Effizienzpotentiale bei elektrischen Antrieben

Prof. Dr.-Ing. Martina Hofmann,

Professur für erneuerbare Energien, Hochschule Aalen

Wo besteht bei elektrischen Antrieben Effizienzpotenzial?

- Richtige Dimensionierung von Motoren
- Einsatz von Hocheffizienzmotoren (IE3, IE4)
- Einsatz von Frequenzumrichtern für bestimmte Anwendungen
- Sinnvolle Komponentenauswahl im Gesamtsystem
- Richtige Wartung

Richtige Dimensionierung

Wirkungsweise eines Drehstromasynchronmotors

Elektrische Energie

U,I

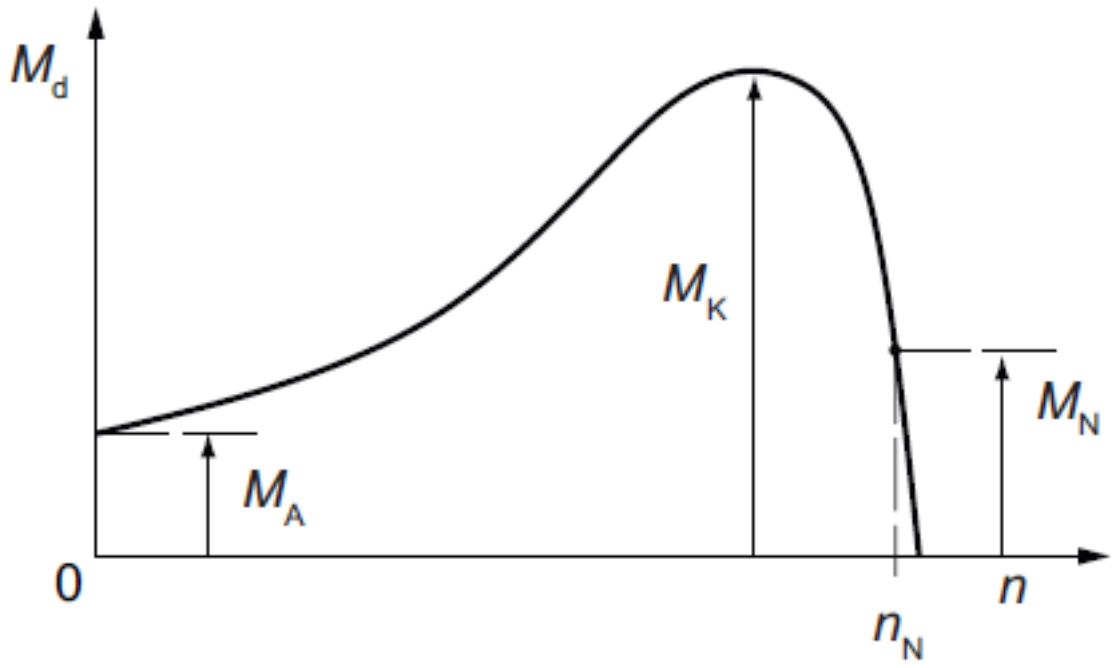
Mechanische Energie

M,n

Der Drehstromasynchronmotor wandelt elektrische Energie in mechanische Energie um.
Diese Energieumwandlung ist verlustbehaftet !
Für den Arbeitsprozess ist diese Verlustleistung „verloren“, muss aber als elektrische Energie (Stromkosten) bezahlt werden.

Quelle: Siemens AG

Die Kennlinie der Asynchronmaschine bei Direktbetrieb



Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Asynchronmaschine

M_A = Anlaufmoment

M_K = Kippmoment

M_N = Nennmoment

n_N = Nenndrehzahl

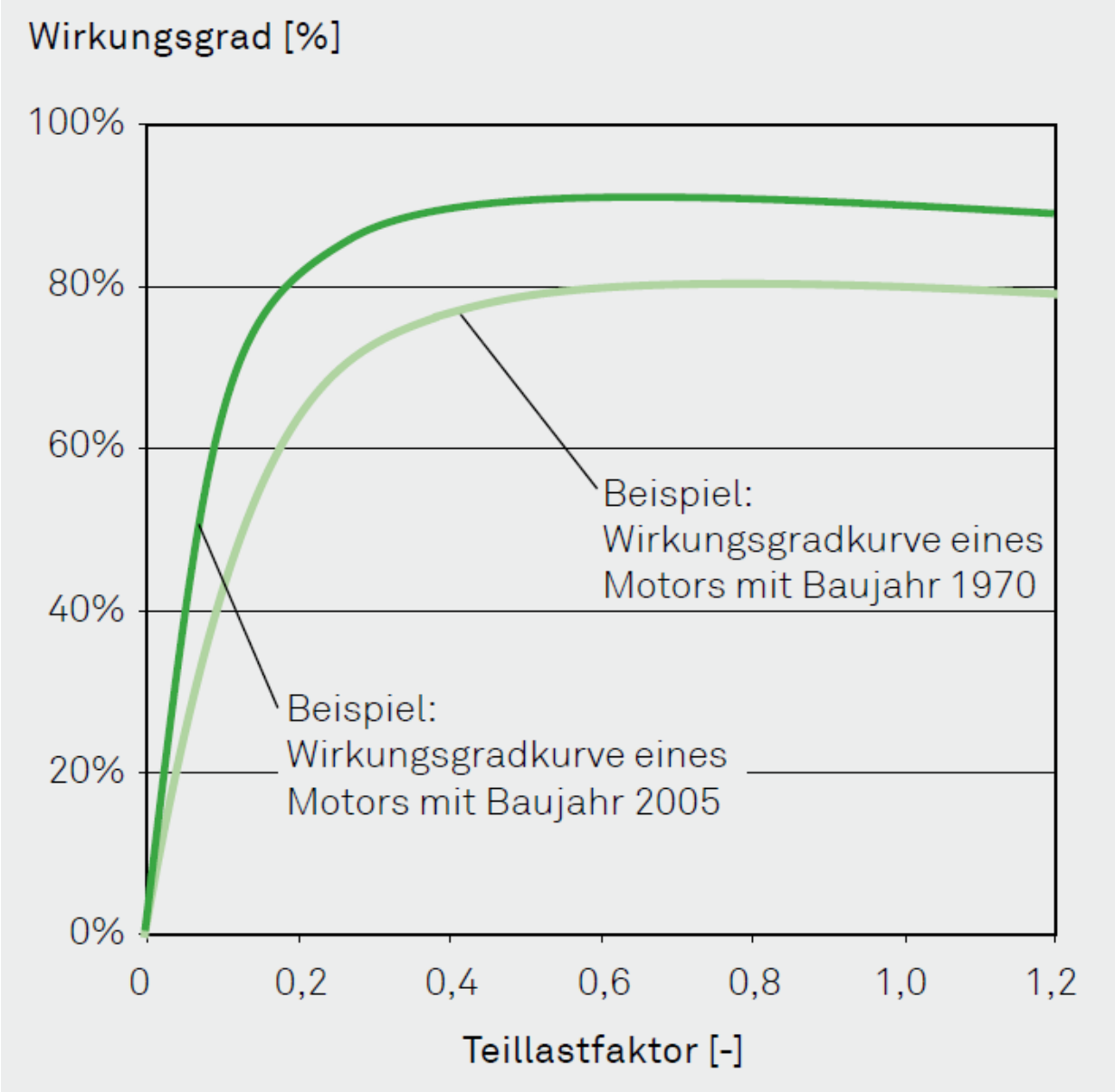
Quelle: Siemens AG

Katalogdaten

P_N, 50 Hz	P_N, 60 Hz 1)	Baugröße	Betriebswerte bei Bemessungsleistung n_N, 50 Hz	M_N, 50 Hz	IE-Klasse	η_N, 50 Hz, 4/4	η_N, 50 Hz, 3/4	η_N, 50 Hz, 2/4	$\cos\varphi_N$, 50 Hz, 4/4	I_N, 50 Hz, 400 V	M_A/M_N	I_A/I_N	M_K/M_N	L_{pfA}, 50 Hz	L_{WA}, 50 Hz	Aluminiumreihe 1LE1001 – *IE2-Ausführung nach IEC 60034-30* Bestell-Nr.	$m_{IM\ B3}$	J	Momentenklasse
kW	kW	BG	min^{-1}	Nm		%	%	%		A				dB(A)	dB(A)	▲ Neuaufnahme	kg	kgm^2	KL
• Kühlung: eigengekühlt (IC 411) bzw. mit Kurzangabe F90 fremdgekühlt ohne Außenlüfter und Lüfterhaube (IC 416) • Wirkungsgrad: High Efficiency IE2, Servicefaktor (SF) 1,15 • Isolierung: Thermische Klasse 155 (Wärmeklasse F), Schutzart IP55, Ausnutzung gemäß thermischer Klasse 130 (Wärmeklasse B)																			
2-polig: 3000 min^{-1} bei 50 Hz, 3600 min^{-1} bei 60 Hz 1)																			
0,75	0,86	80 M	2805	2,6	IE2	77,4	79,5	78,8	0,84	1,67	1,9	4,9	2,3	60	71	▲ 1LE1001-0DA2■-■■■■	9,0	0,00080	16
1,1	1,27	80 M	2835	3,7	IE2	79,6	81,3	80,8	0,83	2,40	2,7	6,0	3,1	60	71	▲ 1LE1001-0DA3■-■■■■	11	0,0011	16
1,5	1,75	90 S	2885	5,0	IE2	81,3	82,3	80,8	0,84	3,15	2,7	6,9	3,6	65	77	▲ 1LE1001-0EA0■-■■■■	13	0,0017	16
2,2	2,55	90 L	2890	7,3	IE2	83,2	83,9	82,3	0,85	4,5	2,5	7,1	3,7	65	77	▲ 1LE1001-0EA4■-■■■■	15	0,0021	16
4-polig: 1500 min^{-1} bei 50 Hz, 1800 min^{-1} bei 60 Hz 1)																			
0,55	0,63	80 M	1440	3,7	–	78,1	78,9	76,1	0,74	1,37	2,2	5,3	3,1	53	64	▲ 1LE1001-0DB2■-■■■■	10	0,0017	16
0,75	0,86	80 M	1440	5,0	IE2	79,6	80,2	78,0	0,76	1,79	2,2	5,6	3,1	53	64	▲ 1LE1001-0DB3■-■■■■	11	0,0021	16
1,1	1,27	90 S	1425	7,4	IE2	81,4	81,7	79,9	0,78	2,5	2,3	5,6	2,9	56	68	▲ 1LE1001-0EB0■-■■■■	13	0,0028	16
1,5	1,75	90 L	1435	10	IE2	82,8	83,5	82,0	0,79	3,3	2,6	6,4	3,4	56	68	▲ 1LE1001-0EB4■-■■■■	16	0,0036	16
2,2	2,55	100 L	1455	14	IE2	84,3	85,1	84,3	0,81	4,65	2,1	6,9	3,3	60	72	1LE1001-1AB4■-■■■■	21	0,0086	16

