

# Neue Motorentechnologien

## Die fünf wichtigsten Punkte

1. Die gute Integration des Motors in das gesamte Antriebssystem und die richtige Dimensionierung sind ausschlaggebend.
2. Für lang oder dauernd mit konstanter Geschwindigkeit laufende Motoren sind Asynchron-Motoren mit hohem Wirkungsgrad (IE3 oder IE4) am besten geeignet.
3. Für Antriebssysteme mit wechselnder Leistung respektive Drehzahl: Frequenzumrichter (FU) und Motor mit hohem Wirkungsgrad (IE3 oder IE4) einsetzen.
4. Für Antriebssysteme mit rasch wechselnder Leistung: Permanentmagnet-Motor (PMM) und Synchron-Reluktanz-Motor (SRM) mit hohem Wirkungsgrad (IE3 oder IE4) einsetzen.
5. Für den direkten Start und Betrieb am Netz sind hybride PMM und SRM verfügbar, welche im Nennbetrieb einen hohen Wirkungsgrad aufweisen.

## Ziel und Zielpublikum

Dieses Topmotors Merkblatt Nr. 29 bringt einen aktuellen, systematischen Überblick über die verschiedenen elektrischen Motorentechnologien, ihre Eigenschaften und ihre energetische Bedeutung innerhalb des Antriebssystems. Es zeigt die Vor- und Nachteile unterschiedlicher Motorentechnologien wie Asynchron-Motor (ASM), Permanentmagnet-Motor (PMM) oder Synchron-Reluktanz-Motor (SRM) und vergleicht sie miteinander und beschreibt typische Anwendungsfälle für die jeweiligen Technologien. Das Merkblatt richtet sich an technisch Interessierte (Anwender, Planer, Installateure, Energieberater etc.) und Hersteller von Komponenten oder ganzen Antriebssystemen.

## Grundlagen

Elektrische Motoren sind für gut die Hälfte des elektrischen Energieverbrauchs weltweit verantwortlich. Sie sind das Kernelement aller Antriebssysteme für Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren, Transport- und Prozessmaschinen, etc. (Abbildung 1).

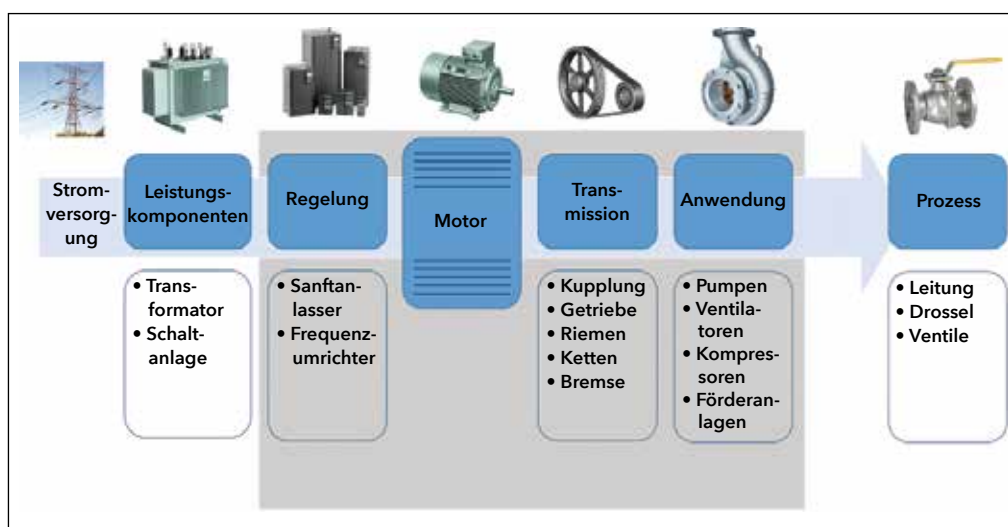


Abbildung 1: Antriebseinheit und ihre Komponenten (Quelle: IEC 60034-31, 2019)

Elektrische Motoren werden aufgrund ihrer Eigenschaften in verschiedene Typen eingeteilt:

- Lang- oder dauernd laufende Motoren mit konstanter Geschwindigkeit (S1 gemäss IEC 60034-1), mit konstanter und teilweise auch mit wechselnder Leistung (Drehmoment)
- Motoren mit stark wechselnder Leistung (Drehzahl respektive Drehmoment) mit dem Einsatz eines Frequenzumrichters, teilweise auch mit rascher Beschleunigung (z.B. Fahrzeugmotoren)
- Motoren mit kurzen und schnellen, teilweise reversiblen Drehbewegungen für die Positionierung (Servomotoren).

Elektrische Motoren mit 2 bis 8 Polen und Nennleistungen zwischen 0,12 kW und 1000 kW werden nach IEC

60034-2-1 geprüft und aufgrund ihres Wirkungsgrades in folgende Effizienzklassen (IE-Code nach IEC 60034-30-1) eingeteilt (siehe Abbildung 2):

- IE4 Superpremium Effizienz
- IE3 Premium Effizienz
- IE2 Hohe Effizienz
- IE1 Standard Effizienz

Auffallend ist die starke Abhängigkeit der Motoreffizienz von der Nennleistung: im gesamten Geltungsbereich der IEC-Norm geht die Effizienz eines 4-Pol-IE3-Motors von etwa 65 % bei 0,12 kW bis zu 96 % bei 1000 kW Nennleistung. In der Schweiz sind heute für Neuinstallationen nur IE3 und bessere Motoren (sowie IE2 mit Frequenzumrichter) zulässig.

