der Diskussion der Energiesparpotentiale einen wichtigen Gesichtspunkt dar. Wie im späteren Abschnitt über *geregelte Antriebe* noch detailliert dargelegt, stellt der Übergang vom drehzahlstarrantrieb (ohne Umrichter) zum drehzahlvariablen Antrieb (mit Umrichter) einen entscheidenden Schritt zur Energieeinsparung auf dem Gebiet elektrischer Antriebe dar. Damit wird der Umrichter mit seiner Regelung zur Schlüsselkomponente (*enabling technology*) von energieeffizienten Antrieben.

Die Standardtechnologie von Antriebsumrichtern ist heute der Pulswechselrichter mit Spannungszwischenkreis, ausgerüstet mit *Insulated Gate Bipolar Transistors* (IGBTs) als Leistungshalbleiter in Siliziumtechnik. Auf Grund der erfreulichen Fortschritte bei der Entwicklung dieser Bauelemente sowie der zugehörigen Silizium-Leistungsdioden liegt der Wirkungsgrad von Antriebsumrichtern bei Leistungen oberhalb von etwa 30 kW *im Bemessungspunkt* typischerweise bei 97 bis 98%. Im Leistungsbereich unterhalb von 30kW weisen Herstellerangaben Wirkungsgrade von Antriebsumrichtern *im Bemessungspunkt* im Bereich von 90 bis 95% auf. Diese sehr positiven Werte gelten aber nur für genau einen Betriebspunkt, den Bemessungspunkt. Davon abweichende Betriebspunkte werden später erörtert.

Wie im vorangegangenen Kapitel bereits erwähnt, beanspruchen Motoren im Leistungsbereich bis etwa 10 kW in Summe den größten Anteil am Energieverbrauch von Antrieben, daher steht der Bereich



unter 30 kW hier im Mittelpunkt. Zur Frage, wie Energiesparpotentiale durch Umrichter erschlossen werden können, werden die folgenden Hauptpunkte diskutiert:

- Verbreiterung des Einsatzes von umrichtergespeisten Antrieben.
- Wirkungsgradverbesserung von Umrichtern kleinerer Leistung.

### 5.1.3.1 Verbreiterung des Einsatzes von umrichtergespeisten Antrieben

Ein verstärkter Übergang zur Umrichterspeisung würde in zweierlei Hinsicht ein erhebliches Energiesparpotential erschließen: Zum einen können durch Anpassung an den Prozess mit Hilfe der Regelung die damit realisierbaren Optimierungsmöglichkeiten ausgeschöpft werden (siehe Abschnitt über *geregelte Antriebe*) und zum anderen können permanenterregte Synchronmotoren verwendet werden, die im Vergleich zu Induktionsmotoren einen günstigeren Motorenwirkungsgrad haben. Dem stehen allerdings die massiv erhöhten Kosten entgegen.

Zum verstärkten Einsatz von umrichtergespeisten Antrieben können sowohl äußere Anreize als auch technische Maßnahmen zur Kostensenkung beitragen. Dem Ziel der Effizienzsteigerung würde der größte Dienst erwiesen werden, wenn auf Seiten von Forschung und Entwicklung eine Priorität auf die Reduktion der Kosten bei Umrichtern vor allem im unteren Leistungsbereich gelegt würde, was aber bislang bei öffentlicher Forschungsförderung nicht erkennbar ist.

Zur Kostenreduktion könnten beispielsweise beitragen:

- gesteigerte Integration einschließlich entsprechender Aufbau- und Verbindungstechniken,
- Massenproduktion.

Beispielsweise könnten die heute verfügbaren *Intelligent Power Modules* (IPMs) weiterentwickelt werden, um neben der Ansteuerung (Gate-Treiber) auch alle Funktionen zur Strommessung, zum Schutz und zugehöriger Spannungsversorgung zu enthalten.

Bei Anwendungen, in denen hinreichend viel Bremsenergie anfällt, kann durch den Übergang zu rückspeisefähigen Umrichtern eine weitere Effizienzsteigerung erreicht werden. Auch hierzu könnte die Reduzierung der Kostenschwelle einen wichtigen Beitrag leisten.

Im Bereich größerer durchlaufender Antriebe bei Neuanlagen ist die Amortisation der Mehrkosten durch Umrichterspeisung im Zeitraum weniger Jahre möglich und wird daher für neue Anlagen auch weitgehend genutzt. Durch die Umrüstung von Altanlagen auf umrichtergespeiste Antriebe könnte auch mit der heute verfügbaren Technik erheblich Energie gespart werden.

### 5.1.3.2 Wirkungsgrad von Umrichtern kleinerer Leistung

Auf den ersten Blick scheinen Wirkungsgrade von Antriebsumrichtern *im Bemessungspunkt* im Bereich von 90 bis 95% durchaus akzeptabel zu sein. Am Beispiel eines neu auf den Markt gekommenen Umrichters mit einer Bemessungsleistung von  $P_{out} = 1,1 \text{ kW}$  eines namhaften Herstellers sei der Wirkungsgrad genauer betrachtet.

**a) Abhängigkeit von der Schaltfrequenz  $f_s$ .**

Angegeben werden die Verluste bei einer Schaltfrequenz von  $f_s = 4$  kHz zu  $P_{\text{verl}} = 100$  W. Daraus ergibt sich ein Wirkungsgrad von

$$\eta_4 = P_{\text{out},4} / (P_{\text{out},4} + P_{\text{verl}}) = 91\%$$

Aus vielerlei Gründen ist es wünschenswert und bei Kleinumrichtern auch üblich, eine wesentlich höhere Schaltfrequenz zu verwenden. Beispielsweise kann eine Geräuschminderung erzielt werden, insbesondere wenn die Schaltfrequenz über die Hörschwelle auf 16 kHz angehoben wird. Dies ist im Bereich der Gebäudetechnik häufig erforderlich. Wenn man  $f_s = 16$  kHz wählt, dann muss der Ausgangsstrom des als Beispiel verwendeten Umrichters um den Faktor  $\hat{i}_{16}/\hat{i}_4 = 1,2/3,1 = 0,39$  kleiner (derated) als im Bemessungspunkt ( $\hat{i}_4$ ) gewählt werden, wodurch dieser Umrichter nicht mehr 1,1 kW sondern nur noch  $P_{16} = 430$  W abgeben kann. Da die abzuführenden Gesamtverluste als gleichbleibend anzunehmen sind, sinkt der Wirkungsgrad auf  $\eta_{16} = P_{\text{out},16} / (P_{\text{out},16} + P_{\text{verl}}) = 81\%$ . Neben der Reduktion der Leistung auf 39% tritt also auch noch eine Verschlechterung des Wirkungsgrades um 10% ein. Wenn man aber bei  $f_s = 16$  kHz eine Ausgangsleistung von  $P_{\text{out},16} = 1,1$  kW haben will, dann muss man einen Umrichter nehmen, der bei  $f_s = 4$  kHz eine Leistung von  $P_{\text{out},4} = 3$  kW bringt, also einen ca. dreimal größeren Umrichter. Dieser hat dann einen Wirkungsgrad von  $\eta_{16} = 87\%$ .

Obige Überlegungen zeigen, dass noch erheblicher Bedarf an Verbesserungen hinsichtlich der Reduktion der Schaltverluste besteht. Darauf wird noch in den Abschnitten zu *Topologien* und *Bauelementen* eingegangen.

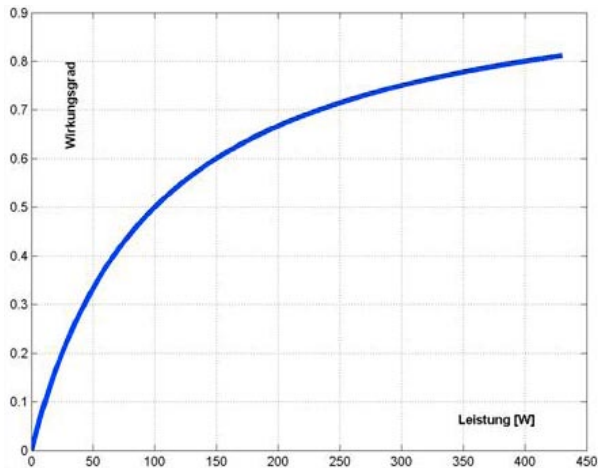
**b) Wirkungsgrad bei Teillast**

Bei Antriebsumrichtern wird höchst selten ein gemessener Wirkungsgradverlauf im Teillastbereich veröffentlicht. Bei Photovoltaik-Wechselrichtern hingegen wird der Wirkungsgradverlauf oder wenigstens ein Mittelwert über mehrere Betriebspunkte incl. Teillast oft als wichtiges Merkmal angegeben. Aus den Datenblattangaben lassen sich nur näherungsweise ein Verlustmodell und daraus der Wirkungsgradverlauf im Teillastbereich ermitteln. Für den obigen Fall mit  $P_{\text{out},4} = 1,1$  kW und  $f_s = 16$  kHz ist dies in Bild 19 gezeigt<sup>24</sup>.

Antriebsumrichter werden eingesetzt, um Drehzahl und Drehmoment einstellbar zu machen, d.h. Betriebspunkte werden vorwiegend im Teillastbereich und damit bei schlechterem Wirkungsgrad als im Bemessungspunkt liegen. Daraus erkennt man, dass Wirkungsgradverbesserungen insbesondere im Teillastbereich anzustreben sind.

24 Diese Kurve gilt näherungsweise sowohl für konstantes als auch für linear oder quadratisch mit der Leistung wachsendes Moment.

Bild 19 Wirkungsgradverlauf bei Teillast



Der Bedarf an Hilfsenergie, die zur Versorgung der Elektronik (Mikrocontroller, Prozessorperipherie, Kommunikation, Treiberstufen etc.) dient, sowie die Verluste in den erforderlichen Netzgeräten sind bei Umrichtern kleiner Leistung nicht mehr vernachlässigbar gegenüber der Umrichterleistung und führen dort Wirkungsgradeinbußen. Daher sollte hier stromsparende Elektronik eingesetzt werden.

### 5.1.3.3 Möglichkeiten zur Verbesserung des Wirkungsgrades

#### a) Bauelemente

Entscheidende Voraussetzungen für energieeffiziente Umrichter bilden deren Bauelemente. Bei hartschaltenden Spannungszwischenkreis-Umrichtern spielen hinsichtlich der Verluste die Leistungshalbleiter die wesentliche Rolle, bei resonant schaltenden oder auch bei Stromzwischenkreis-Umrichtern haben die passiven Bauelemente, insbesondere die induktiven, einen nennenswerten Einfluss auf die Energieeffizienz. Bei den Leistungshalbleitern konnten die Durchlass- und Schaltverluste von IGBTs über drei Generationen hinweg stetig gesenkt werden. Die Fortsetzung dieser Verlustminderung wird bei Silizium-Bauelementen mittelfristig an Grenzen stoßen. In hartschaltenden Umrichtern verursacht der Rückstrom von Si-Leistungsdioden einen erheblichen Anteil der Einschaltverluste der IGBTs. Trotz hochentwickelter Technologie der Si-Dioden, z.B. controlled axial lifetime CAL, ist eine grundlegende Verbesserung nur durch den Übergang zu Leistungs-Halbleitern mit hohem Bandabstand zu erwarten.

Weltweit wird seit geraumer Zeit intensiv das Gebiet der Leistungs-Halbleiter mit hohem Bandabstand erforscht. Die in Deutschland realisierte industrielle Forschung und Entwicklung ist auf diesem Gebiet hervorragend positioniert, wobei Siliziumkarbid (SiC) als Halbleitermaterial im Vordergrund steht. Der hohe Bandabstand ermöglicht höhere Temperaturen. Die hohe kritische Feldstärke lässt dünnere Bauelemente mit niedrigeren Verlusten zu. In 2002 konnte Infineon die weltweit ersten SiC-Schottky-Leistungsdioden in den Markt einführen. Mit Spannungen bis 600 V und Strömen bis 10 A liegt deren Anwendungsschwerpunkt bei Netzteilen. Sie werden aber auch für Kleinantriebe interessant,

wenn die Kosten fallen. Durch die voranschreitende Reduktion der Fehlstellen im Basismaterial (Micro-Pipes) werden auch größere Chips für die bei mittleren Antriebsumrichtern benötigten Stromstärken möglich. Messungen zeigen, dass beim Einschalten eines IGBTs die Summe der Verluste in Diode und IGBT in etwa halbiert wird, wenn anstatt der Si-Dioden SiC-Dioden eingesetzt werden.

Die positiven Eigenschaften von SiC werden bei steuerbaren Schaltelementen in besonderer Weise sichtbar, da SiC-Bauelemente schnelles Schalten mit vernachlässigbaren Schaltverlusten bei gleichzeitig niedrigen statischen Verlusten ermöglichen. So zeigen beispielsweise vertikale JFETs sehr kleine spezifische Durchlasswiderstände zwischen 8 und 25 m $\Omega$ /cm<sup>2</sup> im Sperrspannungsbereich zwischen 600 und 3500 V. Ein weiteres Feld der Bauelemente-Entwicklung, das für effiziente Antriebsumrichter bedeutsam werden kann, ist die Entwicklung monolithischer bidirektionaler Schalter. Diese können zu einer völlig neuen Bewertung einiger Schaltungstopologien wie Matrixumrichtern oder auch Umrichtern mit resonanten Wechselspannungs- oder Stromzwischenkreisen führen. Derzeit beruht die Bewertung hinsichtlich Aufwand und Verlusten derartiger Topologien auf der Nachbildung von bidirektionalen Schaltern durch mehrere heute verfügbare Einzel-elemente wie IGBTs und Dioden. Ein effizienter bidirektionaler monolithischer Schalter würde eine völlig neue Grundlage für die Verlust- und Aufwandsbewertung darstellen.

#### **b) Topologie der Umrichter**

Die Standardtopologie ist – abgesehen von sehr großen Antriebsleistungen – seit längerem der Zweipunkt-Umrichter mit Gleichspannungszwischenkreis. Für Antriebe mit besonders kleiner Induktivität und sehr hoher maximaler Grundfrequenz kommen auch Mehrpunkt-Umrichter, insbesondere Dreipunkt-Umrichter, mit den heute verfügbaren Bauelementen zum Einsatz. Hinsichtlich der Verluste ergeben sich dabei einerseits verlusterhöhende Aspekte wie eine höhere Zahl von Leistungshalbleitern, die am Stromfluss beteiligt sind, aber auch verlustmindernde Einflüsse wie eine niedrigere Spannungsklasse der jeweiligen Halbleiter sowie eine deutlich geringere Schaltfrequenz, um Spektren mit vergleichbaren Stromüberschwingungen einzuhalten. Konkurrierend zu rückspeisefähigen Spannungszwischenkreis-Umrichtern mit großer Zwischenkreiskapazität und pulsrequentem Schalten auf der Netzseite sind der Matrix-Umrichter und der verlustarme rückspeisefähige Antriebs-Stromrichter ohne Zwischenkreiskondensator mit netzfrequentem Schalten auf der Netzseite zu sehen. Erwähnenswert sind auch die vom Matrix-Umrichter abgeleiteten vereinfachten Topologien.

Eine Verfügbarkeit von monolithischen, bidirektionalen Schaltern würde Vorteile für den Matrix-Umrichter bringen. Aber auch die günstigen Eigenschaften von SiC-JFET zeigen, dass die Verlustenergien im

Matrix-Umrichter deutlich reduziert werden. Dies ist für Anwendungen mit hoher Schaltfrequenz und für die Entwicklung von kleinen und kostengünstigen Filterelementen äußerst wichtig.

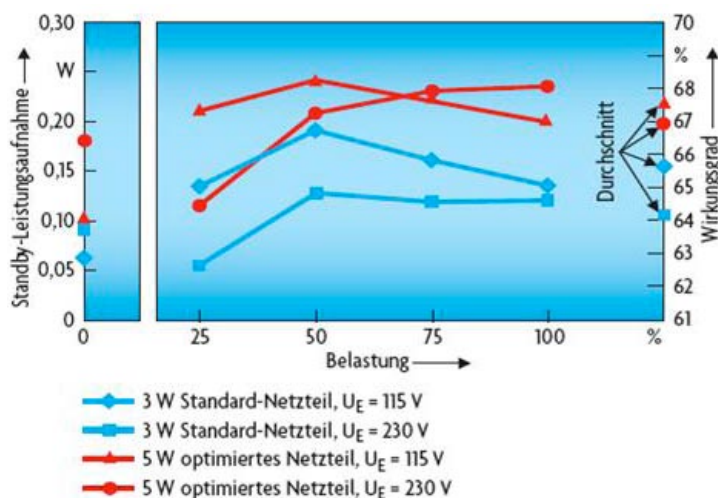
Im Wettbewerb um möglichst hohe Effizienz steht mit den vorgenannten hart schaltenden Topologien die große Familie der weich bzw. resonant schaltenden Umrichter. Es wurde in der Literatur gezeigt, dass die Gesamtverluste mit resonanten Schaltungen gegenüber den hart geschalteten U-Umrichtern insbesondere im Teillastbereich verbessert werden kann.

### 5.1.4 Netzteile und externe Stromversorgungen

Die in vielen Verbrauchern enthaltene Elektronik arbeitet mit einer deutlich geringeren Spannung als der üblichen Netzspannung von 230 V. Netzteile haben die Aufgabe, die Netzspannung in diese geringere interne Spannung umzuwandeln. Dabei sind die früher üblichen 50 Hz Transformatoren mit Linearreglern in neueren Geräten fast völlig durch Schaltregler ersetzt worden, häufig sogar mit Primärreglern, die den relativ verlustreichen 50-Hz-Transformator durch einen kleinen HF-Trafo ersetzen.

Verbrauchsarme C-MOS-Schaltungstechnik in Verbindung mit der Primärregelung von Ausgangsstrom- und Spannung des PWM-Controllers bewirkte in den letzten Jahren im Kleinleistungsbereich eine substantielle Reduzierung der Stand-by-Verluste. Die Geräte sind heute fast ausschließlich mit Weitbereichseingang ausgelegt, um weltweite Netzspannungen abzudecken. Der durchschnittliche Wirkungsgrad (AVG) wird basierend auf den Anforderungen des Energy Star-Programms bei jeweils 25%, 50%, 75% und 100% Last gemessen und gemittelt. Damit kommt der Optimierung des Wirkungsgrades im Teillastbereich eine erhöhte Bedeutung zu.

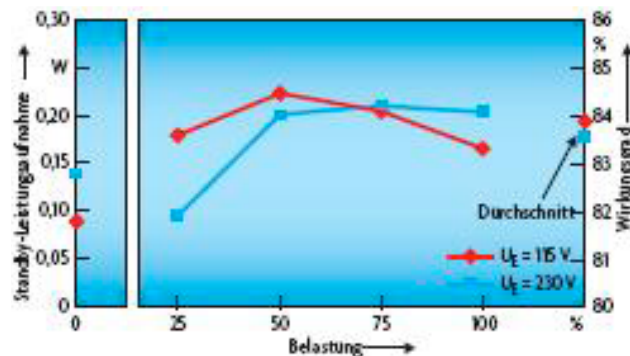
Bild 20 Stand der Technik im Leistungsbereich unter 5W<sup>25</sup>



25 Bothe M., Energie-Effizienz von Kleinstromversorgungen, Elektronik, Sonderheft Eco-Design 2006

Das Bild 20 zeigt den Stand der Technik im Leistungsbereich unter 5 W. Die Stand-by-Verluste liegen deutlich unter 0,2 W. Die Geräte sind primär auf Kosten optimiert. Eine Optimierung des Wirkungsgrades stand bislang nicht im Fokus. Als Topologie kommt ein freischwinger Sperrwandler zum Einsatz, der aufgrund der Weitbereichsauslegung eine relativ hohe Flussspannung für die Schottky-Diode auf der Sekundärseite zur Folge hat. Auf der Primärseite werden kostengünstige Bipolar-Schalttransistoren verwendet. Die Ansteuerungsverlustleistung reduziert jedoch den Wirkungsgrad bei Vollast. Somit liegen die durchschnittlichen Wirkungsgrade unter 70%.

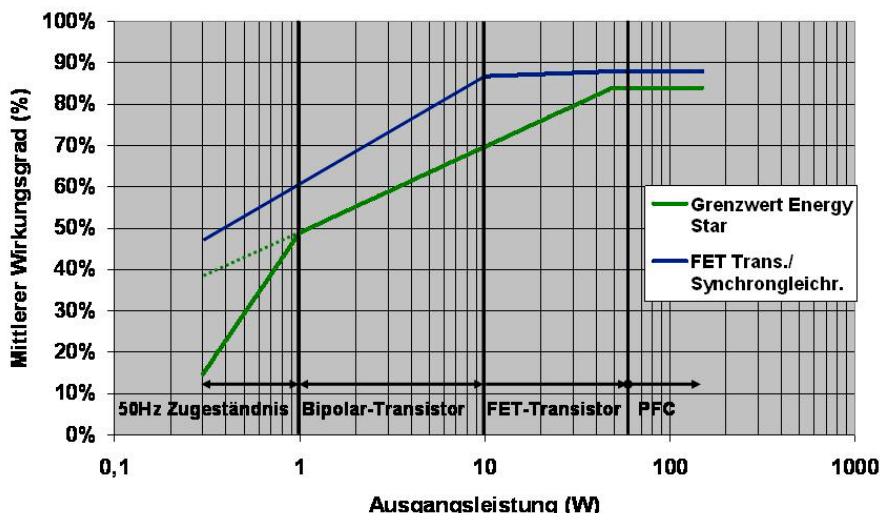
Bild 21 Verbesserungspotential bei Nutzung der FET-Technologie<sup>26</sup>



Das Bild 21 zeigt das Verbesserungspotential bei der Nutzung der FET-Technologie für den Schalttransistor und eines Synchrongleichrichters auf der Sekundärseite. Der Wirkungsgrad konnte um bis zu 15% verbessert werden. Dieses Konzept lässt sich in weitem Rahmen anwenden. Durch die Ansteuerleistung des Synchrongleichrichters bei sehr kleinen Ausgangsleistungen wird der Wirkungsgrad jedoch wieder etwas schlechter. Dennoch liegt hier ein großes Potential, da bei der Festlegung der Grenzwerte Zugeständnisse zugunsten der 50-Hz-Geräte gemacht wurden, die diesen Leistungsbereich immer noch dominieren. Die gestrichelte Gerade zeigt den extrapolierten Verlauf für die Schaltnetzteiltechnik. Über 10 W reduziert sich das Verbesserungspotential, da auch schon heute ein FET-Schalttransistor zum Einsatz kommt. Oberhalb von 65 W dominieren die Verluste der zusätzlichen PFC-Stufe, insbesondere bei niedrigen Netzspannungen. Hier verspricht eine mehrphasige Auslegung der Boost-Stufe mit variabler Zwischenkreisspannung und leistungsselektiver Phasenabschaltung eine nennenswerte Wirkungsgradverbesserung. Das Bild 22 verdeutlicht das Potential.

26 Bothe M., Energie-Effizienz von Kleinstromversorgungen, Elektronik, Sonderheft Eco-Design 2006

Bild 22 Verbesserungspotential des mittleren Wirkungsgrades von Schaltnetzteilen in Abhängigkeit von der verwendeten Technologie



Für die Bewertung des tatsächlichen Einsparpotentials spielt neben dem Wirkungsgrad das Nutzerverhalten die entscheidende Rolle. Als Beispiel soll hier ein externes 65-W-Netzgerät für Laptops gelten (s. Tabelle 9). Der gelegentliche Nutzer erzeugt mit seinem Nutzerprofil ca. 5 kWh Verlustenergie im Jahr. Bei einer Reduzierung der Stand-by-Verluste um 50% spart er somit nur 1,7 kWh ein. Schaltet er das Gerät z.B. über eine Steckerleiste nach der Nutzung ab, so summiert sich die Einsparung auf 3,4 kWh. Selbst eine Steigerung des AVG Wirkungsgrades um 4% ergibt nur noch weitere 0,35-kWh im Jahr – ein Aufwand, der sich sicher nicht rechnet. Anders sieht dies bei Intensivnutzern aus. Er kann im Jahr mit einem optimierten Gerät über 4 kWh sparen und beim Einsatz einer schaltbaren Steckerleiste sogar mehr als 5,6 kWh. Damit kann der Materialmehraufwand wieder eingespielt werden.

Tab. 9 Stand-by-Verluste für ein externes 65-W-Netzgerät

Verlustenergie p.a. (kWh)	Stand der Technik	Standby = 50%	Standby = 0	Standby = 50% AVG = +4%	Standby = 0 AVG = +4%
Hobby - Nutzer	4,8	3,1	1,4	2,75	1,05
Heavy - User	13,4	12	10,7	9,16	7,8

Extrapoliert auf die in 2006 verkauften Laptops<sup>27</sup> könnten so weltweit ca. 0,36 TWh pro Jahr eingespart werden. In Deutschland ist das Potential entsprechend geringer. In Bezug auf den insgesamt verbrauchten Strom liegt dieses Potential im Bereich unter 0,1 Promille. Multipliziert mit einer geschätzten Lebensdauer von drei Jahren ist der Beitrag immer noch deutlich unter 0,1% anzusetzen.

### 5.1.5 Beleuchtung

Der Anteil der Beleuchtung am Gesamtstromverbrauch in Deutschland lag in 2005 bei 9,5%, d.h. bei nahezu 50.000 TWh. Davon entfielen auf den Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung über 50%, jeweils knapp 25% wurden in den Sektoren Industrie und Haushalt verbraucht.

27 Topology Research Institute

Da die Straßenbeleuchtung im Sektor GHD erfasst wird (und nicht im Sektor Verkehr), stellt sie hier den größten Verbraucher dar. Der Beleuchtungsanteil im Sektor Verkehr, dem vor allem die elektrischen Bahnen zugeordnet sind, kann in dieser Betrachtung vernachlässigt werden.

Über einen großen Zeitraum hinweg war die technologische Entwicklung auf dem Bereich der Beleuchtung durch kontinuierliche Weiterentwicklung der verfügbaren Technologien geprägt. Große Innovationschritte blieben eher selten. Das hat sich im letzten Jahrzehnt wesentlich geändert. Insbesondere war die Entwicklung getrieben durch höhere Effizienz und mehr Komfort.

Ansatzpunkte zur weiteren Steigerung der Effizienz sind u.a. auf folgenden Feldern zu erwarten:

- Wahl der Leuchtmittel
- Optimierung und Innovation bei den Vorschaltgeräten
- Bessere Nutzung des Tageslichtes
- Anpassung der Beleuchtungsstärke an den wirklichen Lichtbedarf

#### 5.1.5.1 Technologische Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz

##### a) Leuchtmittel

Die Anwahl des geeigneten Leuchtmittels stellt ein erhebliches Einsparpotential dar. Während eine Glühlampe eine spezifische Beleuchtungseffizienz von etwa 10 lm/W aufweist, kommt eine Kompaktleuchtstoffröhre auf 50 lm/W. Die Lichtausbeute wird also auf das fünffache gesteigert. Gleichzeitig wird die Lebensdauer wesentlich verbessert. Natrium-Hochdruck-Dampflampen erreichen über 150 lm/W.

Ein weiterer Technologiesprung in der Wahl der Leuchtmittel erfolgt durch den Einsatz von halbleiterbasierten Lampen, den sogenannten LED (light emitting diode), die in den OLED (organic light emitting diode) eine weitere Verbesserung in Lichtausbeute und Lebensdauer erfahren werden. Während die LEDs eine Beleuchtungseffizienz von etwa 25 lm/W erreichen, werden von OLEDs Ausbeuten von 50 lm/W erwartet. Der Einsatz von LEDs verspricht darüber hinaus höhere Flexibilität in den unterschiedlichen Einsatzbereichen bis hin zu flächenartig ausgedehnten Lichtquellen statt bisheriger punkt- oder linienförmiger Bestrahlung.

In einem Energieeffizienzscenario hat die IEA folgende Veränderung der Struktur des Einsatzes von Beleuchtungsmitteln prognostiziert (Tabelle 10). Die Veränderung bei den Glühlampen schätzen wir allerdings als zu konservativ ein. Gleichwohl kann durch gezielten und geförderten Austausch von weniger effizienten Leuchten durch hocheffiziente ein wesentliches Einsparpotential gehoben werden (z.B. Glühlampen durch Kompakt-Leuchtstoffröhren).



Lampentyp	Anteil heute	Anteil in Zukunft
Glühlampen	8%	6%
T12 Leuchtstoffröhren	35%	4%
T5 Leuchtstoffröhren	0,5%	23%
Kompakt Leuchtstoffröhren	0,5%	10%
Quecksilber Hochdruckdampf-lampen	8%	1%
Natrium Hochdruckdampflampen	9%	17%

Tab. 10 Veränderungen im Einsatz bestimmter Lampentypen

**b) Vorschaltgeräte**

Vorschaltgeräte stellen eine weitere wesentliche Quelle zur Steigerung der Energieeffizienz im Bereich der Beleuchtung dar. Mit dem Einsatz von Leistungselektronik können ihre Funktionseigenschaften gezielt verbessert werden (Zündspannungsbereitstellung, Vorheizung der Elektroden, Dimmen der Beleuchtungsstärke, Erhöhung der Lichtausbeute durch höhere Frequenzen u.a.). Durch die Integration von Mikroprozessoren in die Steuerungselektronik können in Zukunft auch externe Signalgeber abgefragt und deren Information in den Steuerungsalgorithmus eingebracht werden.

**c) Weitere Maßnahmen**

Wie bereits angedeutet, können durch eine intelligente Steuerung verschiedene Maßnahmen zu einem Gesamtbeleuchtungskonzept für den jeweiligen Anwendungsbereich kombiniert werden. Beispielhaft seien die nachstehenden Maßnahmen genannt:

- Einsatz von Lichtsensoren zur tageslichtabhängigen Steuerung der Beleuchtung
- Bewegungssensoren zur Ein- und Ausschaltung
- Verlängerung der Leuchtenlebensdauer durch Regelung
- Einbindung der Beleuchtung in das Gesamtenergiemanagement eines Betriebes oder Haushalts.

**5.1.5.2 Einsparpotentiale**

Im Bereich der Beleuchtung bestehen noch sehr große Einsparpotentiale. Der ZVEI schätzt, dass 75% der heutigen Beleuchtungssysteme ineffizient sind. In einer Studie für die Enquete-Kommission des Deutschen Bundestages errechnet das ISI<sup>28</sup> ein technisches Einsparpotential von 78% und ein wirtschaftliches Einsparpotential von 56% (Tabelle 11).