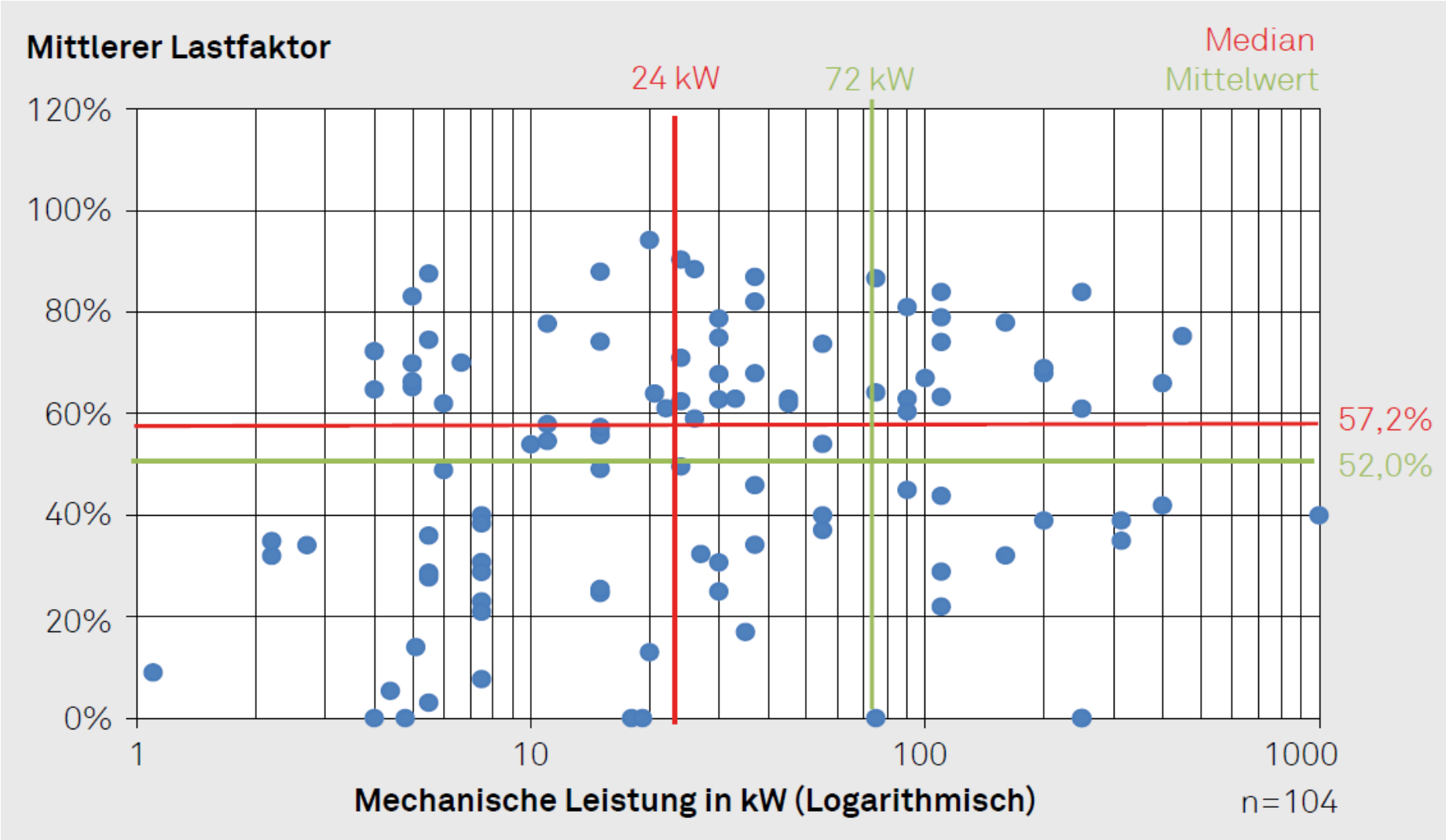
Wirkungsgrad bei Teillast

- Teillast reduziert den Wirkungsgrad.
- Die Einbuße ist je nach Motoren und Effizienzklasse erheblich.
- Dies ist ein wichtiger Grund, weshalb eine Überdimensionierung zu vermeiden ist.



Quelle: Topmotors.ch

Viele Anlagen sind überdimensioniert



Quelle: Topmotors.ch

Auswahl der richtigen Motorgröße – thermische Reserven

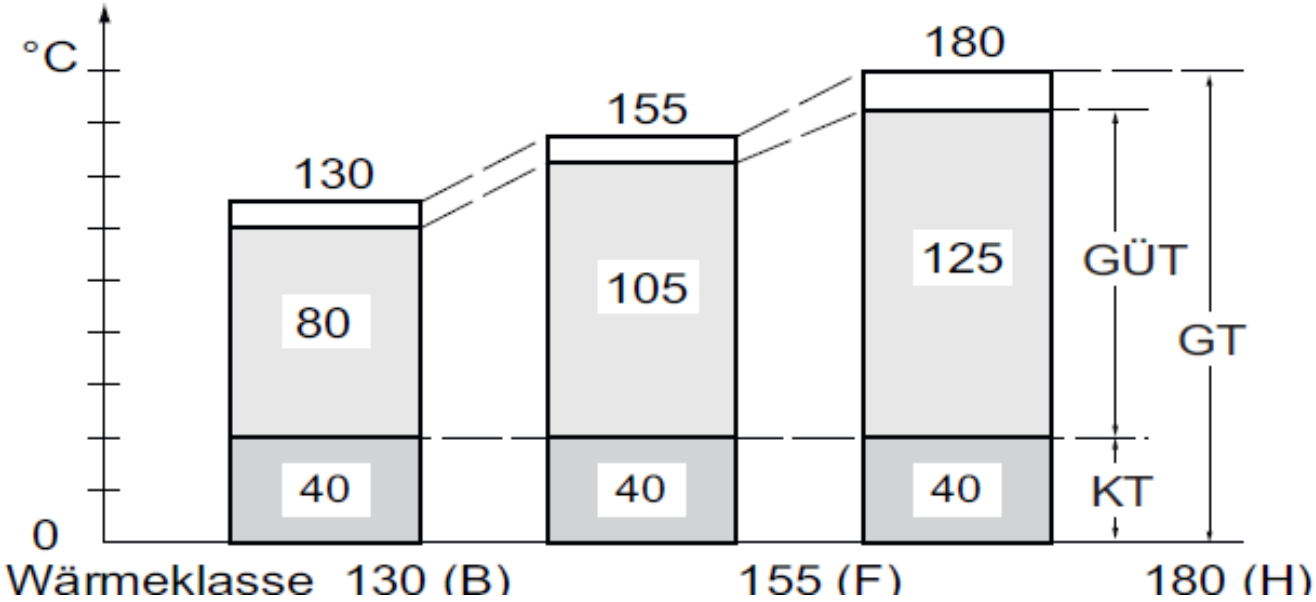
Es sollte immer der **kleinstmögliche** Motor eingesetzt werden

→ hohe Effizienz, geringe Kosten, geringer Platzverbrauch, weniger Ressourceneinsatz, gute Regelbarkeit

Auswahl der richtigen Motorgröße – thermische Reserven

Es sollte immer der **kleinstmögliche** Motor eingesetzt werden

→ hohe Effizienz, geringe Kosten, geringer Platzverbrauch, weniger Ressourceneinsatz, gute Regelbarkeit

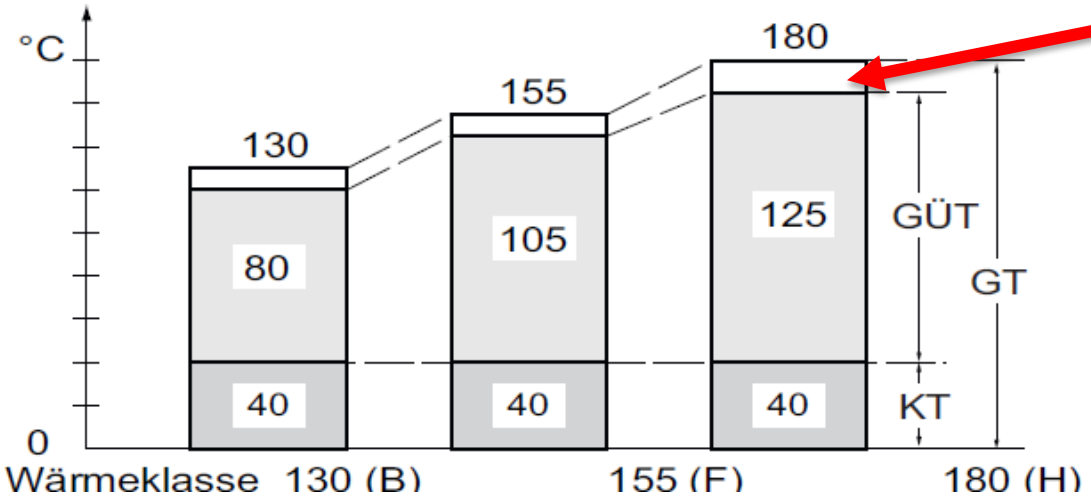


KT	Kühlmitteltemperatur in °C
GÜT	Grenz-Übertemperatur (Erwärmung) in K (Mittelwert)
GT	Grenztemperatur in °C (für den heißesten Punkt in der Wicklung).

Auswahl der richtigen Motorgröße – thermische Reserven

Es sollte immer der kleinstmögliche Motor eingesetzt werden → hohe Effizienz, geringe Kosten, geringer Platzverbrauch, weniger Ressourceneinsatz, gute Regelbarkeit

Thermische Reserve



KT Kühlmitteltemperatur in °C

GÜT Grenz-Übertemperatur (Erwärmung) in K (Mittelwert)

GT Grenztemperatur in °C (für den heißesten Punkt in der Wicklung).