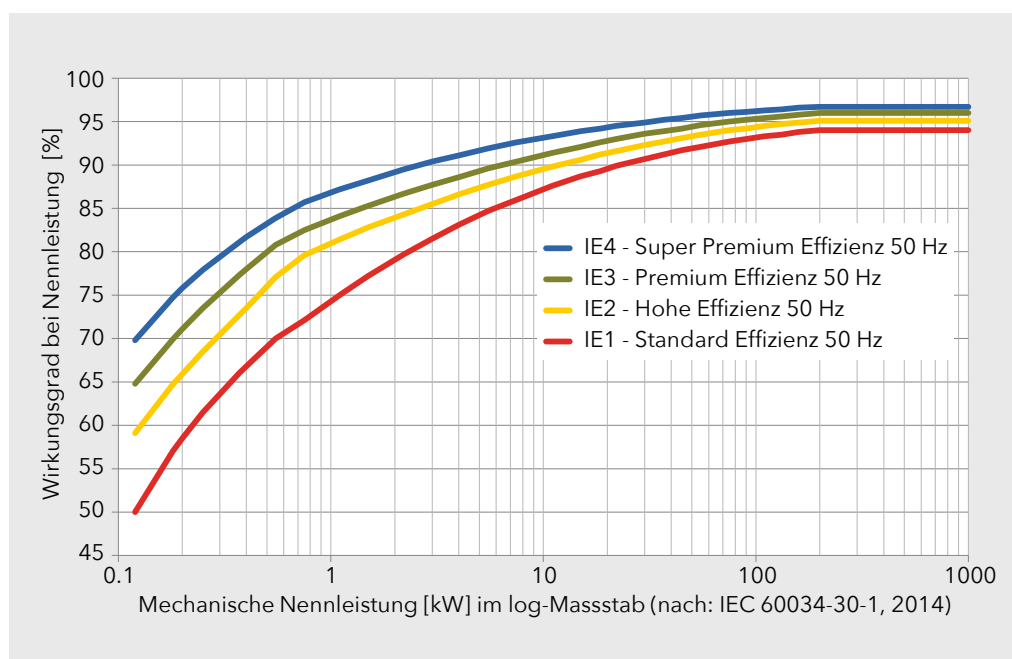


Abbildung 2: Effizienzklassen von Motoren gemäss IEC 60034-30-1

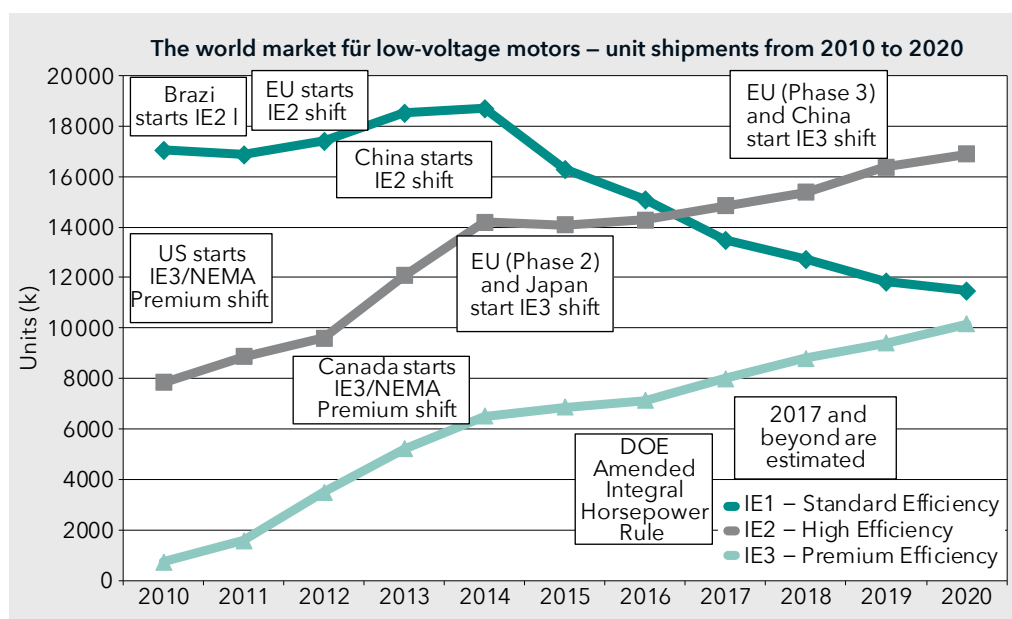


Abbildung 3: Entwicklung der globalen Motorenmärkte: bis 2016: Markterhebung, ab 2017: Schätzung (Quelle: Preston Reine, IHS Markit, in Motor Summit 2017, Zürich)

Mit einem Frequenzumrichter (FU) betriebene Motoren werden als System nach IEC 60034-2-3 geprüft und aufgrund ihres Wirkungsgrades nach IEC 60034-30-2 eingeteilt. Frequenzumrichter werden seit 2017 nach IEC 61800-9-2 geprüft und in Effizienzklassen eingeteilt.

In Anlagen mit einer grossen Zahl von Motoren kommt der Effizienz der eingesetzten Motoren eine hohe Bedeutung zu. Insbesondere wenn diese fast ständig unter Vollast laufen, amortisieren sich Mehrausgaben für Effizienz in der Regel besonders schnell.

Die globalen Märkte verschieben sich: die Entwicklung hin zu hocheffizienten Motoren und neuen Technologien ist unaufhaltbar. Abbildung 3 zeigt den weltweiten Wandel weg von IE1 Motoren zu immer effizienteren IE2- und IE3-Motoren.

Gemäss dem Topmotors Market Report 2018 wurden im Jahr 2017 in der Schweiz die in Abbildung 4 gezeigten Anteile von Motoren nach Effizienzklassen verkauft. Es ist deutlich zu sehen, dass IE2- und IE3-Motoren auf Grund der Mindestanforderungen den Markt dominieren.

Eine positive Entwicklung ist, dass IE1-Motoren heute nahezu vom Markt verschwunden sind und IE4-Motoren kontinuierlich an Marktanteilen zulegen. Fasst man alle Nennleistungen zusammen, zeigt sich die Dominanz der effizienten Motoren noch deutlicher (Abbildung 5).

Allerdings wird in der Schweiz heute noch eine Vielzahl von bestehenden Motoren der Effizienzklasse IE0 und IE1 betrieben, die auf Grund ihrer veralteten Technologie ein erhebliches Effizienzpotential gegenüber zeitgemässen Motoren aufweisen.

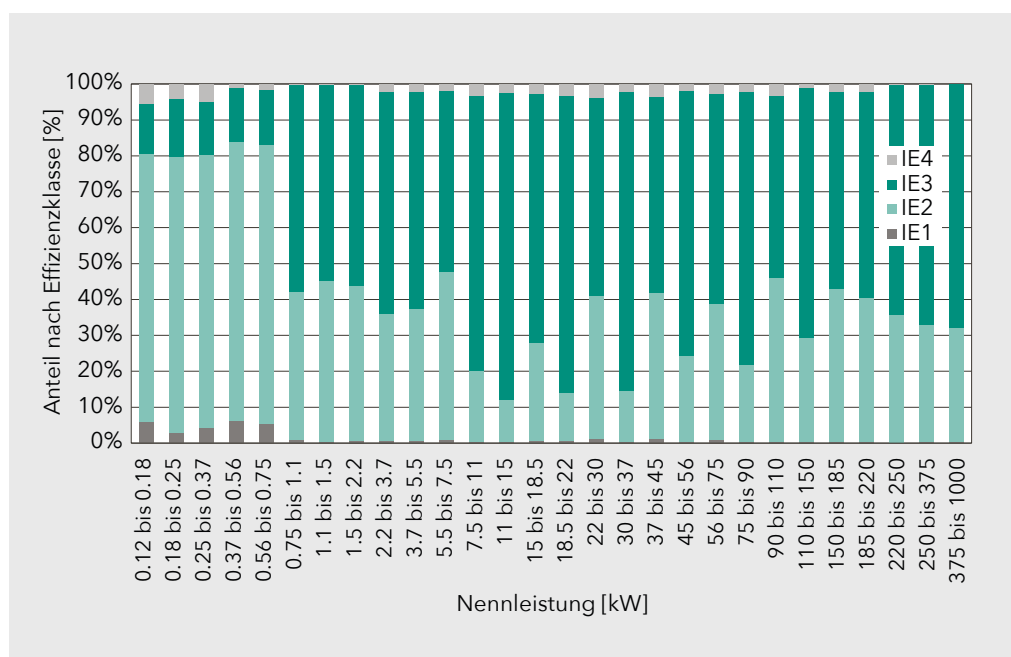


Abbildung 4: Im Jahr 2017 in der Schweiz verkaufte Motoren nach Effizienzklasse und Nennleistung (Quelle: Topmotors Market Report, 2018)