---

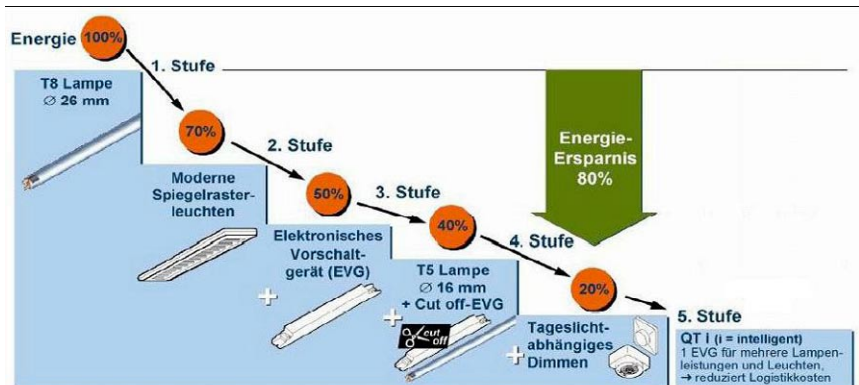
28 ISI

Tab. 11 Energieverbrauch und technisches Einsparpotential in Deutschland <sup>29</sup>

Lampentyp	Glühlampen	Leuchtstofflampen	Kompaktleuchtstofflampen	Metall-dampf- und Halogenlampen	Summe für alle Lampentypen
Verbrauch Endenergie 1998	39,6 PJ	76,3 PJ	11,2 PJ	51,0 PJ	188,1 PJ
Einsparpotenzial durch technische Verbesserung der einzelnen Technologien	-	15,3 PJ	0,6 PJ	6,1 PJ	22,0 PJ
durch technische Verbesserung reduzierter Verbrauch	39,6 PJ	61 PJ	10,6 PJ	54,9 PJ	166,1 PJ
weiteres Einsparpotenzial durch Substitution der Glühlampen durch Kompaktleuchtstofflampen und von 50 % der Halogenlampen durch Leuchtdiodenlampen	33,3 PJ	-	-	14,4 PJ	47,7 PJ
durch Substitution reduzierter Verbrauch				=	118,4 PJ
weiteres Einsparpotenzial durch Tageslichtnutzung				-	23,7 PJ
weiteres Einsparpotenzial durch Steuerung und Regelung				-	47,4 PJ
weiteres Einsparpotenzial durch manuelles Schalten				-	4,8 PJ
Verbrauch unter Einbeziehung aller technischen Maßnahmen und Verhaltensmaßnahmen				=	43,0 PJ

Die konkrete Umsetzung des Einsparpotentials soll beispielhaft anhand einer *technologischen Roadmap* der Firma Osram im Bild 23 aufgezeigt werden:

Bild 23 Energieeinsparpotential eines Beleuchtungssystems



In diesem Beispiel sind verschiedene der oben beschriebenen Maßnahmen in Form von Optimierungsstufen umgesetzt. Ausgehend von einer T8-Leuchtstoffröhre wird durch die Leuchtenkonstruktion und das Vorschaltgerät bereits 50% Energieeinsparung erreicht. Durch die Verwendung einer verbesserten Leuchtstoffröhre T5 und ein optimiertes Vorschaltgerät werden weitere 10% Einsparung erzielt. Die Anpassung der Beleuchtungsstärke an das Tageslicht erbringt eine weitere Einsparung von 20%. Insgesamt zeigt das Beispiel eine Verbesserung der Energieeffizienz von 80% (!) auf.

## 5.2 Energieeinsparung durch Verringerung der Standby-Verluste

Viele elektronische Geräte besitzen einen Bereitschaftsmodus, aus dem sie in kurzer Zeit aus dem sogenannten Standby-Betrieb in den produktiven Zustand wechseln können. Häufig fehlt bei diesen Geräten ein Ausschalter, der die Stromversorgung unterbricht.

Im Standby-Betrieb wird zur Aufrechterhaltung der minimalen Funktionen elektrische Energie benötigt. Unter dem Gesichtspunkt des Energiesparens verdient dieser Betrieb besondere Beachtung durch die langen Laufzeiten von typisch ca. 20 Stunden pro Tag: Über die gesamte Laufzeit eines Gerätes gesehen ist der Stromverbrauch im Standby-Betrieb oft sogar höher als der im produktiven Betrieb. Daher ist es sinnvoll, den Standby-Betrieb entweder ganz überflüssig zu machen oder zumindest energiesparende Komponenten und Konzepte einzusetzen.

In den folgenden Abschnitten wird zunächst exemplarisch an einzelnen Geräten dargestellt, welches Einsparpotential in einem optimierten Standby-Betrieb besteht. Anschließend folgt eine Abschätzung der Einsparmöglichkeiten in privaten Haushalten sowie in Handel und Gewerbe. Zur Vervollständigung schließt sich ein Abschnitt über mobile Geräte an.

Es werden technische Möglichkeiten aufgezeigt, wie heute und in Zukunft durch technische Weiterentwicklung die Standby-Verluste weiter verringert werden können.

### 5.2.1 Beispiele von Einsparmöglichkeiten

#### a) Computer

Seit einigen Jahren werden Computer nicht mehr über einen Hauptschalter ausgeschaltet, sondern heruntergefahren in einen sogenannten Sleep-Modus. Aus diesem kann der Computer per Tastendruck oder durch entsprechende Signale an den Netzwerk- oder Modemeingängen aufgeweckt werden. Damit verbraucht der Computer immer Strom, auch wenn er vermeintlich ausgeschaltet ist.

Man muss somit den Leistungsbedarf (angegeben sind typische Werte) unterscheiden in:

> 130 W	Betriebsmodus: Der Computer und seine Peripheriegeräte sind eingeschaltet und aktiv.
50 W	Standby-Modus: Der Computer und seine Peripheriegeräte sind eingeschaltet und nicht aktiv. Hier gibt es verschiedene Ausprägungen: <ul style="list-style-type: none"> <li>■ Im Standby-Modus bleiben das Speicherabbild und die Prozessor-Register der aktuellen Arbeitssitzung im Arbeitsspeicher komplett erhalten. Bis auf das RAM werden aber alle anderen Komponenten von der Stromversorgung getrennt. Das System muss beim Aufwachen nicht wieder neu gebootet, sondern nur aus dem Speicher zurückgelesen werden. Dieser Vorgang dauert typisch sechs bis zehn Sekunden.</li> <li>■ Im Ruhezustand wird das Systemabbild auf der Festplatte abgelegt und das System vollständig abgeschaltet. Das Aufwecken des Systems dauert durch das Lesen von der langsameren Festplatte (&gt; 20 Sekunden) länger als im Standby-Modus. Dafür bleibt die Sitzung aber auch dann erhalten, wenn die Stromversorgung unterbrochen wird.</li> </ul>
20 W	Sleep-Modus: Der Computer und seine Peripheriegeräte sind „ausgeschaltet“ und nicht aktiv, verbrauchen aber weiterhin Strom.
0 W	Ausgeschaltet: Die Geräte wurden mit einem Hauptschalter oder mit einer ausschaltbaren Steckdosenleiste vom Stromnetz getrennt.

Zum Energiesparen bieten sich folgende Maßnahmen an:

1. Steckdosenleiste mit Schalter: Im ausgeschalteten Zustand wird kein Strom verbraucht. Dies betrifft nicht nur den Computer, sondern auch alle angeschlossenen Peripheriegeräte.
2. Aktivierung des Standby-Betrieb nach kurzer Nutzungspause: Dabei ist der Ruhezustand energiesparender als der Standby-Modus: Wenn ein PC etwa drei Stunden pro Tag durch Besprechungen, Telefonate und Pausen ungenutzt bleibt, lassen sich mit dem Standby-Modus ca. 40 Kilowattstunden pro Jahr sparen.
3. Verminderung des Energieverbrauchs im Standby- und Sleep-Modus: Anzusetzen ist bei den Komponenten, Schaltungen und Standby-Konzepten, weil die Stromversorgung selbst nur einen geringen Beitrag zu den Standby-Verlusten liefert. Bei Reduzierung des Stromverbrauchs im Standby- und im Sleep-Modus auf 50% kann beispielsweise bei 8 Stunden Nutzung pro Arbeitstag mit 30% Pausen mit einer Einsparung von weiteren 25% gerechnet werden, was etwa 80 kWh oder 15 € pro Jahr entspricht (Tabelle 12).

	Dauer pro Tag (h)				Durchschnitt	Energie	Einsparung durch Optimierung	Einsparung durch Optimierung	Einsparung durch Optimierung
	Modus: Betrieb	Standby	Sleep	ausgeschaltet					
Leistung (W)	130	50	20	0	W	%	%	kWh/a	Euro/a (18ct)
Szenarien:									
früher: an oder aus	5,3			18,7	29	65%			
heute: nicht optimiert	5,3		18,7		44	100%			
optimiert: Standbymodus ein	1,2	4,1	18,7		31	69%	31%	119	21
optimiert: Sleep-Verbrauch nur 30%	1,2	4,1	5,6		20	45%	55%	215	39
optimiert: Standby/Sleep nur 30%	1,2	1,2	5,6		14	31%	69%	267	48
Stromverbrauch eines PC im Haushalt									
Nutzung (h)	5,3								
Pausen während Nutzung	77%								

Tab. 12 Einsparungen bei Computern und angeschlossenen Peripheriegeräten bei heutigem und zukünftig reduziertem Verbrauch im Standby- und Sleep-Modus<sup>30</sup>

Bei manchen Computerherstellern ist das Energiesparen bereits als Designziel definiert und als verkaufsförderndes Element vermarktet worden. Dass dies nicht bei allen so ist, zeigen Neuerscheinungen eines amerikanischen Herstellers: Eine Multimedia-Konsole als Schnittstelle zwischen Computer und Fernseher (erweiterter DVD-Player) erzeugt im Betrieb soviel Abwärme, dass die Oberfläche bis zu 55°C warm wird; die Standby-Verluste belaufen sich auf ca. 25 Watt, einen Ausschaltknopf gibt es nicht.

**b) Set-Top-Boxen**

Für den Fernsehempfang über Satellit oder für das digitale Fernsehen mit herkömmlichen Fernsehern werden Set-Top-Boxen benötigt. In diese Kategorie fallen auch Home-Media-Server.

Diese Boxen werden im Allgemeinen ohne Ausschalter hergestellt, d.h. beim „Ausschalten“ per Knopfdruck oder Fernbedienung gehen sie in den Standby-Betrieb.

Der Standby-Verbrauch variiert je nach Modell erheblich. Bei einigen Modellen liegt dieser bei über 50% der Leistungsaufnahme im Betrieb, bei anderen fallen wenige Watt an: Eine einfach ausgestattete und stromeffiziente Set-Top-Box für antennengebundenes Digitalfernsehen verbraucht rund 10 kWh Strom pro Jahr im Standby-Betrieb (ohne Einschaltung); ein weniger sparsames Modell benötigt hingegen bis zu sechsmal mehr. Allein durch Einsatz eines stromeffizienten Gerätes lassen sich pro Jahr bis zu 50 kWh sparen.

Ein besonderes Augenmerk verdienen Set-Top-Boxen deswegen, weil sie bereits heute bei vielen und zukünftig bei allen herkömmlichen Fernsehern zum Einsatz kommen, sei es bei Empfang von Satelliten oder

30 BMWA-Studie „Der Einfluss moderner Gerätegenerationen der Informations- und Kommunikationstechnik auf den Energieverbrauch in Deutschland bis zum Jahr 2010 – Möglichkeiten zur Erhöhung der Energieeffizienz und zur Energieeinsparung in diesen Bereichen“, Fraunhofer Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI), Karlsruhe; Centre for Energy Policy and Economics (CEPE), ETZ Zentrum, Zürich (CH); 2003

beim Unstieg auf Digital-TV (DVB-T). Bei 60 Millionen Fernsehern summieren sich die möglichen Einsparungen durch stromeffiziente Geräte allein hier auf etwa 1 – 2 TWh pro Jahr, wenn man davon ausgeht, dass der heutige Mittelwert der Standby-Leistung in der Mitte zwischen den beiden Extremwerten liegt.

### c) Kaffeemaschinen

Untersuchungen in der Schweiz<sup>31</sup> haben ergeben, dass der größte Anteil des Standby-Verbrauchs von Haushaltsgeräten – rund 70% – auf Kaffee- und Espressomaschinen zurückzuführen ist. Bei diesen treten zum einen Warmhalteverluste auf, zum anderen ist der Standby-Verbrauch dieser Geräte häufig sehr hoch.

Rund 2 Watt benötigt die Elektronik, sofern die Maschinen nicht mit einem Hauptschalter ganz ausgeschaltet werden (können). Viel mehr ins Gewicht fällt der Standby-Verbrauch für die Warmhaltung. Damit der Kaffee sofort ausgegeben werden kann, wird der Boiler/Durchlauf-erhitzer (etwa 1 dl) auf rund 80 bis 90 °C gehalten. Bei vielen Geräten wird zusätzlich auch eine Abstellfläche auf dem Gerät erwärmt, welche für die Aufbewahrung und Vorwärmung von Tassen vorgesehen ist. Die gemessenen Warmhalte-Leistungsaufnahmen (als zeitliche Mittelwerte) lagen zwischen 18 und 60 W. Bei 14 h Nutzung pro Tag entspricht dies 92 bis 306 kWh pro Jahr und Maschine, was zwischen 16 und 55 € Energiekosten verursacht.

### d) Aufzüge

Bei einer Untersuchung in der Schweiz<sup>32</sup> wurde ermittelt, dass der Stand-by-Verlust von Aufzügen zwischen 25% und 80% des Gesamtverbrauches ausmachen kann. Die Verluste pro Aufzug betragen typisch 90 bis 200 W, in Krankenhäusern bis 500 W. Dieser Verbrauch ist unabhängig vom Antriebswirkungsgrad. Bemerkenswert ist auch, dass Hydraulikaufzüge dank Gegenwicht oder Energiespeicher genauso effizient sein können wie Seilaufzüge.

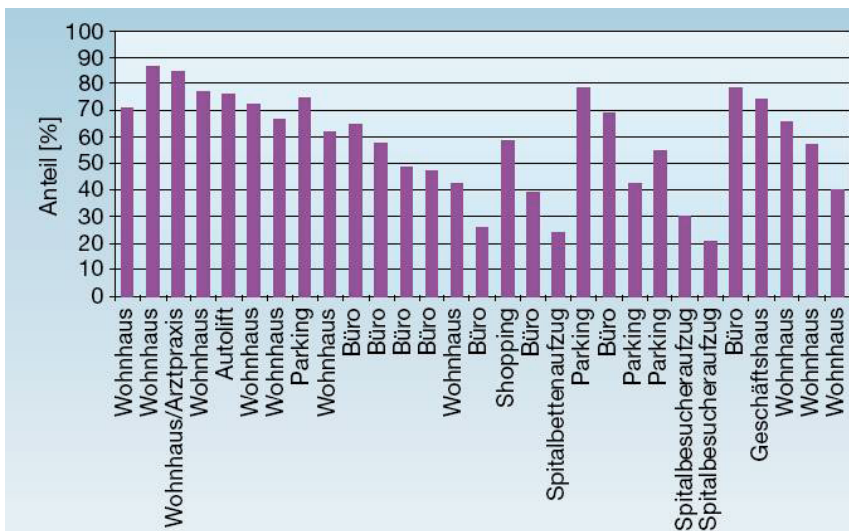
Einsparpotentiale sind vorhanden durch das Abschalten des Kabinenlichtes, Türschließenrichtungen, die keine permanente Kraft erfordert, durch Ausschalten der Frequenzumrichter und der Steuerung sowie effizientere Netzteile, sowie durch Einsatz von rückspeisefähigen Umrichtern.

---

31 Nipkow J.; Bush E., FH beider Basel (FHBB), Mutenz, CH: Stand-by-Verbrauch von Haushaltgeräten. Resultate einer Studie über den Anteil des Standby-Verbrauchs am Gesamtstromverbrauch von Haushaltgeräten in der Schweiz, in: Bulletin SEV/VSE Band 95 (2004) Heft 3, Seite 9 – 14

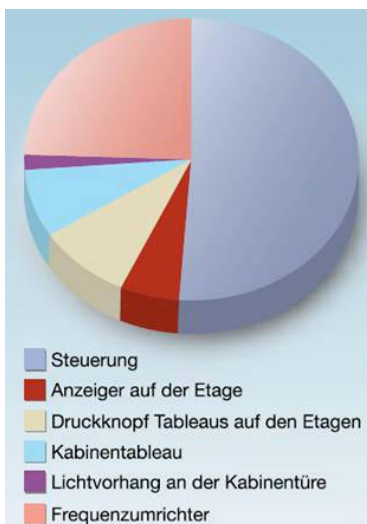
32 Nipkow J., ARENA, Zürich: Energieverbrauch und Einsparpotentiale bei Aufzügen; in: Bulletin SEV/VSE Band 97 (2006) Heft 9

Bild 24 Anteil der Standby-Verluste von Aufzügen am gesamten Energieverbrauch nach Gebäudeart



Bei der Neuausrüstung mit Aufzügen ist eine sorgfältige Ermittlung des Transportvolumens, der erforderlichen Geschwindigkeit u.a. erforderlich. So kann ggf. eine Geschwindigkeitserhöhung den Bau eines zweiten Aufzuges überflüssig machen.

Bild 25 Beispiel für die Zusammensetzung des Standby-Verbrauchs von Aufzügen<sup>33</sup>



**e) Mobile Geräte**

Mit der zunehmenden Mobilität der Bevölkerung nimmt auch die Zahl der mobilen elektrischen Geräte zu. Die meisten sind wie die stationären Geräte nur eine geringe Zeit in Benutzung, einen großen Teil verbringen sie im Standby-Modus. Diese Geräte beziehen ihre Energie aus Akkus und nicht aus dem Netz, so dass sie primär nicht bei den hier betrachteten Standby-Verlusten einzurechnen sind. Zum Laden der Akkus werden die mobilen Geräte an Netzteile angeschlossen, die zumeist aus dem Stromnetz versorgt werden. Aus

33 Für die Messung wurde die Kabinenbeleuchtung abgeschaltet. Quelle: Schindler Aufzüge AG

Bequemlichkeit bleibt ein Teil dieser Ladegeräte nach dem Ladevorgang mit dem Strom verbunden, wobei ein geringer Strom weiterhin fließt. Dieser Verbrauch kann als Standby-Verbrauch in die o.g. Betrachtungen einbezogen werden.

Zu den mobilen Geräten zählen beispielsweise Handy, Ipod, Navigationsgeräte und PMR-Funkgeräte.

## 5.2.2 Haushalte

### a) Haushaltsgeräte

In Haushalten sind viele elektrische Geräte dauerhaft mit dem Stromnetz verbunden, ohne dass sie ihre eigentliche Funktion ausführen. Dies betrifft z.B. Mikrowelle, Kochherd, Backofen (Uhr, Beleuchtung, Kochautomatik), Kaffeemaschine (Uhr, Einschaltautomatik), Bewegungssensoren für Licht, Leuchten mit Berührungssensor, Steckernetzteile allgemein, Akkuladegeräte, Klingeltrafo und Garagentor-Öffner.

### b) Informations- und Telekommunikationsgeräte

Die Ausstattung der Haushalte mit Geräten aus dem Bereich Multimedia/Kommunikation nimmt zu. Hierzu zählen Telefon (schnurgebunden, drahtlos DECT, Telefonanlagen), Fernseher, Video-Recorder, DVD-Player, Home-Cinema / Home-Media-Server, Stereo-Anlage, CD-Player, Radio, Computer sowie Computer-Peripheriegeräte wie Bildschirm, Drucker, Scanner, Router und Modem.

	Stand-by-Verbrauch			Stand-by-Zeit h / d	Stand-by-Energie			Kosten (Euro pro Jahr)		
	typisch	energie- sparend min.	energie- sparend max		typisch	energie- sparend d min.	energie- sparend max	typisch	min	max
	W	W	W		kWh/a	kWh/a	kWh/a	€/a	€/a	€/a
TV	6	1	3	20	44	7	22	8	1	4
Set-Top-Box	6	1	3	21	46	8	23	8	1	4
Video- oder DVD-Recorder	6	1	3	23	50	8	25	9	2	5
HiFi-Anlage	10	1	5	20	73	7	37	13	1	7
3 Radios	5	3	9	21	38	23	69	7	4	12
PC mit Monitor und Drucker	32	5	10	20	234	37	73	42	7	13
DSL-Router (mit WLAN)	12	2	5	24	105	18	44	19	3	8
Telefon schnurlos (Ladeschale)	2	1	1	23	17	8	8	3	2	2
Anrufbeantworter	3	1	2	24	26	9	18	5	2	3
2 Mobiltelefone (mit Ladegerät)	4	1	2	23	34	8	17	6	2	3
Spielkonsole	0	0	0	23	0	0	0	0	0	0
Netzteile für mobile Geräte					0	0	0	0	0	0
digitaler Fotoapparat					0	0	0	0	0	0
Laptop					0	0	0	0	0	0
MP3-Player					0	0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0	0
					0	0	0	0	0	0
<b>Gesamt</b>	<b>86</b>	<b>17</b>	<b>43</b>		<b>667</b>	<b>133</b>	<b>335</b>	<b>120</b>	<b>24</b>	<b>60</b>
Einsparung pro Haushalt					kWh / Jahr	534	332		<b>96</b>	<b>60</b>
Einsparung in Deutschland					TWh / Jahr	21	13			

Tab. 13 Einsparpotentiale durch energieoptimierten Stand-by-Betrieb von typischen Geräten in Haushalten



### c) Abschätzung des Einsparpotentials

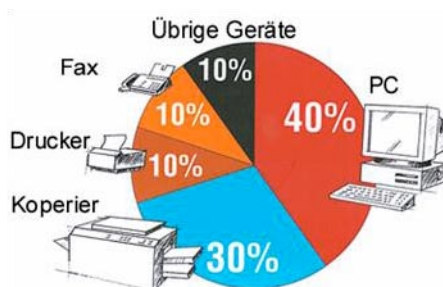
In Tabelle 13 werden typische Verbraucher in den Haushalten mit den jeweiligen Stand-by-Zeiten aufgeführt. Bei den Stand-by-Verbräuchen werden in der Spalte die heute typischen Werte angegeben. In den beiden nachfolgenden Spalten sind die Werte angegeben, die unter Einspargesichtspunkten möglich wären: Der minimale Wert kann mit neuen Technologien erreicht werden, der maximale Wert ist mit bereits heute verfügbaren energieeffizienten Bauelementen und Designs möglich.

Es zeigt sich, dass heute mit einem Standby-Verbrauch von bis zu 90 Watt pro Haushalt gerechnet werden muss. Durch den Einsatz verbrauchsarmerer Geräte könnte dieser bis auf knapp 20 Watt fallen. Unter Einbeziehung der zugehörigen Standby-Zeiten ergeben sich energetische Einsparpotentiale von bis zu 534 kWh pro Jahr. Bei einem Strompreis von 18 ct/kWh liegt die Einsparung pro Haushalt bei knapp 100 €. Dies sind natürlich Extrembeispiele. Eine realistische Einschätzung unter der Annahme, dass heute bereits teilweise stromsparende Geräte im Einsatz sind, die Möglichkeiten nie voll ausgeschöpft werden können, und außerdem sehr viele Haushalte nicht die oben zugrunde gelegte Ausbaustufe erreichen, ergibt ca. 5 – 10 TWh als Einsparpotential deutschlandweit, entsprechend immerhin 1 – 2% des gesamten Stromverbrauchs.

### 5.2.3 Handel und Gewerbe

In Handel und Gewerbe ist die Situation ähnlich wie bei den Haushalten. Die Betriebsdauer einzelner Geräte ist deutlich höher, was bei Geräten ohne Ausschalter zu deutlich verringerten Standby-Zeiten führt. Gleichwohl sind hier zusätzliche elektrische Verbraucher mit hohem Standby-Anteil wie z. B. Kopierer oder Fax vorhanden.

Bild 26 Anteiliger Strombedarf der Bürogeräte<sup>34</sup>



34 IMPULS-Programm Hessen

Eine Abschätzung des Stromverbrauchs der Bürogeräten in Deutschland zeigt Tabelle 14:

Tab. 14 Entwicklung des Strombedarfs (in GWh) für IuK-Geräte und zugehörige Infrastruktur in Büros in Deutschland 2005 bis 2010 (aus: BMWA-Studie siehe Fußnote oben)

	Normalbetrie	Stand-by	Sleep	gesamt
<b>2005</b>				
IuK-Endgeräte	4.330	2.759	516	7.605
Infrastruktur	7.454	273	0	7.727
<b>gesamt</b>	<b>11.784</b>	<b>3.032</b>	<b>516</b>	<b>15.332</b>
<b>2010</b>				
IuK-Endgeräte	4.463	2.687	479	7.629
Infrastruktur	10.829	273	0	11.102
<b>gesamt</b>	<b>15.292</b>	<b>2.960</b>	<b>479</b>	<b>18.731</b>
<b>Anstieg</b>	<b>+30%</b>	<b>-2%</b>	<b>-7%</b>	<b>+22%</b>

## 5.2.4 Beispiele zu technischen Möglichkeiten

### a) Moderne Schaltregler-ICs mit mehreren Betriebsmodi

Um den Energieverbrauch elektrischer Geräte im Stand-by-Betrieb zu begrenzen, hat die Europäische Kommission eine Richtlinie zum Wirkungsgrad von Stromversorgungen verfasst. Damit zukünftige Stromversorgungen mit den neuen Richtlinien konform sein können, müssen neue Konzepte zu ihrer Architektur und Regelung gefunden werden. Im Bereich der Konsumelektronik werden zur Stromversorgung meist Sperrwandler eingesetzt. Ohne die Struktur des Sperrwandlers zu verändern, lässt er sich, je nach Lastfall, in einer anderen Betriebsart betreiben, um unter jeder Lastbedingung einen optimalen Wirkungsgrad zu erreichen<sup>35</sup>.

### b) Power-Management in elektronischen Schaltungen

In modernen Produkten der Kommunikationstechnik werden die Versorgungsspannungen für die Schaltungen immer kleiner, wobei aber ihre Anzahl zunimmt. Die verschiedenen Spannungen müssen in einem richtigen zeitlichen Ablauf ein- und ausgeschaltet werden, was für eine reibungslose Funktion des Gesamtsystems ein Power-Management übernimmt. Um Energie zu sparen, können einzelne Verbraucher vorübergehend ausgeschaltet werden. Speziell für die Zielstellungen des Power-Managements sind Spannungswandler<sup>36</sup> verfügbar.

### c) Verluste in Netzteilen

Netzteile im Stand-by-Modus (vgl. Abschnitt 5.1.4) für Konsumelektronik verbrauchen in den USA etwa 6% des elektrischen Energiebedarfs

<sup>35</sup> Elektronik, Poing; Band 56 (2007) Heft 4

<sup>36</sup> Fischer, R., National Semiconductor, Fürstfeldbruck: Der Power-Manager. Trends und Herausforderungen der Energieversorgung moderner Elektroniksysteme. Trends and challenges of the power supply for modern electronic systems. in: Elektronikpraxis \* (2006) Heft Sonderheft 2/2006 Leistungselektronik & Stromversorgung, Seite 40 – 42, 44 – 45 ISSN 0341-5589

(207 Mrd kWh).<sup>37</sup> Moderne leistungselektronische Bauteile hingegen arbeiten mit energieoptimiertem Design und geringerer Schaltfrequenz. Netzteile mit diesen Bauelementen brauchen dann beispielsweise bei Bemessungsleistungen um 70 W im Stand-by-Betrieb nur noch 84 mW<sup>38</sup>.

In mobilen Geräten kommen ebenfalls energieoptimierte leistungselektronische Bauteile zum Einsatz. Beispielsweise liefern synchron abwärts transformierende DC/DC-Wandler bei einem Wirkungsgrad von 92% Ausgangsströme von 500 mA; die Ausgangsspannung ist in Stufen von 100 mV über einen Bereich von 0,9 bis 4,0 V einstellbar.<sup>39</sup>

#### d) Fernseher

Untersuchungen in Deutschland und Großbritannien haben gezeigt, dass etwa 11% des Stromverbrauches elektronischer Geräte während des Bereitschaftsbetriebes entstehen. Mit dem 'Green Chip' von Philips kann Abhilfe geschaffen werden. Wird ein Green Chip benutzt, so verringert sich die typische Stand-by-Leistung von 5 bis 10 W auf 1 bis 2 W; bei Nutzung zweier Green Chips sogar auf 0,1 bis 0,5 W. Die Einsparung beträgt also bis zu 98%. Die Green Chips beruhen auf einer besonderen Chipstruktur, bei der die Netzspannung auf die zulässige Betriebsspannung von einigen Volt herabgesetzt wird. Die Green Chips sind in einiger Zeit lieferbar<sup>40</sup>.

### 5.2.5 Beispiele: Einsparpotentiale im Versorgungsgebiet Dortmund

Einsparpotentiale werden im Allgemeinen nach Geräte- oder Verbrauchergruppen spezifiziert beschrieben<sup>41</sup>. In einer Dissertation<sup>42</sup> wurden 1997 für ein abgeschlossenes Versorgungsgebiet (Stadt Dortmund) Aussagen über die elektronischen *Dauerverbraucher* gemacht. Grundlage war eine empirische Untersuchung von Haushalten mit Befragung und Messung des Stromverbrauchs der elektronischen Dauerverbraucher. Damit wurde auch ermittelt, welche Geräte wie häufig in Haushalten vorhanden sind (Sättigungsgrad) und wie lang die typischen Einschaltzeiten sind (Nutzungsgrad). Parallel dazu wurden Marktrecherchen über typische Stromverbräuche in den Modi *Aus* und *Stand-by* durchgeführt.