Auszug aus Motorenkatalog:

- Kühlung: eigengekühlt (IC 411) bzw. mit Kurzangabe F90 fremdgekühlt ohne Außenlüfter und Lüfterhaube (IC 416)
- Wirkungsgrad: High Efficiency IE2, Servicefaktor (SF) 1,15
- Isolierung: Thermische Klasse 155 (Wärmeklasse F), Schutzart IP55, Ausnutzung gemäß thermischer Klasse 130 (Wärmeklasse B)

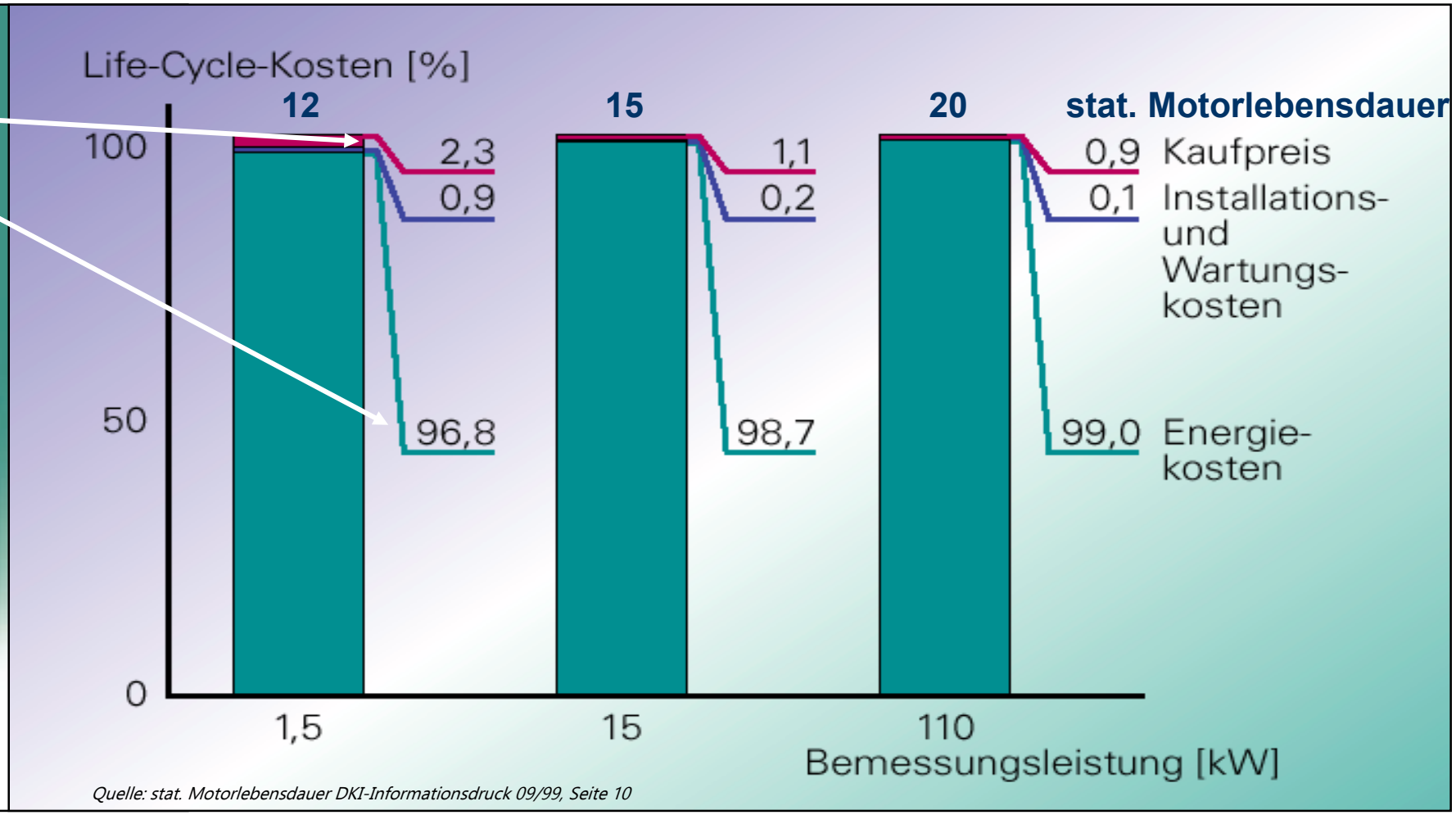
Thermische Reserve

Einsatz von Hocheffizienzmotoren

Energiesparmotoren - Auf die Betriebskosten kommt es an!

Aufwendungen Beispiel:

Motor	440 €
Installation	170 €
Stromkosten	18.585 €



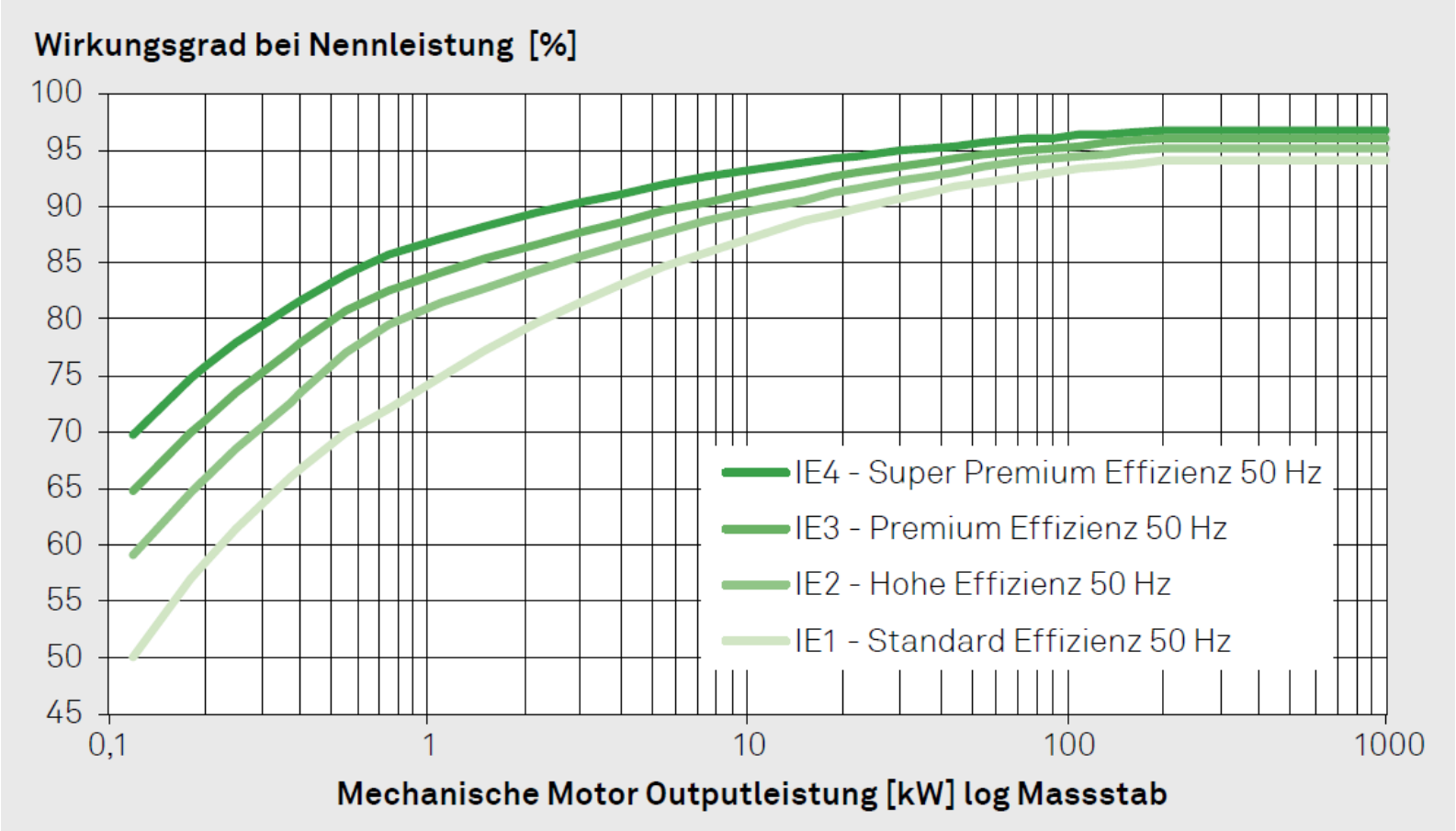
Der Anteil für die Energie an den Gesamtaufwendungen bei einem Motor im Betrieb ist größer als 95%.