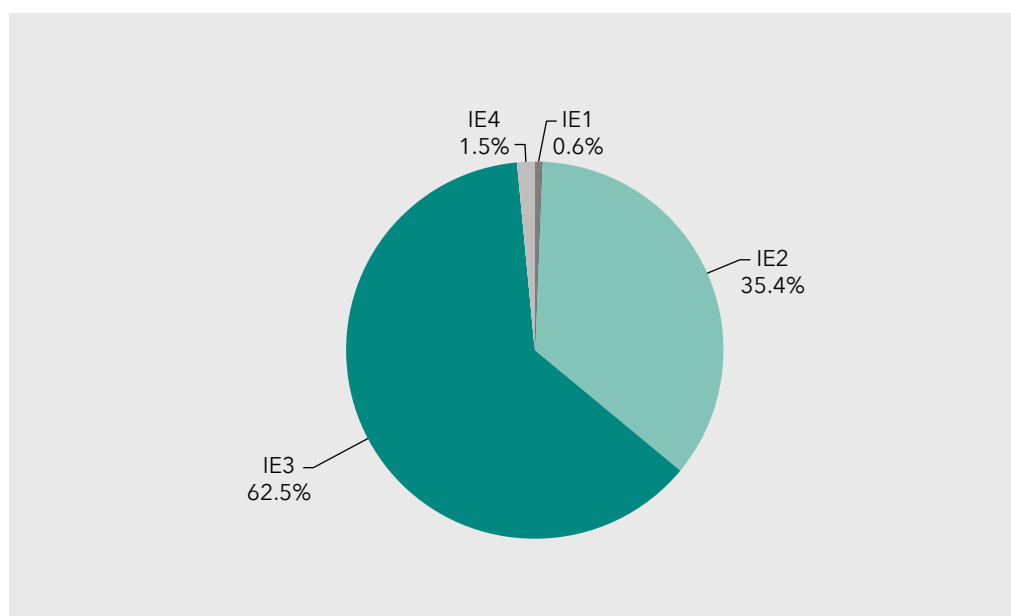


Abbildung 5: Effizienzklassen der in der Schweiz 2017 verkauften Motoren im Leistungs- respektive Geltungsbe- reich der Energieeffizienzver- ordnung: 0,75 kW bis 375 kW (Quelle: Topmotors Market Report, 2018)

# Motorentechnologien im Überblick

Wie die folgende Auflistung der Motortypen zeigt, haben die Ecodesign Richtlinien in Europa seit 2008 und die darauf gestützten Mindestanforderungen in der Schweiz, sowie die Forderung nach hoher Energieeffizienz den Markt für effiziente Motoren enorm beeinflusst. Die technische Entwicklung ist noch nicht abgeschlossen und bietet noch weitere Optimierungspotenziale. Für den Anwender gilt es zu klären, wann der Einsatz eines geregelten, hocheffizienten Motors sinnvoll ist und welche Motorenteknologie für den Einsatzfall am besten geeignet ist. Die Technologien unterscheiden sich durch:

1. Kosten: siehe Tabelle 1
2. Wirkungsgrad bei veränderter Drehzahl: siehe Abbildung 6
3. Wirkungsgrad bei veränderter Drehzahl und Drehmoment: siehe Abbildung 8
4. Gewicht: siehe Abbildung 7
5. Eignung für häufige und rasche Starts
6. etc.

## Kosten

Im Rahmen des Topmotors Market Report werden jährlich Marktuntersuchungen zu den Kosten für IE2-, IE3- und IE4-Motoren durchgeführt. Es werden die spezifischen Kosten je kW Nennleistung (unabhängig von der Motorenteknologie) ermittelt und somit die Mehrkosten für energieeffizientere Motoren dargestellt. Die Auswertung der Verkaufsdaten von 2017 ergab Mehrkosten gemäss Tabelle 1.

## Wirkungsgrad bei veränderter Drehzahl

Die Anpassung der Drehzahl an wechselnde Lasten durch einen Frequenzumrichter (FU) kann bedeutende Einsparungen zur Folge haben. Es gilt aber immer zu bedenken, dass ein FU an sich keine Energie spart - im Gegenteil. Wie jede Komponente eines Antriebssystems hat auch ein FU Eigenverluste, die sich negativ auf den Energieeffizienz auswirken. Es gilt daher durch die Drehzahlreduzierung mehr Energie einzusparen, als der FU zusätzlich verbraucht. Aber gerade in geschlossenen Systemen wie Lüftungsanlagen oder Pumpkreisläufen wirkt sich eine Drehzahlreduzierung mit der 3. Potenz auf die Leistung aus. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis von Messungen an

Klasse	IE2	IE3	IE4
Relativer Preis	100%	113%	131%

**Tabelle 1: Preisvergleich der Effizienzklassen von Motoren: Mittelwert der spezifischen Preise IE2, IE3, IE4 von je 0,12 kW bis 1000 kW (Quelle: Topmotors Market Report, 2018)**

2.2 kW Motoren verschiedener Motorenteknologien. Bei grösseren Nennleistungen sind die Wirkungsgradunterschiede kleiner.