37 VDI-Nachrichten \* Band 58 (2004) Heft 29, Seite 14

38 Basso, C., ON Semiconductor, GR in: Design & Elektronik \* (2002) Heft 9, Seite 43 – 46 ISSN 0933-8667

39 Scott A., Semicond Europe, GB: Lange Ladung. Leistungsverbrauch in tragbaren Geräten senken, in: Design & Elektronik \* (2005) Heft 5, Seite 34 – 37

40 Sensor Magazin \* (1999) Heft 2, Seite 23 (1 Seite) ISSN 0945-6899

41 siehe z. B. Rath, U., Hellmann R. et al: Klimaschutz durch Minderung von Leerlaufverlusten bei Elektrogeräten - Instrumente, Texte 5-99, Umweltbundesamt, Berlin

42 Opitz, H.-J.: Elektronischer Dauerverbraucher, empirische Bestimmung von Bestand und Sparpotentialen am Beispiel Dortmund, Dissertation, Fakultät Maschinenbau, Universität Dortmund, in: Deutsche Dissertation (1997) Seite 1 – 109

Auf der Grundlage der erhobenen Daten wurden Hochrechnungen erstellt, die das Gesamtszenario des durch die elektronischen Dauerverbraucher verursachten Energieverbrauchs und der Umweltbelastungen (Schadstoffausstoß, Steinkohlenäquivalent) beleuchten. Als wesentliche Ergebnisse hinsichtlich der Einsparpotentiale im Erhebungsgebiet Dortmund sind zu nennen:

- Die elektrischen Dauerverbraucher führen zu einem Energieverbrauch in einem Haushalt von 167 kWh pro Jahr (bei einem Strompreis von 0,18 €/kWh sind dies 22,68 €), durchschnittlich 19 W. Hochgerechnet auf Deutschland ergibt dies 6 TWh/a, entsprechend 685 MW Dauerleistung. Damit werden rund 5% der im Haushalt verbrauchten elektrischen Energie durch elektrische Dauerverbraucher umgesetzt.
- Würden alle elektrischen Dauerverbraucher eines Haushalts gleichzeitig an das Stromnetz angeschlossen sein, ergäbe sich eine durchschnittliche Anschlussleistung von 127 W.
- Rund 75% der Energie wird durch folgende Geräte verbraucht: Videorekorder (29%), TV (25%), Satellitenreceiver (8%), Stereoanlagen (5%), Funktelefon (5%), Uhrenradio/Radiowecker 4%).
- Der Anteil der Unterhaltungsgeräte an der im Dauerbetrieb verbrauchten Energie beträgt dabei 80%.
- 2 Maßnahmen zur Verringerung des Verbrauchs sind:
  1. Abschalten
 

Durch konsequentes Abschalten aller Verbraucher, die nicht unbedingt am Stromnetz verbleiben müssen, wie Unterhaltungsgeräte, Steckernetzteile etc. könnten pro Haushalt 128 kWh/a gespart werden. Zum Vergleich: Die verbleibenden nicht abschaltbaren Verbraucher nehmen nur 40 kWh/a Energie auf. Durch den Einsatz von ausschaltbaren Steckdosenleisten oder Ziehen des Steckers könnte somit der Energieverbrauch um 77% gesenkt werden.
  2. Einsatz energieeffizienter Geräte
 

In der Erhebung wurden auch die Leistungen der Geräte im ‚Aus‘- und im Stand-by-Betrieb gemessen. Ein Vergleich mit den energieeffizientesten Geräten auf dem Markt ergab, dass sich bei vollständigem Umstieg der Verbrauch der elektrischen Dauerverbraucher pro Haushalt von 167 auf 42 kWh/a, d.h. um 75%, sinken könnte. Das höchste Einsparpotential (>90%) liegt bei Videorekordern und Druckern, ein hohes (>80%) bei Fernsehern, Stereoanlagen, Telefonanlagen und Schaltuhren sowie ca. 70% bei Satellitenreceivern und etwa 50% bei Funktelefonen und Uhrenradios.
- Durch die o.g. Maßnahmen lässt sich der Dauerverbrauch elektrischer Geräte im Haushalt um typisch 75% senken, dies entspricht etwa 4,5 TWh für ganz Deutschland.
- Vergleich mit anderen Untersuchungen:
  - Der ermittelte Stromverbrauch von Fernsehgeräten lag bei dieser Untersuchung um 50% über den Ergebnissen einer anderen

Studie. Dort wurde allerdings nur ein Fernsehgerät pro Haushalt berechnet, wobei in der Erhebung in Dortmund durchschnittlich 1,44 Geräte pro Haushalt festgestellt wurden. Alleine die Fernsehgeräte nehmen somit in Deutschland eine durchschnittliche Leistung von 176 MW (bzw. 1,5 TWh) auf.

- Das Umweltbundesamt schätzt den Energieverbrauch von Geräten der Unterhaltungselektronik mit 5 TWh/a ab. Die konservativ durchgeführte Dortmunder Untersuchung ergibt 4,8 TWh/a.
- Die durchschnittliche Leistung elektronischer Dauerverbraucher wurde vom Umweltbundesamt mit 20 bis max. 100 W pro Haushalt geschätzt. In dieser Untersuchung wurden 19 W ermittelt.
- Untersuchungen in der Schweiz nennen Einsparpotentiale von 60% bis 70%. In dieser Untersuchung ergeben sich 75%.

## 5.3 Prozessveränderung und Technologiewechsel

### 5.3.1 Geregelte Industrieantriebe

#### 5.3.1.1 Stand der Technik und der Forschung

Industrieantriebe dienen zur Bereitstellung mechanischer Energie für eine Vielzahl industrieller Prozesse und Anlagen. Ihre Aufgabe, Drehmomente (Kräfte) und Drehzahlen (Geschwindigkeiten) angepasst an die Anforderungen der Arbeitsmaschinen bzw. den technologischen Prozess bereitzustellen, soll so erfolgen, dass prozessbedingte Bewegungsabläufe zeitsparend verlaufen. Energieeffiziente Betriebsweisen wurden zumeist erst in zweiter Linie angestrebt. Laut ZVEI wurden im Jahr 2001 5% der in Deutschland installierten Motorleistung drehzahl-geregelt ausgeführt, für 35% wäre dies aber aus energetischer Sicht sinnvoll. Bei einer mittleren Energieeinsparung von 40% je Antrieb käme man auf einen Energiespareffekt von immerhin 16 TWh im Jahr. Nach ZVEI-Angaben zur Hannover Messe 2006 könnten 5,5 TWh durch Energiesparmotoren und 22 TWh durch Frequenzumrichter als Energiesparpotential in Deutschland realisiert werden.

Bisher sind jedoch kaum Beispiele einer einheitlichen energetischen Analyse des Gesamtsystems bestehend aus Antriebsmotor, Stellglied, Mechanikkomponenten (Getrieben) und Arbeitsmaschine/Prozess bekannt, während vorwiegend Teilsysteme betrachtet und optimiert wurden. Zur Effizienzbeschreibung der Antriebsmotoren ist es üblich, sog. Muschelkurven – Kennlinien konstanten Wirkungsgrades – in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl anzugeben. Diese lassen sich auf den Gesamtantrieb mit Stellglied erweitern. Der Standardantrieb besteht aus einem nichtrückspeisefähigen Frequenzumrichter mit Diodengleichrichter. Für diese Antriebskonfiguration sind Unterschiede im Gesamtwirkungsgrad für Standard- und wirkungsgradoptimierte Motoren zwischen 10-15% bei 1 kW und 2% bei 160 kW bekannt, wobei der Wirkungsgrad des Umrichters besonders im Vergleich zu

dem von Motoren kleiner Leistung sehr hoch ist und zudem kaum eine Abhängigkeit von der Typenleistung aufweist. Heutige Umrichter erreichen über einen großen Leistungsbereich im Bemessungspunkt einen Wirkungsgrad von ca. 95%.

Das abschätzbare Einsparpotential durch Effektivitätssteigerung räumt der Optimierung des Gesamtsystems (20%) die größten Reserven gegenüber der Drehzahlregelung (10%) und dem Einsatz wirkungsgrad-optimierter Motoren (3%) ein.

### 5.3.1.2 Lastkennlinien und Bewegungsvorgänge

#### a) Lastkennlinien

Erfolgreiche Beispiele zum energiesparenden Einsatz drehzahl geregelter Antriebe werden vom ZVEI zur Substitution der mechanischen Drosselung von Pumpen- und Lüfteranlagen, der Bypassregelung von Kohlemühlen, der Polumschaltung und der Fördermengenstellung in Flusspumpen und zur Antriebstechnik in Werkzeugmaschinen, Sägereien und Verarbeitungsmaschinen angegeben (s. RAVEL-Studie). Bei drehzahlabhängigen Lastkennlinien der Arbeitsmaschine lassen sich durch drehzahlvariable und geregelte Antriebe die größten Einspareffekte erzielen. Das trifft im Besonderen auf Anwendungen mit quadratischer Lastkennlinie wie Pumpen, Lüfter, Kompressoren oder Rührwerke zu. Hier sind Einspareffekte zwischen 50 und 70% möglich. Bei diesen Anwendungen treten systembedingt die größten Abweichungen der Kennlinien des Antriebssystems und des Verbrauchers auf.

Aber auch bei linearen Lastkennlinien (z.B. bei Extrudern, Kalandern u.a.) sind erhebliche Einsparpotentiale vorhanden, da der Wirkungsgrad des Antriebssystems über einen größeren Lastbereich nahe dem Optimum gehalten werden kann.

#### b) Bewegungsvorgänge

Drehzahlgeregelte Antriebe lassen sich auch zur Steigerung der Energieeffizienz für Anwendungen mit periodischen Anfahr- und Bremsvorgängen nutzen. Eine elektronische Drehzahlregelung sorgt z.B. für eine verlustarme Beschleunigung. Der beim Netzanlauf hohe Schlupf erzeugt im Motor erhebliche Verluste, die im Umrichterbetrieb durch die Spannungs- und Frequenzregelung deutlich reduziert werden kann. Im Vergleich zu bisher üblichen polumschaltbaren Motoren kann die Leistungsaufnahme während der Beschleunigung um 50% gesenkt werden. In Applikationen mit hohem Anteil an rückspeisefähiger Energie lässt sich der Energieverbrauch nochmals um fast 30% senken, wenn eine Einheit zur Energierückspeisung oder Energieverteilung auf andere Antriebe eingesetzt wird [Siemens A&D Newscenter: Antriebe mit Kostenbremse].

Die Option der Energierückspeisung über Rückspeisestromrichter kann im direkten Vergleich der umrichtergespeisten Antriebe bei Anwendungen mit häufigen Bremszyklen, wie sie in Hebezeugen, Zentrifugen,

Förderbändern, Prüfständen, Scherenantrieben in Walzwerken und Walzantrieben in Papiermaschinen anzutreffen sind, eine zusätzliche Energieeinsparungen je Antrieb in der Größenordnung von 2 bis 4% bringen.

**c) Optimale Bewegungsvorgänge und angepasste Antriebsauslegung**

Servoantriebe für Produktions- und Werkzeugmaschinen wurden bisher nur bzgl. Funktionalität und Produktkosten beurteilt. Energiekosten haben dabei keine bzw. nur eine untergeordnete Rolle gespielt. Sie werden überwiegend für zeitoptimale Bewegungsvorgänge konzipiert und für vorgegebene Beschleunigungszeiten ausgelegt. Das erfordert große Stellgrößenauslässe in Form von Beschleunigungsmomenten, die vom Stellmotor in der Regel zwischen dem zwei- und fünffachen Bemessungsmoment aufgebracht werden und der Leistungselektronik entsprechend hohe Ausgangsströme abverlangen. Der Übergang von zeitoptimalen zu energieoptimalen Stellbewegungen nach Bild 27 würde zu spürbaren Energieeinsparungen in der Produktionstechnik bei Werkzeugmaschinen- und Roboterantrieben führen.

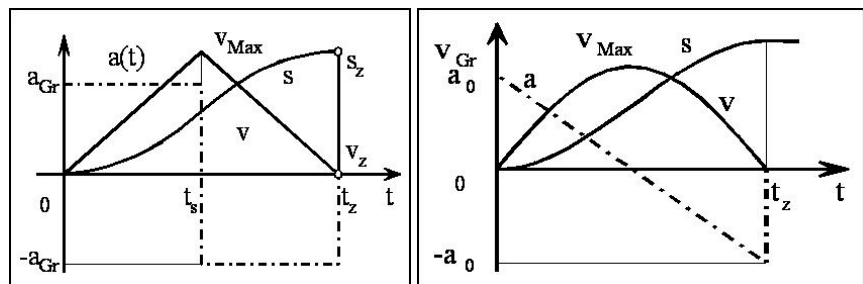


Bild 27 a) zeitoptimale Bewegung

Bild 27 b) energieoptimale Bewegung

Während eine energieoptimale Bewegung 22% mehr Zeit in Anspruch nimmt, entstehen im Vergleich zum zeitoptimalen Verlauf nur 41% der Verlustenergie. Für den Fall, dass der Motor ausreichend überlastbar ist, könnte man bei energieoptimaler Bewegungsvorgabe eine größere Beschleunigung (1,5-fach) zulassen, um dieselbe Zeit wie bei zeitoptimaler Stellbewegung zu erreichen, auch dann würden nur 75% der Verlustenergie entstehen. Die Dimensionierung der meisten Servomotoren wird allerdings durch das geforderte Beschleunigungsmoment bestimmt; dabei wird die hohe Überlastfähigkeit bereits ausgenutzt. Ein normal bemessener Motor kann daher das bei einer energieoptimalen Stellbewegung ohne Zeitverlust erforderliche 1,5fache Beschleunigungsmoment nicht liefern, so dass der Einsatz eines größeren Motors und ggf. auch eines größeren Umrichters erforderlich wären. Die energetischen Vorteile einer energieoptimalen Stellbewegung gehen so zum Teil wieder verloren. Bei hohen Überlasten ist zu beachten, dass die Wirkungsgrade durch Sättigungserscheinungen wieder deutlich abnehmen können.

Die dynamikrelevanten Einspareffekte zwischen rotierenden und linearen Antriebsmotoren unterscheiden sich: Beim rotierenden Stellmotor wird eine stärkere Reduktion des Motorträgheitsmomentes (mit der vierten Potenz zum Drehmoment) möglich, die aber wegen der im Allgemeinen dominierenden Lastträgheitsmomente (mindestens zweifach) zu einer abgeschwächten Reduktion des Gesamtträgheitsmoment führt. Beim Linearmotor dagegen sinkt die Masse proportional zu einer Abmessung des bewegten Linearmotorteils und damit proportional zur Kraft, wobei die Masse des Aktivteils hier dominierend ist.

### 5.3.1.3 Geregelt Antriebsmotoren

Für die wichtigsten in Industrieantrieben eingesetzten Motortypen sind die energieoptimalen Steuergesetze bekannt und weitgehend untersucht worden. Im umfangreichen Schrifttum werden unter energieeffizienten Steuer- und Regelverfahren verschiedene Termini geführt. Allen ist gemeinsam, dass sie mit energieoptimal angepasstem Maschinenfluss arbeiten. Die zur Anwendung kommenden Verfahren lassen sich in drei Kategorien einteilen:

Eine erste Gruppe der Steuerverfahren verwendet mathematische Modelle für Effizienzkenngößen, die online oder offline in der Steuerung oder Regelung eingesetzt werden können. Zur Charakterisierung der Effizienz kommen modellierte stationäre Kenngößen wie Verluste, Wirkungsgrad, Leistungsfaktor, Drehmomentmaximum und Stromminimum zur Anwendung. In diese Gruppe gehören auch Methoden, die Solltrajektorien für Steuergrößen z.B. auf effizienzoptimierten Flussstrajektorien vorgeben, die mittels dynamischer Programmierung online gefunden werden. Bei der praktischen Einstellung bereitet jedoch die Vielzahl sich ändernder Parameter wie Stator- und Rotorwiderstände sowie sättigungsabhängige Induktivitäten Schwierigkeiten.

Eine zweite Gruppe von Verfahren setzt Optimalwert-Suchalgorithmen ein, die auf der Basis gemessener bzw. berechneter aufgenommener Leistungen online schrittweise die günstigsten Steuerparameter einstellen. Erfolgreich angewandte und schnell konvergierende Suchverfahren wie Rosenbrock-, Proportional-, Gradienten-, Fibonacci- oder Golden-Schnitt-Methoden sind von der normalen Regelung der Betriebsgrößen dynamisch entkoppelt, um Grenzschrwingungen oder Instabilitäten zu vermeiden.

Eine dritte Gruppe verwendet Softcomputing-Methoden, die entweder online mit Fuzzy-Logik den energetisch günstigsten Arbeitspunkt einstellen oder offline Kennlinienfelder mit Hilfe Neuronaler Netze ermitteln, die am Antrieb trainiert und qualifiziert werden und in der Regel einen hohen informationstechnischen Aufwand erfordern.

In Anwendungsbeispielen mit konstanter bzw. quadratischer Drehmomentcharakteristik lassen sich erreichte Verbesserungen mit Leistungs-factorregelung, modellbasierter Regelung und Suchregelung gegenüberstellen und für Pumpenantriebe mit einer Verlusteinsparung von ca.



10% gegenüber dem Betrieb mit Bemessungsmagnetisierung beziffern. Für Antriebe mit konstantem Leistungsbedarf kann eine Variante mit variabler Spannung vorgeschlagen werden, die allerdings eine Neufestlegung des Bemessungspunktes der Maschine nach sich zieht und somit nur im engen Kontext zum Motorentwurf anzuwenden ist. In Aufzugsantrieben kann eine energieoptimale Steuerung der drehmoment- und feldbildenden Komponenten in Abhängigkeit von der Belastung verknüpft werden mit optimalen Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgängen. Auch für Direktantriebe sind Einsparungen bekannt geworden, wenn der Feldschwächbereich bei Konstantleistungsbetrieb für Wicklerantriebe energieoptimal genutzt wird.

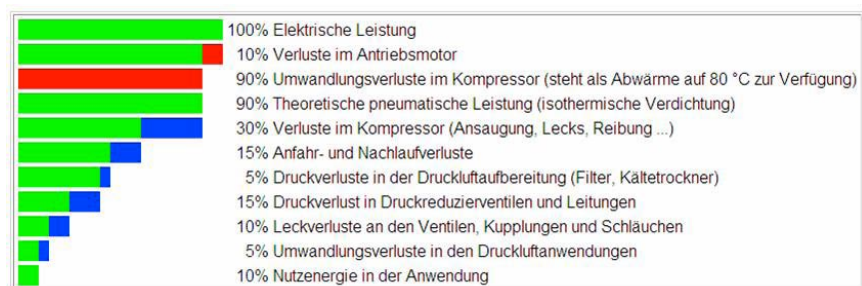
Von drehzahl- oder lagegeregelten Industrieantrieben ist bekannt, dass auch sogenannte Sekundäreffekte die Effizienz herabsetzen. Aus Untersuchungen der Fa. Heidenhain geht hervor, dass Rauschsignale in der Signalübertragungsstrecke zu Regelausschlägen führen, die Zusatzverluste in Stromrichtern und dem Antriebsmotor zur Folge haben können. Darauf deutet die messbare zusätzliche Erwärmung von 6 - 8 Kelvin im Motor hin, die bei Verwendung von optischen Gebern mit Interpolationsfehlern nachgewiesen werden konnte.

### 5.3.1.4 Branchenspezifische Potentiale (beispielhaft)

#### a) Druckluftanlagen

In fast jedem produzierenden Unternehmen ist eine Druckluftanlage installiert. In Deutschland sind das etwa 62.000 Druckluftanlagen. Sie dienen zum Antrieb von Montage- und Bauwerkzeugen, stellen Prozess- und Förderluft bereit und werden in der Flaschenproduktion und bei Textilmaschinen (Webereien) usw. benötigt. Der Stromverbrauch beträgt etwa 14 TWh. Die unterschiedlichen Verlustarten wurden in unterschiedlichen Untersuchungen nachgewiesen.

Bild 28 Aufteilung der Energie und Verluste in Druckluftsystemen<sup>43</sup>



Die Energieeinsparpotentiale an Druckluftanlagen durch drehzahlvariable Antriebe werden nach einer Studie des ISI Karlsruhe<sup>44</sup> für 25% der Neuanlagen oder Ersatzinvestitionen zu einem 15%igen Anteil

43 Gloor, Energieeinsparungen bei Druckluftanlagen in der Schweiz; BfE 2000

44 Radgen, P.: Energieeffiziente Motorensysteme – Schwerpunkt Druckluft. Tagung Effiziente Elektroantriebe. SWISSMEM 2005

an Effizienzgewinn (bezogen auf den jährlichen Energieverbrauch) zu einem gesamten Effizienzpotential von 3,8% . Danach wird der Einsatz effizienter und übergeordneter Steuerungen für 20% der Neuanlagen zu einem 12%igen Effizienzgewinnanteil mit einem Gesamtpotential zu 2,4% führen. Im Vergleich dazu wird der Einsatz hocheffizienter Antriebsmotoren mit einer Anwendbarkeit auf 25% der Neuanlagen einen Effizienzgewinn von 2% mit einem Gesamtpotential von 0,5% in die Bilanz eingehen.

Beim Betrieb von Druckluftanlagen wird generell unterschieden in

- diskontinuierliche Regelungen ohne drehzahlvariablen Motorbetrieb,
- kontinuierliche Regelungen mit Motordrehzahlregelung.

Die diskontinuierliche Regelung trifft man derzeit noch am häufigsten als sogenannte Vollast-Leerlauf-Aussetzregelung an. In Abhängigkeit vom Erreichen einer minimalen und einer maximalen Druckgrenze wird der Motor gestartet und über den Kompressor Druckluft gefördert bzw. durch Druckentlastung geht der Kompressor in den Leerlauf über. Die Folge sind eine hohe Schalthäufigkeit mit entsprechend hohen Anlaufverlusten im Motor sowie dauernder Leerlaufbetrieb ohne entsprechende Auslastung (auch als Spitzenlastkompressor bezeichnet, s. Bild 29).

Bild 29 Spitzenlastkompressor

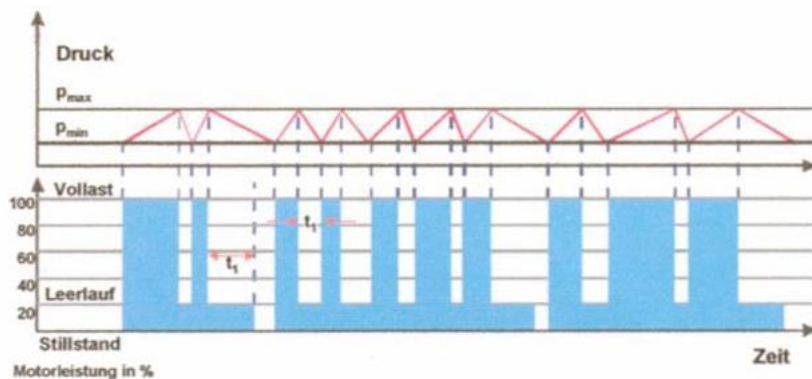
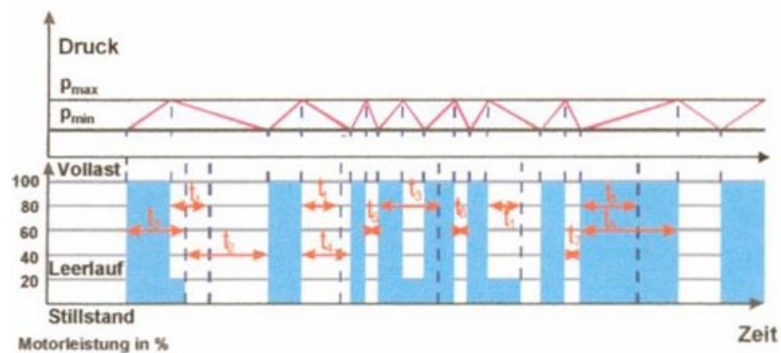


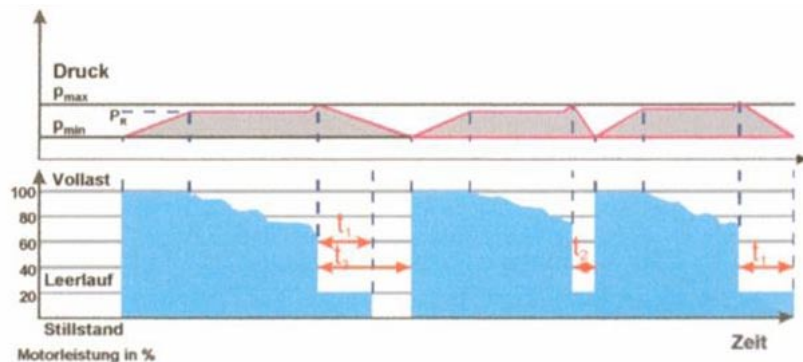
Bild 30 Grundlastkompressor



Bei einer Leerlaufregelung mit optimierter Leerlaufzeit wird die Nachlaufzeit nach Druckschwankungen geregelt (s. Grundlastkompressor nach Bild 30).

Mit einer Motordrehzahlregelung über Frequenzumrichter oder Gleichstrommodulation wird die Anlage auf einer Drehzahlkennlinie in den Druckgrenzen gefahren (s. Bild 31)

Bild 31 Drehzahlregelt betriebener Kompressor



Für Arbeitspunkte außerhalb des normalen Arbeitsbereiches von 20 bis 80% wird auf Vollast- bzw. Leerlaufbetrieb geschaltet.

Die Energieaufwendungen eines Druckluftnetzes hängen von der Höhe des Betriebsdrucks ab, 1 Bar Druckerhöhung verursachen um ca. 7% größere Energiekosten. Der optimale Betriebsdruck kann durch schrittweise Minimierung des Systemdruckes gefunden werden. Sind die Anforderungen der angeschlossenen Verbraucher zu unterschiedlich, sollte über eine Teilung der Anlage in verschiedene Zonen nachgedacht werden.

Neben den Verlusten im Betrieb, treten erhebliche Verluste auch in den Ruhezeiten des Druckluftnetzes auf. Die Leckageverluste entstehen zu 95% im Leitungsnetz und den Verbrauchern. Es ist sinnvoll, die Druckluft komplett oder zumindest teilweise automatisch aus- und einzuschalten. Während der Ruhephasen entfällt dann außerdem die Energie zum Aufbereiten (Trockner).

Die Überprüfung der Anlage sollte jährlich durchgeführt werden um Schwachstellen zu lokalisieren.

### b) Fördertechnik, Aufzüge

Für elektrische Seilaufzüge konnte in den vergangenen Jahrzehnten der Energiebedarf bereits um 30% gesenkt werden. Weitere Einsparmöglichkeiten ergeben sich durch Minimierung der Standby-Funktionen, Einsatz von Energiespeichern, Rückspeisung per Matrixumrichter, Gruppensteuerungen für optimalen Energiebedarf, geringere Gegenlasten. Da der Energiebedarf der Aufzüge am Gesamtenergieverbrauch eines Gebäudes nur 2-5% beträgt, werden die Energiesparzwänge auf diesem Sektor gegenwärtig als nicht so dringlich angesehen.

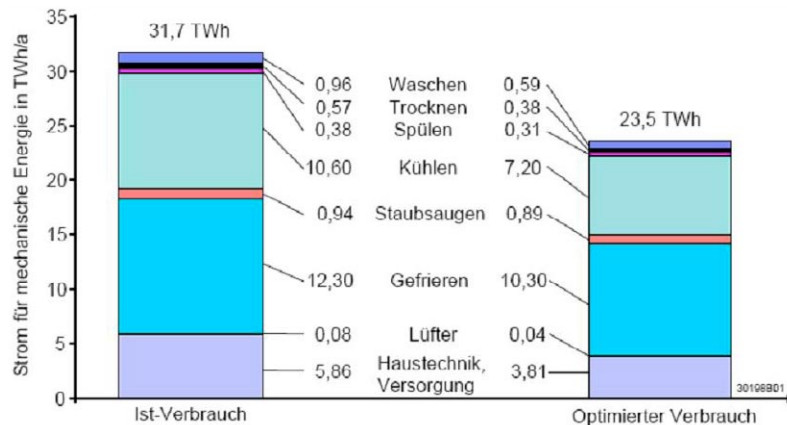
### c) Pumpen, Lüfter und Rohrleitungen

Siehe Abschnitt 5.3.2

#### d) Kleinantriebe im Haushaltbereich

Mit ca. 130 TWh entfällt ein Drittel des Stromverbrauchs für mechanische Energie auf ca. 100 Mio. Haushaltgeräte, die mittels elektrischer Kleinantriebe betrieben werden. Deren Wirkungsgrad kann bis zu 85% (permanent erregte Motoren) betragen; überwiegend werden heute jedoch Einphasen-Induktions- oder Universalmotoren mit 40 bis 75% Wirkungsgrad eingesetzt. Nach [45] sind die Energieeinsparpotentiale im Kleinmotorenbereich für Haushaltgeräte mit ca. 8,2 TWh/a zu beziffern. Bild 32 gibt die Energieeinsparpotentiale im Detail wieder.

Bild 32 Energieeinsparpotential bei Kleinantrieben in Haushaltgeräten



#### 5.3.1.5 Weitere Innovationspotentiale

Die in Industrieantriebssystemen wirkenden Antriebskomponenten weisen bzgl. Drehmoment und Drehzahl unterschiedliche Wirkungsgradcharakteristiken auf. Die größten Verbesserungen lassen sich erzielen, wenn eine Konzentration auf die im Energieverbrauch auffälligsten Komponenten erfolgt.

Ausgehend von dem fortgeschrittenen Stand der Forschung zu energieoptimalen Steuer- und Regelverfahren für einzelne Motorarten könnte ein Schwerpunkt zukünftiger Arbeiten auf die Entwicklung, Untersuchung und Bewertung bedarfsangepasster energieoptimaler Steuerungen für das Gesamtantriebssystem gelegt werden. Besondere Beachtung soll dabei die Einbeziehung von Prozess- und Messgrößen der Arbeitsmaschinen einschließlich der Hilfsaggregate und ihre Verwendung in Modellen, Suchalgorithmen und Kennlinienfeldern finden sowie die Substitution prozessnaher Größen durch Messgrößen im Antrieb.

Bei geregelten Antrieben, die starken stochastischen Störungen über den Prozess oder die Messwerterfassung ausgesetzt sind, könnte die Anwendung stochastisch optimaler Reglereinstellungen und der Einsatz von Kalmanfiltern bzw. LQG-Reglern eine nicht vernachlässigbare Einsparung an Stellenergie bringen.

45 Langgaßner, W.: Techniken und Potentiale der energetischen Optimierung elektrischer Kleinantriebe. Tagung Techniken und Instrumente der innovativen Energiewirtschaft. Schliersee 2001

Die Regelung von Industrieantrieben mit optimaler Energieeffizienz könnte für Spezialantriebe mit hohem Energiekonsum besondere Einspareffekte ergeben. Modellbasierte Regelungen oder auch überlagerte Suchregler dürften hierbei das größte Potential besitzen. Besondere Schwierigkeiten bei deren erfolgreichem Einsatz ergeben sich für hochausgenutzte Maschinen, zu denen insbesondere auch Direktantriebe wie Torquemotoren und High-Speed Motoren zu rechnen sind. Sättigungseffekte führen bei den einen zu nichtlinearen Kopplungen zwischen den Zweiachsengrößen für Strom oder Spannung und können dynamisch wie energetisch uneffiziente Pendelungen hervorrufen. Hohe Betriebsfrequenzen steigern bei den anderen die Ummagnetisierungsverluste, die nur schwer genau vorausberechenbar sind. Für Betriebsbereiche wie Überlast oder Überdrehzahl sind Regelverfahren, die die Energieeffizienz im Fokus haben, bisher nicht untersucht worden. Es sind weder die Einsparpotentiale bekannt noch die konkreten Steuergesetze.

Besonderes Augenmerk ist bei geregelten Antrieben auf den Einsatz von Sensoren elektrischer Größen wie Strom und Spannung und mechanischer Größen wie Drehzahl, Drehmoment und Drehwinkel zu richten, für letztere insbesondere auch bzgl. des Messorts (Antriebs- oder Abtriebswelle). Interpolationsfehler oder Messrauschen können über die Regeleinrichtung oder übliche Filter vielfach nicht vollständig ausgeblendet werden. Ihrem Einfluss auf eine zusätzliche Leistungsaufnahme ist derzeit noch nicht die nötige Beachtung geschenkt worden. Deshalb sind in Zukunft angepasste Messverarbeitungsstrategien wie stochastische Filter (Kalmanfilter) zu entwickeln und hinsichtlich ihres Verbesserungspotentials für eine energieeffiziente Betriebsweise des Antriebssystems zu untersuchen.

Nach Entwurf und Inbetriebnahme von Antrieben wäre ein umfassendes Energiemonitoring auch über eine längere Zeit wünschenswert. Die Sinnfälligkeit begründet sich aus veränderten industriellen Prozessabläufen und Verschleiß- und Alterungsprozessen in der Arbeitsmaschine. Die Ergebnisse könnten zur Nachjustierung energieoptimaler Steuergesetze oder Parametereinstellungen herangezogen oder für die Selbstoptimierung der Anlage benutzt werden. Einschränkend wirkt sich dabei für die Praxis aus, dass meist nur auf im Antrieb bereits vorhandene Sensorik zurückgegriffen werden kann. Methoden, Messverfahren und Potentiale eines Energiemonitoring könnten hierbei im Mittelpunkt stehen.