Quelle: Siemens AG, modifiziert

Wirkungsgrade von Elektromotoren

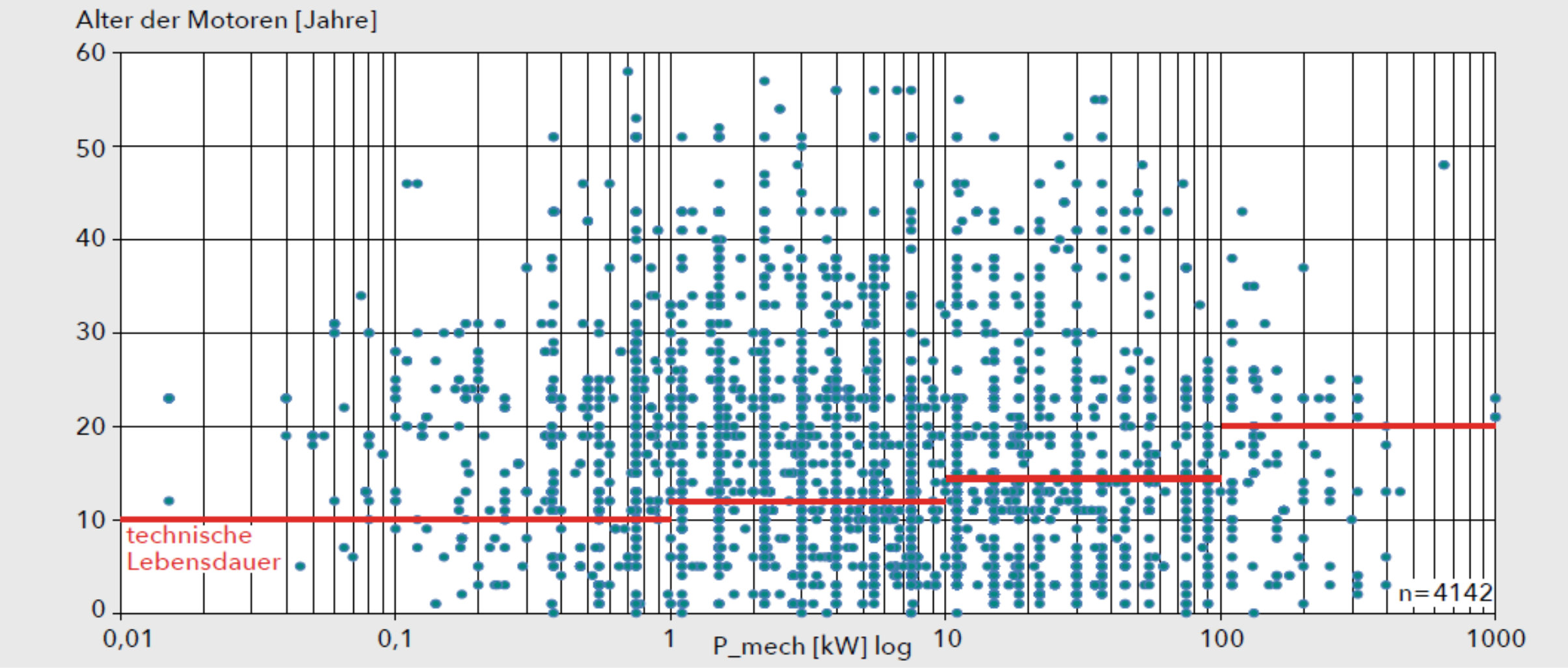
Die Wirkungsgrade der Elektromotoren bei Nennleistung sind gemäß der Norm IEC 60034-30-1 (2014) in vier Effizienzklassen eingeteilt:

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



Quelle: Topmotors.ch

Altersverteilung von elektrischen Antriebssystemen



Quelle: Topmotors.ch

Beispiel 1: Austausch von Motoren mit höherer Effizienz

Ausgangslage:

Zentrale Kälteerzeugung -30°C mit 5 parallel arbeitenden Kompressoren Baujahr 1966. Bestehender Antrieb BBC, 295kW 8-polig Asynchronmotor mit Schleifringen, Anlasswiderstand im Rotorkreis welcher im Normal-betrieb überbrückt wird.

Leistungsbedarf:

Messung der Leistungsaufnahme über einen Zeitraum von mehr als 300 h

- Energieaufnahme während der Messdauer 73'037 kWh
- mittlere Leistungsaufnahme 218 kW
- Wirkungsgrad gemäß IE0 92,8%, Berechnetet Wellenleistung 202 kW

Quelle: Birr Machines AG

Beispiel 1: Einsparungen

Auslegung neu Motor:

Käfigläufermotor, Effizienzklasse IE4 ABB, 315 kW, 8-polig

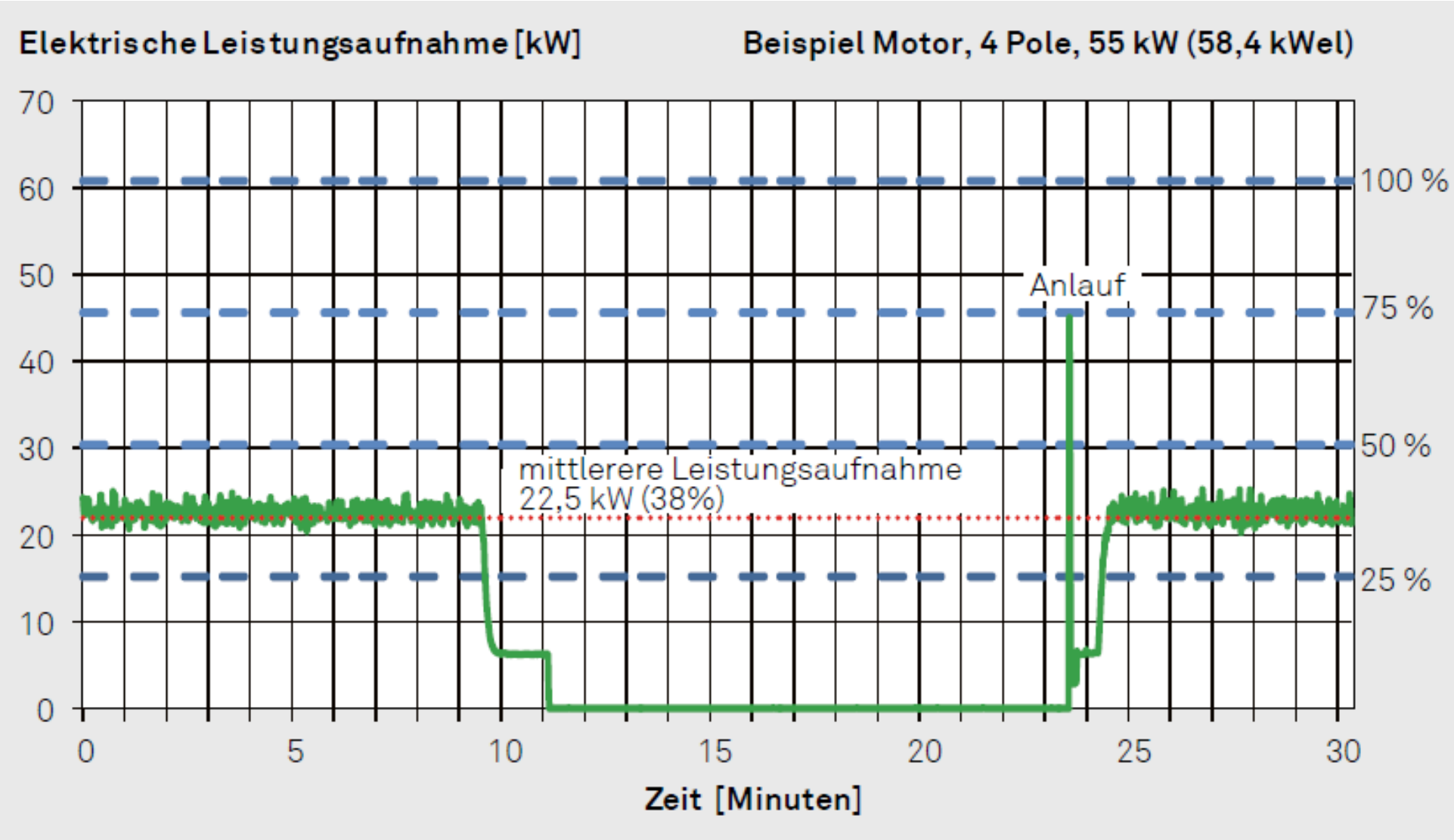
Der neu Antrieb läuft mit einer Wellenleistung von 202 kW, was 64% der neuen Motorleistung entspricht.

Einsparung:

- Jahresverbrauch heute 1‘250 MWh
- Wirkungsgrad alt 92,8%
- Wirkungsgrad neu 95,4% Teillast
- jährliche Einsparung 1‘250 MWh x (1 – 92,8%/95,5%) = 34,1 MWh/a → bei 20 ct/kWh → 6.820 €/a
- Totale Einsparung 639 MWh

Quelle: Birr Machines AG

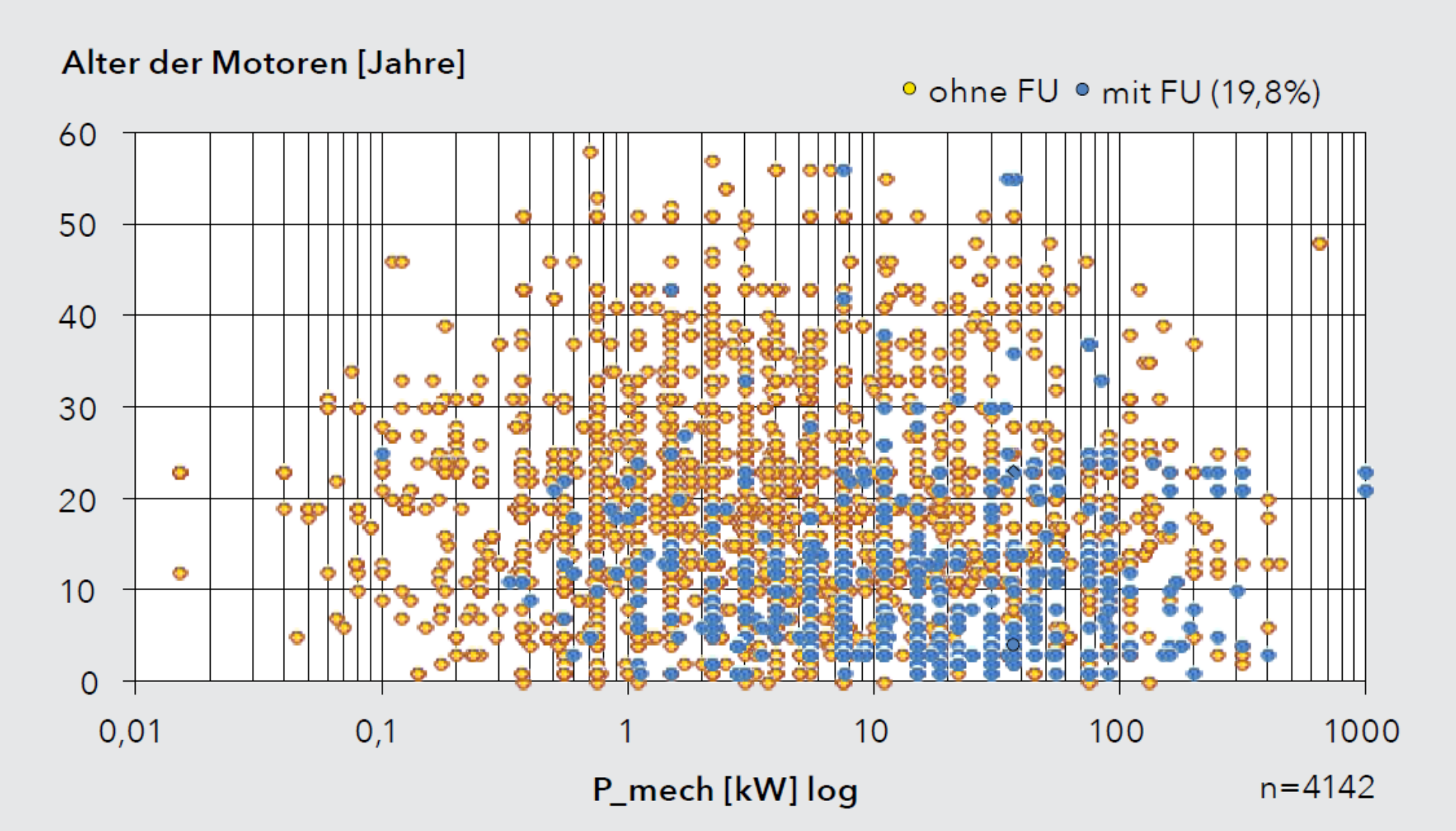
Wie kann man Einsparpotenziale finden?