## Wirkungsgrad bei veränderter Drehzahl und Drehmoment

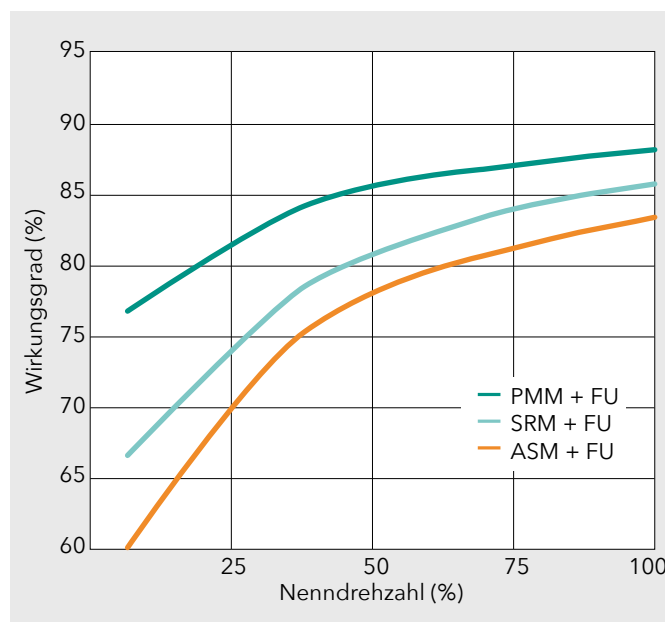
Die verschiedenen Motorenteknologien zeigen unterschiedliche Charakteristiken bei wechselnder Last (Drehzahl und Drehmoment). Abbildung 7 stellt die Ergebnisse von Messungen der Wirkungsgrade von Motorenteknologien jeweils inkl. FU dar.

## Gewicht

Basierend auf den unterschiedlichen Motorenteknologien und den damit verbundenen Materialien, ergeben sich für die gleiche Nennleistung unterschiedliche Gewichte. Je nach Anwendung kann das bei der Auslegung eine Rolle spielen und sollte daher geprüft und allenfalls berücksichtigt werden. Abbildung 8 zeigt das Ergebnis einer Untersuchung zum relativen Gewicht der einzelnen Motorenteknologien im Vergleich zu einem 11 kW IE3 Asynchronmotor.

## Eignung für häufige und rasche Starts

Motoren für häufige und rasche Starts erfordern eine geringe Massenträgheit, d.h. einen leichten Rotor. Für Antriebsfunktionen mit genauer Winkelposition mit kontrollierter Beschleunigung und Drehgeschwindigkeit, wer-



**Abbildung 6: Wirkungsgradvergleich 4-Pol-Motoren mit 2.2 kW, belastet mit einem Drehmoment von 7 Nm (Quelle: Jorge Estima/EEMODS'17)**

den sogenannte Servomotoren verwendet. Ein Servomotor ist ein üblicher Elektromotor (unabhängig von seiner Technologie) hoher Dynamik, mit niedrigem Trägheitsmoment (schlanker Rotor), der über eine Positionsbestimmung verfügt.

## Asynchron-Motor (ASM)

Auch heute noch ist der bereits 1889 von AEG entwickelte ASM das «Arbeitspferd» in der Industrie. Er ist äusserst robust und zuverlässig. Der Trend zum ASM wurde durch die Entwicklung von Softstartern und Frequenzumrichtern noch deutlich verstärkt. Der Softstarter ermöglicht das sanfte Beschleunigen eines Motors innerhalb gewünschter Zeit und verringert dadurch den Anlaufstrom. Nach dem Startvorgang und dem Erreichen der Nenndrehzahl wird der Softstarter in der Regel überbrückt; der Motor

liegt dann direkt am Netz. Ebenso kann der Motor während einer vorgegebenen Zeit angehalten werden. Ein Softstarter ist somit ideal für das Starten und Stoppen von Anwendungen mit konstanter Drehzahl geeignet. Soll während des Betriebs die Drehzahl des Motors verändert werden können, wird ein Frequenzumrichter benötigt. Dieser erlaubt neben dem kontrollierten Starten und Stoppen auch eine genaue und energieeffiziente Drehzahlregelung des Motors.

Der ASM ist eine einfache Form eines Induktionsmotors und besteht aus einem feststehenden Stator, in dem sich der Rotor dreht. Der Stator ist dabei meistens zugleich das Gehäuse und besteht bei Elektromotoren aus einem Stapel von Stahlblechen mit Schlitzen, die als gemeinsamer Kern für die Statorwicklungen dienen. In den Schlitzen des Stators liegen Wicklungspakete aus Kupferdraht, die je

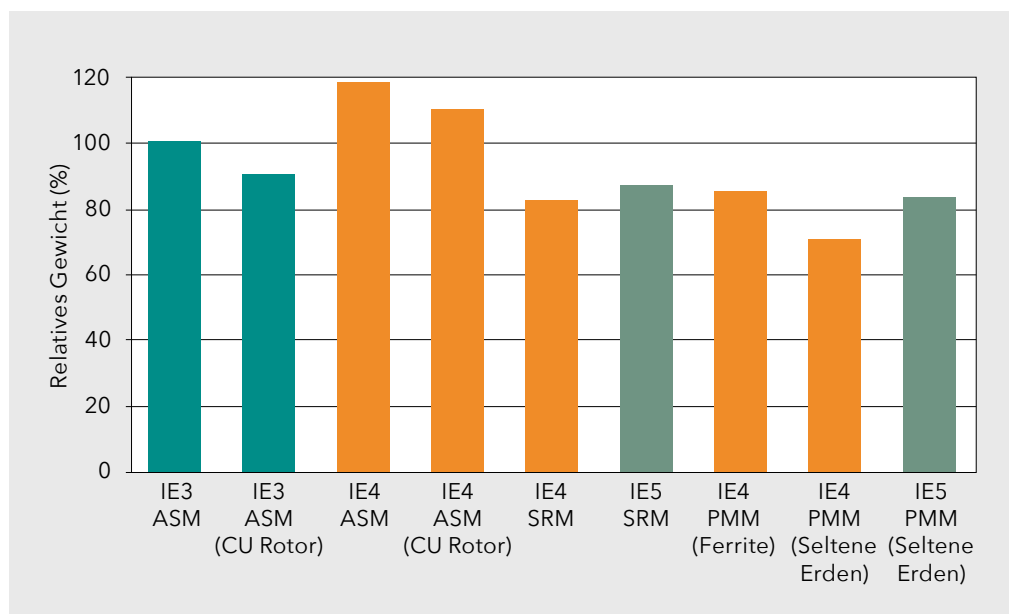


Abbildung 7: Gewichtsvergleich von Motoren unterschiedlicher Technologien (Basis: 11 kW Motoren, IE3, ASM; 1500 U/min; Aluminium Gehäuse) (Quelle: Anibal de Almeida, MS'16)