Standardmotoren lassen sich nicht mit dem im Bemessungspunkt angegebenen Drehmoment dauernd betreiben. Aufgrund der nichtidealen nichtsinusförmigen Spannung verursachen Spannungs- und Stromüberschwingungen zusätzliche Verluste, die über eine zusätzliche Erwärmung des Antriebsmotors eine speisefrequenzabhängige Drehmomentreduktion erfordern. In der Konsequenz führt das entweder zur Auswahl eines größeren Motors, für den sich dann überwiegend Teil-

lastbetrieb und damit eine Verschlechterung der Energiebilanz ergibt, oder es wird ein verlustoptimierter Motor, der für diesen Einsatz entwickelt wurde, eingesetzt.

Ein probates Mittel, die Energieeffizienz von Antriebssystemen zu erhöhen ist die Rückspeisung oder Zwischenspeicherung von Energiemengen, die momentan nicht benötigt werden (Bremsenergie). Die Einbeziehung der Rückspeiseeinheit und des Speichers in die Energiebilanz ist somit geboten und dürfte für Aufzugsantriebe für große Förderhöhen, Mehrmotorenantriebssysteme oder Hybridantriebe von großer praktischer Bedeutung sein.

Ferner ist zur fast ausschließlichen Verwendung von frequenzgesteuerten drehzahlvariablen Drehstromantrieben mit Induktions- und Synchronmaschinen zu vermerken, dass Stromrichter motoren (Synchronmaschine mit I-Umrichter in Thyristortechnik) und doppeltgespeiste Induktionsschleifringläuferantriebe (unter- bzw. übersynchrone Stromrichter kaskade) in Anwendungen mit ihren dann reduzierten Stellbereichen energetisch bessere Lösungen darstellen.

## 5.3.2 Pumpen, Lüfter und Rohrleitungen

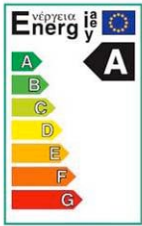
Neben den industriellen elektrischen Antrieben werden elektrische Antriebe in großen Mengen für Pumpen und Lüfterapplikationen eingesetzt. In den unterschiedlichen Marktsegmenten sind auf Grund der Anforderungen technologische Unterschiede bei Pumpen, Lüftern und Motoren anzutreffen.

Für viele Pumpen und Lüfter ist kennzeichnend, dass sie zwar wenig elektrische Leistung, aber oft sehr lange Betriebszeiten aufweisen. Bei Heizungspumpen geht man von einer jährlichen Betriebsdauer von ca. 7200 Stunden aus.

### 5.3.2.1 Heizungspumpen

Bundesweit werden mehr als 30 Millionen Heizungspumpen in einem Leistungsbereich kleiner 200 W eingesetzt, wobei sie etwa 3,5% der in Deutschland insgesamt eingesetzten elektrischen Energie verbrauchen. Ihr Verbrauch liegt damit in der gleichen Größenordnung wie der aller Schienenfahrzeuge von Bundesbahn und öffentlichem Nahverkehr. Bis heute werden hier im wesentlichen Spaltrohrmotoren in Asynchron-technik eingesetzt. In der Vergangenheit wurden zur Verbesserung des Wirkungsgrades im größeren Leistungsbereich zunehmend elektronisch geregelte Induktionsmotoren eingesetzt. Neuere Entwicklungen und Produkte basieren auf Spaltrohrmotoren mit elektronisch geregelten Motoren mit Permanentmagneterregung (PM- bzw. EC-Motoren). Kennzeichnend für diese Antriebe ist der deutlich höhere Motorwirkungsgrad.

Die elektronisch geregelten Pumpen verbessern grundsätzlich den Wirkungsgrad des Gesamtsystems, weil sich die Betriebspunkte der Pumpe auf die gegebene Anlagenkennlinie optimal einstellen lassen.



Dies gilt besonders, da sich die Systemkennlinie auf Grund von Regelungsvorgängen der Heizkörperventile stetig verändert.

Seit 2005 ist bei den Heizungspumpen, vergleichbar zur Weißen Ware, ein Energielabeling eingeführt worden. Berücksichtigt werden hier die unterschiedlichen Betriebszustände von 25% bis 100% Last. Über ein Belastungsprofil werden die Verbräuche zeitlich gewichtet:

$$P_{L, avg} = 0,06 \cdot P_{L, 100\%} + 0,15 \cdot P_{L, 75\%} + 0,35 \cdot P_{L, 50\%} + 0,44 \cdot P_{L, 25\%}$$

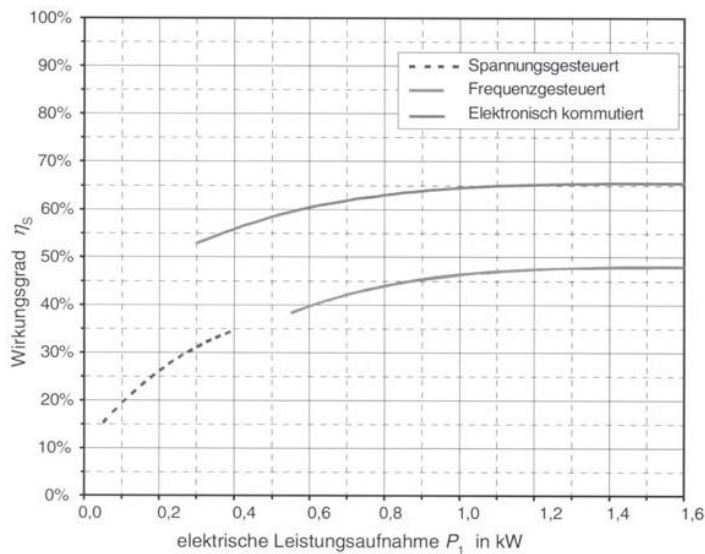
Der so ermittelte Verbrauch wird einem Verbrauchsindex

$$EFF = \frac{P_{L, avg}}{P_{ref}}$$

zugeordnet, wobei sich die Referenzleistung aus der maximalen hydraulischen Pumpenleistung bestimmt.

Die Richtlinie VDI 6014 ist eine Grundlage zur Auswahl für drehzahlveränderbare Pumpen und Ventilatoren in der Gebäudetechnik. In dieser Richtlinie werden Hinweise zur Auswahl des Antriebs und mögliche Energieeinsparpotentiale aufgezeigt.

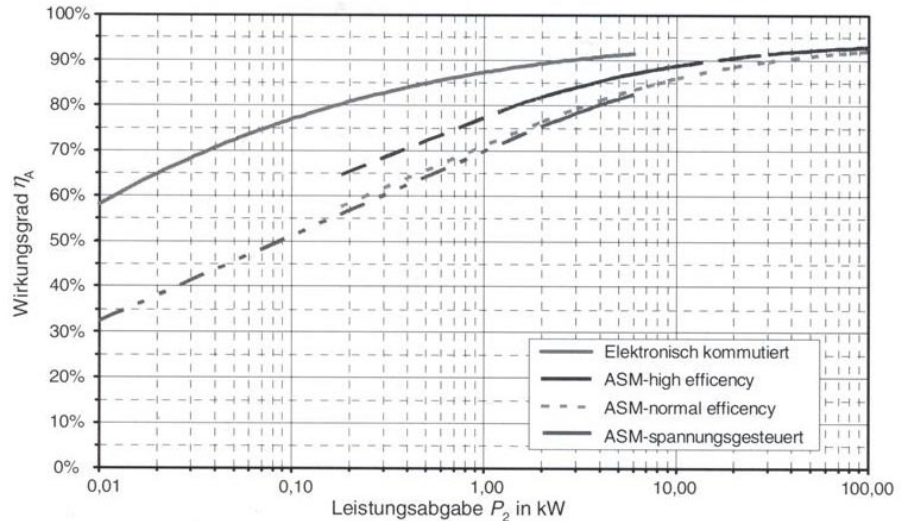
Bild 33 Systemwirkungsgrad von Nassläufern



Tab. 15 Lastprofil von Heizungsumwälzpumpen

	Jährliche Betriebsdauer des Antriebs in h					Gesamt
	Nicht in Betrieb	25 % Förderstrom	50 % Förderstrom	75 % Förderstrom	100 % Förderstrom	
Pumpe	1488	3200	2545	1091	436	8760
Ventilator	760	0	4000	3000	1000	8760

Bild 34 Antriebswirkungsgrad von Trockenläufern und Ventilatoren



Die weiteren Pumpenanwendungen sind:

- große Heizanlagen und Klimatechnik,
- Wasserversorgung (Druckerhöhung, Bohrlochpumpen),
- Wasserentsorgung (Submersible),
- chemische Industrie,
- Industrielle Prozesstechnik.

Für den breiten Anwendungsbereich der Pumpen wird lt. Europumps ein Verbrauch von ca. 20% des Gesamtenergieverbrauchs weltweit geschätzt. Hierbei entfallen 25% bis 50% auf industrielle Applikationen. Für diese Applikationen gelten bezüglich Betriebsdauer oft die gleichen Voraussetzungen wie in der Gebäudetechnik. In diesen Bereichen wird heute ausschließlich der Standard-Asynchronmotor eingesetzt. Für große Heizungsanlagen und in der Klimatechnik werden ungefähr 10%, sonst weniger als 10% drehzahlgeregelte Motoren verwendet. Bohrlochpumpen für die Wasserentsorgung und Tauchpumpen für die Abwassertechnik sind hochausgenutzte flüssigkeitsgekühlte Asynchronmotoren, deren Wirkungsgrad tendenziell schlechter als der von leistungsgleichen und größeren oberflächengekühlten Motoren ist. In der chemischen Industrie oder der industriellen Prozesstechnik sind die Antriebssysteme und die Applikationen meistens besser aufeinander abgestimmt und oft werden Anlagen im Bemessungsbetriebspunkt betrieben. Reduzierungen des Energieverbrauchs durch drehzahlveränderbare Antriebe sind hier im Einzelfall zu klären. Im Hinblick auf öfter wechselnde Produktionsprozesse lassen sich die Anlagen mit drehzahlveränderbaren Antrieben universeller projektieren.

### 5.3.2.2 Einfluss des Rohrsystems auf den Gesamtwirkungsgrad

Die Auslegung von Rohrleitungen gehört zu den häufigsten praktischen Anwendungen der Hydrodynamik. Jedes Leitungssystem zum Flüssigkeits- bzw. Lufttransport soll ohne Verwendung von unnötig dicken Rohren und zu starken Pumpen bzw. Kompressoren ausgelegt werden.



Für isotherme, stationäre Strömungen einer inkompressiblen Flüssigkeit lässt sich über die Bernoullische Gleichung der Energieeinsatz zwischen zwei Bezugsebenen beschreiben:

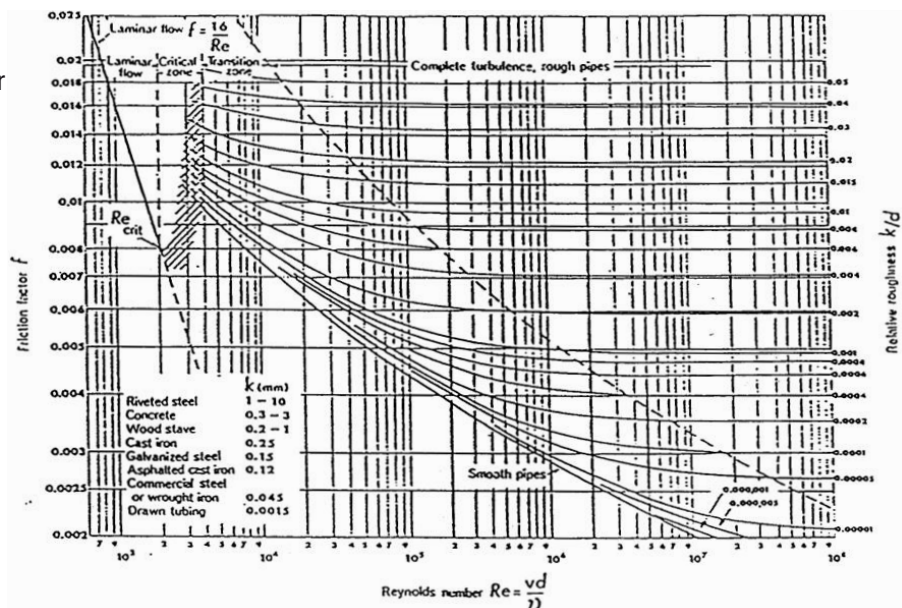
$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gh_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gh_2 + e_f$$

Dabei ist  $e_f$  der spezifische Energieverlust, der durch Reibung und örtliche Widerstände hervorgerufen wird. Diese Verlustquellen sind von der kinetischen Energie der strömenden Flüssigkeiten abhängig:

$$e_f = \frac{v_2^2}{2} \left( 4f \frac{L}{d} + \sum 4f \frac{L_e}{d} \right)$$

$f$  wird als Reibungsfaktor bezeichnet, der von der Reynoldszahl und der Rauheit der inneren Oberfläche abhängt. Örtliche Widerstände, z.B. Armaturen, können mit Hilfe einer äquivalenten Ersatzlänge eines geraden Rohres mit dem gleichen Widerstand beschrieben werden. Der dimensionslose Reibungsfaktor wird, wie in Bild 35 zu sehen, meist grafisch dargestellt. Besonders zu berücksichtigen ist der sprunghafte Anstieg des Widerstandes beim Wechsel von laminarer zu turbulenter Strömung.

Bild 35 Abhängigkeit des Reibungsfaktors von der Reynoldszahl und der relativen Rauheit (nach Moody)



In Tabelle 16 sind die äquivalenten Rohrlängen für einige wichtige Armaturen aufgeführt.

Tab. 16 Äquivalente Rohrlängen  
für Armaturen

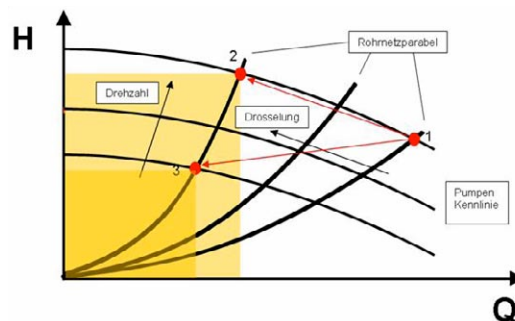
Armatur	Le/d
Bogen 45° (NW 1" bis 3")	15 bis 20
Bogen 90° (NW 3/8" bis 3")	30
Bogen 90° (NW 3" bis 6")	40
Bogen 180°, kleiner Radius	75
Bogen 180°, großer Radius	50
Ventil offen	10
Schieberventil offen	7
Eckventil offen	170
Rückschlagklappe	80

Weiterhin ist zu beachten:

- bei plötzlicher Querschnittserweiterung geht die kinetische Energie praktisch verloren,
- bei plötzlicher Kontraktion geht ein Viertel bis die Hälfte der kinetischen Energie verloren.

Aus diesen physikalischen Zusammenhängen lässt sich die Rohrnetzparabel bestimmen. Durch Ventile oder Stellglieder können für ein bestehendes System verschiedene Rohrnetzparabeln gelten.

In Bild 36 sind Pumpenkennlinien für geregelte Pumpen und Rohrnetzparabeln aufgezeigt. Pumpen mit konstanter Drehzahl verfügen nur über eine Pumpenkennlinie.

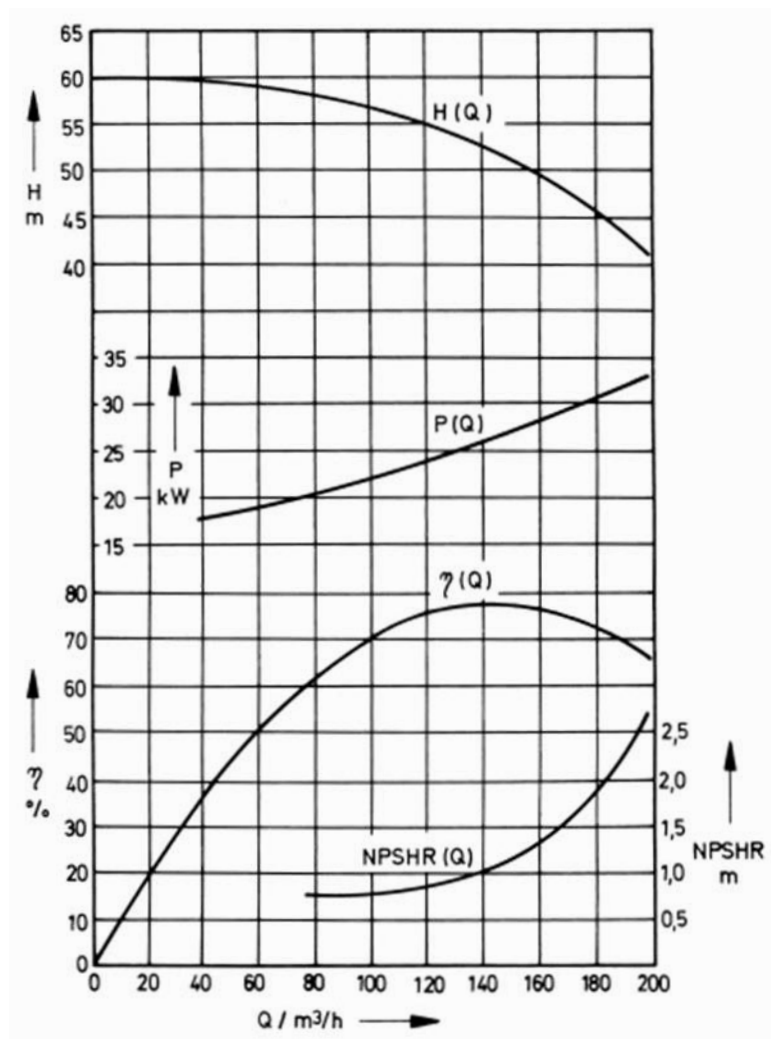
 Bild 36 Pumpenkennlinien und  
Rohrnetzparabeln


Als Arbeitspunkt (1) des Systems stellt sich der Schnittpunkt aus der Rohrnetzparabel und der Pumpenkennlinie ein. Bei Veränderung der Rohrnetzparabel z. B. durch Ventildrosselung verschiebt sich der Arbeitspunkt der Pumpe bei konstanter Drehzahl immer auf der entsprechenden Pumpenkennlinie auf den neuen Betriebspunkt (2), während eine drehzahlveränderbare Pumpe den energetisch optimalen Betriebspunkt (3) auf der gültigen Rohrnetzparabel einstellen kann. Die rechteckige Fläche unterhalb des Arbeitspunktes ist über die Wirkungsgradkurven von Pumpe und Motor ein Maß für die Verluste im System. Der Pumpenwirkungsgrad ist proportional dem Produkt aus der Förderhöhe  $H$  und dem Volumenstrom  $Q$ . Der maximale Wirkungsgrad einer Pumpe liegt in aller Regel bei hohen Volumenströmen und einer mittleren Förderhöhe.

Für drehzahlregelte Pumpen ergeben sich beliebig viele Pumpenkennlinien, womit die Regelstrategie darauf abzielt, den optimalen Wirkungsgrad zu erreichen.

Wie aus den vorangegangenen Betrachtungen zu erkennen ist, ist besonders im Hinblick auf Energieeinsparung eine gute Abstimmung der Pumpe und des Rohrsystems notwendig. Veränderliche Rohrsysteme, wie z.B. Heizsysteme durch den Eingriff der Heizkörperventile, erfordern besondere Anpassungsmöglichkeiten der Pumpen auf die gegebenen hydraulischen Anforderungen, die optimal nur durch drehzahlvariable Pumpen zu erfüllen sind.

Bild 37 Kennlinien einer Kreiselpumpe



Bei komplexen Systemen ist eine Berechnung der realen Rohrnetzparabel sehr aufwändig bis fast unmöglich, so dass das reale System nach Fertigstellung vermessen werden müsste um eine optimale Pumpe auszuwählen. Der vielfach eingesetzte Weg, die Pumpe überzudimensionieren, ist aus energetischen Gesichtspunkten der falsche Ansatz, da diese Pumpe aufgrund des relativ kleinen Fördervolumens bei einem schlechten Wirkungsgrad betrieben wird.

Elektronisch geregelte Heizungspumpen mit permanenterregten Motoren verbrauchen 40 bis 50% weniger Energie als moderne Standardpumpen mit Induktionsmotoren und bis zu 70% weniger als unregelte Pumpen, die noch vielfach im Gebäudebestand anzutreffen sind. Zudem bieten EC-Heizungspumpen regelungstechnische Vorteile. Bei Betrachtung der Kosten für den Lebenszyklus von Umwälzpumpen zeigt sich, dass die Stromkosten ein Vielfaches der Anschaffungskosten betragen. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht machen sich die Mehrkosten einer solchen Heizungspumpe rasch – oft schon nach zwei Jahren – bezahlt.<sup>46</sup>

### 5.3.3 Optimierung elektrothermischer Prozesse

Die elektrothermische Prozesstechnik ist eine Querschnittstechnologie und nimmt bei vielen industriellen Herstellungs- und Bearbeitungsprozessen aus technologischer und energetischer Sicht eine zentrale Bedeutung ein. Die Anwendungsbereiche sind vielseitig und erstrecken sich von der Nahrungsmittelindustrie über die Textil- und Papierindustrie bis hin zur chemischen Industrie, wo überwiegend Prozesstemperaturen bis etwa 500°C zu finden sind. Hochtemperatur-Prozesswärme im Bereich zwischen 1000°C und 1500°C wird beispielsweise in der Stahlindustrie, in der Baustoffindustrie, in den Eisen- und Nichteisengießereien, in der Glas- und Keramikindustrie sowie in der Halbleiterindustrie benötigt. Zum Teil sind die elektrischen Verfahren bezüglich der an sie gestellten Anforderungen konkurrenzlos, z.B. Elektrolyseprozesse oder Vakuumschmelzen, zum Teil bestehen Alternativen in Form von mit Brennstoff beheizten Verfahren, z.B. Induktionsschmelzöfen versus mit Koks beheiztem Kupolofen.

Der industrielle Verbrauchssektor Prozesswärme dominiert mit einem Anteil von etwa 2/3 den gesamten Endenergieverbrauch der deutschen Industrie deutlich. Hiervon werden etwa 14% entsprechend 62 TWh<sup>47</sup> durch elektrischen Strom und der Rest durch direkte Nutzung fossiler Brennstoffe genutzt. Hieraus resultiert, dass die Prozesswärme mit einem Anteil von 26% hinter der mechanischen Energie den zweitgrößten industriellen Stromverbraucher darstellt. Etwa 4/5 des industriellen Stromeinsatzes für Elektroprozessenergie wird in den Sektoren Chemie, Nichteisen-Metallindustrie und der eisenschaffenden Industrie eingesetzt. Aus produktspezifischer Sicht dominieren mit einem Anteil von etwa 50% die Elektrolyseprozesse zur Herstellung von Chlor, Hüttenaluminium und anderer Grundstoffe wie Phosphor oder Calciumkarbid deutlich den industriellen Prozessstromverbrauch. Hierbei handelt es sich im eigentlichen Sinne nicht um eine wärmetechnische, sondern um eine elektrochemische Verwendung des Stroms. Auf diese Anwen-

---

<sup>46</sup> Kech H.: Bine Projektinfo 13/01 Stromsparende Pumpen für Heizungen und Solaranlagen

<sup>47</sup> Tzscheutschler P., Nicke M., Wernicke I.: Energieverbrauch in Deutschland. BWK 5, 2007 S. 13

dungsbereiche soll im Folgenden nicht eingegangen werden. Der Stromverbrauch für Elektroprozesswärme mit einem Anteil von etwa 30 TWh verteilt sich auf eine Vielzahl industrieller Bereiche und Anwendungen. Der größte Verbrauchssektor dabei ist die Herstellung von Elektrostahl mit einem Anteil von rund 7 TWh.

Eine differenzierte Betrachtung zeigt, dass der Stromverbrauch im Verbrauchssektor Prozesswärme in den letzten 10 Jahren um rund 4% zunahm, obwohl der Verbrauch der grundstoffschaffenden Industrie in Deutschland abnahm. Gründe hierfür sind neben der verstärkten Automatisierung insbesondere die Zunahme elektrothermischer Verfahren, die bei der Produktion von besonders hochwertigen Produkten in komplexen Produktionsprozessen verstärkt eingesetzt werden, wie z.B. in der optischen Industrie oder bei der Herstellung von speziellen metallischen Werkstoffen und Bauteilen sowie in der Halbleiterindustrie. Trotz des hohen Entwicklungsstandes der eingesetzten elektrothermischen Technologien bestehen nach wie vor energetische und wirtschaftliche Einsparpotentiale gerade in energieintensiven Branchen, wie z.B. in der Stahlindustrie, in Eisen- und Nichteisen-Gießereien sowie in der Glas- und Keramikindustrie. Die energetischen und wirtschaftlichen Einsparpotentiale der Erwärmungs- und Schmelzprozesse unterliegen einer Vielzahl von anlagen- und insbesondere prozessspezifischen Einflussfaktoren, deren quantitative Wirkungen dem Betreiber oft unbekannt sind. Infolgedessen arbeiten zahlreiche Anlagen und Prozesse aus energetischer, wirtschaftlicher und damit ressourcenschonender Sicht nicht optimal. Dies gilt sowohl für die mittelständische Industrie als auch für die großen Industrieunternehmen.

Die Verbesserung der Energieeffizienz im Bereich der industriellen Prozesswärme erfordert eine anwendungsspezifische, umfassende Analyse und Bewertung des jeweiligen thermischen Prozesses, d.h. Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz sind überwiegend prozessorientiert und weniger anlagenorientiert. Da die Produktionsprozesse zunehmend komplexer werden, ist zur Bewertung und gezielten Nutzung der Einsparpotentiale die Betrachtung und Analyse der gesamten Prozess- bzw. Produktionskette erforderlich. Die isolierte Untersuchung und Verbesserung einzelner Anlagen oder Prozessstufen führt oft nicht zu den gewünschten Einspareffekten. Vor diesem Hintergrund ist eine allgemeingültige, auf eine Branche oder auf ein elektrothermisches Verfahren bezogene Aussage zu den spezifischen Einsparpotentialen durch Optimierung elektrothermischer Prozesse nur näherungsweise möglich.

Zur Verbesserung der Energieeffizienz bei elektrothermischen Prozessen lassen sich drei Ansatzpunkte nennen:

#### **5.3.3.1 Optimierung vorhandener Prozesse und Anlagen**

Zur Bestimmung möglicher Einsparpotentiale müssen alle erforderlichen energietechnischen und energiewirtschaftlichen Prozess- und

Produktionsparameter über bestimmte Zeiträume erfasst und analysiert werden. Durch den Vergleich mit theoretischen und branchentypischen Kennzahlen (Benchmarking) können energetische Einsparpotentiale aufgedeckt, bewertet und Maßnahmen zum Heben dieser Potentiale unter Berücksichtigung ihrer Wirtschaftlichkeit eingeleitet werden. In vielen Fällen lässt sich die Energieeffizienz durch eine verbesserte Abstimmung bzw. Anpassung der Erwärmungs- oder Schmelzprozesse an die vor- bzw. nachgeschalteten Produktionsschritte erheblich verbessern. Durch geeignete technische und/oder organisatorische Maßnahmen lassen sich oft energetisch ungünstige Betriebszustände, wie Leerlaufbetrieb, Teillastbetrieb, der so genannte Warmhaltebetrieb oder das zweimalige Erwärmen oder Schmelzen von Kreislaufmaterial vermeiden oder zumindest einschränken. Praktische Untersuchungen haben gezeigt, dass hierdurch mitunter Einsparpotentiale von bis zu 50% möglich sind.

Die vorhandenen Erwärmungs- und Schmelzanlagen müssen in regelmäßigen Abständen auch hinsichtlich ihres spezifischen Energiebedarfs ggf. messtechnisch überprüft werden. Bei älteren Anlagen lassen sich durch die Verbesserung der thermischen Isolierung, durch den Einbau verbesserter Temperaturmesstechnik, durch die Optimierung der Ofensteuerung und Ofenregelung Einsparpotentiale von bis zu 30% erzielen. Leistungs- und Energiespitzen lassen sich durch Einbindung der Ofenanlagen in ein Lastmanagement- und Energiecontrolling-System reduzieren. Daneben ist die richtige Betriebsweise durch das Bedienpersonal bei wärmetechnischen Anlagen besonders wichtig. Das simple Abschalten von nicht genutzten Geräten oder das Schließen des Ofendeckels nach dem Chargieren führt zu erheblichen Energieeinsparungen von bis zu 20%.

Viele Elektrowärmeanlagen werden über Frequenzumformer an das Versorgungsnetz angeschlossen. Dabei werden Frequenzen von wenigen hundert Hertz (Induktions-Schmelzöfen) über einige bis einige hundert Kilohertz (Induktions-Durcherwärmungsanlagen und -Oberflächenhärtenanlagen) bis hin zum Megahertz-Bereich (Kristallzüchtungsanlagen) verwendet. Durch den Einsatz moderner Frequenzrichter lassen sich bei Versorgung von Mittel- und Hochfrequenz-Induktionsanlagen Energieverluste von bis zu 30% einsparen und oft gleichzeitig eine verbesserte Prozesskontrolle realisieren.

Ein besonders elektroenergieintensiver Prozess ist die Herstellung von Elektro Stahl im Lichtbogenofen, wobei sich durch verschiedene Maßnahmen der spezifische Einsatz elektrischer Energie reduzieren lässt. Hierzu gehören die Zufuhr von fossilen Brennstoffen, die energetische Prozessoptimierung durch Reduzierung der Rauchgasverluste, die Energierückgewinnung durch Schrottvorwärmung sowie die Prozessdampfherzeugung und Heizenergieauskopplung. Hierdurch lassen sich technische Einsparpotentiale von bis zu 30% realisieren, wobei aus wirtschaftlicher Sicht bis zu 15% gegenwärtig umsetzbar sind.

### 5.3.3.2 Substitution oder Ergänzung konventioneller thermischer Prozesse und Anlagen

Grundsätzliche Umstellungen von Produktionsprozessen sind ein zentraler Ansatzpunkt zur Optimierung der Energieeffizienz in der thermischen Prozesstechnik. Dies schließt insbesondere auch die Substitution des Endenergieträgers, d.h. Brennstoffe durch Strom oder umgekehrt, mit ein, wobei auch Verminderungen des Primärenergieeinsatzes und Reduzierung der klimarelevanten Emissionen möglich sind. In vielen Fällen dieser Prozess-Substitutionen liegen die Energieeinsparungen bei 50 bis 70%. Auch die geeignete Kombination unterschiedlicher thermischer Verfahren in Form von Hybridanlagen führt oftmals zu energetischen Einsparungen von bis zu 20%.

In vielen industriellen Prozessen sind Trocknungsvorgänge erforderlich, die heute überwiegend durch Konvektionstrocknung in mit Gas oder elektrisch betriebenen Öfen stattfindet. Hier können gezielt auf das Produkt abgestimmte Trocknungsprozesse, die beispielsweise mit Mikrowellen- oder Infrarot Erwärmung realisiert werden, erhebliche energetische Einsparungen bringen. Durch den Einsatz dieser direkt wirkenden Trocknungsverfahren kann der spezifische Energiebedarf um durchschnittlich 40 bis 70% im Vergleich zum konventionellen Umlufttrockner gesenkt werden.