Quelle: Topmotors.ch

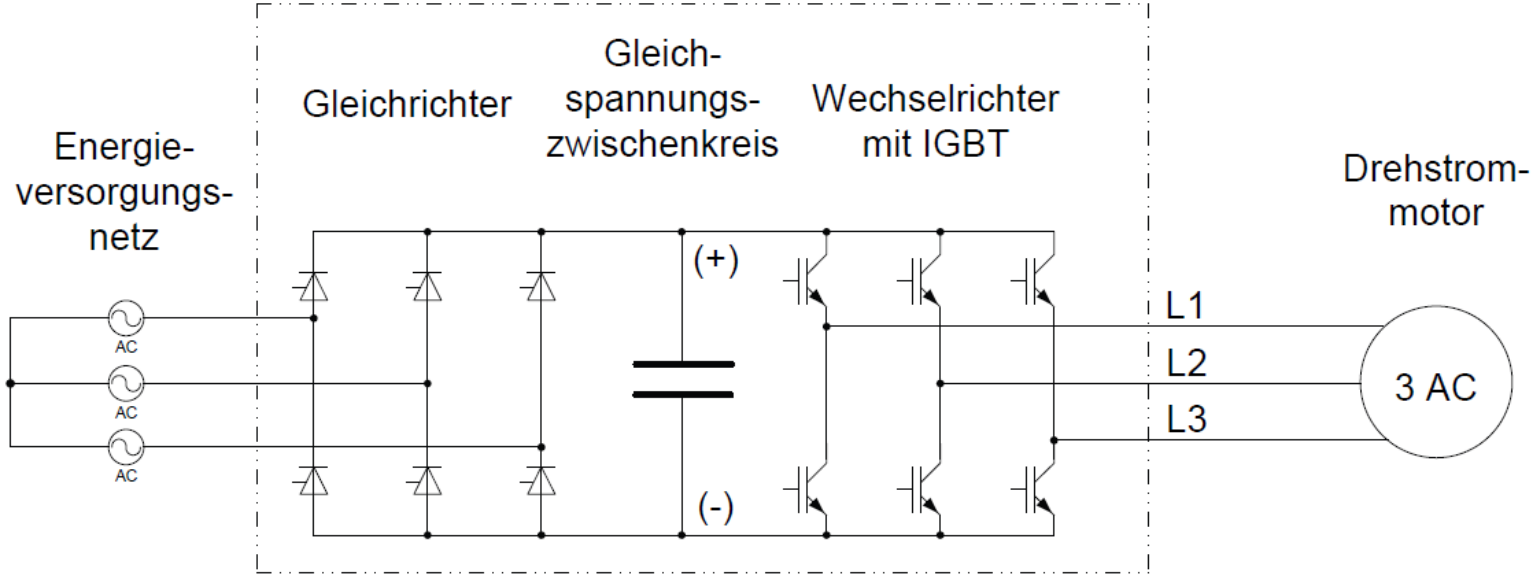
Einsatz von Frequenzumrichtern

Einsatz von Frequenzumrichtern



Quelle: Topmotors.ch

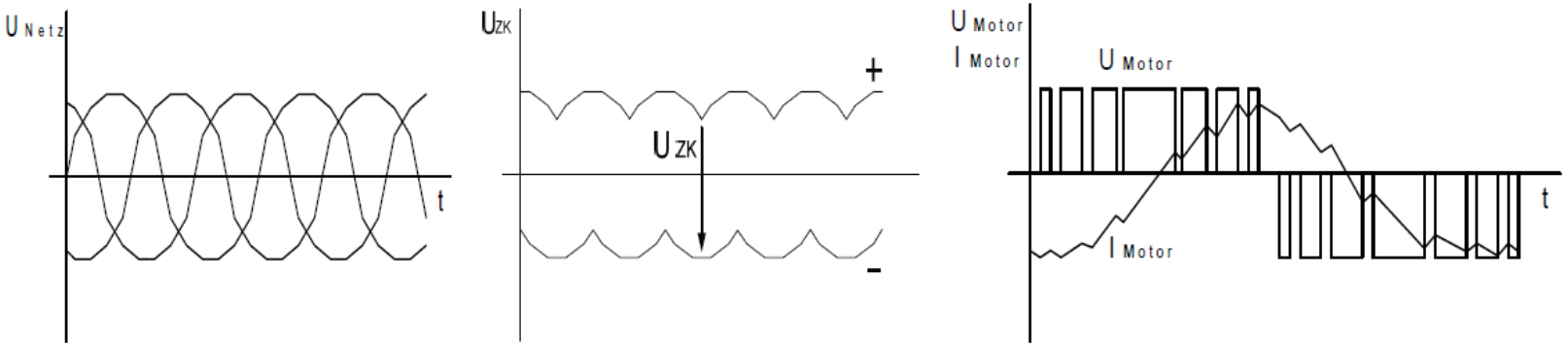
Prinzipschaltbild eines Pulsumrichters mit Gleichspannungszwischenkreis