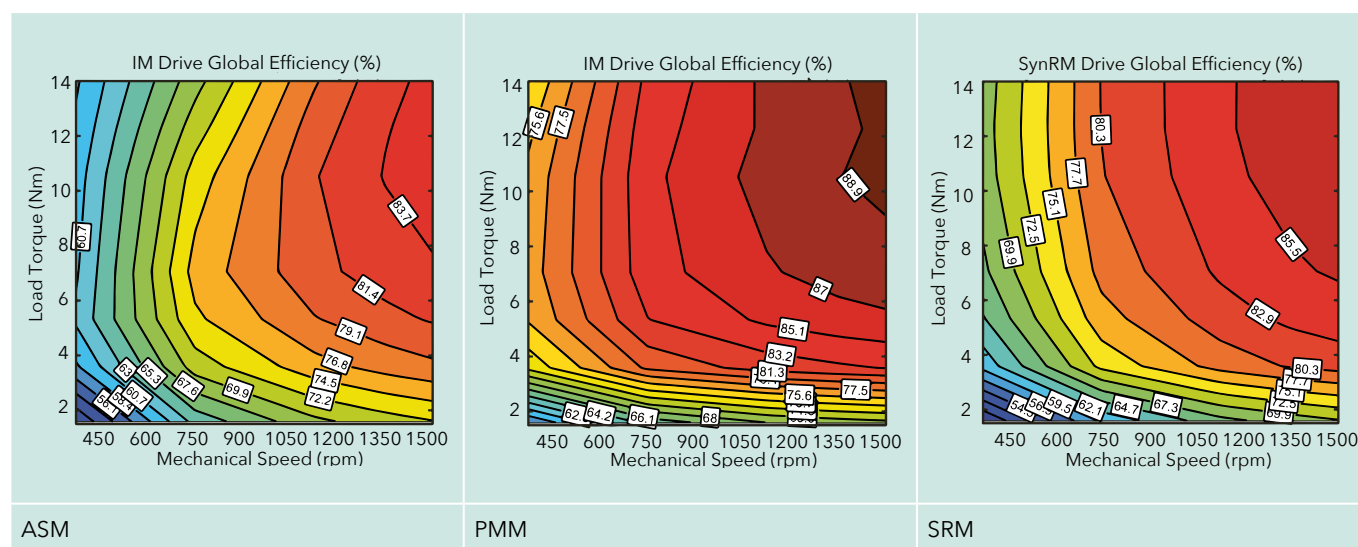


Abbildung 8: Kurven gleicher Wirkungsgrade in Abhängigkeit des Drehmomentes und der Drehzahl für Asynchron-, Permanentmagnet- und Synchronreluktanz-Motoren, jeweils mit Frequenzumrichter, Leistung 2,2 kW (Quelle: Jorge Estima/EEMODS'17)

nach Polzahl des Motors verschaltet sind. Die Polzahl des Motors definiert seine Synchrondrehzahl (siehe Tabelle 2). Durch die Phasenverschiebung des 3-phasigen Netzes entsteht im Stator ein umlaufendes Drehfeld, das auf den Rotor wirkt. Kleinere Leistungen (< 2 kW) können auch mit Hilfe eines Kondensators am 1-phasigen 230-V-Netz betrieben werden.

Der Rotor eines Elektromotors besteht aus der Welle und der Rotorwicklung. In der Regel besteht die Wicklung aus einem Paket von Stahlblechen, in die Kupfer- oder Aluminiumstäbe eingelassen sind – der sogenannte Käfig. Zwischen Rotor und Stator liegt ein schmaler Luftspalt. Das im Stator umlaufende Magnetfeld induziert über den Luftspalt einen Strom im Rotor, der ein radiales Drehfeld aufbaut, das im Rotor die Drehbewegung erzeugt. Auf Grund der induzierten Ströme im Rotor spricht man von einem Induktionsmotor.

Die Rotordrehzahl ist lastabhängig kleiner als die des umlaufenden Statorfeldes. Die reale Drehzahl des Rotors bei Nennlast ist auf dem Typenschild des Motors angegeben. Bei Leerlauf ist sie sehr nahe der Synchrondrehzahl. Die Differenz zwischen der Synchrondrehzahl aufgrund der Netzfrequenz (umlaufendes Statorfeld) und der Drehzahl des Rotors (Nennzahl des Motors) wird als Schlupf bezeichnet. Der ASM verdankt seinen Namen der Tatsache, dass er nicht synchron mit der Netzfrequenz des Statorfeldes dreht.

Für eine Verbesserung des Wirkungsgrades werden oft magnetisch bessere, grössere oder mehr Bleche für den Aufbau von Stator und Rotor eingesetzt. Dies kann in der Praxis teilweise zu Motoren mit grösseren Abmessungen führen. Allerdings sind alle Hersteller bemüht, die standardisierten IEC-Anschlussmasse (gemäss IEC 60072-1/-2/-3) einzuhalten, um eine Kompatibilität mit den weit verbreiteten Motoren in bestehenden Anlagen zu gewährleisten. Daher sind die normierten Anschlussmasse (Fussabstand, Wellenhöhe, Wellendurchmesser) in der Regel gleich, nur der Stator fällt teilweise grösser (länger) aus.

Polzahl	Polpaare	Synchrondrehzahl $n_{sync}$ 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

Tabelle 2: Synchrondrehzahlen nach Anzahl der Pole

Vor dem Austausch eines Motors soll geprüft werden, ob ein Ersatz überhaupt notwendig ist. Ein zehn Jahre alter ASM kann vielfach einen genügenden Wirkungsgrad haben, während andere Systemkomponenten günstiger ersetzt werden können.

Grundsätzlich geht der Motorstandard IEC 60034-30-1 davon aus, dass die Wirkungsgradklasse IE4 mit einem ASM prinzipiell möglich ist. Viel schwieriger wird es sein, IE5 bei netzbetriebenen Motoren zu erreichen.

Eine Variante des Standard-Asynchronmotors mit hohem Wirkungsgrad ist der ASM mit einem Kupferkäfig im Rotor anstelle eines Aluminiumkäfigs. Er verfügt über den gleichen Aufbau und das gleiche Funktionsprinzip, unterscheidet sich aber im Rotormaterial. Die Kupferwicklung hat einen niedrigeren elektrischen Leitwiderstand als das Aluminium und reduziert damit die Verluste im Rotor. Der Motor kann so leicht die Wirkungsgradklasse IE3 oder sogar IE4 erreichen. Auch der ASM mit Kupferrotor kann direkt am Netz oder mit Frequenzumrichter betrieben werden. Seine Bauform ermöglicht Motoren der Effizienzklasse bis zu IE4 in den IEC Standard-Baugrössen. In manchen Fällen kann dieser Motortyp die benötigte Leistung sogar mit einer kleineren Baugrösse erreichen. Erkauft werden diese Vorteile durch Nachteile bei der Fertigung. Denn die hohe Schmelztemperatur des Kupfers (etwa 1100°C) im Vergleich zum Aluminium (etwa 660°C) erfordert hochwertigere Werkzeuge und Druckgussanlagen und verteuert die Material- und Herstellungskosten des Motors. Zudem ist Kupfer deutlich teurer als Aluminium. Aufgrund des niedrigeren Widerstands haben Motoren mit Kupferrotor oft einen höheren Anlaufstrom sowie ein niedrigeres Anlaufmoment. Dies ist bei der Auslegung und beim Austausch älterer ASM zu beachten.