### 5.3.3.3 Entwicklung und Einführung neuer energieeffizienter Verfahren

Die Nutzung von energetischen Einsparpotentialen kann bei vielen industriellen thermischen Prozessen durch die Verkürzung von Prozesslinien und Einsparung von Prozessschritten erfolgen. Hierzu ist die Entwicklung neuer zukunftsweisender Verfahren und Prozesse erforderlich. Beispiele hierfür sind die energieeffiziente Herstellung von Flachstahl in Form von Blechen und Bändern durch den Ausbau der Technologie des endabmessungsnahen Dünnbandgießens. Die Zwischenerwärmung von dünnen Blechen und Bändern kann dabei effizient und energiesparend durch die induktive Querfelderwärmung erfolgen. Energieeinsparungen von bis zu 30% sind möglich.

Eine herausfordernde Entwicklung ist der Einsatz von supraleitenden Induktionsspulen, da bei induktiven Erwärmungs- und Schmelzprozessen die größten Energieverluste von 20 bis 40% in der Induktionsspule auftreten. In aktuellen Forschungsprojekten wird der Einsatz von supraleitenden Induktionsspulen für die Aluminiumbolzen-Erwärmung zum nachfolgenden Strangpressen untersucht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Bedeutung des Endenergieträgers Strom für thermische Verfahren zunimmt, insbesondere an hoch entwickelten Industriestandorten wie Deutschland durch die Forderung nach innovativen Prozessen und hochqualitativen Produkten. Dabei wird der spezifische Energiebedarf, also der Energiebedarf bezogen auf die jeweilige Produktionseinheit, durch den hocheffizienten Stromeinsatz abnehmen. Die zukünftige Aufgabe der Entwickler

und Hersteller von Thermoprozessanlagen besteht aber vor allem darin, entsprechend den unterschiedlichen Problemstellungen jeweils die optimale Anlage für einen speziellen Prozess liefern zu können. Dabei muss die Erwärmungs- oder Schmelzanlage nicht als Einzelaggregat betrachtet, sondern bezüglich Materialtransport, Wärmeverbund, Automation usw. in die Gesamtanlage und den Gesamtprozess optimal integriert werden.

### 5.3.4 Technologiewechsel

Energiesparpotentiale sind nicht immer mit einer Reduktion des Verbrauchs elektrischer Energie verbunden, sondern z. T. auch mit einem Mehrverbrauch. Dies ist dann der Fall, wenn sich durch einen Technologiewechsel von einem Primärenergieverbraucher hin zu einem Verbraucher elektrischer Energie eine wesentliche Verbesserung des Wirkungsgrads erreichen lässt.

#### a) Ersatz von Antriebsgasturbinen durch Elektroantriebe

Ein Beispiel hierfür sind Industrieantriebe, bei denen heute Gasturbinen als Antreiber dienen, wie dies in der Öl- und Gasindustrie oft der Fall ist. Gasturbinen haben im Leistungsbereich zwischen einigen 100 kW und bis zu 70 MW einen maximalen Vollast-Wirkungsgrad von ca. 25% bei kleineren bis 38% bei sehr großen Einheiten. Bei hohen Außentemperaturen sinkt dieser Maximalwirkungsgrad auf unter 20%. Vergleichbare elektrische Direktantriebe haben dagegen einen Wirkungsgrad von 95% bis 98% für den Motor und 97% bis 99% für den zugehörigen Antriebsstromrichter.

Diese Zahlen zeigen, dass sich eine Substitution von Antriebs-Gasturbinen durch Elektroantriebe eine erhebliche Einsparung an Primärenergie erzielen ließe, wobei der Bedarf an elektrischer Energie allerdings ansteigen würde. Die entsprechenden Potentiale existieren jedoch vor allem in Ländern mit bedeutender Erdöl- bzw. Erdgasförderung und in Flächenstaaten mit langen Gaspipelines wie Kanada, den USA oder Russland.

Die gesamte in Deutschland installierte Leistung von Antriebsgasturbinen liegt bei lediglich ca. 200 MW. Bei einem durchschnittlichen Wirkungsgrad von 28% und einer jährlichen Laufzeit von durchschnittlich 5000 h resultiert hieraus ein Primärenergieverbrauch von  $0,2 \text{ GW} / 28\% \cdot 5000 \text{ h} = 3,6 \text{ TWh}$ .

Bei Ersatz aller Industriegasturbinen durch Elektroantriebe substituiert würden, entstünde bei 95% Systemwirkungsgrad der Elektroantriebe und unter Berücksichtigung von 95% Wirkungsgrad der Energieübertragung ein Mehrverbrauch an elektrischer Energie von  $0,2 \text{ GW} / 95\% / 95\% \cdot 5000 \text{ h} = 1,1 \text{ TWh}$ . Für den Fall, dass die elektrische Energie in einem modernen GuD-Kraftwerk mit einem Wirkungsgrad von 55% ebenfalls aus Gas erzeugt würde, würde diese Menge elektrischer Energie zu ihrer Erzeugung 2,0 TWh Primärenergie benötigen. Die



Einsparung an fossiler Primärenergie betrüge damit in Deutschland 1,6 TWh pro Jahr. Würde die zusätzliche elektrische Energie vollständig aus regenerativen Quellen gewonnen, entspräche die Einsparung an fossiler Primärenergie den vollen 3,6 TWh.

#### **b) Verlagerung von Verkehr von der Straße auf die Schiene**

Ähnlich wie bei der Substitution von Antriebsgasturbinen durch Elektroantriebe würde auch eine Verlagerung des Verkehrs von der Straße auf die Schiene zu einer Verringerung des Primärenergieverbrauchs führen, die aber einen erhöhten Stromverbrauch zur Folge hat. Da z. B. der Gütertransport heute überwiegend über die Straße erfolgt, hätte bereits eine Verlagerung von wenigen Prozent des Güterverkehrsaufkommens auf die Schiene eine zweistellige Erhöhung des Stromverbrauchs im Verkehrssektor zur Folge. Eine konkrete Prognose wird dadurch erschwert, dass der Umfang einer solchen Verlagerung stark durch politische Rahmenbedingungen wie die Entwicklung der Lkw-Maut beeinflusst wird.

#### **c) Ersatz pneumatischer und hydraulischer Antriebe**

Auch die Substitution pneumatischer oder hydraulischer Antriebe durch Elektroantriebe ist unter energetischen Gesichtspunkten sinnvoll. Im Gegensatz zu den beiden vorstehenden Beispielen würde er den Stromverbrauch reduzieren, da die in pneumatischen oder hydraulischen Antrieben verwendeten Medien (Luft bzw. Öl) i. Allg. durch von Elektromotoren angetriebenen Verdichtern bzw. Pumpen auf den erforderlichen Arbeitsdruck gebracht werden. Beim direkten Einsatz von Elektroantrieben würden die mit der Energiewandlung in Verdichter oder Pumpe, dem Transport des Mediums in Rohren und der Rückwandlung in mechanische Energie im pneumatischen bzw. hydraulischen Antrieb verbundenen Verluste komplett entfallen, die alleine zwischen 20 und 80% der eingesetzten elektrischen Energie ausmachen.

## **5.4 Energieeinsparung durch Verhaltensänderung – Schulung und Werbung**

Von der Hamburgischen Electricitäts-Werke AG wurden 80 ausgewählte Haushalte über Energiesparmaßnahmen im häuslichen Bereich durch Verhaltensänderungen beraten und ihr Energieverbrauch während eines Jahres beobachtet.<sup>48</sup>

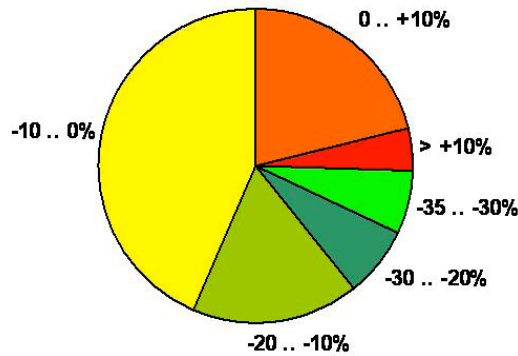
Nach einer Analyse des Stromverbrauchs und der Aufdeckung von Energiesparpotentialen erfolgte vor Ort die Anleitung zur Übertragbarkeit der Energiespartipps durch Energieberater. Dabei wurde Wert gelegt

---

48 Hallier, H., Hamburgische Elektrizitäts-Werke (HEW) in: Energieanwendung \* Band 44 (1995) Heft 6, Seite 15 – 18

auf praktikable Tipps, die die Nutzer leicht umsetzen konnten. Im Vergleich zu einer Referenzgruppe, deren Energieverbrauch in demselben Zeitraum um 4% stieg, konnten die beratenen Haushalte nach einem Jahr eine Durchschnittseinsparung von 7% oder 279 kWh pro Haushalt vorweisen. Diese Einsparung wurde größtenteils lediglich durch eine Veränderung des Nutzungsverhaltens erzielt, die Anzahl der Personen und die Elektrogeräte blieben im betrachteten Zeitraum konstant.

Bild 38 Häufigkeit von durchschnittlichen Stromverbrauchsänderungen



Drei Viertel der Haushalte verbrauchte im untersuchten Zeitraum gleich viel oder weniger Strom. Einsparungen von über 10% erreichte ein knappes Drittel (30,5%). Eine derartige Änderung geht über die normalen jährlichen Schwankungen hinaus und ist i. Allg. nur durch besondere Maßnahmen zu erreichen. Die Leistung dieser Haushalte ist der gezielten Energiesparberatung vor Ort zuzuschreiben. Der Haushalt mit der höchsten Einsparung verringerte den Stromverbrauch um 37%. Ein Viertel der Haushalte zeigte im Vergleichszeitraum eine Verbrauchserhöhung von durchschnittlich 228 kWh. Da die Verbrauchsänderung das Resultat von Verhaltensänderung und Außeneinflüssen ist, nannten diese Haushalte trotz Verbrauchserhöhung Erfolge bei der Umsetzung der Spartipps, da die Verbrauchserhöhung auf Außeneinflüsse zurückgeführt wurden.

Bei den Abschlussgesprächen wurde nachgefragt, in welchen Bereichen die meisten Energiespartipps angewendet wurden (s. Tabelle 17; Mehrfachnennungen möglich):

Stand-by-Betrieb	Warm-Wasser	Licht	E-Herd	Waschmaschine	Gefriergerät	Kühlschrank	Geschirrspüler	Klein-geräte	Wäschetrockner
55%	49%	48%	43%	38%	19%	16%	13%	12%	6%

Tab. 17 Häufigkeit der Umsetzung von Energietipps abhängig vom jeweiligen Gerätetyp

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Schulung der Verbraucher zu einer Verringerung des Stromverbrauchs führen kann. Es wurden Einsparungen von bis zu 37% pro Haushalt festgestellt; durchschnittlich waren es 7%. Statistisch gesehen kann bei 30% der Haushalte eine signifikante Verbrauchsänderung festgestellt werden, die auf ein verändertes Nutzungsverhalten auf der Basis der anfangs durchgeführten Schulung zurückzuführen ist.

Grundsätzlich müssen technische Themen wie Energiesparen, Stand-by-Verbrauch und Energieeffizienz in der Bevölkerung so bekannt gemacht werden, dass diese mit einem Basiswissen ausgestattet selbständig eine Nutzungsänderung durchführen kann. Als Beispiel sei der *Stand-by-Verbrauch* genannt, der 2001 im Rahmen einer Marketingkampagne der Energienstiftung Schleswig-Holstein in diesem Bundesland thematisiert wurde. Dabei wurde erstmals die Wirkung der Imagekampagne für einen Begriff durch ein renommiertes Meinungsforschungsinstitut überprüft.<sup>49</sup>

In Presse, Rundfunk und Fernsehen, mit Plakaten und Flyern wurde auf witzige, ansprechende Weise der Slogan dargestellt. Es zeigte sich, dass zwei Zielgruppen innerhalb kurzer Zeit auf diese Aktion reagierten:

Die Konsumenten

- nahmen zu 54% den Begriff *Stand-by-Verbrauch* während der Kampagnenlaufzeit wahr. Rund 80% der befragten Personen gaben an, dass es sie stört, dass immer mehr Elektrogeräte nicht mehr wirklich ausschalten können. Hier scheinen neben finanziellen und ökologischen Aspekten auch psychologische Motive der Autonomie und Verhaltenskontrolle zu wirken,
- assoziierten mit dem Begriff *Stand-by* nach der Kampagne in höherem Maße Energieverschwendung und hoher Stromverbrauch (vorher 3%, nachher 24%),
- wurden in Ihrer Einsätzung, alles zu diesem Thema zu wissen, erschüttert und informierten sich im Fachhandel über Flyer und Webseiten: Um 14% sank die Anzahl der Personen, die sicher waren, ausreichend über Stromsparmöglichkeiten im Haushalt informiert zu sein. Weiterhin ist der Anteil derjenigen, die mehr Informationen zur Reduktion des Standby-Verbrauchs wünschen, von 36% um deutliche 9% auf 45% gestiegen,
- zeigten verstärkt Interesse für Elektrogeräte mit niedrigerem Standby-Verbrauch, selbst wenn diese in der Anschaffung mehr kosten,
- veränderten auf Grund der Kampagne ihr Nutzungsverhalten und schalteten z. B. den Fernseher öfter ganz aus und nicht nur über die Fernbedienung.

Die Elektrofachhändler

- zeigten wie die Konsumenten eine deutliche Sensibilisierung für das Thema. Viele haben sich über die Informationsmittel der Kampagne hinaus in das Thema eingearbeitet, um die Kunden kompetent beraten zu können,
- nutzten die Informationsmaterialien zur Weitergabe an ihre Kunden und zur Organisation eigener Events,
- erwarten durch die erweiterte Kundenberatung keine Zunahme des

---

<sup>49</sup> Wortmann, K. et al: Wirklich aus? Ergebnisse der landesweiten Stromsparkampagne der Energienstiftung Schleswig-Holstein in: Energiewirtschaftliche Tagesfragen, 2002, Band 52, Heft 1/2, Seite 78 – 83

Verkaufs, sondern eine Verlagerung hin zu energiesparenden Geräten,

■ stellten teilweise ihre Produktpalette auf energiesparende Geräte um. Damit kann die Empfehlung gegeben werden, dass neben den technischen Maßnahmen zum Energiesparen die Nutzer über den energiesparenden Umgang mit Elektrogeräten informiert werden sollten. Damit wird zum einen die Akzeptanz technischer Maßnahmen erhöht, zum anderen kann allein durch Nutzungsänderung ein gewisser Anteil an Energie eingespart werden.

## 5.5 Ausblick auf zukünftige Technologien

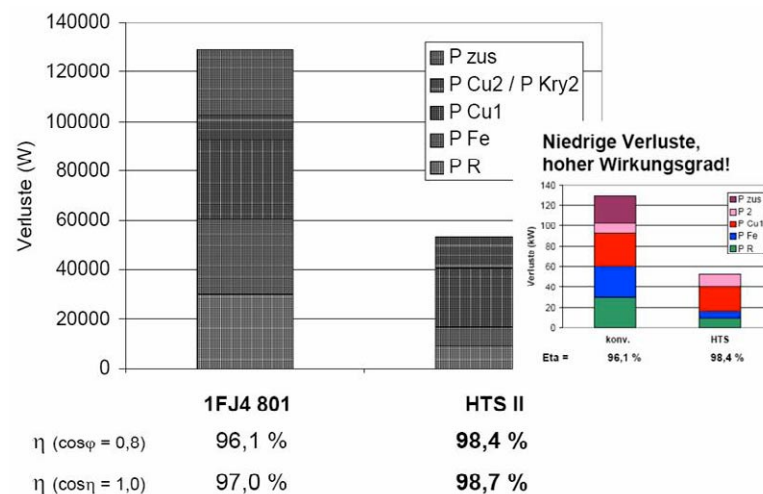
### 5.5.1 Permanentmagneterregung und Supraleitung

Neben den heute dominant eingesetzten Induktionsmaschinen (Tabelle 8) gibt es bei Großmaschinen Entwicklungsansätze, die ein Wirkungsgradsteigerungspotential von 1% und mehr aufweisen. Hierzu gehört die Entwicklung von durch Permanentmagnete oder mit supraleitenden Erregerwicklungen erregten Maschinen.

Bei kleinen und mittleren Leistungen sind insbesondere langsam laufende Permanentmagnet erregte Motoren bereits im serienmäßigen industriellen Einsatz. Der Wirkungsgrad verbessert sich dabei um etwa 5% bei kleinen und 1% bei größeren Maschinen.

Der Einsatz von Supraleitern in elektrischen Maschinen befindet sich derzeit noch im Prototypen-Stadium, wobei bereits große technische Hürden genommen wurden. Unklar ist jedoch noch, inwieweit diese Technik auch außerhalb seltener Spezialanwendungen wirtschaftlich wird. Bild 39 veranschaulicht das Einsparpotential an Verlusten, welches bei einer bereits entwickelten 4-MVA-Maschine bei 3600rpm mehr als 2% der Gesamtleistung betragen kann, wodurch sie die Gesamtverluste mehr als halbieren.

Bild 39 Einzelverluste und Wirkungsgradwerte eines konventionellen Synchrongenerators (1FJ4 801) und des 4-MVA-HTS-Generators (HTS II)<sup>50</sup>



50 Frauenhofer J., Kaufhold M., Nerowski G., Nick W.: „Supraleitende Synchronmaschinen dem Weg zur Produktreife“, EMA Böblingen

## 5.5.2 Magnetische Werkstoffe

Die magnetischen Werkstoffe werden in weich- und hartmagnetische Werkstoffe unterschieden.

Die als gängiges Einteilungskriterium für magnetische Werkstoffe verwendete Koerzitivfeldstärke  $H_c$  ist diejenige Feldstärke, bei der die von einer Aufmagnetisierung zurückgebliebene Induktion (Polarisation) wieder verschwindet. In einer Hystereseschleife stellt  $H_c$  den Durchgang durch die H-Achse dar. Die Koerzitivfeldstärke hängt weniger vom Material selbst als mehr von Störungen im Material und der Abweichung von der Idealstruktur ab. Die Bandbreite bei  $H_c$  geht von 0,5 A/m bei extrem weichmagnetischen Werkstoffen bis zu ca. 2.000 kA/m bei den besten Dauermagneten. Die Grenze zwischen den beiden Materialgruppen liegt bei etwa 1.000 A/m.

### 5.5.2.1 Weichmagnetische Werkstoffe

Weichmagnetische Werkstoffe zeichnen sich durch leichte Magnetisierbarkeit, die sich in einer kleinen Koerzitivfeldstärke ausdrückt, aus. Bei den weichmagnetischen Werkstoffen erreicht man optimale Eigenschaften, wenn die elementaren Magnetsierungsprozesse, Wandverschiebungen und Drehprozesse möglichst leicht und ungehemmt ablaufen. Weichmagnetische Werkstoffe sind:

- kristalline Legierungen auf Basis Eisen, Nickel und Kobalt u. a. Zusätzen,
- amorphe und nanokristalline Legierungen auf Basis Eisen, Nickel und Kobalt u. a. Zusätzen,
- Pulverwerkstoffe,
- Weichferrite (NiZn, MnZn).

Im Transformatorenbau wird kornorientiertes Blech (KO-Blech), amorphes Band oder nicht kornorientiertes Blech (NO-Blech) eingesetzt. Bei den Elektromotoren wird hauptsächlich nicht kornorientiertes Blech eingesetzt. Der Einsatz der verschiedenen Materialien richtet sich stark nach den Eigenschaften und dem Einsatzgebiet.

Kornorientiertes Blech und amorphes Band weisen eine starke Abhängigkeit der Ummagnetisierungsverluste von der Magnetisierungsrichtung auf. Typische Verlustwerte sind:

- Längs 0,8 bis 1,5 W/kg bei 1,5 T und 50 Hz
- Quer 3,5 W/kg bei 1,5 T und 50 Hz

Das Maximum der Verluste liegt bei 55° bis 60°.

Daraus folgt, dass dieses Material präzise auf die Magnetisierungsrichtung ausgerichtet sein muss und dass der Aufbau damit in aller Regel aus segmentierten Blechschnitten hergestellt wird. In der Anwendung muss sichergestellt sein, dass kein magnetischer Quer-, Diagonal- oder Kreisfluss auftreten darf. Bei elektrischen Maschinen ist dies nur in Sonderkonstruktionen und meist nur in großen Maschinen zu gewährleisten.

Aus diesem Grund findet sich KO-Blech und amorphes Band meist in

Transformatoren. Weltweit werden häufig kleinere Transformatoren über relativ lange Zeiträume im Leerlauf betrieben, was eine spezielle Auslegung auf geringe Leerlaufverluste erfordert.

In aller Regel werden im Elektromaschinenbau NO-Bleche eingesetzt. Diese Bleche weisen Ummagnetisierungsverluste von 2 bis 10 W/kg bei Blechdicken zwischen 0,35 und 0,65 mm auf.

Mit abnehmender Blechdicke reduzieren sich die Wirbelstromverluste, aber gleichzeitig sinken der Füllfaktor und damit die Maschinenausnutzung. Bleche mit reduzierten Ummagnetisierungsverlusten weisen eine geringere Permeabilität auf, so dass der magnetische Kreis früher in die Sättigung getrieben wird und damit die Verluste wieder ansteigen. Seit einigen Jahren sind hochpermeable Bleche mit geringen Verlusten verfügbar.

Die Ummagnetisierungsverluste lassen sich im Wesentlichen über den Zusatz von Silizium oder ähnlichen Materialien (siehe oben) steuern. Es hat sich gezeigt, dass ein Si-Anteil von 1,8 bis 2% einen guten Kompromiss zwischen Verlusten und einer guten Stanzbarkeit darstellt. Mit zunehmendem Si-Anteil versprödet das Material und verhält sich ähnlich wie KO-Blech bzw. amorphes Band mit seinen relativ großen Kornstrukturen. Es führt beim Stanzen zu übermäßigen Verhärtungen und kann bei kleinen Stanzkörpern sogar an den Korngrenzen reißen. In den Verhärtungsbereichen steigen die Verluste durch Strukturstörungen deutlich an.

Die Hersteller von weichmagnetischen Werkstoffen beschäftigen sich hauptsächlich mit der Optimierung der Herstellung und der späteren Verarbeitbarkeit des Materials. Aus heutiger Sicht scheinen keine nennenswerten Verbesserungen auf Materialbasis in Sicht zu sein.

Im Elektromaschinenbau werden heute aus Kostengründen meist noch Materialien mit 8 bis 10 W/kg und Blechstärken von 0,65 mm verwendet. Ein Umstieg auf leistungsfähigere Materiale ist sinnvoll, macht in aller Regel aber Neuauslegungen der elektrischen Maschinen notwendig. Dieser Aufwand wird wegen der hohen Zusatzkosten in der Entwicklung und Fertigung nicht betrieben, da sie sich nicht oder nur bedingt an den Kunden weitergeben lassen.

### 5.5.2.2 Hartmagnetische Werkstoffe

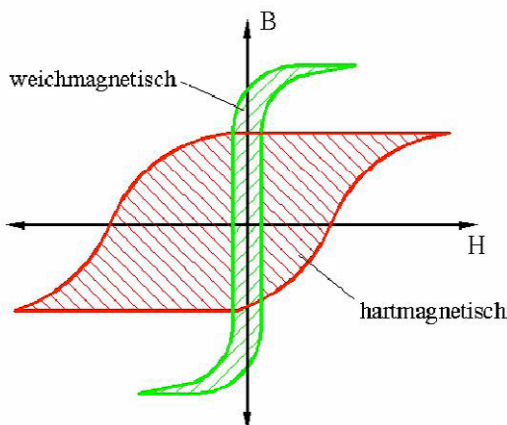
Für Dauermagnete ist die Energiedichte  $B \cdot H$  der wichtigste Parameter. Typische Werte liegen im Bereich von 20 bis 340 kJ/m<sup>3</sup>. Hartmagnetische Werkstoffe sind:

- Samarium-Kobalt  $\text{SmCo}_5$ ,  $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ ,
- Neodym-Eisen-Bor (NdFeB),
- AlNiCo-Legierungen,
- Hartferrite auf Basis von Barium oder Strontium,
- PtCo-Legierungen,
- CuNiFe- und CuNiCo-Legierungen,
- FeCoCr-Legierungen,

- martensitische Stähle,
- MnAlC-Legierungen.

Hartmagnetische Werkstoffe besitzen im Vergleich zu weichmagnetischen Materialien eine sehr breite Hystereseckennlinie.

Bild 40 Hystereseckennlinie magnetischer Werkstoffe



Die Magnetmaterialien werden bei der Herstellung häufig einem magnetischen Feld ausgesetzt, um eine Vorzugsmagnetisierung einzustellen (Anisotropie). Bei der Herstellung unterscheidet man zwischen kunststoffgebundenen und den Sintermaterialien.

Die ersten Magnetmaterialien im Elektromaschinenbau waren Ferrite und AlNiCo. AlNiCo-Magnete zeichnen sich durch eine hohe Temperaturstabilität aus (500°C), sie haben aber eine kleine Koerzitivfeldstärke und sind daher empfindlich bezüglich Entmagnetisierung durch äußere Felder. Ferrite sind nicht so temperaturstabil (200°C) und neigen bei tiefen Temperaturen zum Entmagnetisieren.

Diese Materialien sind so ausgereift, dass keine wesentlichen Verbesserungen zu erwarten sind. Seit den 1980er Jahren sind außerdem die wesentlich energiereicheren Seltenerd-Magnete verfügbar. Diese Materialien besitzen die hohe Flussdichte von AlNiCo verbunden mit einer sehr hohen Koerzitivfeldstärke. Die Temperaturstabilität liegt heute auf dem Niveau der Ferrite. Das in den 1980er Jahren eingesetzte Samarium-Kobalt (SmCo) ist heute meist durch das kostengünstigere und nochmals energiereichere Neodym-Eisen-Bor (NdFeB) abgelöst worden. Die gesinterten Magnete sind spröde und neigen zu Brüchen. Die Bearbeitung erfolgt durch Sägen, Erodieren und Schleifen. Seit einigen Jahren werden auch zunehmend kunststoffgebundene Seltenerd-Magnete eingesetzt, deren Energieprodukt oberhalb der Ferrit- und AlNiCo-Magnete liegt. Ein Vergleich der Energieprodukte ergibt:

■ Kunststoffgebundener Ferrit anisotrop	18kJ/m <sup>3</sup>
■ Ferrit gesintert anisotrop	25 bis 50 kJ/m <sup>3</sup>
■ AlNiCo 45/5	36 bis 50 kJ/m <sup>3</sup>
■ Kunststoffgebundenes SmCo	64 kJ/m <sup>3</sup>
■ Kunststoffgebundenes NdFeB	75 kJ/m <sup>3</sup>
■ SmCo gesintert	195 bis 300 kJ/m <sup>3</sup>
■ NdFeB gesintert	280 bis 420 kJ/m <sup>3</sup>

In den letzten Jahren zielte die Entwicklung der Magnetwerkstoffe im Wesentlichen auf die Steigerung des Energieproduktes und der Temperaturstabilität. Zusätzlich wurden die Herstellverfahren optimiert. Das aufgrund physikalischer Grenzen maximal erreichbare Energieprodukt liegt bei  $1000 \text{ kJ/m}^3$ ; die Grenze des technisch möglichen dürfte bei  $700 \text{ kJ/m}^3$  liegen. Die rasanten Verbesserungen der letzten Jahrzehnte sind dieser Grenze bereits recht nahe gekommen, so dass weitere gravierende Verbesserungen auf diesem Bereich nicht möglich sind.

### 5.5.2.3 Auswirkungen im Elektromaschinenbau

Im Bereich der Induktionsmotoren ist der Einsatz eines verlustärmeren Blechmaterials häufig nur in Verbindung mit optimierten Schnittgeometrien sinnvoll, da die bei diesem Maschinentyp notwendige Erregungsleistung von der Permeabilität und den magnetischen Querschnitten abhängt. Die angestrebte Minimierung der Ummagnetisierungsverluste kann unter Umständen zu einer Erhöhung der Gesamtverluste führen, da mit sinkenden spezifischen Verlusten i. Allg. auch die Magnetisierbarkeit des Blechmaterials sinkt. Dadurch erhöhen sich der zur Magnetisierung erforderliche Strom und die von ihm hervorgerufenen Stromwärmeverluste in der erregenden Wicklung.

Bei permanenterregten Motoren ist eine gute Abstimmung zwischen den magnetischen Materialien und den gewünschten Betriebsparametern Drehmoment und Drehzahl notwendig.

Aus heutiger Sicht sind entscheidende Verbesserungen der Energieeffizienz von Motoren durch Weiterentwicklung der Magnetmaterialien nicht in Sicht.

## 5.5.3 Magnetlagertechnik

### 5.5.3.1 Einleitung<sup>51 52</sup>

Bei Maschinen und Getrieben mit sehr hohen Drehzahlen, wie z.B. Turbomaschinen ergeben sich erhebliche Reibmomente bzw. Verluste (Bild 41), so dass Magnetlager in einigen Bereichen bereits Anwendung finden.

Magnetlager unterscheidet man in aktive Magnetlager mit elektromagnetischer Krafterzeugung, die geregelt betrieben werden, und in passive Magnetlager, die permanentmagnetisch funktionieren, oder auf der Basis passiv stabiler Hochtemperatur-Supraleiter arbeiten. Letztere befinden sich noch im Prototypenstadium.

Aktive Magnetlager werden vorzugsweise im Werkzeug- und Schwermaschinenbau eingesetzt, mit denen sich hohe anwendungsbedingte dynamische Störkräfte beherrschen lassen. Allerdings wird durch die

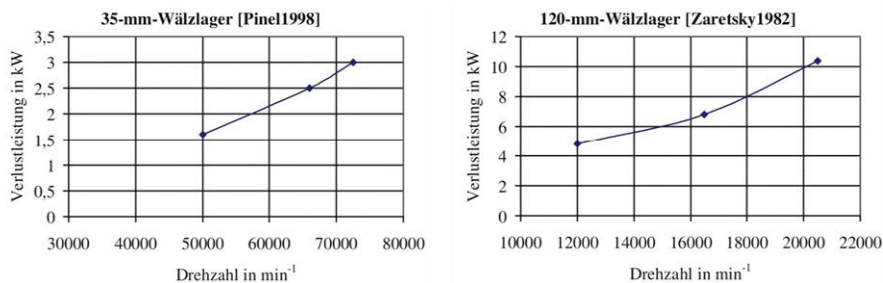
51 Pinel S. I., Signer H. R., Zaretsky E. V.: Design and operating characteristics of high-speed, small-bore, angular-contact ball bearings. NASA Technical Report NASA/TM-1998-206981, 1998

52 Zaretsky, E. V.: Advances in High-Speed Rolling-Element Bearings. NASA Technical Memorandum 82910, 1982



erforderlichen leistungselektronischen Stellglieder (Pulssteller) zusätzliche elektrische Energie verbraucht. Permanentmagnetische Lager erzeugen statische Tragkräfte ohne zusätzliche Energiezufuhr.