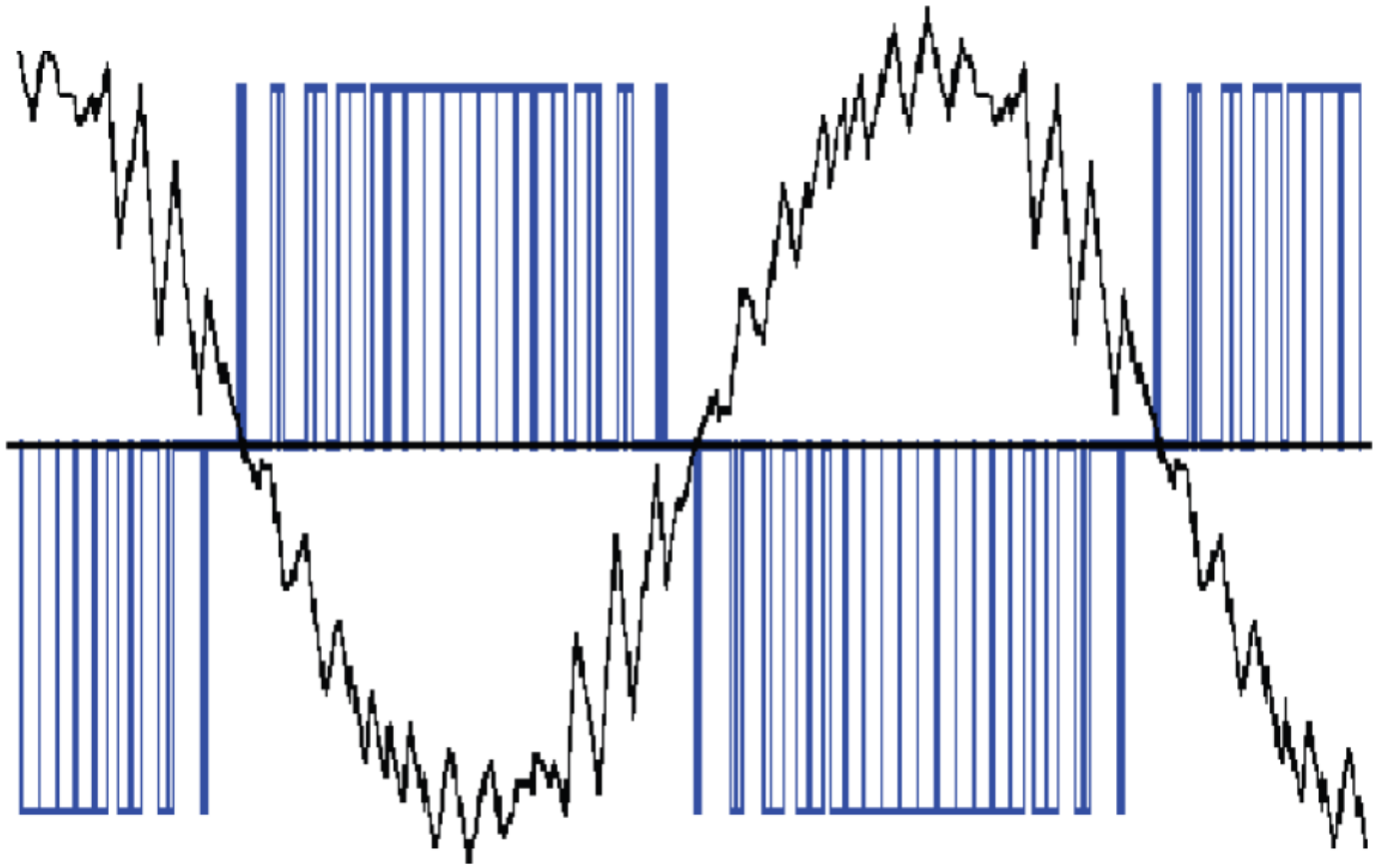
U Netz = constant
f Netz = constant

UZK

U Motor = 0.....UNetz
f Motor = 0.....f max Wechselrichter



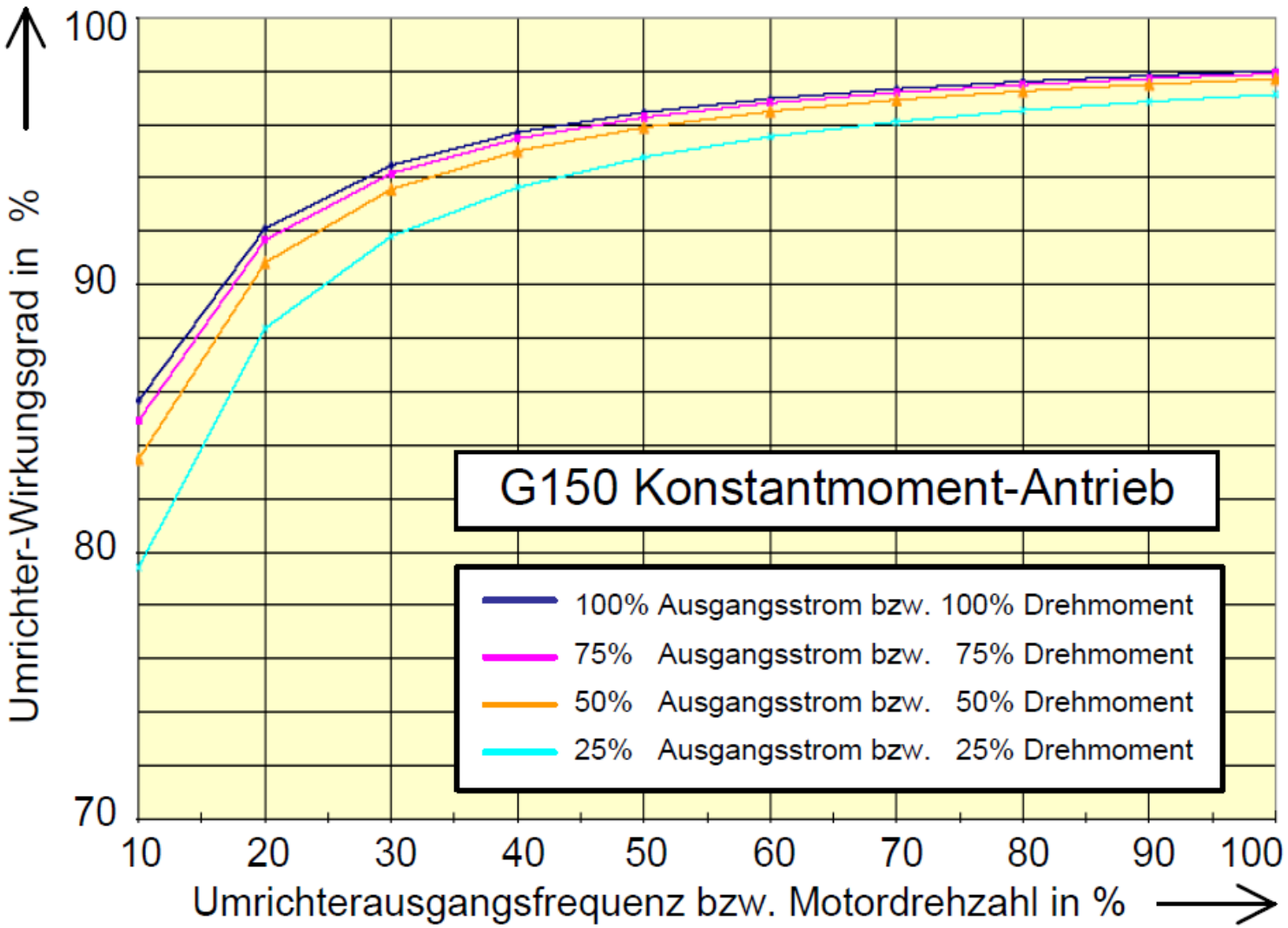
Umrichterstrom



Motorspannung (U Leiter-Leiter) und Motorstrom bei Raumzeigermodulation

Quelle: Siemens AG

Beispiel Umrichter Wirkungsgrad



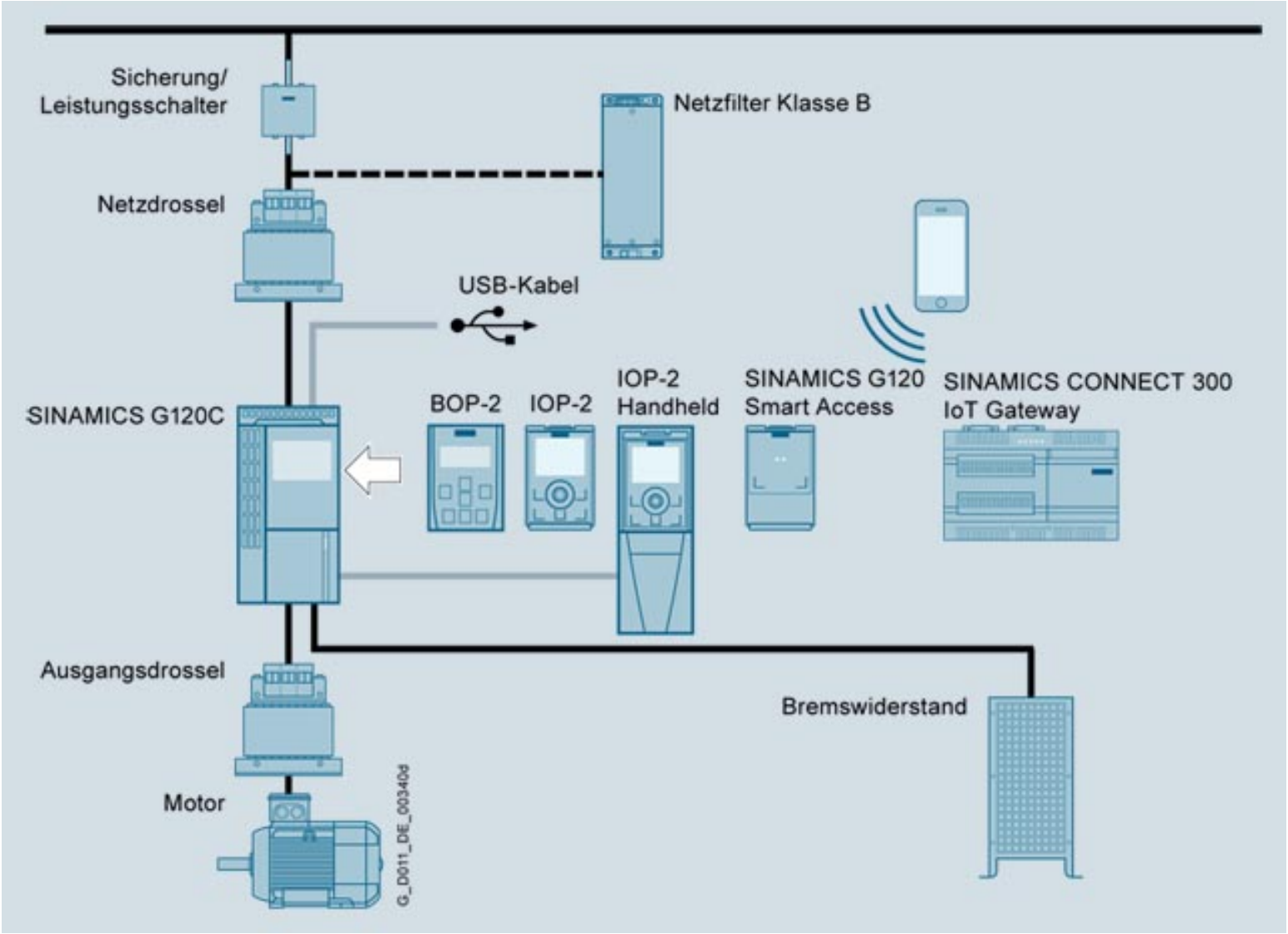
Quelle: Siemens AG

Katalogdaten eines Frequenzumrichters

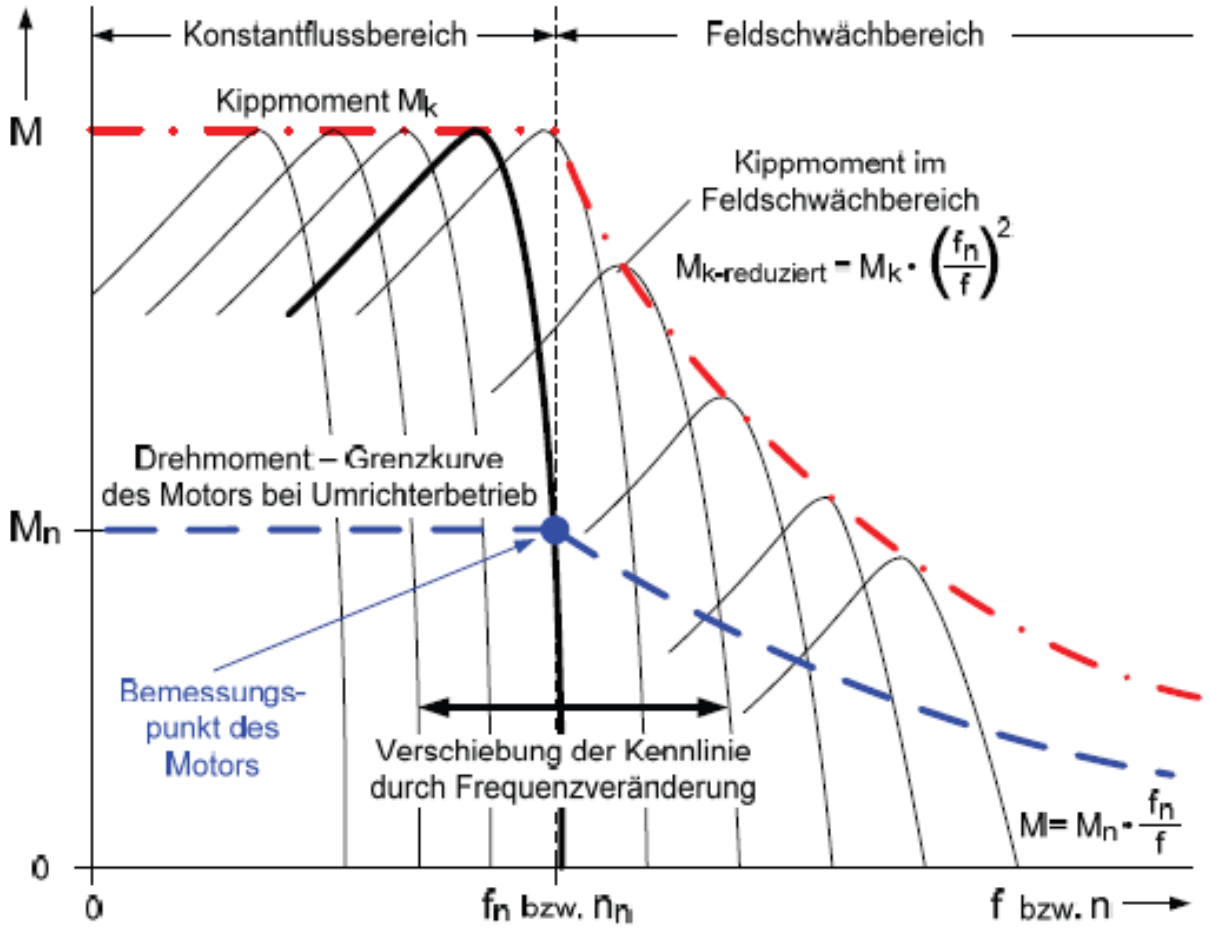
Netzspannung 3 AC 380 ... 480 V		Leistungselektronik SINAMICS G120C			
		6SL3210-1KE11-8..2	6SL3210-1KE12-3..2	6SL3210-1KE13-2..2	6SL3210-1KE14-3..2
Ausgangsstrom bei 3 AC 400 V					
• Bemessungsstrom I_N [1]	A	1,8	2,3	3,2	4,3
• Grundlaststrom I_L [2]	A	1,7	2,2	3,1	4,1
• Grundlaststrom I_H [3]	A	1,3	1,7	2,2	3,1
• Maximalstrom I_{max}	A	2,6	3,4	4,4	6,2
Bemessungsleistung					
• Auf Basis I_L	kW	0,55	0,75	1,1	1,5
• Auf Basis I_H	kW	0,37	0,55	0,75	1,1
Bemessungspulsfrequenz	kHz	4	4	4	4
Wirkungsgrad η	%	97	97	97	97
Verlustleistung [4] bei Bemessungsstrom	kW	0,034	0,039	0,049	0,062
Kühlluftbedarf	m^3/s	0,005	0,005	0,005	0,005
Schalldruckpegel L_{pA} (1 m)	dB	<49	<49	<49	<49
Bemessungseingangsstrom [5]					
• Auf Basis I_L	A	2,3	2,9	4,1	5,5
• Auf Basis I_H	A	1,9	2,5	3,2	4,5

