



**Prof. Dr. Peter Radgen**

Energieeffizienz, Energiemanagement  
Dekarbonisierung und Sektorkopplung

## **Gemeinsam erfolgreich – Produkt- und Systemoptimierung gehören zusammen**

Forum INCITE

Effiziente Elektrische Motoren und Antriebe

28. November 2023, Bern, Schweiz

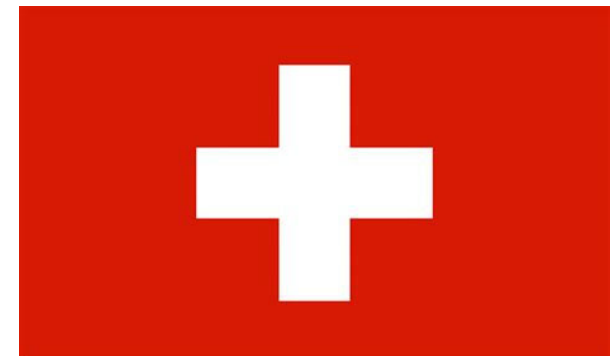
**Prof. Dr.  
Peter  
Radgen**

# Kern Botschaften

- Die Effizienz im Bereich der Elektromotoren ist in den letzten Jahren deutlich gestiegen.
- Die Potentiale zur weiteren Steigerung der Wirkungsgrade von Asynchronmotoren sind begrenzt.
- Neue Motorenkonzepte (Reluktanz Motoren, Permanentmagnet Motoren) eröffnen neue Möglichkeiten zur weiteren Wirkungsgradsteigerung.
- Die Mehrkosten von Frequenzumrichtern zur Drehzahlregelung sind in den letzten Jahren drastisch zurückgegangen. Vielfach nutzen Hersteller deshalb Frequenzumrichter um die Vielfalt der produzierten Pumpen und Ventilortypen zu reduzieren.
- Effizienzmaßnahmen im Bereich Motorensystems sind sehr wirtschaftlich
- Die Möglichkeiten Motoren und Motorensysteme zu fördern sinken, da die Mindestanforderungen für die Effizienz zunehmend den maximal definierten Effizienzklassen entspricht.
- Negative Mitnahmeeffekte bei der Förderung, aber auch Spill-Over Effekte durch Förderprogramme
- Herausforderungen bei der Effizienzbestimmung von Systemen zur Förderung von Gasen (Kompressoren, Ventilatoren)

# Angleichung der Regulierung für Elektromotorensysteme EU-Schweiz

- In der Schweiz und in der Europäischen Union gelten ab dem 1. Juli 2021 einheitliche Vorschriften betreffend Energieeffizienz von Elektromotoren und Frequenzumrichtern
- Durch Beschluss des Bundesrates vom 22. April 2020 wurden die Bestimmungen der Verordnung (EU) 2019/1781 in die Energieeffizienzverordnung (EnEV, vgl. Anhang 2.7) aufgenommen.
- Auch für Pumpen, Umlaufpumpen und Ventilatoren gelten in der Schweiz die gleichen Anforderungen wie in der EU
- Für Druckluftkompressoren bestehen derzeit weder in der EU noch in der Schweiz gesetzlich Mindestanforderungen bezüglich der Effizienz



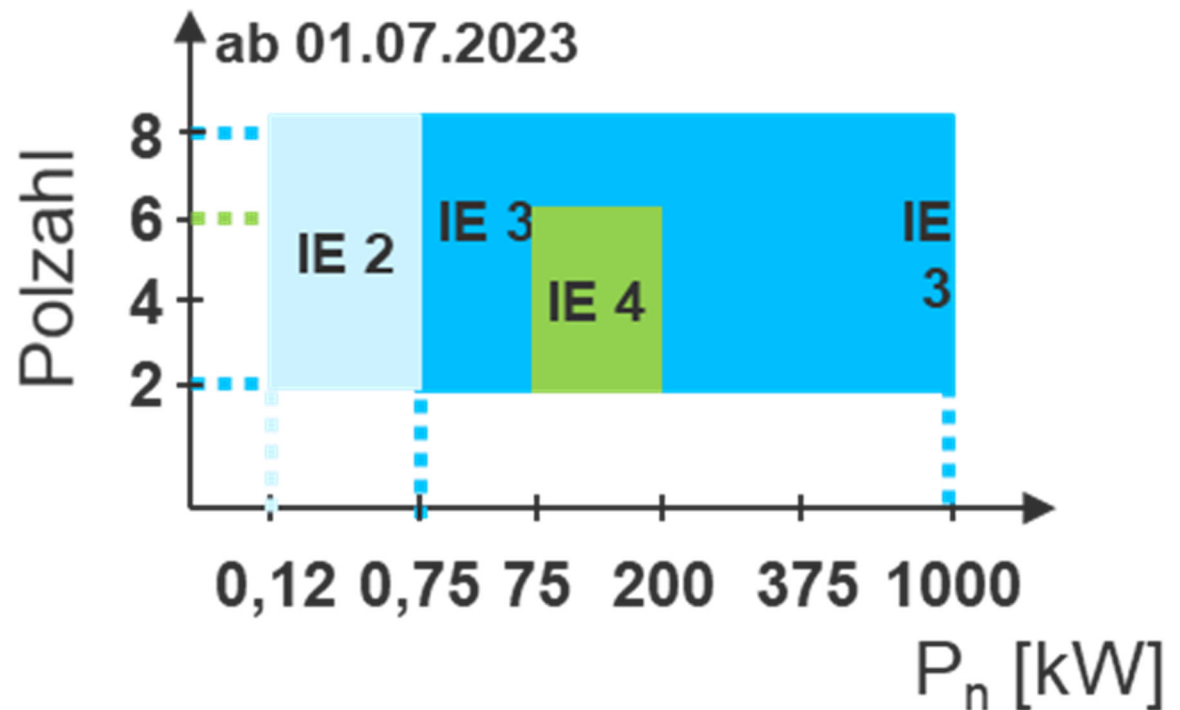
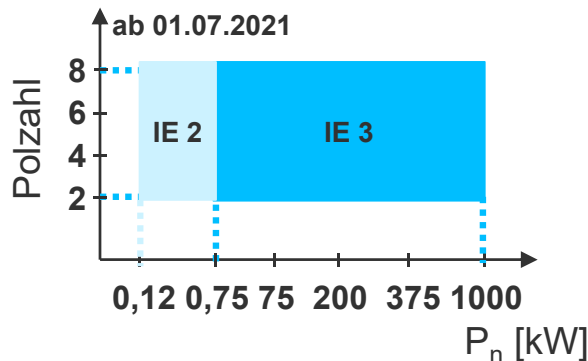
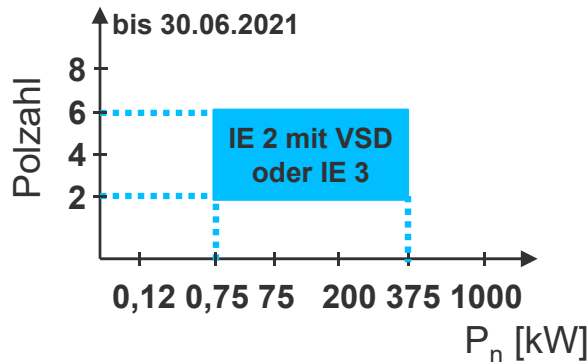
# Aktueller Status der EuP Regelungen (Ecodesign) für Motorsysteme