Bild 41 Messtechnische Untersuchungen an Wälzlagern



Nach Untersuchungen sind bei Umfangsgeschwindigkeiten im Lager von über 100 m/s die Verluste in einem Magnetlager um den Faktor 10 kleiner als in Wälzlagern und um den Faktor 100 kleiner als in Trockenreibungs-Gleitlagern. Erfahrungen mit magnetgelagerten Großmaschinen, bei denen die Kühlung des Magnetlagers erhebliche zusätzliche Lufttreibungsverluste verursacht, zeigen, dass die Reibungsverluste bei Maximaldrehzahl im Magnetlager praktisch gleichgroß sind wie in einem ölgeschmierten Gleitlager. Bei geringer werdender Drehzahl gibt sich ein wachsender Wirkungsgradvorteil zugunsten des Magnetlagers. Im Werkzeugmaschinenbau werden für hochtourige Anwendungen wie Schleifspindeln aerostatische Lager (Luftlager) eingesetzt. Die entstehende Reibleistung berechnet sich nach PETROFF mit:

$$P_{vr} = \frac{1}{c} \nu \pi^3 l_L D_L^3 n^2$$

c – radiales Lagerspiel,  $\nu$  – dynamische Viskosität,  $l_L$  – Lagerlänge,  $D_L$  – Lagerdurchmesser, n – Drehzahl

So kann in einem radialen Luftlager der Länge 150 mm, vom Durchmesser 30 mm und einem Lagerspiel von 12µm bei 90000 min<sup>-1</sup> mit einer Reibungsverlustleistung von immerhin 428 W gerechnet werden.

### 5.5.3.2 Bekannte Einzelanwendungen

#### a) Turbinen, Kompressoren

Waren es früher vorwiegend Nischenanwendungen wie Turbomolekularpumpen, Zentrifugen und Gasturbinen, rücken zunehmend breitere industrielle Anwendungen wie schnelldrehende Gaskompressoren und Dampfturbinen in den Fokus. Vielfach geht die Tendenz zu höherdrehenden Anlagen wie bei Turbokompressoren, die ausgerüstet mit bürstenlosen Synchronmotoren und Massiveisenrotor bis 65 MW und Induktionsmotoren bis 30 MW mit Drehzahlen bis zu 12000 /min betrieben werden. Daneben kommen noch weitere funktionelle Vorteile durch aktive Magnetlager zum Tragen, wie der Verzicht auf Schmierstoffe unter schwierigen Umgebungsbedingungen und das gefahrlose Durchlaufen kritischer Eigenmoden der Antriebswelle. Die größten bisher

realisierten aktiven Magnetlager tragen den über 9 t schweren Läufer eines 23-MW-Synchronmotors für Drehzahlen bis zu 6300 /min.

### **b) Werkzeugmaschinen**

Weitere Anwendungen wie in der Lineartechnik in Werkzeugmaschinen könnten neben höheren linearen Geschwindigkeiten bis zu 300 m/s sowie Beschleunigungen mit mehr als 5g bei dem Einsatz von Linear- und Magnetlagertechnik für geringeren Abrieb und reduzierte Wärmeentwicklung sorgen sowie den Wegfall von Schmiermitteln mit sich bringen.

### **c) Speicher**

Hochtemperatur-Supraleiter-Magnetlager oder permanenterregte (passive) Magnetlager lassen sich vorteilhaft in maschinenintegrierte Schwungmassenspeicher aus Faserverbundwerkstoffen einbauen. Damit ließen sich nicht nur Spannungsunterbrechungen für kurze Zeit überbrücken sondern auch prozessbedingte Überschussenergien zwischenspeichern und in kürzester Zeit (20 ms) wieder dem Prozess zur Verfügung stellen. Ferner sind erste praktische Anwendungen in speziellen HTS-Generatoren für Schiffe bekannt.

### **d) Spinntechnik**

Aus der Spinntechnik sind Innovationen zu Rotorspinnmaschinen für Industriegarne und Chemiefasern bekannt, die bei Übergang auf sogenannte Highspeed-Garne eine Produktivitätssteigerung um 40% versprechen. Die aktive Magnetlagerung von Rotoren bringt hier gegenüber einer Luftlagerung eine deutliche Energieeinsparung. Textilspindeln erfordern Drehzahlen zwischen 20000 und 80000 /min und werden zunehmend auch durch Synchronmotoren angetrieben. Hierbei unterstützen Permanentmagnetlager die erforderliche Lagerfunktion ergänzt durch herkömmliche Lagertechnik, da permanentmagnetische Lager allein nicht alle Freiheitsgrade zur Lagerkraftbildung erfüllen können.

### **e) Motorspindeln zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung**

Moderne Motorspindeln zum Drehen, Fräsen oder Schleifen, ausgeführt in der Regel als Direktantriebe (High-Speed), sind mit mehr als 60 Bauteilen sehr komplexe mechatronische Systeme, die ihre Vorteile insbesondere bei hohen Drehzahlen ausspielen. Übliche Stellbereiche sind für Fräsmaschinen in Bearbeitungszentren bis 24000 /min bei 40 kW, für Hochleistungsfräsen bis 40000 /min bei 100 kW, für Drehmaschinen bis 10000 / min bei 40 kW, für Schleifmaschinen bis 60000 /min bei 5 bis 30 kW. Mit Ausnahme von Frässpindeln im Werkzeug und Formenbau und bei der Leistungserspannung, wo Induktionsmotoren dominieren, findet ein Wechsel von der Induktions- zur Synchronmaschine statt. Der erreichbare Vorteil durch Einsatz von Synchronmotoren lässt

sich steigern durch Einsatz von aktiven Magnetlagern. wälzkörpergelagerte Spindeln, die auch als Hybridlager mit Rollelementen aus Keramik ausgeführt werden, können Reibungsverluste von 12 bis 40% der Gesamtverluste der Spindel verursachen. Problematisch kann dann die lokale Erwärmung der Lager werden, da eine Kühlung von Welle und Rotor schwierig ist.

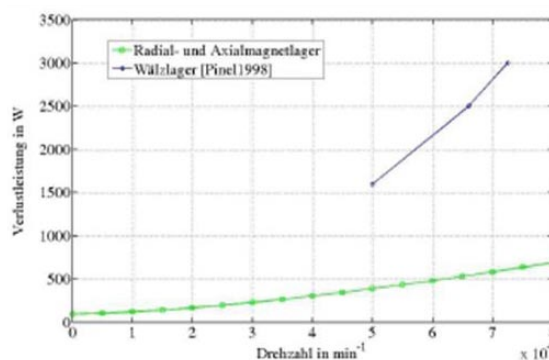
Vereinzelt anzutreffen sind bereits magnetgelagerte Schleifspindeln für höchste Präzisionsanforderungen, die aufgrund der erreichbaren Drehzahlen eine leistungsärmere Hochgeschwindigkeitsbearbeitung in der Fertigungstechnik zulassen.

### 5.5.3.3 Perspektiven und Grenzen der Technologie

#### a) Aktive Magnetlager

Beim Einsatz geregelter und damit aktiver Magnetlager ist die Anwendung von rauscharmen Mess- und Regelmethode sowie leistungsarmen Stellgliedern für die Magnetspulen von immenser Bedeutung für die vorteilhaftere Energiebilanz gegenüber klassischen Lagern. Ein besonderes Problem stellen bei Rotordrehzahlen über 20 000 /min die stärker ins Gewicht fallenden Ummagnetisierungs- und Wirbelstromverluste dar. Sie entwickeln Bremsmomente, die ähnlich wie mechanische Reibung zur Wirkungsgradminderung beitragen. Man setzt dort gern homopolare Magnetlager, die eine geringere Ummagnetisierung des Rotoreisens gegenüber heteropolaren Anordnungen aufzuweisen haben. Bei großen Wellendurchmessern können die Wirbelstromverluste dadurch stark reduziert werden, dass im Bereich des Magnetlagers ein separates Blechpaket auf der Welle angeordnet wird.

Bild 42 Vergleich von Lagerverlusten bei Wälzlager und aktiven Magnetlager für 35 mm Wellendurchmesser



Bei hohen Ummagnetisierungsfrequenzen (hohe Drehzahl) und in Abhängigkeit von der Eindringtiefe des magnetischen Feldes wird die Tragkraft abhängig von der Drehzahl. Dies wirkt sich besonders nachteilig bei massivem Rotor aus, der sich durch eine hohe mechanische Festigkeit auszeichnet und daher für Highspeed-Anwendungen geeignet ist. Hier sind in Zukunft weitere konstruktive Verbesserungen (z.B. über die Gestaltung der Ausgleichsringe und der Erregerpole) erforderlich sowie Materialfragen zu klären. Bei Normmotoren beträgt der Anteil der Reibungsverluste an den gesamten mechanischen Verlusten bis zu 30 bis 50%.

### b) HTSL-Magnetlager

Besonders verlustarme Magnetlager lassen sich durch Anwendung der HTSL-Technologie aufbauen. Die Eigenverluste setzen sich zusammen aus den Hystereseverlusten (s. Bild 43) den Wirbelstromverlusten sowie den Kühlverlusten, die zur Kühlung des Kälteaggregats aufgewendet werden müssen. Hinzu kommen die Luftreibungsverluste.

Bild 43 Hystereseverluste in HTSL-Lagern nach<sup>53</sup>

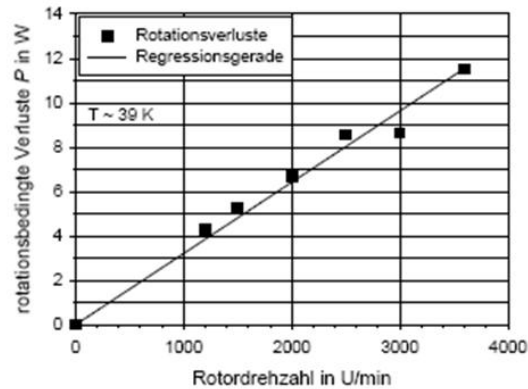
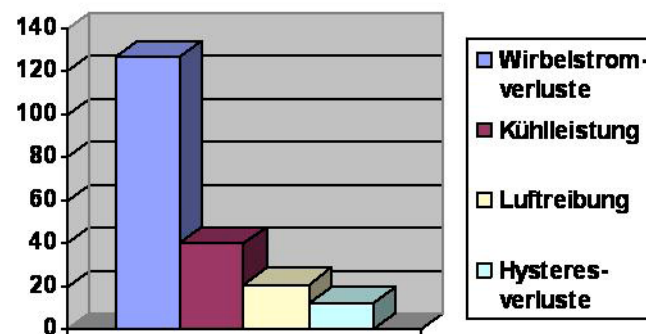


Bild 44 Verlustaufteilung in HTSL-Magnetlagern nach [49] mit 50 mm Wellendurchmesser und 5 kN Tragkraft



Eine Aufteilung der Verluste im Bemessungspunkt (3600 min<sup>-1</sup>) zeigt Bild 44. Mit einer Gesamtverlustleistung von 200 W ist das für Wellendurchmesser von 50 mm bei einer Tragkraft von 5 kN ausgelegte HTSL-Magnetlager um den Faktor 10 verlustärmer als vergleichbare Ölgleitlager. Einen vergleichsweise hohen Verlustanteil machen die Wirbelstromverluste aus.

### 5.5.4 SiC-Technik

Die auf dem Werkstoff Silizium basierenden gängigen Halbleiterbauelemente erlauben Sperrschicht-Dauertemperaturen von 125°C, 150°C und 175°C. Neue Leistungshalbleiter aus SiC (Siliziumkarbid) ermöglichen wegen des großen Bandabstandes zwischen Valenz- und Leitungsband theoretisch einen stabilen Betrieb bis zu 600°C und darüber.

<sup>53</sup> Kummeth P.; Nick W.; Nerowski G.; Neumüller, H.W.: Passives HTS-Magnetlager mit 5 kN radialer Tragkraft für 4 MVA-HTS-Generator. VDI-Berichte 1963, 2006 S. 617 – 628

Die hohe kritische Feldstärke in SiC erlaubt kurze Driftzonenweiten und damit geringe Durchlassverluste. Dieser Umstand macht es möglich, unipolare Bauelemente mit geringsten Schaltverlusten für Sperrspannungsklassen weit über 1 kV effektiv zu nutzen. Die heute verfügbaren Anschluss-, Montage- und Isolationstechniken sowie die dafür benötigten Materialien sind jedoch nur bis etwa 200°C spezifiziert. Um das Potential von SiC bezüglich Hochtemperaturanwendungen nutzen zu können, müssen neue Materialien erforscht und zugehörige Anschluss- und Montagetechniken entwickelt werden.

Der für Sperrspannungen ab 800 V bis etwa 6,5 kV geeignetste Silizium-Leistungs-Transistor, der IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), konnte hinsichtlich der Durchlass- und Schaltverluste über drei Bauelement-Generationen hinweg stetig verbessert werden. Im Bereich unterhalb von 800 V sind durch Anwendung des Kompensationsprinzips die statischen Verluste des MOSFETs (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) drastisch gesenkt worden. Die Fortsetzung dieser Verlustminderung wird jedoch bei Silizium-Bauelementen mittelfristig an Grenzen stoßen. In hartschaltenden Umrichtern verursacht der Rückstrom von Si-Leistungsdioden einen erheblichen Anteil der Einschaltverluste der IGBTs. Trotz hochentwickelter Technologie der Si-Dioden ist eine grundlegende Verbesserung nur durch den Übergang zu Leistungshalbleitern mit hohem Bandabstand wie SiC zu erwarten, so dass weltweit seit einigen Jahren intensiv das Gebiet der SiC-Halbleiter erforscht wird.

#### 5.5.4.1 Stand der Technik / Stand der Forschung

In Deutschland hat sich eine sehr erfolgreiche industrielle Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet entwickelt. In 2002 konnte Infineon Technologies die weltweit ersten SiC-Schottky-Leistungsdioden in den Markt einführen. Für diese Dioden ist besonders im Bereich von Schaltanzweilanzwendungen erhebliches Marktpotential vorhanden. Für Spannungen ab 4,5 kV bis > 20 kV werden bipolare SiC-Dioden untersucht, deren zukünftiger Einsatz für Antriebsumrichter hoher Leistung völlig neue Perspektiven bezüglich Verlusten und Schaltfrequenz eröffnet. Im Jahr 2006 gelang es dem führenden Hersteller von SiC-Substraten, dem amerikanischen Unternehmen Cree, sowie der in Japan ansässigen Kansai Electric, einen 110-kVA-Spannungszwischenkreiswechsellrichter vollständig in SiC zu realisieren. Basis ist ein für 4,5 kV und 100 A entwickelter GTO, der sogenannte SiC-GT (SiC Commutated Gate turn-off Thyristor). Grundlage für SiC-Leistungshalbleiter dieser Stromtragfähigkeit ist eine drastische Reduktion der Defektdichte der Substratmaterialien sowie der Prozesse bei der Bauelementherstellung. Die 8 x 8 mm großen SiC-GTs schalten ohne Snubber-Netzwerke und erlauben etwa zehnfach höhere Schaltgeschwindigkeiten als Si GTOs. Die Pulsfrequenz beträgt 2 kHz. Als Freilaufdioden kommen 6 x 6 mm große SiC-PiN-Dioden zum Einsatz. Neue Isolationsmaterialien erlau-

ben Sperrschichttemperaturen bis zu 300°C. Im Vergleich zu Si-basierten Wechselrichtern dieser Leistungsklasse wird durch konsequenten Einsatz von SiC eine Verlustreduktion von mehr als 50% in Aussicht gestellt.

Messungen haben gezeigt, dass beim Einschalten von IGBTs die Summe der Verluste in Diode und IGBT halbiert wird, wenn anstatt der Si-PiN-Dioden SiC-Schottky-Dioden eingesetzt werden. Durch intensive Nutzung wesentlich höherer Schaltfrequenzen als derzeit üblich müssen die dadurch erzielten Systemvorteile die höheren SiC-Bauelemente-Kosten kompensieren. Seit kurzem werden erstmalig in einem kommerziellen Umrichter (Siemens) SiC-Schottky-Dioden eingesetzt. Dadurch kann die Pulsfrequenz auf 16 kHz angehoben und ein Sinus-Ausgangsfilter in den Umrichter integriert werden.

Die positiven Eigenschaften von SiC werden bei steuerbaren Schaltelementen in besonderer Weise sichtbar, da SiC-Bauelemente schnelles Schalten mit vernachlässigbaren Schaltverlusten bei gleichzeitig niedrigen statischen Verlusten ermöglichen. Seit 2003 sind erste Realisierungen eines hartschaltenden Wechselrichters mit JFETs (Junction Field Effect Transistors) bekannt. Die derzeit noch ausschließlich als Muster erhältlichen JFETs sind bei fehlendem Ansteuersignal leitend (normally-on). Die Kombination eines SiC-JFETs mit einem Nieder-volt-Si-MOSFET als sogenannter Kaskadenschalter erlaubt jedoch ein herkömmliches normally-off-Verhalten. Im Fall des Kaskadenschalters begrenzt allerdings der Si-MOSFET die Einsatztemperatur eines solchen Bauelements. Neuartige Treiberkonzepte sind notwendig, um den SiC-JFET direkt und sicher anzusteuern. Neben dem JFET ist auch der Bipolartransistor in SiC realisiert worden. Er erlaubt geringste statische Verluste, hat jedoch bis heute keine akzeptablen Stromverstärkungen aufzuweisen. Darüber hinaus ist fraglich, ob sich ein stromgesteuertes Bauelement gegen feldgesteuerte Typen durchsetzen wird.

MOS-gesteuerte SiC-Transistoren, wie z.B. der MOSFET oder der IGBT, leiden gegenwärtig noch an zu hohen Einschaltwiderständen im Kanalgebiet. Die thermische Stabilität des Gateoxids setzt hinsichtlich möglicher Einsatztemperaturen solcher Bauelemente ebenfalls Grenzen im Bereich der heute üblichen Werte.

#### 5.5.4.2 Potentiale und Perspektiven

Forschungsergebnisse an Universitäten und Forschungseinrichtungen haben ergeben, dass der Einsatz neuartiger SiC-Bauelemente in Umrichtern die Reduktion der Verluste erlaubt, so dass der Kühlaufwand maßgeblich verringert werden kann und sich eine besondere Eignung für Kompaktstromrichter ergibt. Aus den Vergleichen verschiedener Bauelementekombinationen zeigen derzeit die als Labormuster verfügbaren SiC-JFETs die besten Resultate, deren Verluste in anwendungsnaher Schaltung experimentell ermittelt und für den Gesamtumrichter hochgerechnet wurden. Dabei ergeben sich für einen 2 kVA-

Umrichter Verlusteinsparungen von 38% bzw. 71% bei Pulsfrequenzen von 5 kHz bzw. 50 kHz. Hohe Pulsfrequenzen erlauben zudem eine signifikante Baugrößenreduktion von Filtern.

Der Vergleich des SiC-JFETs mit schnellsten IGBTs von Infineon ergab pulsfrequenzabhängige Verlusteinsparungen von 23% (5 kHz) bzw. 53% (50 kHz). Weiterhin konnte das enorme Potential der SiC-Schottky-Diode als Freilaufdiode für den Si-IGBT deutlich gemacht werden. Für identische Bedingungen konnten die pulsfrequenzabhängigen Umrichterverluste um 10% (5 kHz) bzw. 38% (50 kHz) reduziert werden. Die Kombination von herkömmlichen Transistoren (normally-off-Verhalten und konventionelle Gate-Ansteuertechnik) mit SiC-Freilauf-Dioden erscheint mittelfristig als das attraktivste Konzept für energieeffiziente Stromrichter der unteren bis mittleren Leistungsklasse. Für Umrichter mit SiC-GTs wird durch konsequenten Einsatz von SiC eine Verlustreduktion von mehr als 50% prognostiziert im Vergleich zu Si-basierten Wechselrichtern dieser Leistungsklasse (150 kVA).

#### 5.5.4.3 Technologiedefizite

Die in mehrfacher Hinsicht verbesserten Eigenschaften von SiC-Leistungsbaulementen gegenüber bisher eingesetzten Si-Baulementen wie höhere Sperrspannung, höhere Sperrschichttemperaturen, verbessertes Schaltverhalten oder geringere Verlustleistung stellen an die Systemtechnik gänzlich neue Anforderungen. Dies sind zum einen im Hochtemperaturbereich Aufbau- und Verbindungstechniken, Passivbauelemente (Kondensatoren und Magnetbauelemente), Schaltkreise, Sensoren und Mikroprozessoren und zum anderen im Hochfrequenzbereich Verbindungstechniken, Treiber, die Beherrschung von Parasitärereffekten und EMV-Filter.

## 6 Entwicklung des Stromverbrauchs in Deutschland bis 2015 mit Ausblick auf 2025

Ausgangspunkt für die Abschätzung des zukünftigen Stromverbrauchs in Deutschland sind die Daten der Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen<sup>54</sup>. Auf der Grundlage dieser Daten wurde der Trend der Vergangenheit für jeden Verbrauchssektor und darin für jedes Anwendungsgebiet nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate berechnet.

Es wird unterstellt, dass in diesem Trend sowohl Volumeneffekte (Zu- bzw. Abnahmen der Menge) als auch Effizienzeffekte enthalten sind – die Steigerung der Energieeffizienz ist kein neues Thema; schon in der Vergangenheit wurde die Energieeffizienz bei Geräten und Prozessen kontinuierlich verbessert. Von diesem Trend ausgehend wurden die Veränderungen in Bezug auf die Mengenentwicklung bis 2015 bzw. 2025 abgeschätzt (Beispiel: bis 2015 3 PCs pro Haushalt statt heute 2 PCs, also eine Steigerung um 50%). Neben der Mengenentwicklung wurde die Entwicklung der Stromeffizienz der jeweiligen Anwendungsgebiete

Tab. 18 Mengen- und Effizienzfaktoren für die Stromverbrauchsentwicklung in den verschiedenen Sektoren und Anwendungsgebieten

Sektor/ Anwendung	Verbrauch in 2004 in TWh	Heutiger Trend der Strom- verbrauchs- steigerung pro Jahr	Änd.der Mengen zusätzlich zum Trend bis 2015	Änd.der Mengen zusätzlich zum Trend von 2015 bis 2025	Verbesserung der Effizienz zusätzlich zum Trend bis 2015	Verbesserung der Effizienz zusätzlich zum Trend von 2015 bis 2025
<b>Industrie</b>	<b>214</b>	<b>1,4%</b>				
Prozesswärme	56	2,1%	3,0%	5,0%	4,0%	8,0%
Raumwärme	1	0,0%	---	---	---	---
Mech. Energie	136	1,2%	0,4%	0,4%	5,0%	16,0%
Beleuchtung	11	1,3%	---	---	40,0%	10,0%
IuK	9	1,4%	---	---	20,0%	10,0%
<b>Verkehr</b>	<b>16</b>	<b>0,3%</b>				
Prozesswärme	0	0,0%	---	---	---	---
Raumwärme	1	0,0%	---	---	---	---
Mech. Energie	14	0,3%	---	---	5,0%	5,0%
Beleuchtung	1	0,0%	---	---	40,0%	10,0%
IuK	1	0,0%	0,0%	0,0%	20,0%	10,0%
<b>Haushalt</b>	<b>140</b>	<b>0,9%</b>				
Prozesswärme	49	1,7%	---	---	10,0%	10,0%
Raumwärme	24	-1,5%	19,2%	19,2%	---	---
Mech. Energie	41	1,7%	28,9%	28,9%	10,0%	25,0%
Beleuchtung	11	0,6%	---	---	40,0%	10,0%
IuK	15	0,3%	15,0%	15,0%	20,0%	10,0%
<b>GHD</b>	<b>136</b>	<b>3,1%</b>				
Prozesswärme	33	4,0%	3,0%	5,0%	2,0%	4,0%
Raumwärme	11	-0,7%	-5,0%	-5,0%	5,0%	5,0%
Mech. Energie	56	4,4%	---	---	5,0%	15,0%
Beleuchtung	26	2,3%	---	---	40,0%	10,0%
IuK	11	0,9%	10,0%	10,0%	20,0%	10,0%

54 Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Berlin, 2007



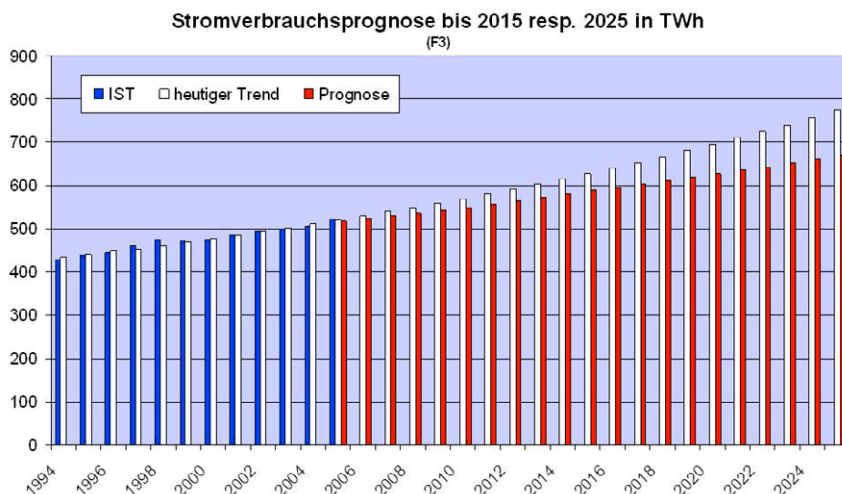
bis 2015 bzw. 2025 in jedem Sektor abgeschätzt. Rechnerisch wurden die abgeschätzten 10-Jahres-Änderungen in durchschnittliche jährliche Veränderungsrate umgerechnet.

Es wurde auch berücksichtigt, dass Substitutionen stattfinden, die Einfluss auf den Stromverbrauch haben (Beispiel: eine Öl-, Gas- oder Stromheizung wird durch eine Wärmepumpe ersetzt, die einen elektrischen Antrieb benötigt). Auch erkennbare neue Anwendungen wurden in die Prognose einbezogen. Als Beispiel seien Klimageräte genannt.

Unter Einbezug diese Aspekte wurde Tabelle 18 aufgestellt. Sie enthält die von den Fachleuten prognostizierten Veränderungen in Bezug auf Menge, Effizienz, Substitution und Neuanwendung. Auf dieser Faktorenbasis werden die Verläufe des Stromverbrauchs in den einzelnen Anwendungsgebieten in jedem Sektor bis 2015 bzw. 2025 errechnet. Da die Steigerungsraten von 2005 bis 2015 und dann von 2015 bis 2025 in den meisten Fällen unterschiedlich angenommen wurden, ergeben sich in den Übergangspunkten „Knicke“. In Wirklichkeit sind diese Übergänge natürlich gleichförmiger. Auf eine Verstetigung der Steigungen wurde verzichtet, da sie keine wesentlich neuen Erkenntnisse bringt. Die Sektorenwerte ergeben sich aus der Addition der Werte der zugehörigen Anwendungsgebiete. Die Addition aller Sektoren ergibt den Gesamtstromverbrauch bis 2015 bzw. 2025.

Bild 45 zeigt die Prognose für den Stromverbrauch in Deutschland bis zum Jahr 2015 und einen Ausblick bis 2025. Sie entsteht aus der Addition der Verläufe des Stromverbrauchs der vier Sektoren. Die rote Kurve ist die Fortsetzung des heutigen Trends bis in das Zieljahr, der blaue Verlauf ist die Prognose. Obgleich in den verschiedenen Anwendungsbereichen große Effizienzgewinne abgeschätzt wurden, zeigt sich aber nur ein relativ geringer Rückgang gegenüber dem Verlauf entsprechend dem heutigen Trend. Der Unterschied beträgt im Zieljahr 2015 nur 2,5%

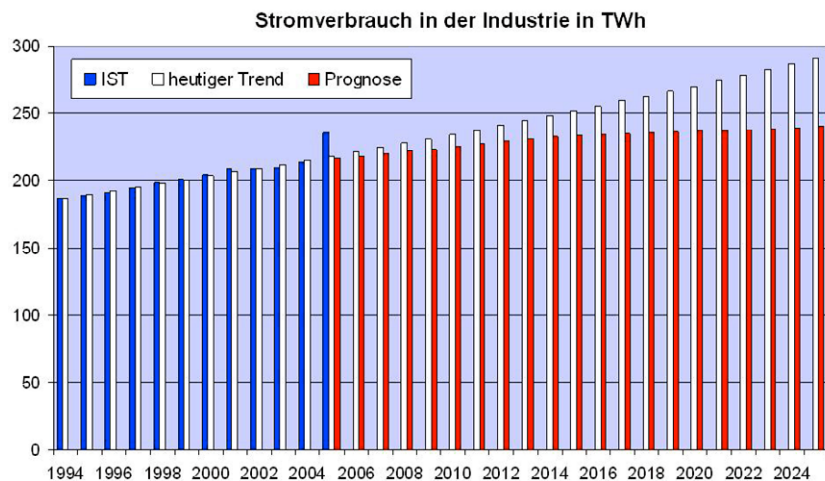
Bild 45 Prognose der Stromverbrauchsentwicklung bis 2015 mit Ausblick auf 2025



und im Perspektivjahr 2025 auch nur 5,4%. Die Ursache liegt in der angenommenen Mengensteigerung, in Substitutionseffekten und in neuen Stromanwendungen. Ohne diese Effekte wäre der Unterschied bis 2015 ca. 9% und bis 2025 gut 15%. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die möglichen Effizienzverbesserungen oft erst mit neuen Geräten und Prozessen erreicht werden. Diese werden aber oft erst über einen Zeitraum von mehreren Jahrzehnten ausgetauscht. Eine Beschleunigung ist nur über entsprechende Anreize oder regulatorische Maßnahmen zu erzielen – mehr dazu im Kapitel Handlungsbedarf.

Die Prognose für den zu erwartenden Stromverlauf im Sektor Industrie (Bild 46) weicht insbesondere im Zeitraum 2015-2025 von der Prognose für den Gesamtstromverlauf ab, da nach einer Vorlaufphase die Effizienzgewinne bei den optimierten Gesamtanlagen und Prozessen zum Tragen kommen. Das gilt insbesondere für die Bereiche der Prozesswärme und der Antriebe, da oft komplette Anlagen umgebaut werden müssen, was erst mit einem Generationswechsel der Produktion erfolgt.