Abbildung 9: Schemabild eines ASM (Quelle: Danfoss)



## Permanentmagnet-Motor (PMM)

Im Vergleich zum ASM besitzt der PMM keine Rotorwicklung, sondern Permanentmagnete, die entweder auf dem Rotor sitzen oder in ihm verbaut sind. Im einfachsten Fall ist der Stator analog zum ASM als verteilte Dreiphasenwicklung aufgebaut.

Beim PMM handelt es sich um einen Synchronmotor, das heisst, es gibt keinen Schlupf zwischen Rotor- und Stator-drehfeld wie beim ASM. Die Permanentmagnete sorgen für die notwendige Magnetisierung des gesamten Motors, was verlustlos erfolgt. Damit steigt der Wirkungsgrad des Motors gegenüber dem ASM, der höhere Kupfer- (Aluminium-), bzw. Stator- und Rotorwiderstandsverluste aufweist, die durch den für die Magnetisierung benötigten Strom entstehen. Diese Technik wird bereits seit langem in Servomotoren verwendet. Neu ist jedoch – aufgrund des höheren Wirkungsgrads – die Anwendung als IEC-Normmotor und die dazugehörigen Bauform.

Kurzzeitig waren zwischen 2000 und 2010 die Preise für die Magnete sehr hoch, da für ihre Fertigung die teuren Seltenen Erden nötig sind. Heute sind die Preise für die Seltenen Erden wieder deutlich gesunken, weil neue Minen für diese Rohstoffe erschlossen wurden oder günstigere Ersatzmaterialien verfügbar sind. Hersteller prüfen, ob möglicherweise Magnete mit Ferriten anstelle von Seltenen Erden einsetzbar sind. Erste Tests sind vielversprechend.

Ein Nachteil der PMM ist die Notwendigkeit, einen Frequenzumrichter für den Betrieb einzusetzen. Zudem muss dieser wiederum eine Positionsrückmeldung bekommen, um das Magnetfeld optimal an die Position der Permanentmagnete anzupassen und die Rotation zu erzeugen. Zwei weitere Nachteile der Motoren sind zum einen die Gefahr der Entmagnetisierung bei hohem Strom und hoher Temperatur, was in der Praxis eher selten auftritt, und zum anderen ein Problem bei der Wartung von Motoren: Durch die starken Magnete im Rotor lässt sich dieser nur schwer und mit entsprechendem Spezialwerkzeug aus dem Stator ausfahren und warten.

In der Praxis erreichen aktuelle PMM die Wirkungsgradklassen IE3 und IE4. Damit der PMM auch bei Anwendungen mit konstanter Drehzahl ohne Frequenzumrichter und dessen Eigenverluste sinnvoll betrieben werden kann, wurde ein spezieller «Line-Start-PMM» entwickelt. Dabei handelt es sich um eine Hybridlösung aus ASM und PMM. Ausgerüstet ist er mit einem Käfigrotor, in dem zwischen Oberfläche und Achse Magnete eingebettet sind. Daraus resultiert eine aufwendigere Konstruktion des Rotors, was den Motor teurer macht. Allerdings hat er gegenüber einem konventionellen PMM einen wesentlichen Vorteil: Er kann direkt am Netz ohne Frequenzumrichter gestartet und betrieben werden. Dabei ist während des Anlaufs die Käfigwicklung aktiv. Wenn der Motor auf die durch die Netzfrequenz vorgegebene Drehzahl beschleunigt hat, verhält er sich wie ein PMM und fällt in den Synchronlauf. Diese Form des Anlaufs hat auch einen Nachteil: Der Motor kann beim Start kurz (für höchstens eine halbe Polteilung) rückwärts laufen. Dieses Anfahr-Wechselmoment gibt es ebenso beim ASM am Netz. Allerdings ist es beim Line-Start-PMM wesentlich ausgeprägter. Ausserdem können die Momentenspitzen beim Start sehr hoch ausfallen – im Extremfall bis zum 17-fachen Nenndrehmoment. Der Motortyp beherrscht weder den Schweranlauf noch verfügt er über eine hohe Dynamik. Ferner kann der Motor bei Lastspitzen oder ein wenig zu hoher Belastung aus der Synchronität fallen, was den Wirkungsgrad drastisch verschlechtert. Empfindlich reagiert er zudem auf Unterspannung, wie dies bei Netzschwankungen auftreten kann. Bei Netzbetrieb erreichen Line-Start-PMM die Wirkungsgradklassen IE3 und IE4. Es ist zu beachten, dass bei einem prinzipiell möglichen Umrichterbetrieb häufig die Wirkungsgrade um 5% bis 10% im Vergleich zum Netzbetrieb sinken können. Grund dafür ist die Käfigwicklung, die als Dämpferwicklung wirkt. Die verfügbaren Bauformen entsprechen der IEC-Norm oder sind etwas kleiner. Zudem treten bei diesem Motor die Beschaffungsprobleme der Seltenen Erden auf, da hier ebenfalls Permanentmagnete



Abbildung 10: Zwei PMM, links mit eingebetteten, rechts mit oberflächenmontierten Magneten (Quelle: Danfoss)

zum Einsatz kommen. Der Einsatz von Line-Start-PMM ist kritisch zu prüfen, weil mit einem Kupfer-ASM auch IE4 erreichbar ist.

### Electronically commutated motor (ECM)

Der ECM tritt in der Praxis in vielen unterschiedlichen Varianten auf. So kommt er beispielsweise als kleiner Stellmotor mit wenigen Watt zum Einsatz, aber ebenso im Heizungs-, Lüftungs- und Klima-Bereich als Aussenläufer in Ventilatoren sowie in Nassläufer-Umwälzpumpen. Häufig wird er von Herstellern als Motor mit extrem hohen Wirkungsgrad deklariert. Vor allem bei Kleinstantrieben trifft dies zu, bei denen der ECM zum Beispiel dem Universal- oder Spaltpolmotor (Wirkungsgrad unter 30 %) deutlich überlegen ist. Heute sind die Wirkungsgrade der aktuellen ECM je nach Ausführung vergleichbar mit IE2 bis IE4 Asynchronmotoren.