LOT Nummer	Produktgruppe	Status	Letzte Anpassungsstufe
ENER 30	Elektromotoren	VO (EG) 1781/2019 (ersetzt VO (EG) 640/2009)	01.07.23
ENER 11	Umlaufpumpen	VO (EG) 1781/2019 (ersetzt VO (EG) 641/2009)	01.08.2015
ENER 11	Ventilatoren	VO (EU) 327/2011	01.01.2015
ENER 11	Wasserpumpen	VO (EU) 547/2012	01.01.2015
ENER 28	Abwasserpumpen und Pumpen für Flüssigkeiten mit hohem Feststoffgehalt	Vorstudie abgeschlossen	
ENER 31	Kompressoren	Konsultationsforum	Die EU plant hier aktuell keine Ecodesign Anforderungen
GROW 1	Professionelle Kühlung	VO (EU) 2015/1095 VO (EU) 2015/1094	01.07.2019
GROW 6	Klimatechnik, Lüftungstechnik	VO (EU) 1253/2014 VO (EU) 1254/2014	01.01.2018

Quelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). <https://netzwerke.bam.de/Netzwerke/Navigation/DE/Evpg/EVPG-Produkte/evpg-produkte.html>

# Anpassung der Verordnung für Elektromotoren

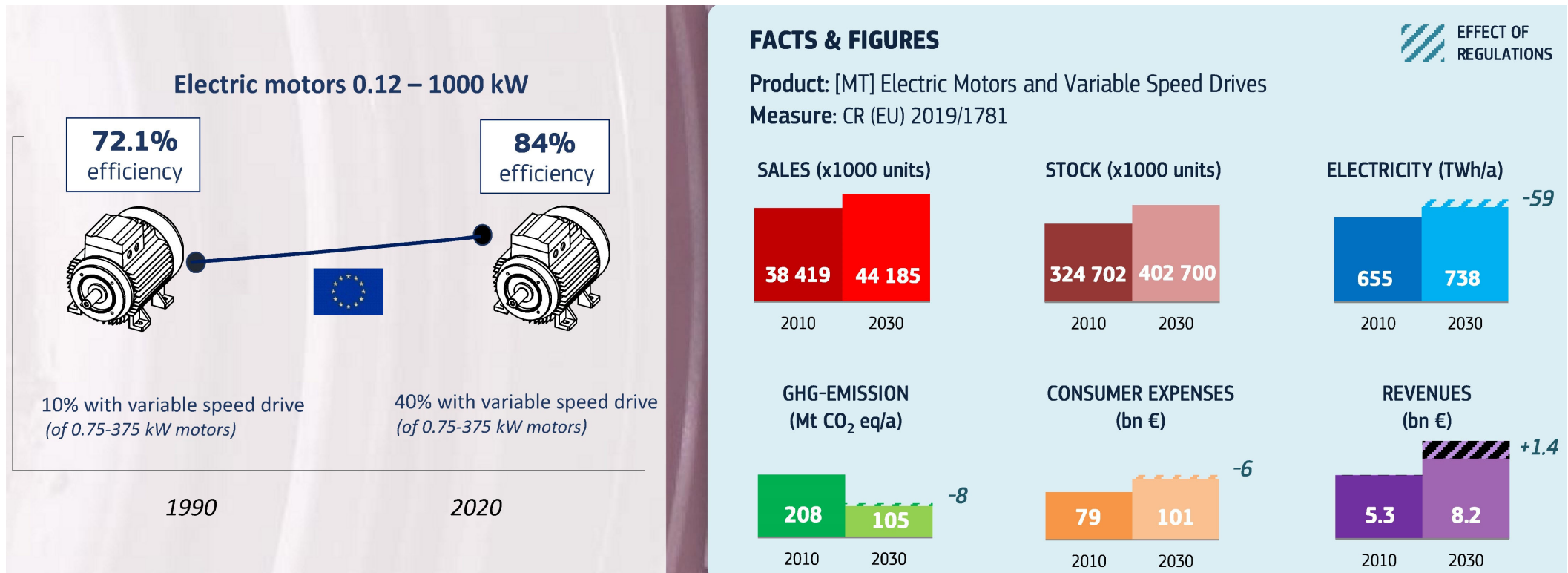
## Elektromotoren (3 Phasen AC) (Ecodesign-Richtlinie, 2019)