Bild 46 Prognose des Stromverbrauchs in der Industrie bis 2015 mit Ausblick auf 2025

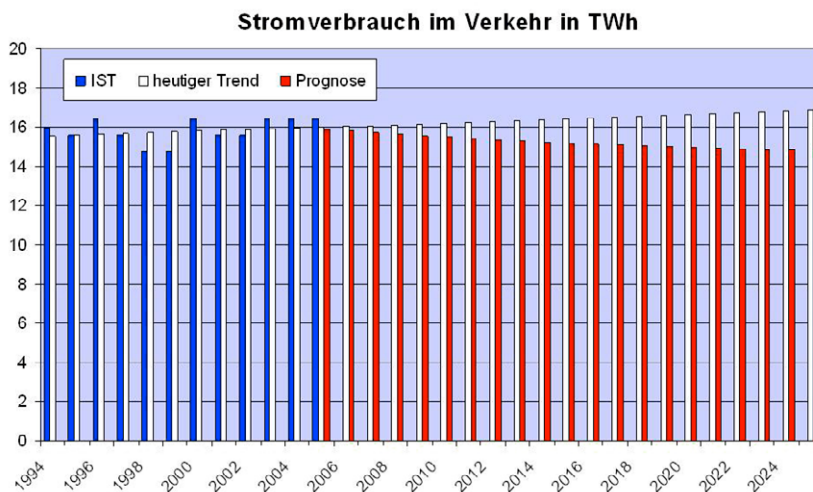


Der Stromverbrauch im Sektor Verkehr ist mit 3% des Gesamtstromverbrauchs relativ klein und wird von der Versorgung des Bahnbetriebs geprägt. Da der Verbrauch über das letzte Jahrzehnt – von wetterbedingten Schwankungen abgesehen – eher stagnierte, macht sich in der Prognose kein Mengeneffekt bemerkbar (s. Bild 47). Jedoch sorgt eine Verbesserung der Stromeffizienz für einen kontinuierlichen Rückgang des Verbrauchs in den beiden nächsten Jahrzehnten.

Während im Bereich der Haushalte der Gesamtenergieverbrauch in den nächsten Jahren durch bessere Gebäudedämmung und optimierte Heizungssysteme stark rückläufig sein wird, sehen wir im Stromverbrauch sogar einen beschleunigten Anstieg trotz Effizienzgewinnen bei den verwendeten Geräten und Anlagen (s. Bild ). Die Ursache liegt zum einen in einem Anstieg der Anzahl der eingesetzten Geräte (z.B. im Klima- und Lüftungsbereich oder auch im Informations- und Kommuni-

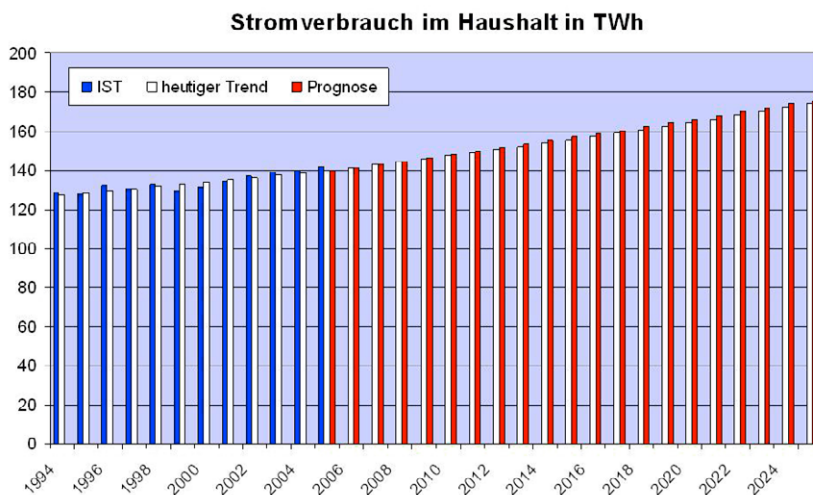
kationsbereich) und zum anderen in Substitutionen von Energieträgern im Heizungsbereich. Öl- und Gas werden in den Heizungssystemen durch erneuerbare Energien substituiert, wie

Bild 47 Prognose des Stromverbrauchs im Verkehr bis 2015 mit Ausblick auf 2025



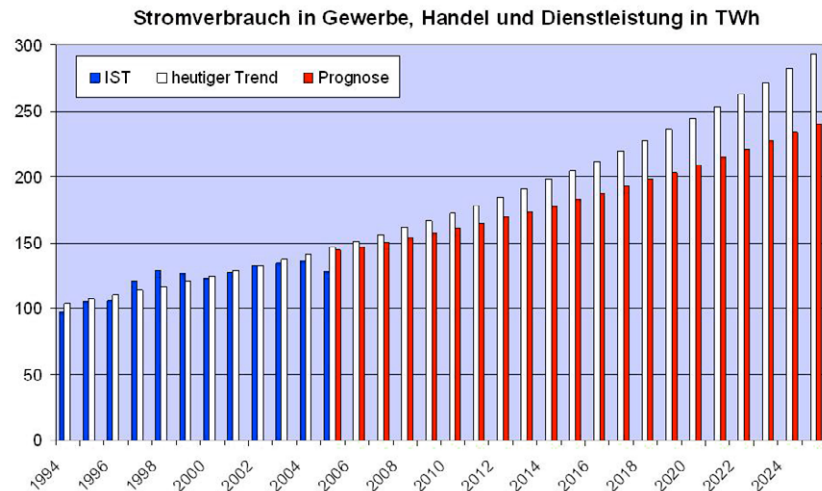
z.B. durch Wärme aus der Umgebung oder dem Erdreich durch den Einsatz von Wärmepumpen. Diese müssen elektrisch angetrieben werden, was zu einem Anstieg des Stromverbrauchs führt bei gleichzeitiger Senkung des Primärenergieverbrauchs.

Bild 48 Prognose des Stromverbrauchs im Haushalt bis 2015 mit Ausblick auf 2025



Der Verbrauchssektor Gewerbe, Handel und Dienstleistung schließlich war schon in der Vergangenheit der Sektor, der die höchsten Zuwachsraten im Stromverbrauch hatte. Auch wenn sich der bisherige Mengeneffekt fortsetzen wird – wir sehen einen weiteren Ausbau dieses Sektors in den nächsten Jahrzehnten –, wird sich der Anstieg des Stromverbrauchs durch Effizienzgewinne deutlich reduzieren (s. Bild 49). Die Wachstumsrate von über 3% pro Jahr wird auf jährlich ca. 2% zurückgehen.

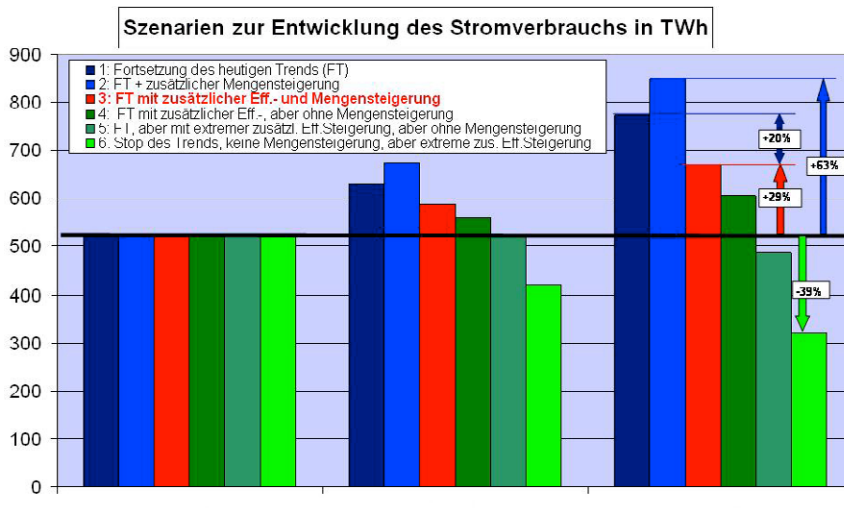
Bild 49 Prognose des Stromverbrauchs im Gewerbe bis 2015 mit Ausblick auf 2025



Basierend auf der oben beschriebenen wahrscheinlichen Entwicklung des Stromverbrauchs wurden einige „Extremfälle“ durchgerechnet, um die Grenzen abzustecken und den sehr wahrscheinlichen Fall („very likely case“, Bild 50, Fall 3) einzuordnen. In der einen Extremrichtung wurde die Verbrauchsentwicklung unter der Annahme berechnet, dass sich der derzeitige Trend fortsetzt, keine zusätzlichen Effizienzmaßnahmen eingeleitet werden und weitere neue Stromanwendungen dazukommen (Bild 50, Fall 2). Im Kontrast dazu wurde ein zweites Szenario berechnet, bei dem der derzeitige Trend im Stromverbrauchswachstum kurzfristig gestoppt wird, d. h. das Mengenwachstum zu Null angenommen wird, die Effizienzverbesserungen kurzfristig auf das aus heutiger Sicht technisch maximal erreichbare Maß gesteigert werden und keine neuen Stromanwendungen in den nächsten 2 Jahrzehnten dazukommen (Bild 50, Fall 6).

Im ersten Fall müssten wir mit einem Anwachsen des Stromverbrauchs bis 2025 um über 60 % bezogen auf das heutige Niveau rechnen, im anderen Fall mit einer Verringerung des Stromverbrauchs um 39%, wie dem Bild 50 zu entnehmen ist. Der in dieser Studie beschriebene und als sehr wahrscheinlich angesehene Fall 3 führt bei aus unserer Sicht realistischen Annahmen der Mengensteigerung und zusätzlicher Effizienzsteigerung zu einer effektiven Zunahme des Verbrauchs um knapp 30% bis 2025. Gegenüber der Fortsetzung des heutigen Trends (Fall 1), der ja bereits die bisherigen Effizienzsteigerungen fortschreibt, ist das immerhin eine relative Reduzierung des Stromverbrauchs um 20%.

Bild 50 Szenarien der Entwicklung des Stromverbrauchs



Interessant sind die beiden Szenarien 5 und 6 mit einer Stromverbrauchsreduktion um 7% bzw. 39% bis 2025, weil die Vorstellungen der Bundesregierung zur Reduktion des Stromverbrauchs gerade zwischen diesen beiden Szenarien liegen. Das hieße aber, dass die Regierung mit außerordentlichen stringenten Massnahmen agieren muss, um die entsprechenden Einsparungen zu erreichen. Dies wäre sehr wahrscheinlich ohne wesentliche marktpolitische Eingriffe praktisch nicht zu realisieren.

# 7 Handlungsbedarf

## 7.1 Maßnahmen zur Energieeinsparung

Die Bundesregierung hat im Rahmen der Brüsseler EU-Beschlüsse vom 9.3.2007 und der Koalitionsvereinbarung von Meseberg vom 23.8.2007 die Ziele gesetzt, die CO<sub>2</sub>-Emissionen bis 2020 um 40% gegenüber dem Wert von 1990 zu reduzieren, den Stromverbrauch um 20% zu senken und dabei die Energieeffizienz um 20% zu steigern. Um diese Ziele zu erreichen, müssen wie im Kapitel 6 aufgezeigt außerordentliche Anstrengungen unternommen werden:

1. Erhebliche Verbesserung der Stromeffizienz der energieverbrauchenden Geräte, Anlagen und Prozesse
2. Gleichzeitig unmittelbare Einsparung des Stromverbrauchs in Gewerbe, Handel & Dienstleistung, Industrie und Haushalt, also nicht nur über Stromeffizienz
3. Schaffung von Anreizen
4. Aufklärung der Verbraucher und dabei Veränderung von Gewohnheiten und Verhalten
5. im Falle, dass die Ziele auf freiwilliger Basis nicht erreicht werden: möglicherweise in bestimmten Fällen gesetzliche Vorgaben

Alle Maßnahmen sollten in kurz- und mittelfristig wirkende eingeteilt werden, um schnell die „low hanging fruits“ zu ernten. Es müssen zunächst freiwillige und marktorientierte Maßnahmen initiiert werden, die die Verbraucher belohnen. Auch könnte über die energiesparenden Maßnahmen ggf. eine Berichtspflicht erlassen werden. Ordnungspolitische Maßnahmen sind aber erst dann zu treffen, wenn der Markt und die Freiwilligkeit nicht den gewünschten Erfolg zeigen.

Das können u.a. Vorgaben für Mindestwirkungsgrade/ Maximalverbräuche sein, aber auch eine Modernisierungspflicht. Alternativ kann durch entsprechende progressive Besteuerung des Verbrauchs der gleiche Effekt erreicht werden. Auch die flächendeckende Einführung eines Energiepasses für stromsparende Geräte und Anlagen mit Angabe der wesentlichen Verbrauchskennziffern kann einen wichtigen Beitrag zur Bewusstseinsveränderung liefern.

Durch Benchmarking sind die Ziele regelmäßig zu überprüfen und ggf. nachzjustieren. Es sollte mit kleineren, aber konsequenten Schritten begonnen werden, die dann kontinuierlich gesteigert werden.

Der Staat muss in seinem Bereich mit einer Vorreiterrolle vorangehen und die entsprechenden Investitionen anstoßen, um die Energieeffizienz und die unmittelbare Einsparung von Energie in seinem Verantwortungsbereichen massiv zu steigern.

Generell gilt, dass der Energieverbrauch überall dort, wo das einfach möglich ist, visualisiert wird. Der Verbraucher muss stets den durch ihn verursachten Verbrauch vor Augen haben. Das gilt sowohl für Gesamtprozesse als auch für Teilprozesse (z.B. den Gesamtheizungsverbrauch

ebenso wie den Verbrauch in dem Raum, in dem man sich gerade aufhält).

In öffentlichen Einrichtungen, Industrie- und Gewerbeunternehmen sollte ab einer bestimmten Größe ein Energiebeauftragter eingeführt werden (ähnlich wie ein Sicherheitsbeauftragter). Gegebenenfalls können beide Funktionen in Personalunion wahrgenommen werden, um den Aufwand zu begrenzen. Der Energiebeauftragte hat die Aufgabe, die Energieflüsse zu registrieren, zu analysieren und zu optimieren. Als wichtigste Beiträge zur technologischen Steigerung der Effizienz im Bereich der Stromanwendung werden gesehen:

### a) Raumwärme:

- Wärmepumpensysteme
- Solarthermiesysteme mit den entsprechenden Pumpen
- Breitenanwendungen von Kraft-Wärme-Kopplungen insbesondere im GHD-Bereich wie Schulen, Krankenhäusern, Schwimmbädern
- Elektronische Steuerungen und Überwachung des Verbrauchs
- Geregelt umrichter gesteuerte Hocheffizienzpumpen statt alte Umwälzpumpen
- Intelligente Automatisierung im Bereich der Raumheizung
- Intelligentes Gesamtenergiemanagement
- Optimierung des Einsatzes von Klimaanlage in Verbindung mit der Einführung moderner energieoptimierter kältetechnischer Prozesse
- Nutzung von Abwärme
- Nutzung von Nah- und Fernwärmesysteme

### b) Mechanische Energie:

- Vermeidung von mechanischen Stellgliedern
- Umrüstung von Altmotoren auf Premium-Effizienz-Motoren
- Flächenweite Einführung geregelter Antriebstechnik, wo energetisch sinnvoll
- Intelligente Antriebsysteme, z.B. Pumpen und Lüfter, die nur dann arbeiten, wenn sie wirklich gebraucht werden
- Beschleunigter Austausch von alten Lüftern durch Hochleistungsantriebe
- Energieminimierende Optimierung der vollständigen Komponentenkette industrieller Teil- und Gesamtprozesse

### c) Informations- und Kommunikationstechnik:

- Optimierung und ggf. Einschränkung der Standby-Funktion, wo zur Grundfunktion nicht erforderlich
- Neue energiesparende Daten-Speicherungsmethoden und -verfahren für Serverfarmen im Internet bzw. in den Intranets

### d) Beleuchtung:

- Elektronische Vorschaltgeräte
- Energiesparende Lampen, wo sinnvoll
- Optimierung der öffentlichen Beleuchtung, insbesondere der Straßenbeleuchtung (Einsatz von Hocheffizienzlampen, Einschränkung der Betriebszeiten)

## e) Prozesswärme:

- Energieoptimierter Einsatz von Hybridtechnologien
- Energieoptimierte Abstimmung von Prozessschritten
- Energiemanagementsysteme
- Verbesserte Prozessüberwachungssysteme
- Nutzung der Abwärme

Eine übergeordnete Laststeuerung im Privatbereich, in der Industrie, im Gewerbe sowie in öffentlichen Einrichtungen kann darüber hinaus einen wichtigen Beitrag zur optimalen Nutzung des schwankenden Angebots aus regenerativer Energieerzeugung (Windkraft, Photovoltaik) liefern.

Die vorstehende Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Wichtig ist vor allem die systematische Optimierung aller Bereiche und Prozesse in Industrie, Haushalt und GHD in Bezug auf Energieeinsatz und Energieeinsparung. Erst der flächendeckende Einsatz von energieoptimierten Geräten, Systemen, Anlagen und Prozessen bringt den gewünschten Mengeneffekt.

Energiesparmassnahmen, die bereits heute in der Breite bei Neuanlagen oder größeren Ersatzmaßnahmen eingesetzt werden, sind auch weiterhin notwendig. Bleibt es jedoch allein bei den bisherigen Maßnahmen, wird der Stromverbrauch bis 2025 um ca.30% ansteigen anstatt zu sinken. Es muss somit massiv in neue Massnahmen investiert werden. Dabei ist die öffentliche Hand aufgerufen, die Entwicklung von Grundlagentechnologien zur Verbesserung der Energieeffizienz durch entsprechende F&E - Mittel zu unterstützen.

## 7.2 Ausblick: Einfluss des Strompreises auf den Energieverbrauch

Trotz verschiedener Maßnahmen zum Energiesparen ist es in Deutschland nicht gelungen, den Anstieg des Stromverbrauchs innerhalb der letzten 10 Jahre zu reduzieren. Stattdessen ist der Stromverbrauch um 18% gestiegen. Den Stromverbrauch in Deutschland alleine durch technologische Maßnahmen, d.h. durch eine Steigerung der Energieeffizienz, um 20% zu reduzieren, ist daher nicht unbedingt realistisch. Es ist unabdingbar, deutliche Verhaltens- und Werteänderungen zu initiieren.

Die Wirtschaft agiert derzeit im Wesentlichen kostenoptimiert. Wirkungsgradsteigernde Maßnahmen werden nur dann umgesetzt, wenn sich die Investition innerhalb von wenigen Jahren amortisiert. Des Weiteren fehlt bei vielen Projekten oft jeglicher Anreiz für Zwischenlieferanten von Teilanlagen, Wirkungsgrade der Anlage im Preis zu berücksichtigen, solange sie über einem minimalen Wert liegen. Insbesondere im Anlagenbau finden sich derzeit wenige Ausschreibungen mit Ausnahme der Öl & Gas- sowie der Energieindustrie, die eine Verlustkomponente im Angebotsvergleich berücksichtigen.



Der Einsatz von energiesparenden Maßnahmen hängt heute im Wesentlichen vom Geschäftsfall und von den Energiekosten ab. Mit den folgenden Ausführungen soll am Beispiel der Investitionsentscheidung für die Kesselspeisepumpe in einem Kohlekraftwerk veranschaulicht werden, welchen Einfluss der Energiepreis auf den Einsatz energieeffizienter Technik und damit auf den Stromverbrauch hat. Zur Auswahl stehen drei verschiedene technische Konzepte, die sich im Hinblick auf Investitionskosten und Wirkungsgrad, d.h. den späteren Stromverbrauch, deutlich unterscheiden:

**a) Ausführung: Kesselspeisepumpe im Kohlekraftwerk, Leistung 15MW;**

Getriebe	1500/min auf 5000/min,	$\eta = 98,5\%$ ;
Schlupfkupplung	1000/min bis 1500/min,	$\eta = 70\%$ bis $99\%$ ;
Induktionsmotor	1500/min,	$\eta = 97\%$ ;
Investitionskosten		ca. 1,2 Mio. €.

**b) Ausführung: Kesselspeisepumpe im Kohlekraftwerk, Leistung 15MW;**

Getriebe	1500/min auf 5000/min	$\eta = 98,5\%$ ;
Induktionsmotor	1500/min,	$\eta = 96,7\%$ ;
U-Umrichter		$\eta = 98,5\%$ ;
Investitionskosten		ca. 1,4 Mio. €;
Energiesparpotential gegenüber Fall a)		ca. 2000 MWh/a.

**c) Ausführung: Kesselspeisepumpe im Kohlekraftwerk, Leistung 15MW;**

Synchronmotor	5000/min,	$\eta = 98,0\%$ ;
I-Umrichter		$\eta = 99,0\%$ ;
Stromrichtertransformator		$\eta = 99,5\%$ ;
Investitionskosten		ca. 2,2 Mio. €;
Energiesparpotential gegenüber Fall a)		ca. 4300 MWh/a.

Im ersten betrachteten Geschäftsfall soll ein neues Kraftwerk gebaut werden; der Kraftwerksbetreiber bewertet eine eingesparte MWh mit 30 €. Innerhalb von 5 Jahren soll sich die Investition getragen haben. Er wird daher bei dem angenommenen Betrieb des Kraftwerkes, bei dem er mit Variante b) 2000 MWh pro Jahr spart, mehr sparen als den Unterschied von 0,2 Mio. € Investitionskosten. Die Ausführung c) lohnt sich für ihn dagegen nicht.

Im einem zweiten betrachteten Fall dürfen für einen Betreiber, der eine heute vorhandene Anlage nach Ausführung a) durch die energieeffizienteste Ausführung c) ersetzen möchte, die Investitionskosten bei heutigen Primärenergiekosten ca. 0,65 Mio. € nicht übersteigen. Ein Austausch käme also nicht in Frage. Steigen die Primärenergiekosten um 30% lohnt sich Variante c) bereits im Neuanlagengeschäft. Bei einem Anstieg auf das 3,5fache würden auch Altanlagen entsprechend umgebaut.

Ähnliche Relationen ergeben sich auch für viele andere Stromverbraucher in der Industrie und den Privathaushalten, z.B. für Haushaltsgeräte. Investitionen in energiesparende Technik werden oft erst dann wirtschaftlich und eine nachhaltige Reduktion des Stromverbrauchs

somit dann erreicht, wenn die Energiekosten um den Faktor 2 bis 3 steigen würden und gleichzeitig die Wahrnehmung aller Stromnutzer für die durch Neugeräte und -anlagen erreichbaren Strom- und damit Kosteneinsparungen geschärft würden.

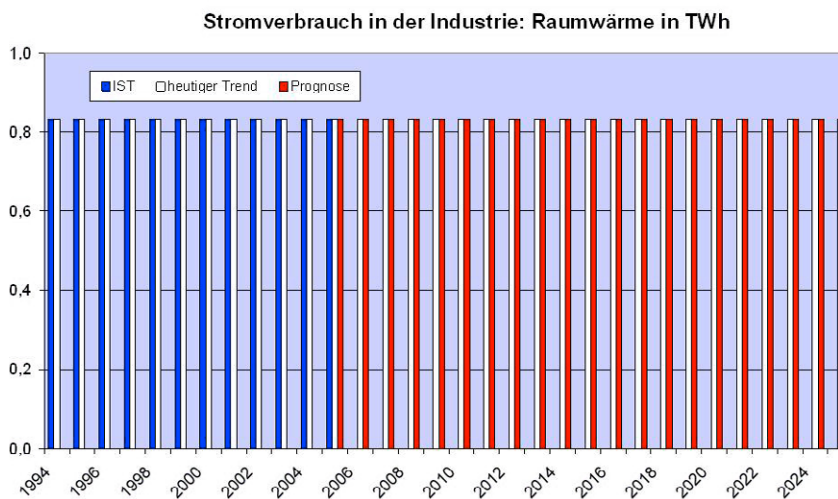
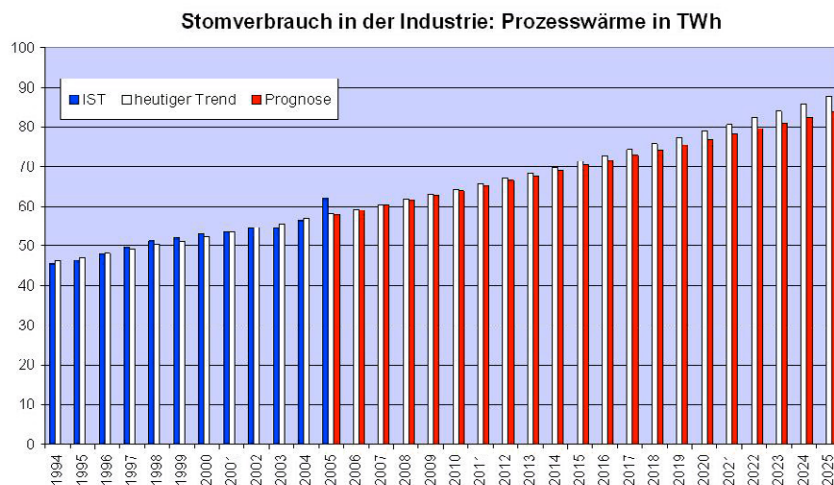
Für den hypothetischen Fall, dass durch politische Eingriffe die Energiepreise so erhöht würden, dass sich obige Investitionen wirtschaftlich lohnten, ist aber darauf zu achten, dass keine Kostennachteile gegenüber im Ausland produzierten Gütern oder Dienstleistungen entstünden, da der Energieverbrauch ansonsten nur exportiert würde, und dass ein Ausweichen auf andere, ggf. umweltschädlichere Energieträger keine Kostenvorteile brächte.

# 8 Anhang

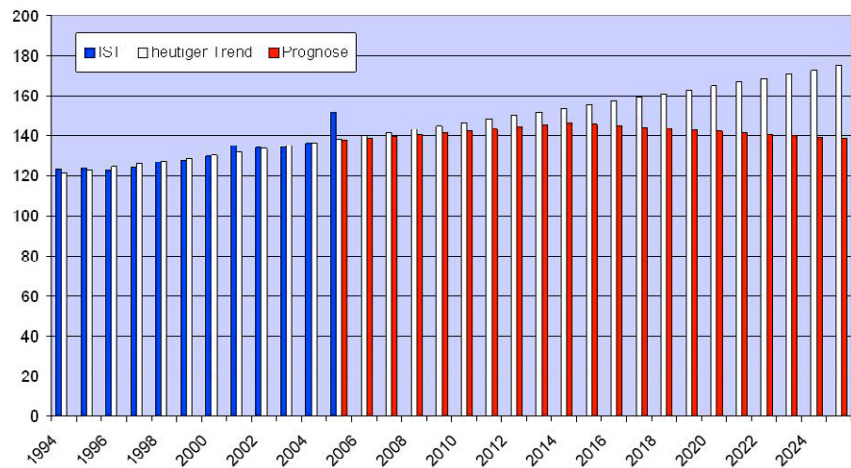
## 8.1 Prognose des Stromverbrauchs

Die nachfolgenden Grafiken zeigen die Prognosen der 5 Anwendungsbereiche Prozesswärme, Raumwärme, mechanische Energie, Beleuchtung und Information & Kommunikation für die Sektoren Industrie, Verkehr, Haushalt und Gewerbe, Handel und Dienstleistung. Sie sind die Ausgangsbasis des im Kapitel 6 als sehr wahrscheinlich beschriebenen Verlauf der Stromverbrauchsentwicklung in Deutschland bis 2025. Die in diesen Verläufen unterstellten Annahmen sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

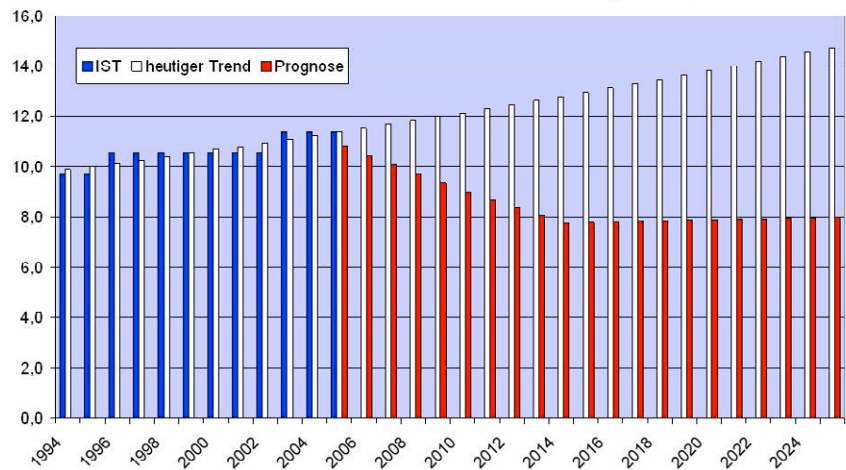
### 8.1.1 Prognose des Stromverbrauchs im Sektor Industrie nach Anwendungsgebieten



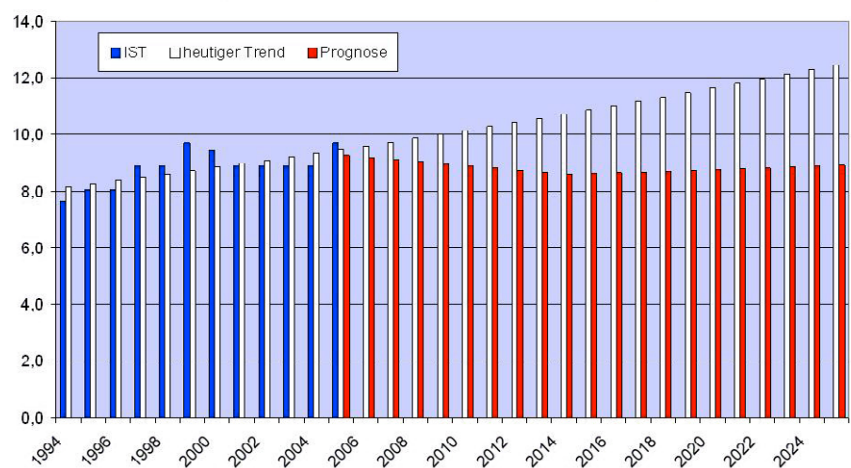
Stromverbrauch in der Industrie: mechanische Energie in TWh