Ähnlich den PMM ist der Rotor mit Magneten bestückt und der Stator trägt die Drehstromwicklung. Im ursprünglichen Konzept arbeitete der ECM mit einem elektronisch geschalteten Gleichstrom (Direct Current, DC), der immer nur zwischen zwei Strängen fließt. Daher rührt auch die Bezeichnung BLDC (Brushless DC-Motoren) oder ECM (Electronically Commutated Motor). Technologisch gehört der BLDC zu den Wechselstrom-Motoren. Daraus folgt, dass die Bezeichnung BLDC leicht irreführend sein kann. Zur Kompensation der Nachteile des BLDC-Konzepts wie dem höheren Phasenstrom und Momenten-Rippel, haben Hersteller bessere Verfahren zur Steuerung entwickelt. Mittlerweile sind bereits sensorlose Verfahren erhältlich. Beide Konzepte - das BLDC- wie auch die neue Pulsweitenmodulation-Sinusansteuerung (PWM-moduliert) - laufen unter dem Begriff EC-Motor. Daher besteht für den Anwender die Problematik, zu unterscheiden, ob er es mit einem BLDC oder mit einem verbesserten, PMM-ähnlichen Konzept zu tun hat. Aufgrund der Permanentmagnete ergeben sich die gleichen Einflussfaktoren bezüglich der Seltenen Erden und Wartung wie beim PMM.

### Der Synchron-Reluktanz-Motor (SRM)

Eine weitere Variante bei den Drehstrommotoren sind die Synchron-Reluktanz-Motoren SRM, die ohne teure Magnete auskommen. Sie nutzen die Reluktanzkraft, die aus der rotorlageabhängigen Änderung des magnetischen Widerstands resultiert. Diese Technik ist nicht neu, kommt allerdings heute neu auf den Markt. Dies rührt daher, dass Hersteller bisher diese Motoren nicht auf Energieeffizienz getrimmt haben. Spezielle Schnitte der Rotorbleche führen die Magnetlinien im Innern des Rotors und erzeugen so ein Reluktanz-Moment mit hoher Energieeffizienz. Damit ergeben sich in der Praxis derzeit Wirkungsgrade im Bereich von IE2 bis IE4, bei kleineren Leistungen eher IE2.

Erst bei Leistungen ab etwa 15 kW erreichen die Motoren die Wirkungsgradklasse IE4. Zudem weisen sie auch sehr gutes Verhalten bei kleineren Drehzahlen auf.

Für den Betrieb am Netz benötigen SRM genau wie die PMM einen FU. Derzeit zeichnen sich diese Motoren noch durch die eher hohen Kosten aus. Mit steigenden Stückzahlen sind allerdings sinkende Preise zu erwarten, weil der Aufbau und die Fertigung relativ einfach sind.

Wie auch beim Line-Start-PMM nutzt der «Direct-On-Line» (DOL-) SRM das Prinzip des Käfigrotors. Dazu füllt er offene Stellen im Rotorblech mit Aluminium aus und schliesst diese an den Enden kurz. Auch hier liegt der große Vorteil darin, dass dieser Motor direkt am Netz gestartet und betrieben werden kann. Gleichzeitig ergibt sich daraus ein besserer  $\cos \varphi$ . Der Nachteil dabei ist, dass die zusätzliche Dämpfung der Käfigwicklung wieder höhere Verluste im Frequenzrichterbetrieb erzeugt.

### Vor- und Nachteile von modernen hocheffizienten Motoren

Eine höhere Effizienz des Motors ist grundsätzlich ein positiver Beitrag zur Einsparung von elektrischer Energie. Die dadurch oft entstehenden Mehrkosten müssen durch die Energiekosteneinsparungen im Betrieb kompensiert werden. Dies ist meistens bei über 2000 Betriebsstunden pro Jahr in weniger als 5 Jahren der Fall. Zudem sind die korrekte Dimensionierung und ein lastangepasster Betrieb immer vorteilhaft und senken die Gesamtkosten. Einige Motortechnologien bergen die Chance, bei gleicher Leistung und höherer Effizienz, kleinere und leichtere Motoren einzusetzen. Geringere Verluste und dadurch tiefere Temperaturen wirken sich meist positiv auf die technische Nutzungsdauer und die Betriebskosten aus.

Mit steigender Effizienz nimmt die Nenndrehzahl von ASM & PMM leicht an. Dieser Effekt beruht auf dem geringeren Schlupf zwischen Netzfrequenz und Rotordrehzahl. Beim 1:1 Ersatz eines alten Motors durch einen gleich grossen, neuen Motor (ohne FU Betrieb) ist zu berücksichtigen, dass z.B. Pumpen und Ventilatoren mit leicht höherer

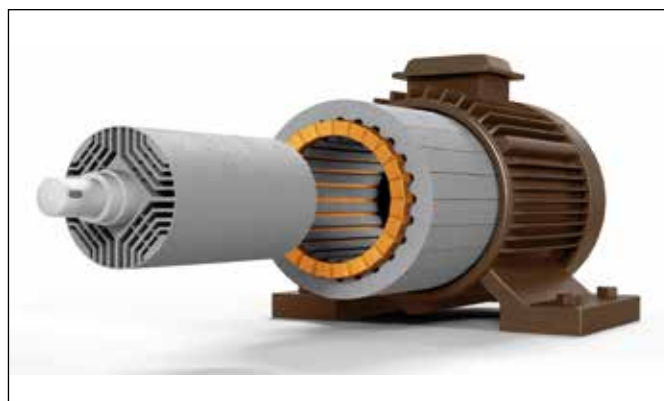


Abbildung 11: Bildschema SRM (Quelle: Danfoss)



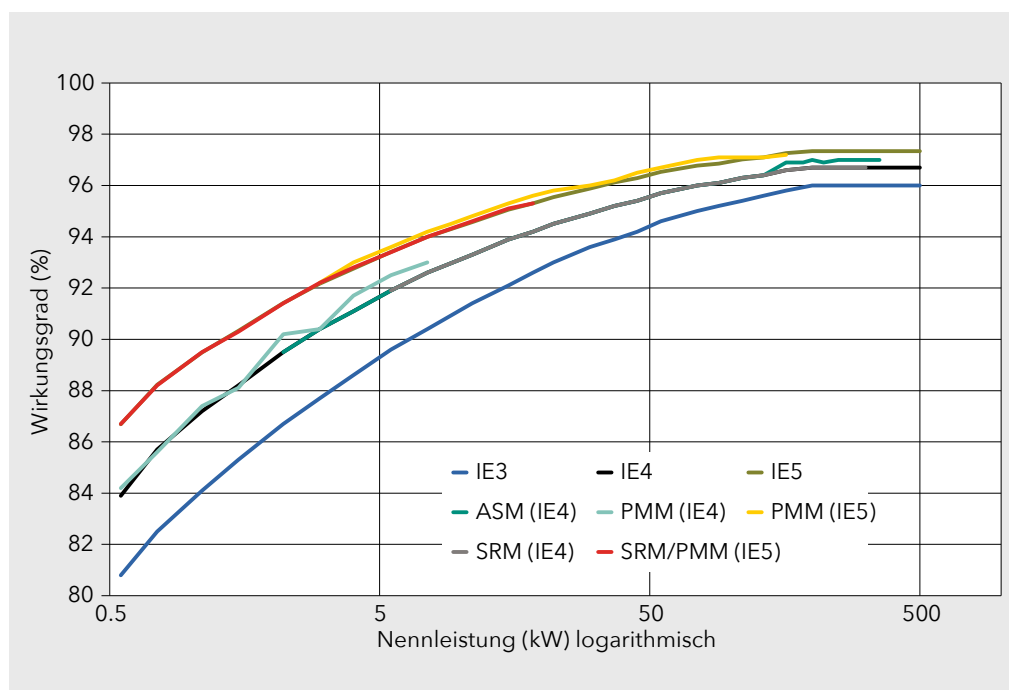
Drehzahl laufen und somit mehr Luft bzw. Wasser als vorher fördern. Dies kann, trotz effizienterem Motor, zu einer höheren elektrischen Leistungsaufnahme (3. Potenz zur Drehzahl) führen. Dieser Effekt kann durch die Anpassung der Transmission (Übersetzungsverhältnis) oder dem Einsatz eines FU vermieden werden.