Quelle: Ecodesign Regulation (EU) 2019/1781 for Motors and Drives <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019R1781&from=EN>

# Marktveränderungen durch die Ecodesignrichtlinie

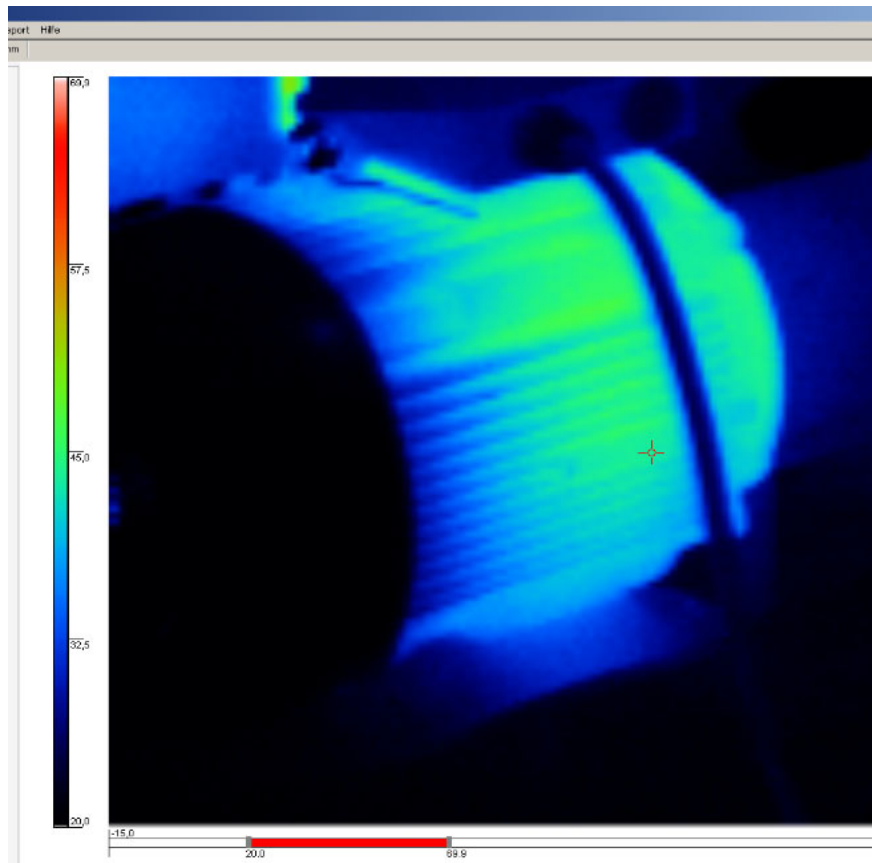
## Am Beispiel Elektromotoren



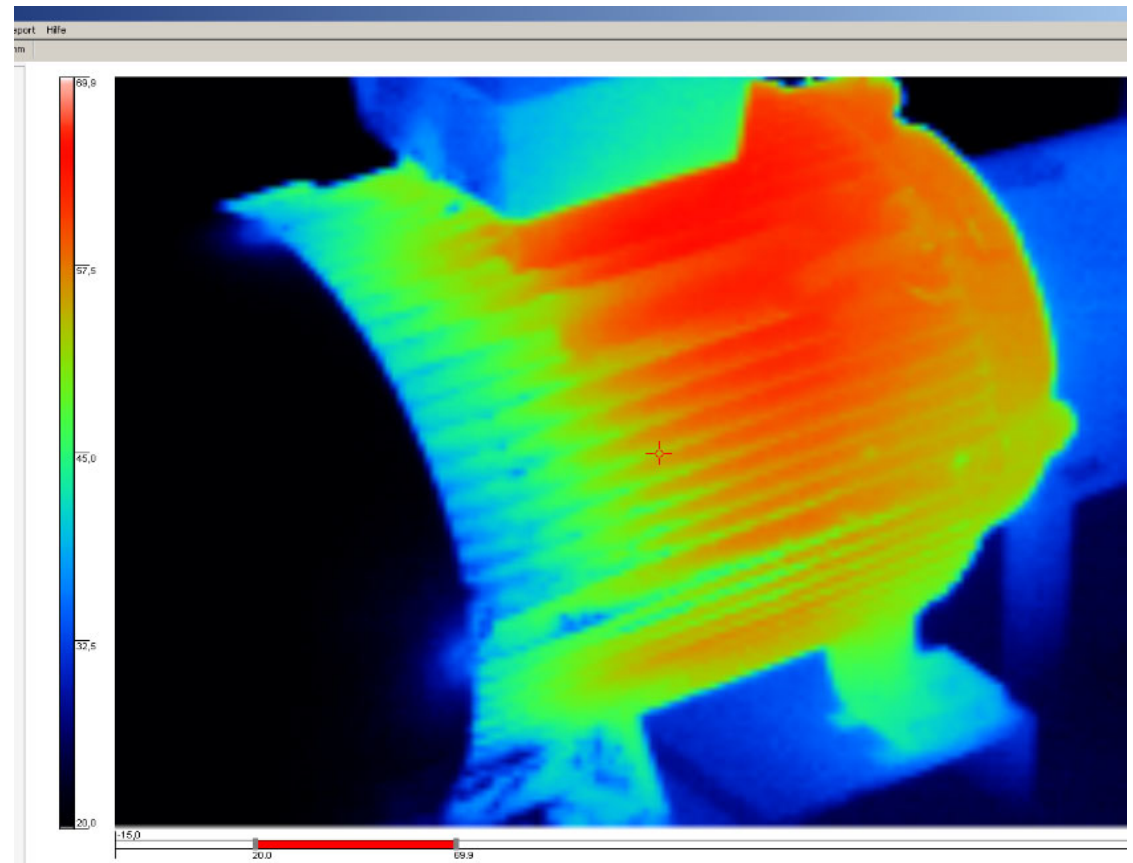
Quelle: European Commission: Ecodesign Impact Accounting, Annual Report 2021, Overview and Status Report, DG Energy, S. 103, September 2022, <https://op.europa.eu/de/publication-detail/-/publication/392bc471-76ae-11ed-9887-01aa75ed71a1/language-en>