Stromverbrauch in der Industrie: Beleuchtung in TWh

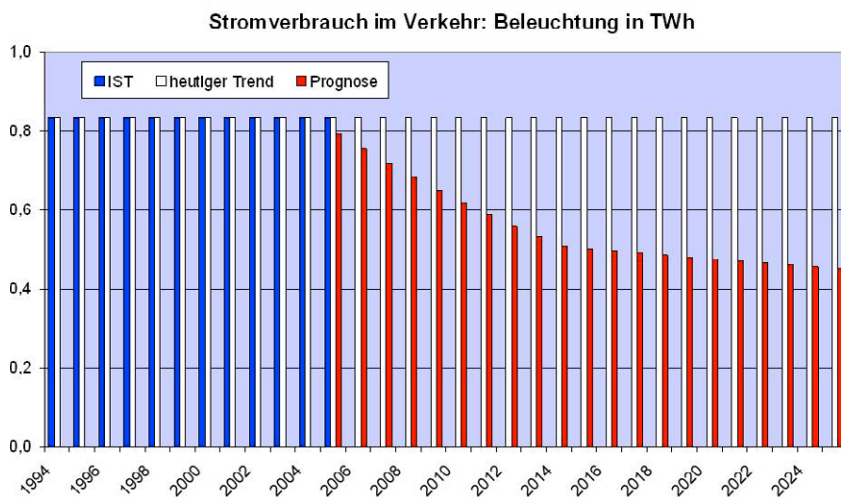
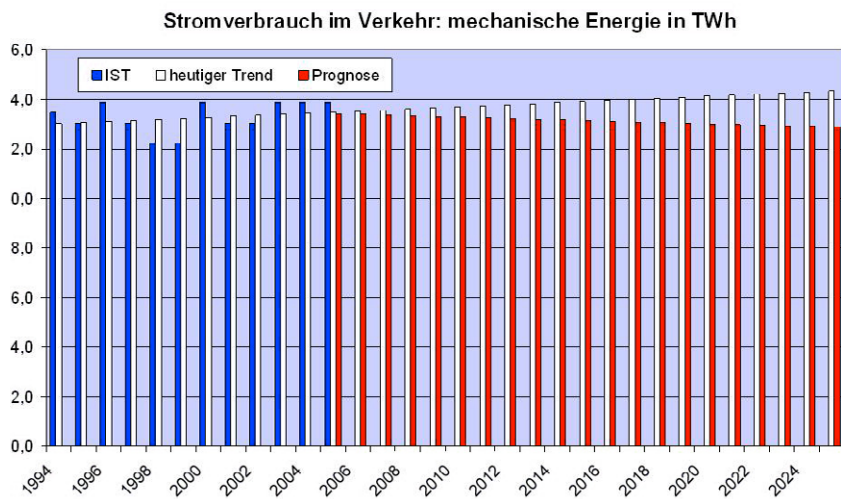
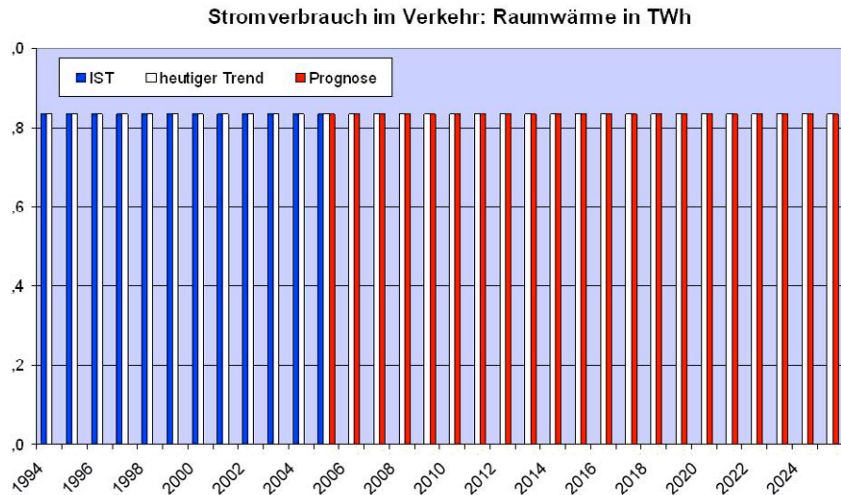


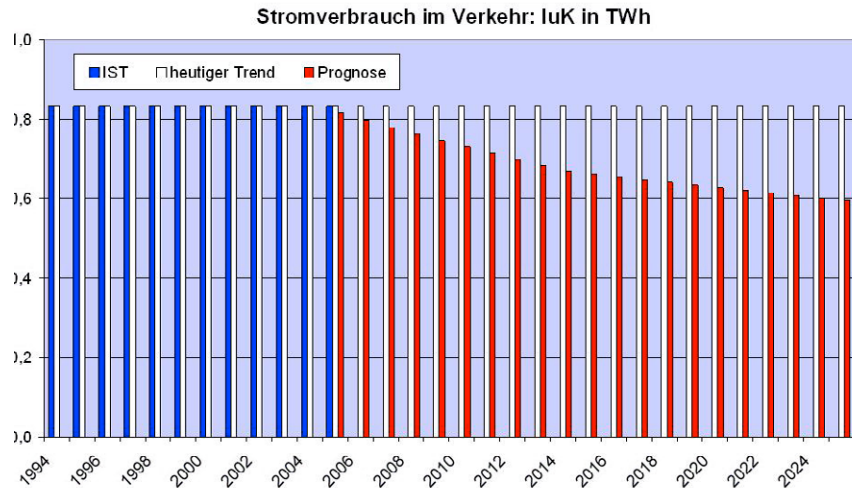
Stromverbrauch in der Industrie: IuK in TWh



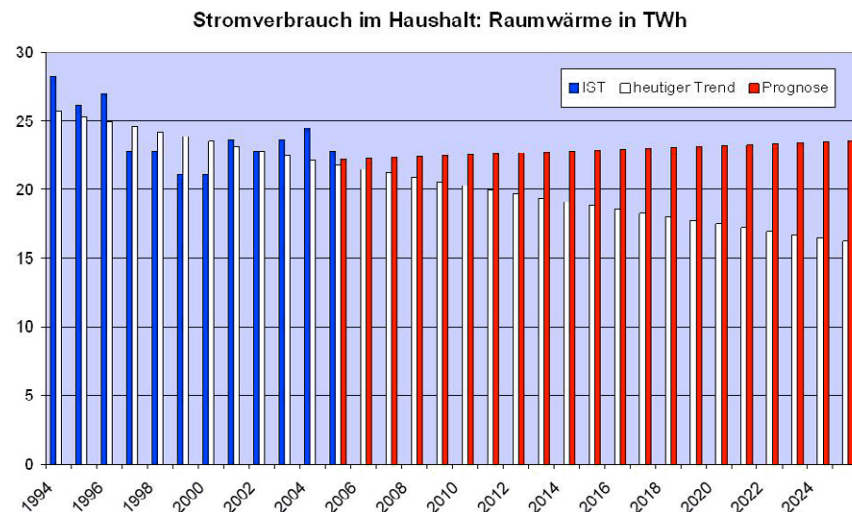
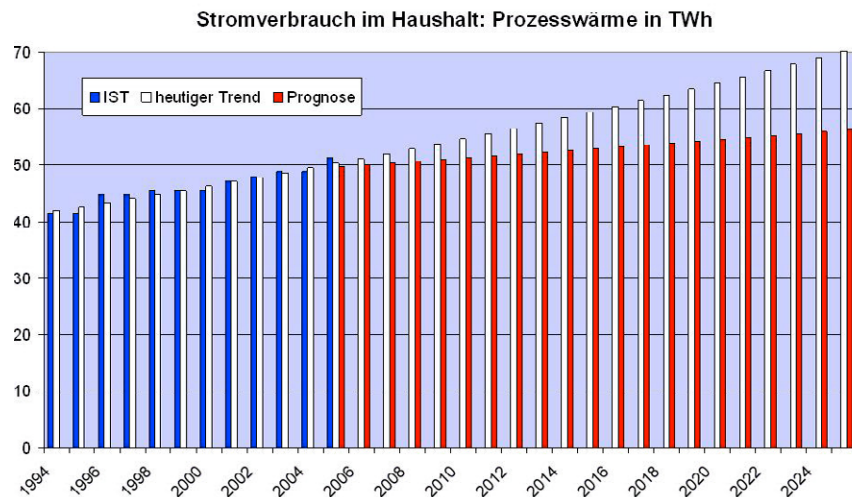
## 8.1.2 Prognose des Stromverbrauchs im Sektor Verkehr nach Anwendungsgebieten

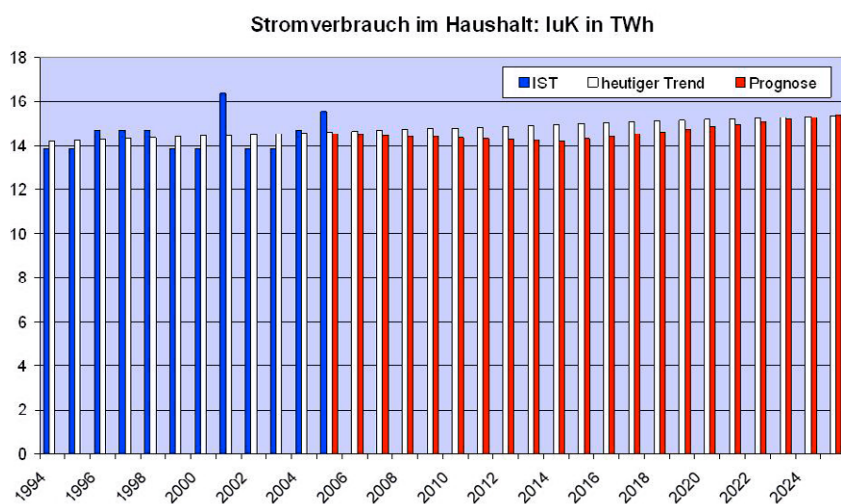
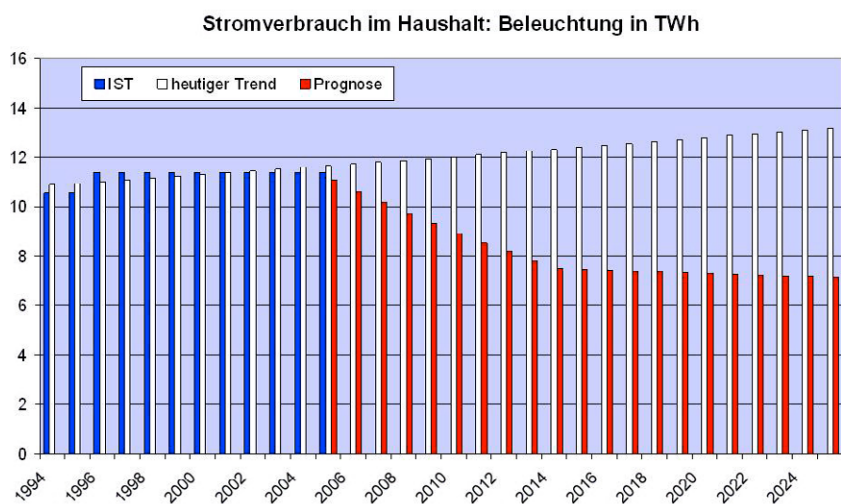
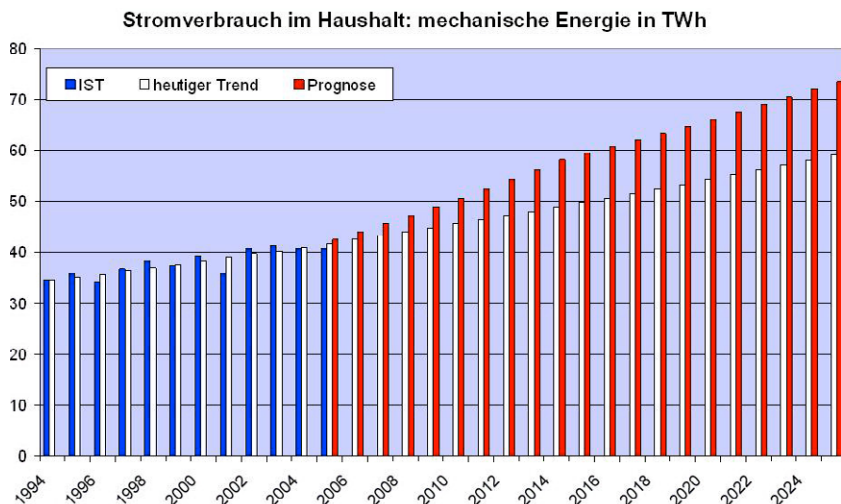
Im Sektor Verkehr wird praktisch keine Prozesswärme aus Strom erzeugt. Daher entfällt die Grafik.



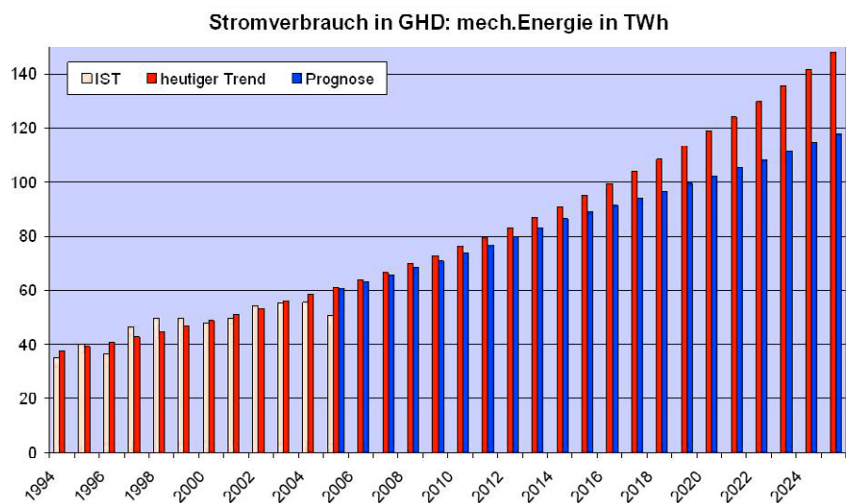
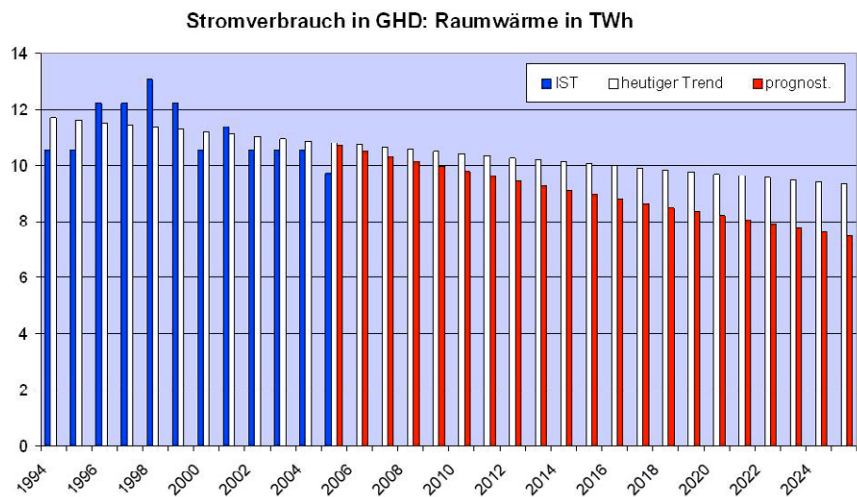
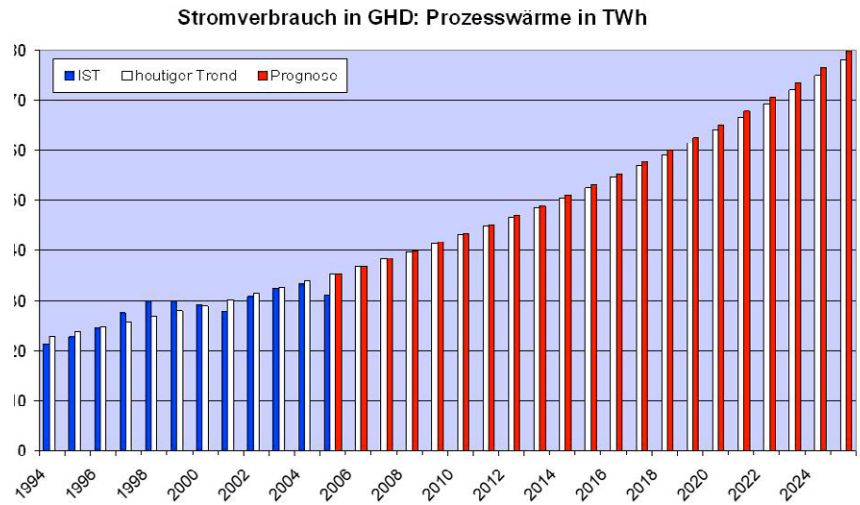


### 8.1.3 Prognose des Stromverbrauchs im Sektor Haushalt nach Anwendungsgebieten



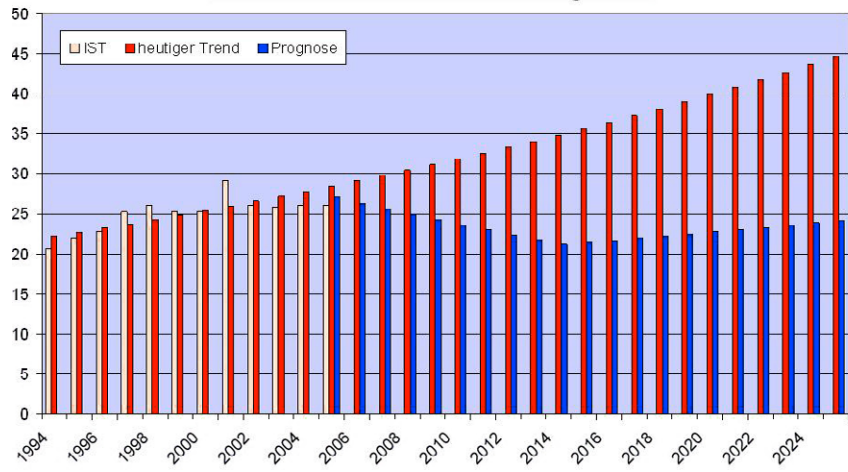


### 8.1.4 Prognose des Stromverbrauchs im Sektor GHD nach Anwendungsgebieten

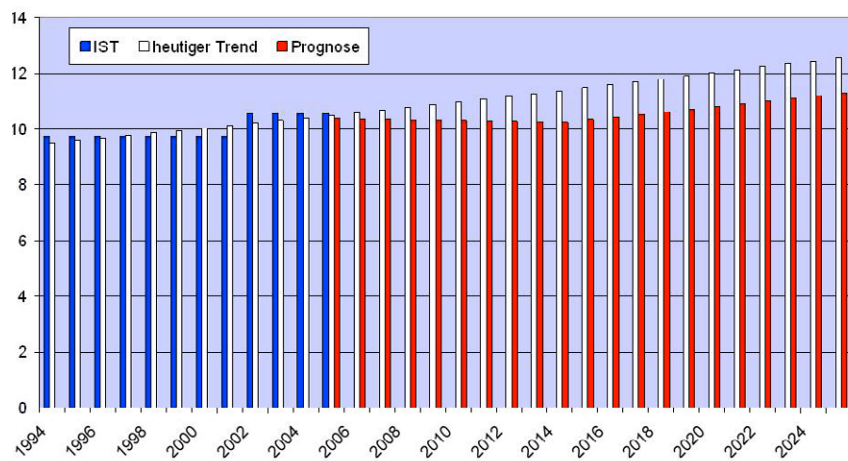




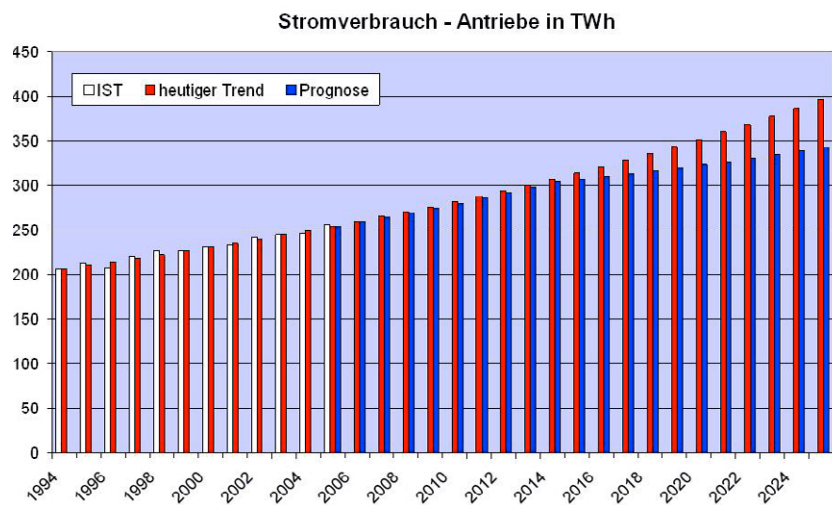
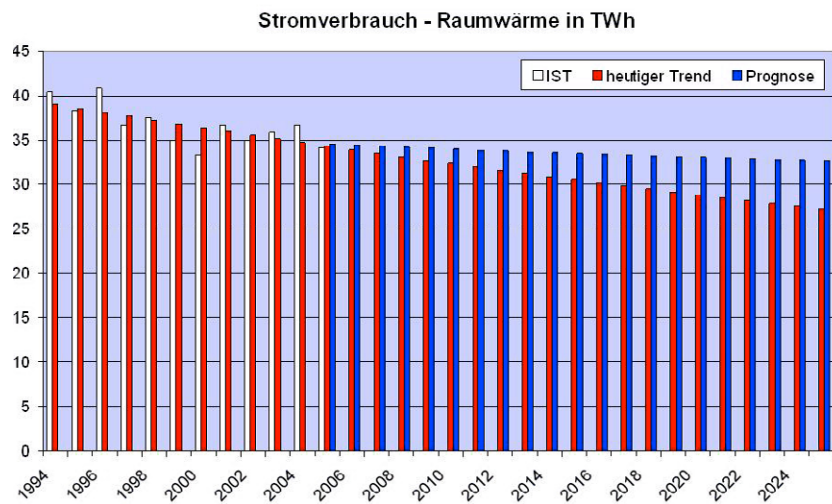
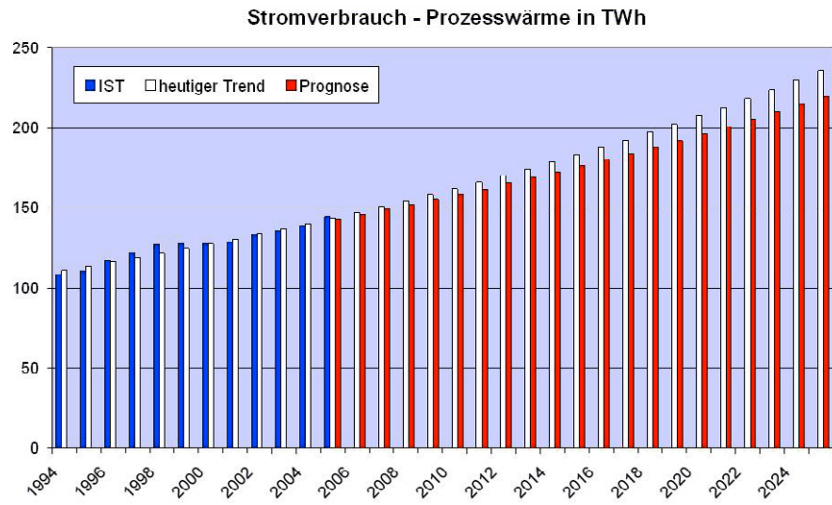
Stromverbrauch in GHD: Beleuchtung in TWh

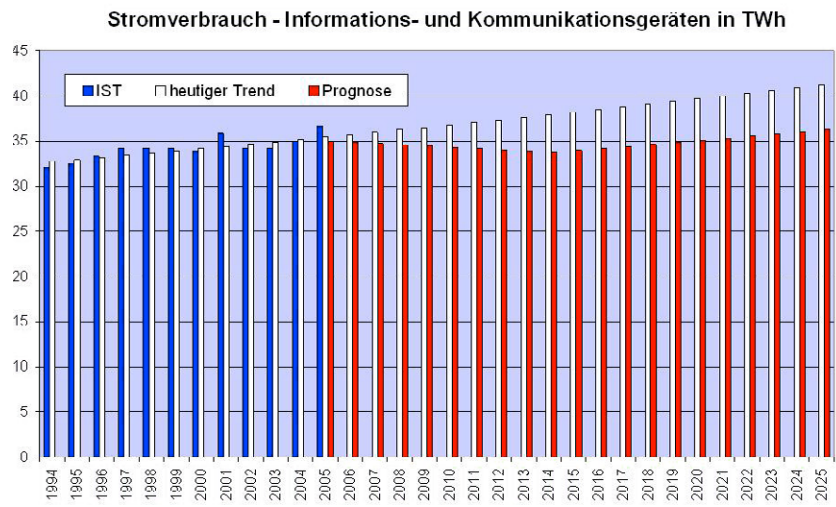


Stromverbrauch in GHD: IuK in TWh



### 8.1.5 Prognose des Stromverbrauchs in den Anwendungsgebieten summiert über alle Sektoren





## 8.2 Ermittlung der Lebenszykluskosten von Antrieben<sup>55</sup>

### Schema der Berechnung

Basis-Eingaben		Einheit	Antrieb 1	Antrieb 2	
Anzahl der Jahre (Lebensdauer)	N	[ ]	10		
Zinssatz (für Kapitalanlagen)	I	[%]	6,0		
Inflationsrate (jährliche Teuerungsrate)	P	[%]	2,0		
Energiepreis (aktuell)	EP	[€/kWh]	0,12		
gewichtete mittlere el. Leistung	P	[kW]	0,093	0,238	
durchschnittliche jährliche Betriebszeit	T	[h]	5500	5500	
Einmal-Kosten					
Anschaffungskosten	Cic	[€]	957	832	(1)
Installations- und Inbetriebnahmekosten	Cin	[€]	40	40	(2)
Stilllegungs- und Beseitigungskosten	Cd	[€]	40	40	(11)
Jährliche Kosten					
Jährliche Energiekosten (EP x P x T)	Ce/y	[€]	61,5	157,3	(3)
Jährliche Betriebskosten	Co/y	[€]	0	0	(4)
jährliche Wartungskosten (Routine)	Cm/y	[€]	5	5	(5a)
jährliche Wartungskosten (MTBF)	Cm/y	[€]	6,70	5,82	(5b)
jährliche Ausfallkosten	Cs/y	[€]	0	0	(6)
jährliche Umweltschutzkosten	Cenv/y	[€]	0	0	(7)
andere jährliche Kosten		[€]	0	0	(8)
Summe der jährlichen Kosten (3+4+5+6+7+8)		[€]	73,2	168,2	(9)
Umrechnung auf Present Value (PV)					
Verzinsungsfaktor (Tabelle df)	df	[ ]	8,111		
„PV“ der jährlichen Kosten ((9) x df)		[€]	594	1364	(10)
Faktor Cp/Cn (Tabelle Cp/Cn)	Cp/Cn	[ ]	0,676		
„PV“ der Einmalkosten ((11) x Cp/Cn)		[€]	27	27	(12)
Ergebnis					
LCC auf heutiger Basis (1+2+10+12)	LCC	[€]	1618	2263	
davon sind Energiekosten ((3) x df)		[€]	499	1276	
& Kosten für Routinewartung ((5) x df)		[€]	95	88	

55 Wilo AG, Dortmund; VDI 6014, Europumps

### Erläuterungen zur Life Cycle Cost Berechnung:

Anzahl der Jahre (n)

Mit Anzahl der Jahre ist die Dauer des betrachteten Zeitraums bzw. die Lebensdauer gemeint.

Zinssatz (i)

Dieser Zinssatz ist der übliche Kapitalmarktzins. Da dieser aber variabel ist, kann hier auch mit dem bekannten Durchschnittswert aus der Vergangenheit gerechnet werden, oder mit einem für die Zukunft prognostizierten Wert. Es ist aber unbedingt zu beachten, dass bei Vergleichen dann auch immer die gleichen Werte in die Berechnung einfließen.

Inflationsrate (p)

Die Inflationsrate ist wie der Zinssatz eine variable Größe. Üblicherweise rechnen Unternehmen für ihre Investitionsvorhaben mit einer mittleren, für die Zukunft zu erwartenden, Inflationsrate über die betrachtete Anzahl von Jahren.

Energiepreis (EP)

Mit diesem Preis ist der aktuelle Preis für elektrische Energie gemeint.

Gewichtete mittlere elektrische Leistung (P)

Die gewichtete mittlere elektrische Leistung ist der aus dem Betriebsprofil des Antriebs ermittelte Durchschnittswert unter Berücksichtigung der Laufzeit der jeweiligen Leistungsstufe.

Durchschnittliche jährliche Betriebszeit (T)

Die durchschnittliche jährliche Betriebszeit wird unter Berücksichtigung des Systems und des Standortes entweder berechnet (oder geschätzt) oder auch vom Planer vorgegeben.

## Einmal-Kosten

### Anschaffungskosten ( $C_{ic}$ )

Die Anschaffungskosten beinhalten die Kosten für das System und eventuell zusätzlich erforderliche Komponenten. Eventuell sind verschiedene Rabattstufen (z.B. 30 oder 50%) zu berücksichtigen.

### Installations- und Inbetriebnahmekosten ( $C_{in}$ )

Die Installations- und Inbetriebnahmekosten beinhalten in diesem Beispiel die Kosten für die Montage inkl. des elektrischen Anschlusses des Systems.

### Stilllegungs- und Beseitigungskosten ( $C_d$ )

Im vorliegenden Beispiel wird mit Stilllegungs- und Beseitigungskosten (Demontage des Systems) in Höhe von €40,- gerechnet.

## Jährliche Kosten

### Jährliche Energiekosten ( $C_e / y$ )

Die jährlichen Energiekosten werden aus dem Produkt des Energiepreises mit der gewichteten mittleren Leistung und der durchschnittlichen jährlichen Betriebszeit, also  $EP \times P \times T$ , gebildet.

### Jährliche Betriebskosten ( $C_o / y$ )

Zu den Betriebskosten zählen u.a. die Kosten für eine jährliche Inspektion, sowie evtl. eine kleinere Reparatur berücksichtigt.

### Jährliche Wartungskosten ( $C_m / y$ )

Unerwartete Fehler werden über die MTB-Statistik (mean time between failures) berücksichtigt. Dazu werden die mittleren jährlichen Ausfallraten herangezogen.

### Jährliche Ausfallkosten ( $C_s / y$ )

Da manche Systeme keine planmäßigen Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten erfordern, entstehenden auch keine diesbezüglichen Kosten.

### Jährliche Umweltschutzkosten ( $C_{env} / y$ )

Nur zu berücksichtigen, wenn diese vom System tatsächlich verursacht werden.

### Andere jährliche Kosten

Fallen oft nicht an.

Summe der jährlichen Kosten

Die Summe der jährlichen Kosten wird aus den o.g. einzelnen Bestandteilen gebildet. Im vorliegenden Beispiel sind dies die jährlichen Energiekosten, sowie die jährlichen Wartungskosten.

### Umrechnung auf heutige Basis (Present Value 'PV')

Verzinsungsfaktor (df)

Der Verzinsungsfaktor wird unter Berücksichtigung der Anzahl der Jahre (10) und der Realverzinsung ( $i-p=4,0\%$ ).

Heutiger Wert der jährlichen Kosten (PV)

Der heutige Wert der jährlichen Kosten über den gesamten Zeitraum von  $n=10$  Jahren errechnet sich aus dem Produkt des Verzinsungsfaktors und der Summe der jährlichen Kosten.

Faktor  $C_p/C_n$

Der Faktor  $C_p/C_n$  wird unter Berücksichtigung der Anzahl der Jahre (10) und der Realverzinsung ( $i-p=4,0\%$ ) aus der Tabelle  $C_p/C_n$  entnommen ( $C_p/C_n = 0,676$ ).

Heutiger Wert der Einmal-Kosten (PV)

Da die *Einmal-Kosten* für Anschaffung ( $C_{ic}$ ), sowie für Installation und Inbetriebnahme ( $C_{in}$ ) typischerweise im Jahr 0 anfallen, entsprechen sie exakt dem heutigen Wert ( $C_p/C_n = 1$ ). Nur die Stilllegungskosten ( $C_d$ ) fallen im letzten Jahr (Jahr 10) an und müssen auf den heutigen Wert umgerechnet werden.

### Ergebnis

'LCC' auf heutiger Basis

Die 'Life Cycle Costs' auf heutiger Basis (Present Value LCC) werden durch die Summe aus Anschaffungs- und Installationskosten, sowie die auf heutigen Wert umgerechneten jährlichen- und Einmal-Kosten bestimmt. Im Berechnungsblatt sind dies die Felder (1), (2), (10) und (12).

# VDE

**VERBAND DER ELEKTROTECHNIK  
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.**

Stresemannallee 15  
60596 Frankfurt am Main

Telefon 069 6308-0  
Telefax 069 6312925  
<http://www.vde.com>  
E-Mail [service@vde.com](mailto:service@vde.com)