Die Einsparung durch den Schritt von IE3 zu IE4 ist kleiner als noch vor einigen Jahren von IE1 auf IE2, d.h. der Grenznutzen zu noch höherer Effizienz ist abnehmend.

Ein IE4-Motor kann wegen höheren Anschaffungskosten oder bei Anwendungen mit vielen Lastspielen aufgrund evtl. höherer Trägheitsmomente nicht für alle Anwendungen ratsam sein. Allerdings kann ein PMM mit einem kleineren Massenträgheitsmoment als ein ASM gebaut werden.

Einige der Nachteile bei den verschiedenen Motorentechnologien lassen sich durch Optimierungen abschwächen - so zum Beispiel das Anlaufverhalten bei den direkt am Netz startenden (Line-Start-) PMM.

Die Optimierung muss in der gesamten Antriebseinheit (Motor, FU, Getriebe, Transmission und Anwendung) erfolgen. Ein guter Motor allein genügt nicht zu einem besseren Wirkungsgrad des Gesamtsystems, andere Massnahmen können u.U. günstiger zu einer Verbesserung der Effizienz des Gesamtsystems führen: präzisere Dimensionierung, gute Abstimmung der einzelnen Komponenten, bessere Lastanpassung im Betrieb, Direktantrieb statt Transmission und Getriebe, besserer Wirkungsgrad der Anwendung (Pumpe, Ventilator, Kompressor, etc.) etc.



**Abbildung 12: Messdaten verschiedener Motortechnologien im Vergleich mit IE-Klassen (Quelle: Anibal de Almeida, Motor Summit 2018)**

# Weiterführende Informationen

## Begriffe und Einheiten

Bezeichnung	Abkürzung	Einheit	Indizes, Erklärung
Asynchron-Motor	ASM		
Permanentmagnet-Motor	PMM		
Elektronisch kommutierter Motor	ECM		
Bürstenloser Gleichstrommotor	BLDC		
Synchron-Reluktanz-Motor	SRM		
Frequenzumrichter	FU		auch: VFD (Variable Frequency Drive)
Direct-On-Line	DOL		50 Hz ab Netzeinspeisung
Line-Start			Start ab Netzfrequenz (ohne FU)
Hybrid	mit DOL oder FU einsetzbar		
Gleichstrom	DC	A	Direct Current
Wechselstrom	AC	A	Alternating Current
Leistung	P	kW	e: elektrisch m: mechanisch
Wirkungsgrad	$\eta$ (eta)	-	
Drehmoment	M	Nm	
IE-Code	IE1, IE2, IE3, IE4		Effizienzklassen von Elektromotoren gemäss IEC 60034-30-1

## Normen und Gesetze

### IEC Normen für Motoren-Effizienzklassen und Wirkungsgradtests

	Motor mit fixer Drehzahl	Motor mit geregelter Drehzahl	Frequenzumrichter
Allgemeine Bedingungen, Toleranzen	IEC 60034-1	IEC 60034-1	
Wirkungsgradtest	IEC 60034-2-1	IEC 60034-2-3	IEC 61800-9-2
Effizienzklassen	IEC 60034-30-1	IEC 60034-30-2	IEC 61800-9-2
Baugrössen	IEC 60072-1/-2/-3		

## Europäische Richtlinien

■ Ecodesign Verordnung (EG) Nr. 640/2009 der Kommission vom 22. Juli 2009 zur Durchführung der Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Elektromotoren (Revision pending), Brüssel, 2009

## Schweizerische Mindestanforderungen

■ Energiegesetz, Verordnung über die Anforderungen an die Energieeffizienz serienmässig hergestellter Anlagen, Fahrzeuge und Geräte (Energieeffizienzverordnung, EnEV) vom 1. November 2017 (Stand am 1. Januar 2018)

■ Netzbetriebene Elektromotoren in Annex Nr. 2.7, Bern

## Quellen und weiterführende Literatur

■ Michael Burghardt, Offenbach, Deutschland: Motoren-Technologien im Effizienz-Check, 2014, [www.computer-automation.de/feldebene/antriebe/artikel/107212/8/](http://www.computer-automation.de/feldebene/antriebe/artikel/107212/8/)

■ Jorge Estima: CISE - Electromechatronic Systems, Research Centre, Universidade da Beira Interior, Calçada Fonte do Lameiro, P - 6201-001 Covilhã, Portugal, in: EEMODS 2017, Rom

■ John Petro: Future Trends in Motor System Efficiency, in: Motor Summit, 2018, Zürich

■ Anibal de Almeida: Electric Motors and Variable Speed Drives Efficiency - Adjusting MEPS to Technology Developments, in: Motor Summit 2018, Zürich

■ Preston Reine: IHS Markit, A global update on the market for motor-driven systems, in: Motor Summit 2018, Zürich

■ Impact Energy: Topmotors Market Report 2018, Zürich (unveröffentlicht, erscheint anfangs 2019)

## Editorischer Vermerk

Das Topmotors Merkblatt Nr. 29 Neue Motorentechnologien wurde von Impact Energy im Rahmen des Umsetzungsprogrammes für effiziente Antriebssysteme Topmotors erstellt. Es wurde von Conrad U. Brunner (iE), Michael Burghardt und Norbert Hanigovszki (Danfoss), Prof. Andrea Vezzini (BFH), Jürg Nipkow (ARENA), Rolf Tieben und Petar Klingel (iE) erarbeitet. Lektorat und graphische Umsetzung: Faktor Journalisten AG.