# Wirkungsgradvergleich von Elektromotoren mit einer IR Kamera


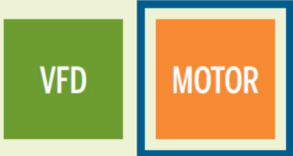

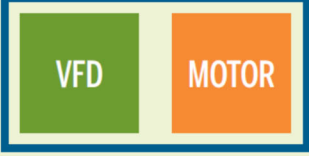
IE 3



IE 1



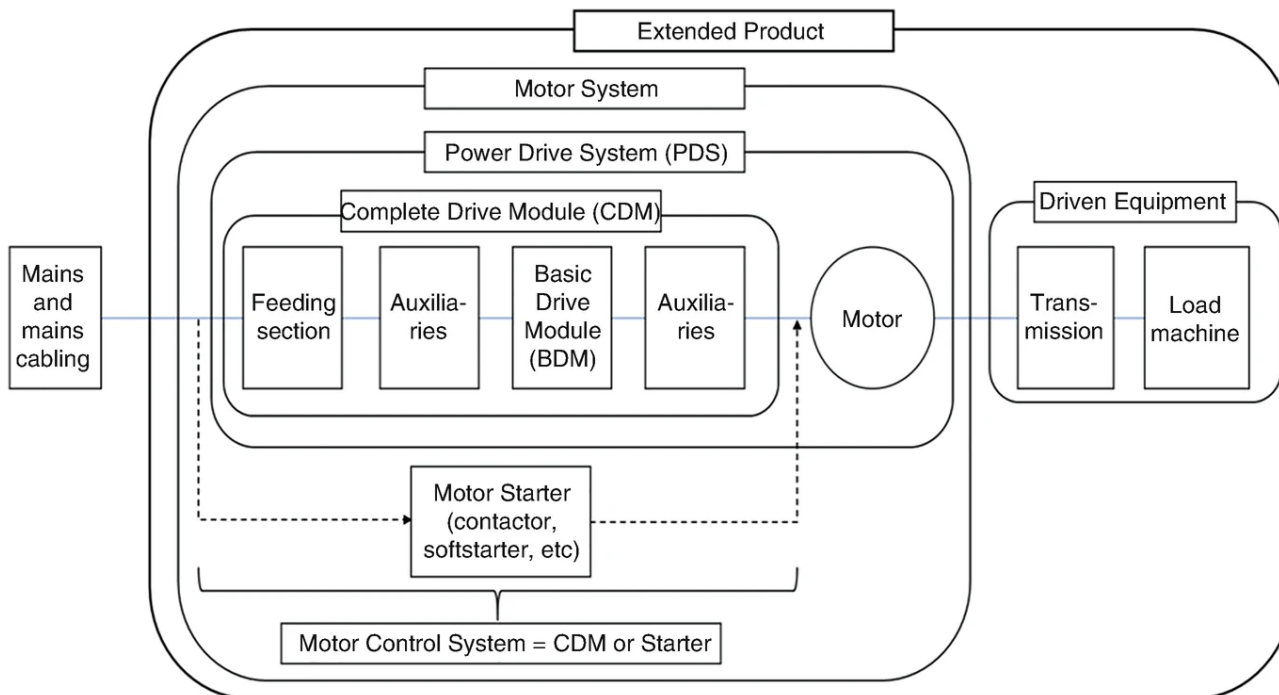
# Standards für Motoren mit und ohne Drehzahlregelung

		SCOPE	TESTING	EFFICIENCY CLASSIFICATION
1		motor	IEC 60034-2-1 ed 2 published	IEC 60034-30-1 ed 2 published
2		motor, driven by a VFD	IEC/TS 60034-2-3 ed 1 published	IEC 60034-30-2 CDV October 2015
3		VFD	IEC 61800-9 IEC 61800-9-1 Extended Products IEC 61800-9-2 Classification CDV October 2015	
4		motor+VFD		

Quelle: Energy efficiency roadmap for motors and motor systems, IEA Paris, November 2015.



# Der Systemansatz für Motorsysteme

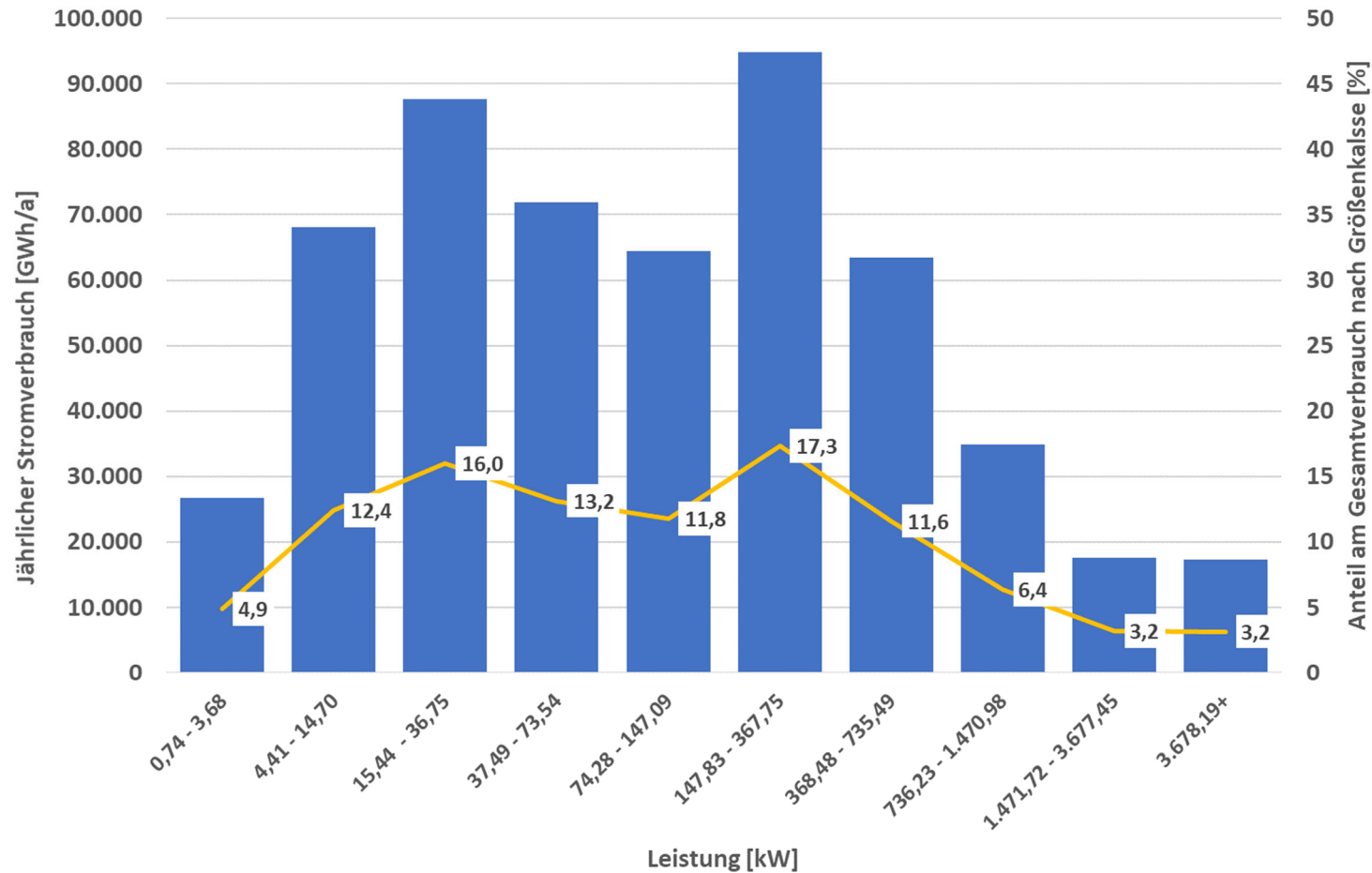


**IEC 61800-9-1: 2017:** Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications – General requirements for setting energy efficiency standards for power driven equipment using the extended product approach (EPA) and semi analytic model (SAM)

**IEC 61800-9-2:2018:** Ecodesign for power drive systems, motor starters, power electronics and their driven applications – Energy efficiency indicators for power drive systems and motor starters

Quelle: IEC 61800-0-1, 2017

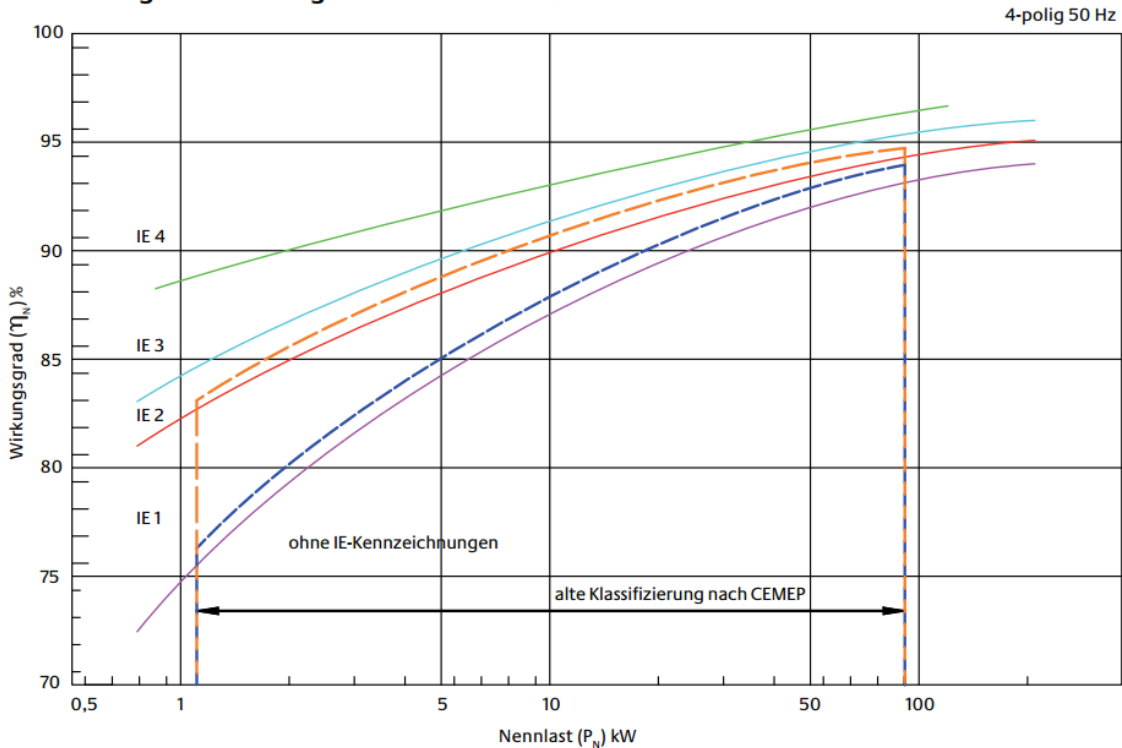
# Stromverbrauch Elektromotoren in der Industrie nach Leistungsklasse (USA, 2020)



Rao, Prakash, Sheaffer, Paul, Chen, Yuting, Goldberg, Miriam, Jones, Benjamin, Cropp, Jeff, and Hester, Jordan. 2021. "U.S. Industrial and Commercial Motor System Market Assessment Report Volume 1: Characteristics of the Installed Base". United States. <https://doi.org/10.2172/1760267>

# Energieeffiziente Antriebsmotoren (HEM) (Kennzeichnung von Elektromotoren)

Abb. 4: Gegenüberstellung alte und neue Effizienzklassen.



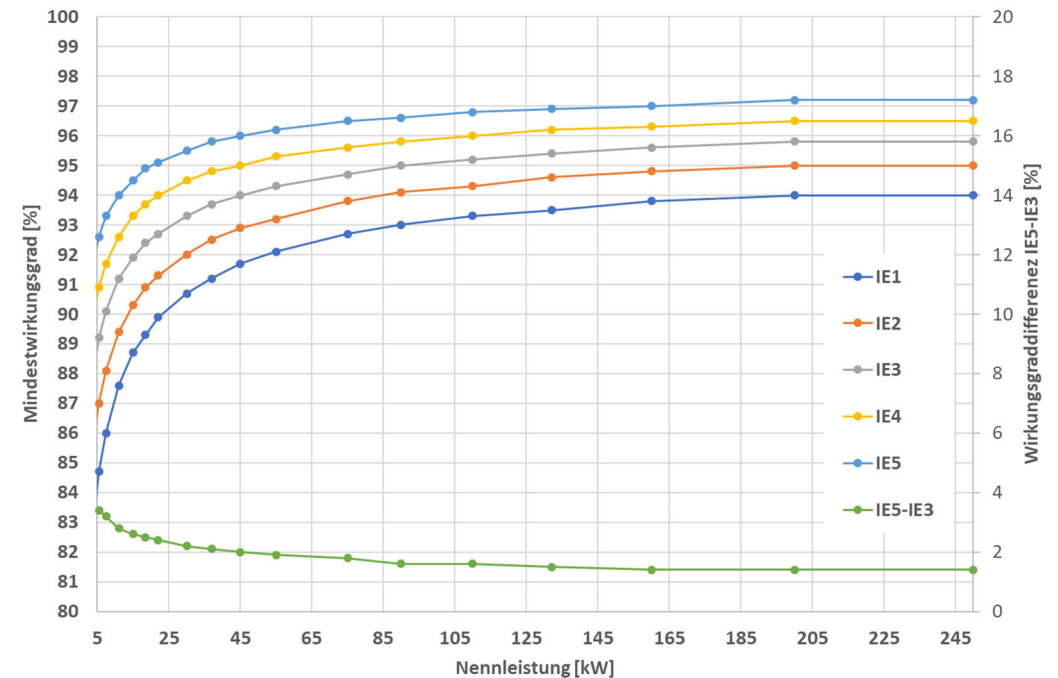
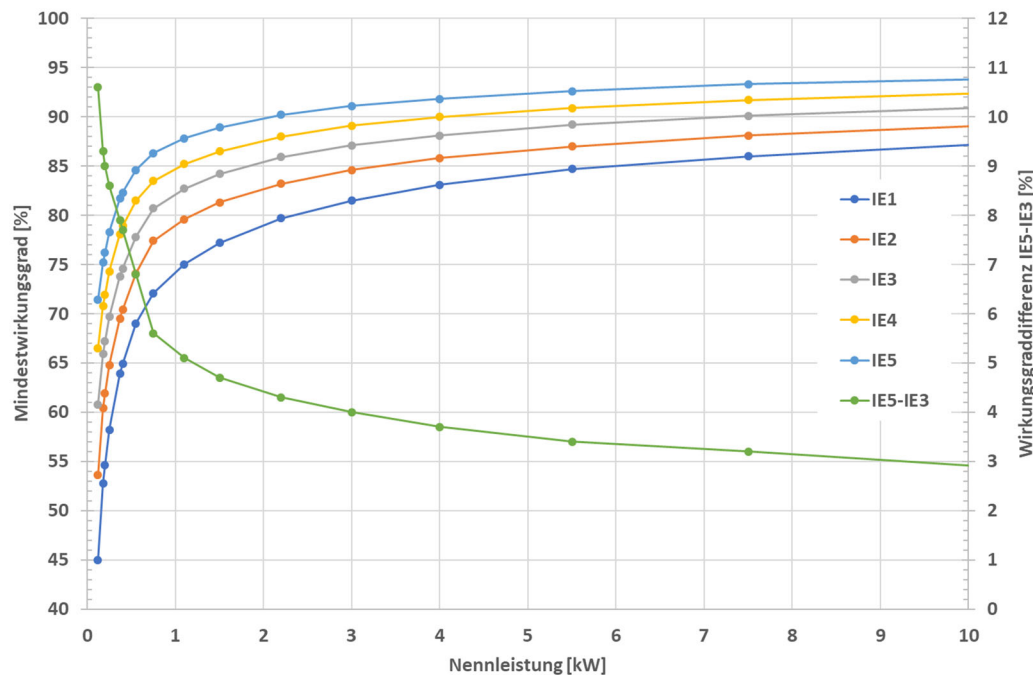
Neue IE-Wirkungsgradklassen (2009)		Alte IE-Wirkungsgradklassen nach CEMEP (1998)	
Wirkungsgrad	IE-Code		Klasse
Super Premium	IE 4	-	
Premium	IE 3	-	-
Hoch	IE 2	Hoch	EFF 1
Standard	IE 1	Verbessert	EFF 2
Unter Standard	Keine Kennzeichnung	Normal	EFF 3

Quellen: Deutsche Energieagentur (dena); Elektrische Motoren in Industrie und Gewerbe: Energieeffizienz und Ökodesign-Richtlinie; Tabelle: eigene Darstellung

**Effizienzklassen sind festgelegt in der IEC Norm IEC 60034-30-1: Rotating Electrical Machines Part 30-1: Efficiency Classes of line operated AC motors. March 2014**

**IE1-IE4**

# Energieeffiziente Antriebsmotoren für variable Drehzahl (Kennzeichnung von Elektromotoren 0,120-1000 kW)



- Die neue Effizienzklasse IE5 wurde im Rahmen der Überarbeitung der Norm in 2016 hinzugefügt.
- Klassifikation von Motoren nicht mehr über Polzahl sondern über Bemessungsdrehzahlen
- In der Norm steht, dass Wirkungsgradklassen über IE5 nicht geplant sind.

**Effizienzklassen sind festgelegt in der IEC Norm IEC 60034-30-2:2016 Rotating Electrical Machines Part 30-2: Efficiency classification of AC motors with variable speed. Februar 2016**

**IE1-IE5**

# Vergleich Motortechnologien

Motor	Erreichbare Effizienz	IEC Typ	Frequenzumrichter Betrieb	Einsatzbereiche	Kommentar
<b>IM</b>	IE3/IE4	IE3 oder höher teilweise schwierig	Keine Probleme	Fast alle Anwendung	IE3/IE4 entsprechen möglicherweise nicht den IEC-Einbaumaßen
<b>IM mit Kupfer Rotor</b>	IE3/IE4	Kompatibel. Kann auch kleiner sein.	Keine Probleme	Fast alle Anwendung	Höhere Anlaufströme und andere Anlaufmomente als beim IM. Müssen bei der Systemauslegung und bei der Nachrüstung berücksichtigt werden.
<b>PM</b>	IE3/IE4	Kompatibel. Kann auch kleiner sein.	Es wird immer ein Regler benötigt. Gleiche Frequenzumrichter benötigen eine Positionsrückmeldung. Bessere Effizienz bei niedrigen Geschwindigkeiten als Drehstrom-Asynchronmaschine.	Fast alle Anwendung	Gelegentlicher hoher Preise für benötigte Seltene Erden. Aktueller Preis Trend fallend.
<b>LSPM</b>	IE3/IE4	Kompatibel. Kann auch kleiner sein.	Möglich. Wirkungsgrad etwa 5 bis 10 % niedriger als bei Netzbetrieb	Kein Anfahren unter hoher Last, geringe dynamische Leistung, Probleme mit schwachen Netzen und Laststößen.	Sehr guter Motorwirkungsgrad, wenn die Einschränkungen für die Anwendung akzeptabel sind. Probleme mit seltenen Erden ähnlich wie bei PM-Motoren.
<b>EC</b>	IE3/IE4	Nein	Benötigt immer einen Regler.	Niedrige Leistung, EC-Ventilatoren, Servomotoren	Höherer Wirkungsgrad als andere Technologien bei relativ geringer Leistung (unter 750 W). Der Systemwirkungsgrad wird bei Radialventilatoren Konstruktionen, bei denen der Motor in die Ventilatornabe integriert ist, oft herabgesetzt. Probleme mit seltenen Erden ähnlich wie bei PM-Motoren.
<b>SynRM</b>	IE2/IE4	Kompatibel. Kann auch kleiner sein	Benötigt immer einen Regler. Besserer Wirkungsgrad bei Leistungen über ca. 11-15 kW; vergleichbar mit PM bei relativ niedrigen Drehzahlen. Wegen des schlechten Leistungsfaktors ist oft ein größerer FC erforderlich.	Gegenwärtig hauptsächlich für Pumpen und Lüfter mit einer Leistung von etwa 11 bis 15 kW eingesetzt.	Motoren die noch relativ neu auf dem Markt sind. Vorteile derzeit vor allem für Leistungen im Bereich 11-15 kW.

IM=Three-phase induction motor; PM=Permanent magnet; LSPM=Line-start PM; EC=Electronically commutated; SynRM=Synchronous reluctance; FC=Frequency converter

Gemeinsam erfolgreich – Produkt- und Systemoptimierung gehören zusammen, Forum INCITE, Bern, 28.11.2023, Prof. Dr. Peter Radgen

# Zusammenhang zwischen Polzahl und Drehzahl eines Motors



**Prof. Dr. Peter Radgen**  
Energieeffizienz, Energiemanagement  
Dekarbonisierung und Sektorkopplung

Polzahl	Polpaare	Synchrongeschwindigkeit bei 50 Hz [U/min]
2	1	3000
4	2	1500
6	3	1000
8	4	750
10	5	600
12	6	500
14	7	429
16	8	375

Die Drehzahl eines Elektromotors kann sowohl über einen Frequenzumrichter als auch die Polzahl angepasst werden

Polzahl: Feste Stufen

Frequenzumrichter: Stufenlos

# Förderung von Elektromotoren

## Vergleich CH und DE

- **In der Schweiz über das Programm ProKilowatt**

- In der Form der wettbewerblichen Ausschreibung
- Mit Definition von Mindestanforderungen an Wirkungsgrade von Motorsystemen

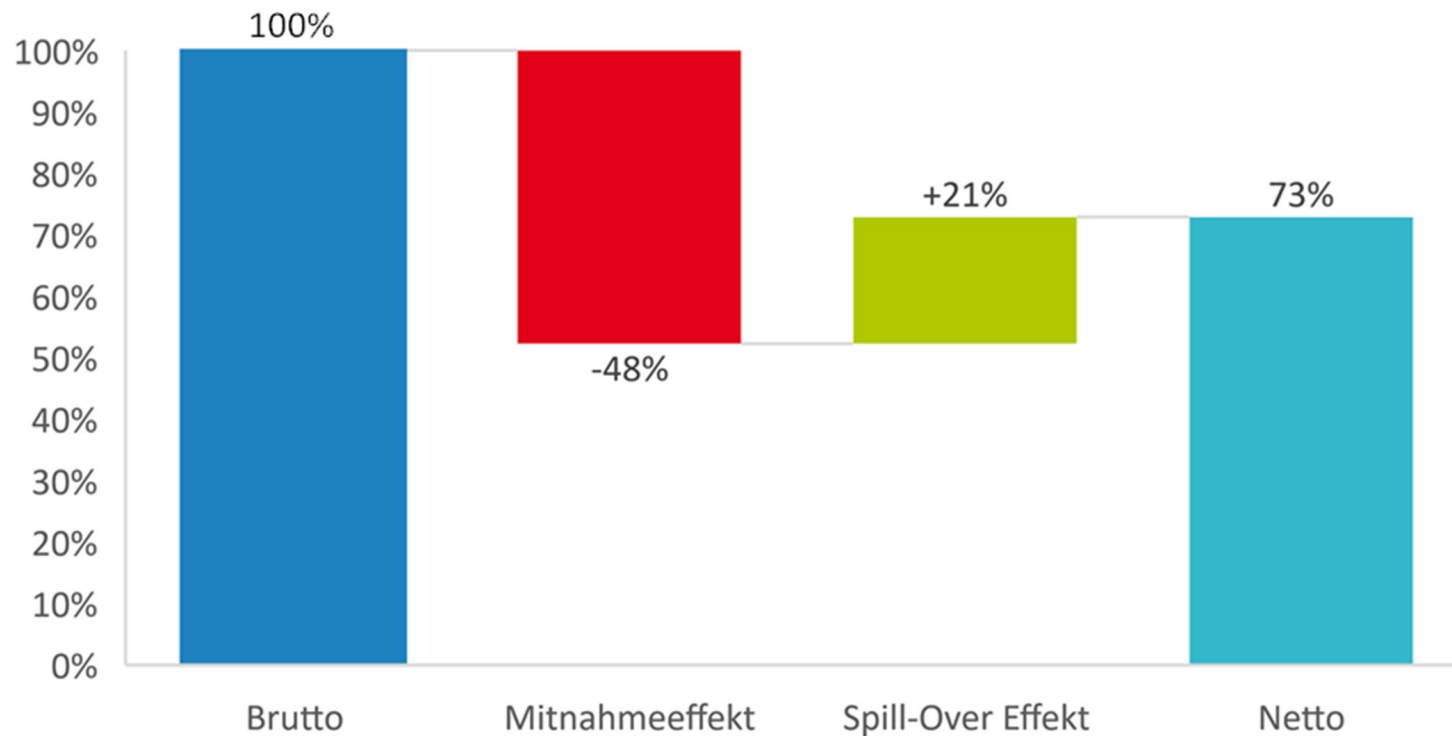
- **In Deutschland über das Programm Energie und Ressourceneffizienz in der Wirtschaft (EEW)**

- Fester Fördersatzes in Abhängigkeit von Förderregime und Unternehmensgröße
- Mit Definition von Mindestanforderungen an Wirkungsgrade von Motorsystemen

Höhe der Förderung in Abhängigkeit der Unternehmensgröße und der gewählten Art der Förderung:			
	Artikel 17 AGVO (Investitionsbeihilfen für KMU)	Artikel 38 AGVO (Energieeffizienz- maßnahmen)	De-minimis-VO*
Große Unternehmen	-	30 %	30 %
Mittlere Unternehmen	10 %	40 %	40 %
Kleine Unternehmen	20 %	50 %	50 %
Der maximal mögliche Förderzuschuss beträgt 200.000 Euro pro Vorhaben.			

## Mitnahmeeffekte bei Förderprogrammen

### Beispiel EEW Modul 1, 2021 (DE)



#### Fördereffizienz Modul 1 (2019-2021)

- Bezogen auf Endenergieeinsparung  
44,95 €/MWh
- Bezogen auf Primärenergieeinsparung  
29,56 €/MWh
- Bezogen auf Emissionsminderung  
159,97 €/t CO<sub>2Äq</sub>

Quelle: BAFA: Evaluation der „Bundesförderung für Energieeffizienz in der Wirtschaft“ (Zuschuss und Kredit/Förderwettbewerb) Jahresbericht 2021. Karlsruhe, Basel, Stuttgart, Berlin, 31.1.23.

[https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Evaluationen/Foerdermassnahmen/bundesfoerderung-fuer-energieeffizienz-in-der-wirtschaft.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Evaluationen/Foerdermassnahmen/bundesfoerderung-fuer-energieeffizienz-in-der-wirtschaft.pdf?__blob=publicationFile&v=6)

Gemeinsam erfolgreich – Produkt- und Systemoptimierung gehören zusammen, Forum INCITE, Bern, 28.11.2023, Prof. Dr. Peter Radgen



# Displacement compressors - Acceptance tests

## ISO 1217:2009

- Effizienzanforderungen für Geräte und Anlagen setzen stets auch entsprechende Standards für die Ermittlung der Energieeffizienz voraus
- Im Bereich der Druckluftkompressoren ist die aktuelle Prüfnorm seit 14 Jahren unverändert
- Aktuell läuft ein Ringversuch mit 2 Druckluftkompressoren in drei Laboren (IER Deutschland, DTI Dänemark, Caltest Australien). Ziel ist es die Reproduzierbarkeit von Messungen nach der ISO 1217 zu überprüfen.
- Auf Basis der Ergebnisse sollen Vorschläge zur Verbesserung der Norm entwickelt werden
- Erste Ergebnisse:  
Zulässige Toleranzen bei Messgeräten in der Norm (zu) hoch, Definition von Messpunkten nicht eindeutig, Ergebnisse von Volumenstrommessungen sehr fehleranfällig.

Projekt gefördert durch Energie Schweiz, Danish Energy Agency, Australian Government, IEA-E4