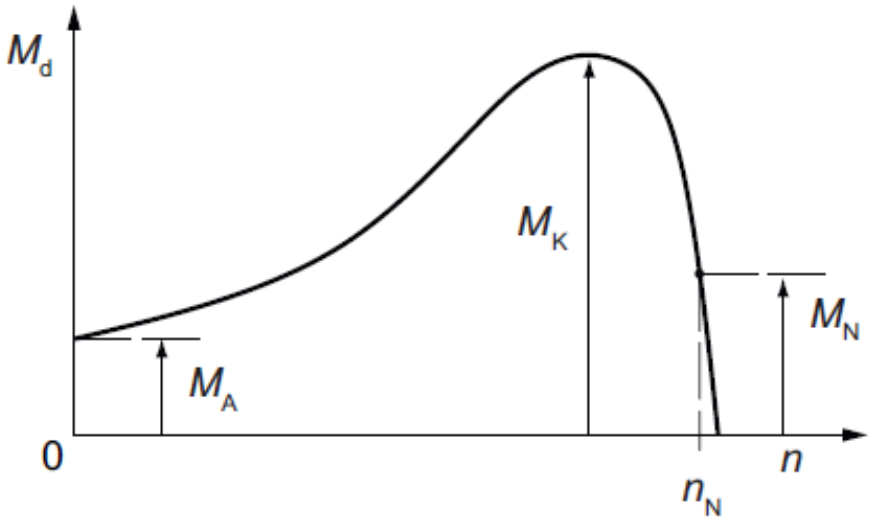
Quelle: Siemens AG

Kombination aus Motor und Frequenzumrichter mit Zusatzkomponenten



Mit Frequenzumrichtern die Motorkennlinie genau auf die Last anpassen

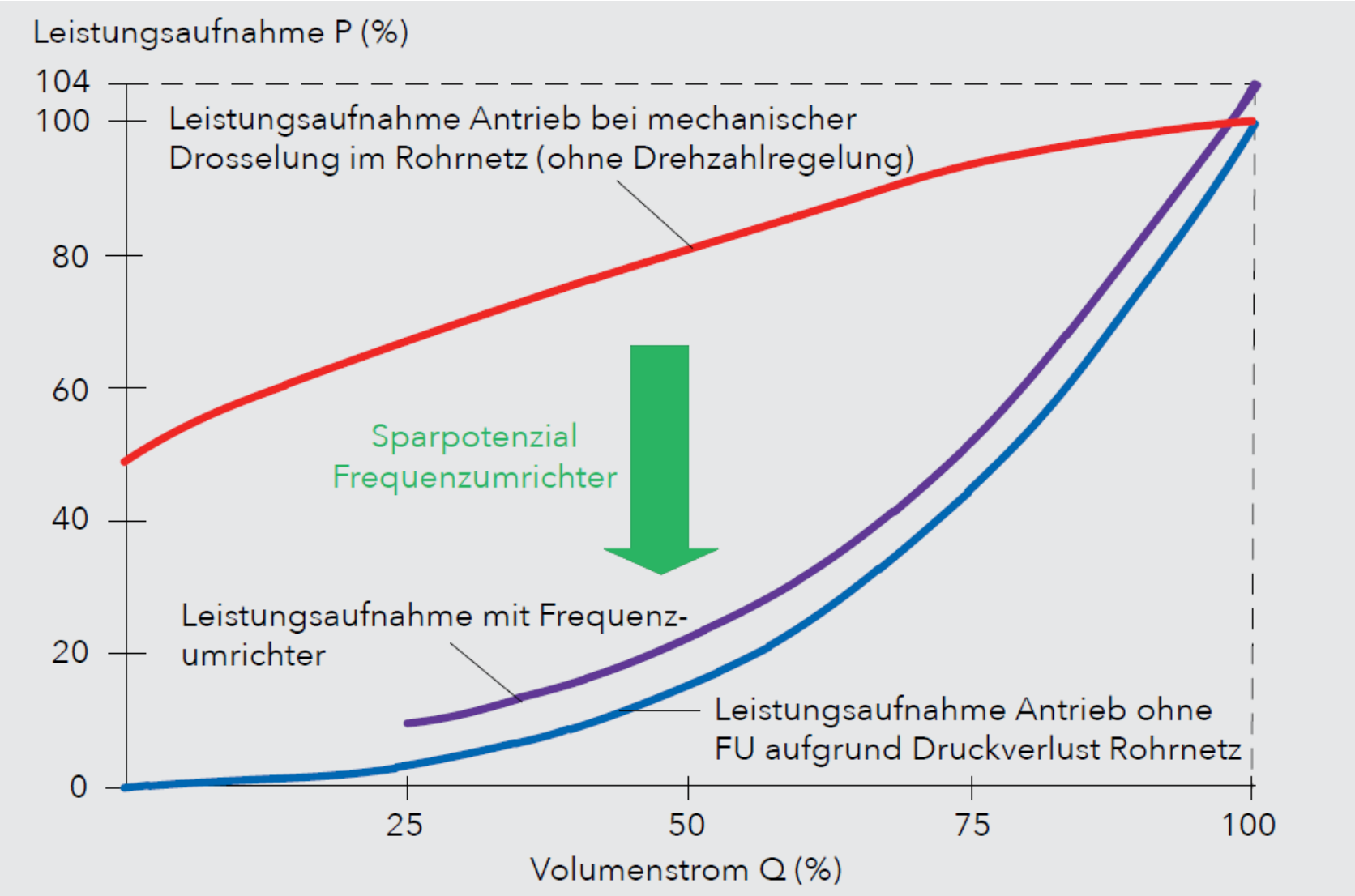




Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie der Asynchronmaschine

Verschiebung der Drehzahl-Drehmoment-Kennlinie eines Asynchronmotors durch Verstellung von Frequenz u. Spannung

Einsparpotenzial mit Frequenzumrichter



In geschlossenen Systemen sinkt die Leistungsaufnahme mit der 3. Potenz des Volumenstroms Q

Reduktion Q um 20%:

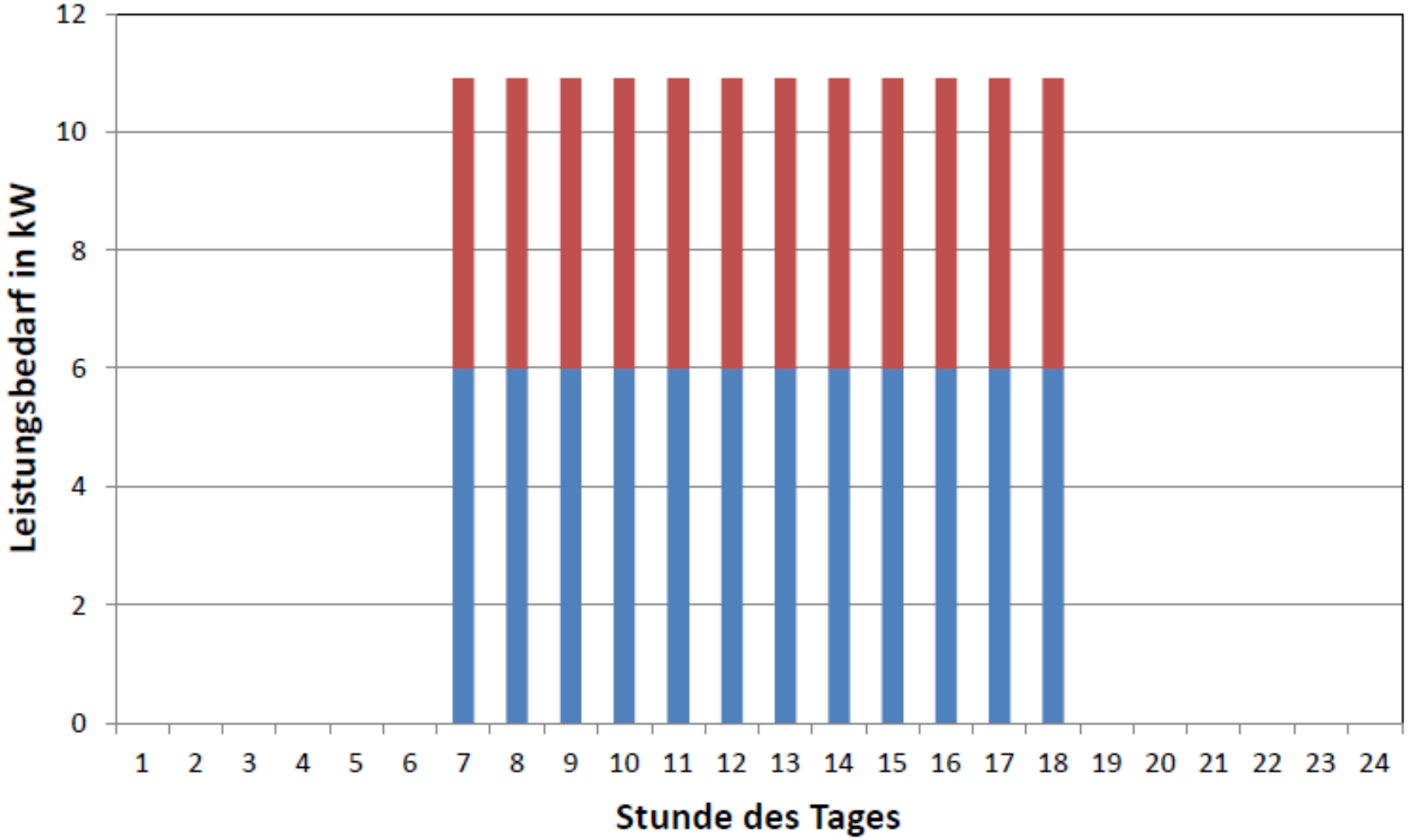
$P_{neu} = P_{alt} * (1 - 0{,}8^3)$

$= P_{alt} * (1 – 0{,}8*0{,}8*0{,}8)$

$= P_{alt} *$ **48,8%**

Quelle: Topmotors.ch

Beispiel 2: Lüftungsanlage Bürolüftung ohne Frequenzumrichter



Total 130.9 kWh/d

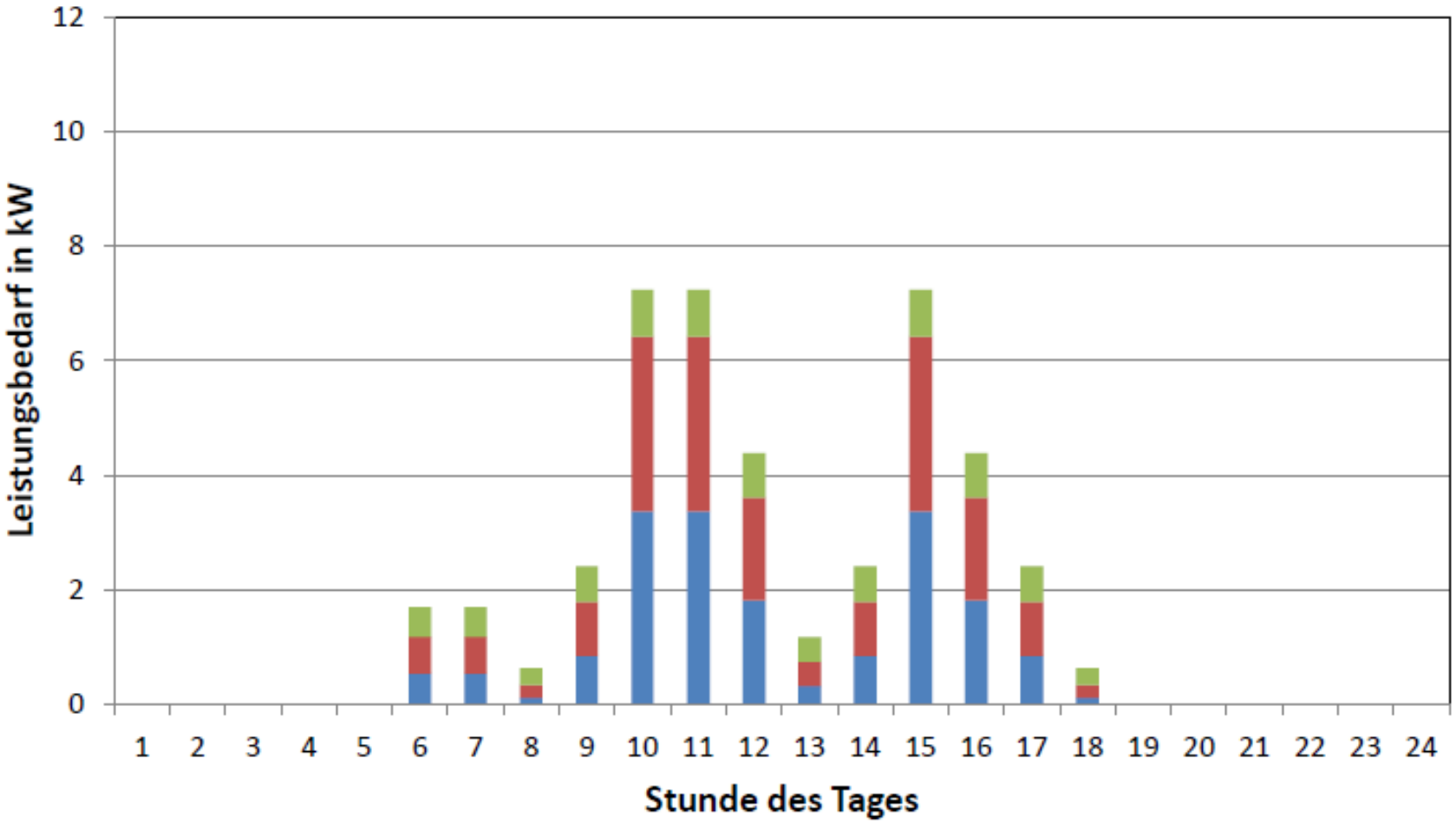
12 Vollaststunden/d

Verlustleistung Motor+Venti

Luftleistung

Quelle: Urs Steinemann, Ingenieurbüro US, Wollerau (Schweiz)

Beispiel 2: Lüftungsanlage Bürolüftung mit Frequenzumrichter



Total 43.5 kWh/d

8.2 Vollaststunden/d (bezüglich Luftmenge)

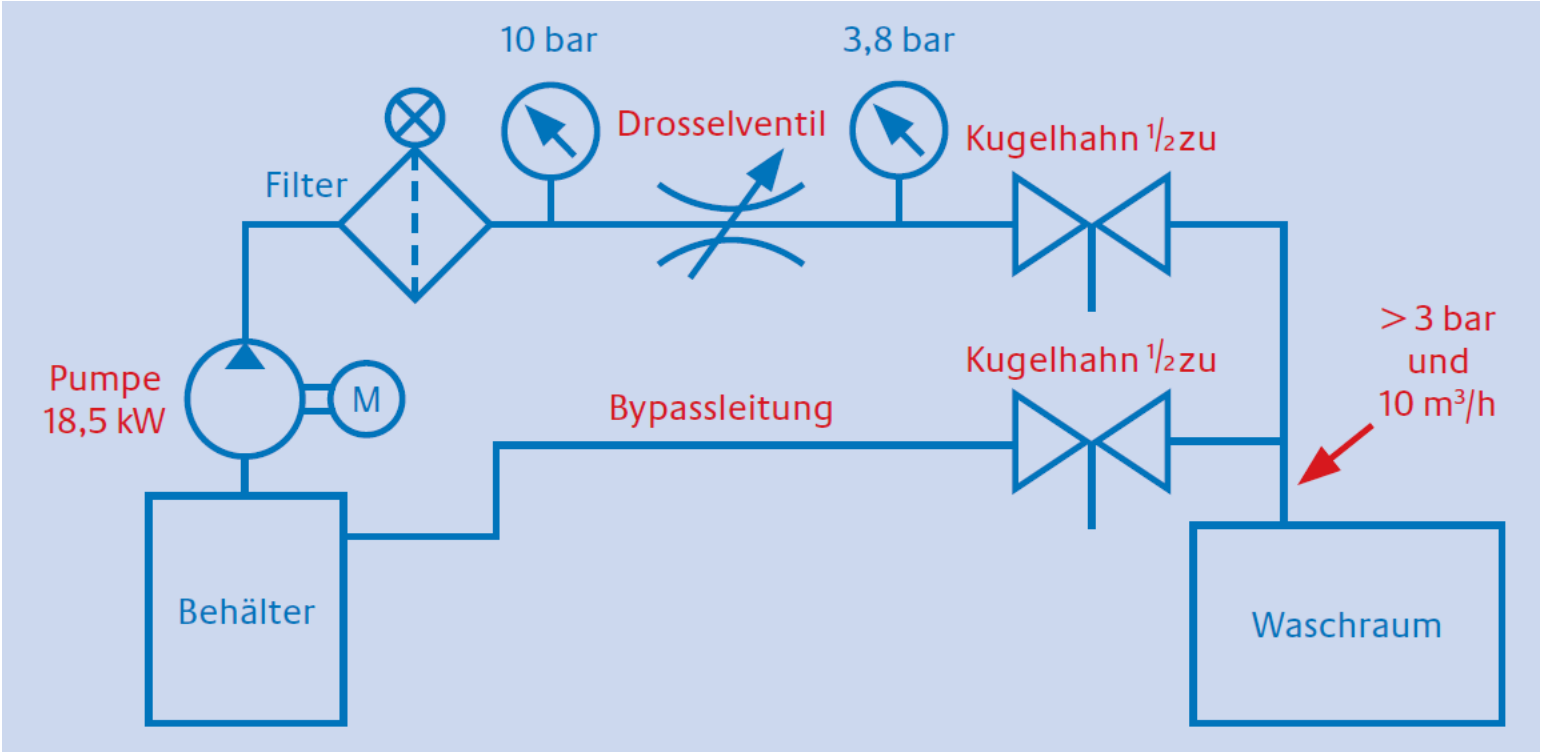
- Verlustleistung FU
- Verlustleistung Motor+Venti
- Luftleistung

→ Energiebedarf um 2/3 reduziert

Quelle: Urs Steinemann, Ingenieurbüro US, Wollerau (Schweiz)

Beispiel 3: Daimler Untertürkheim Umbau Teilereinigung

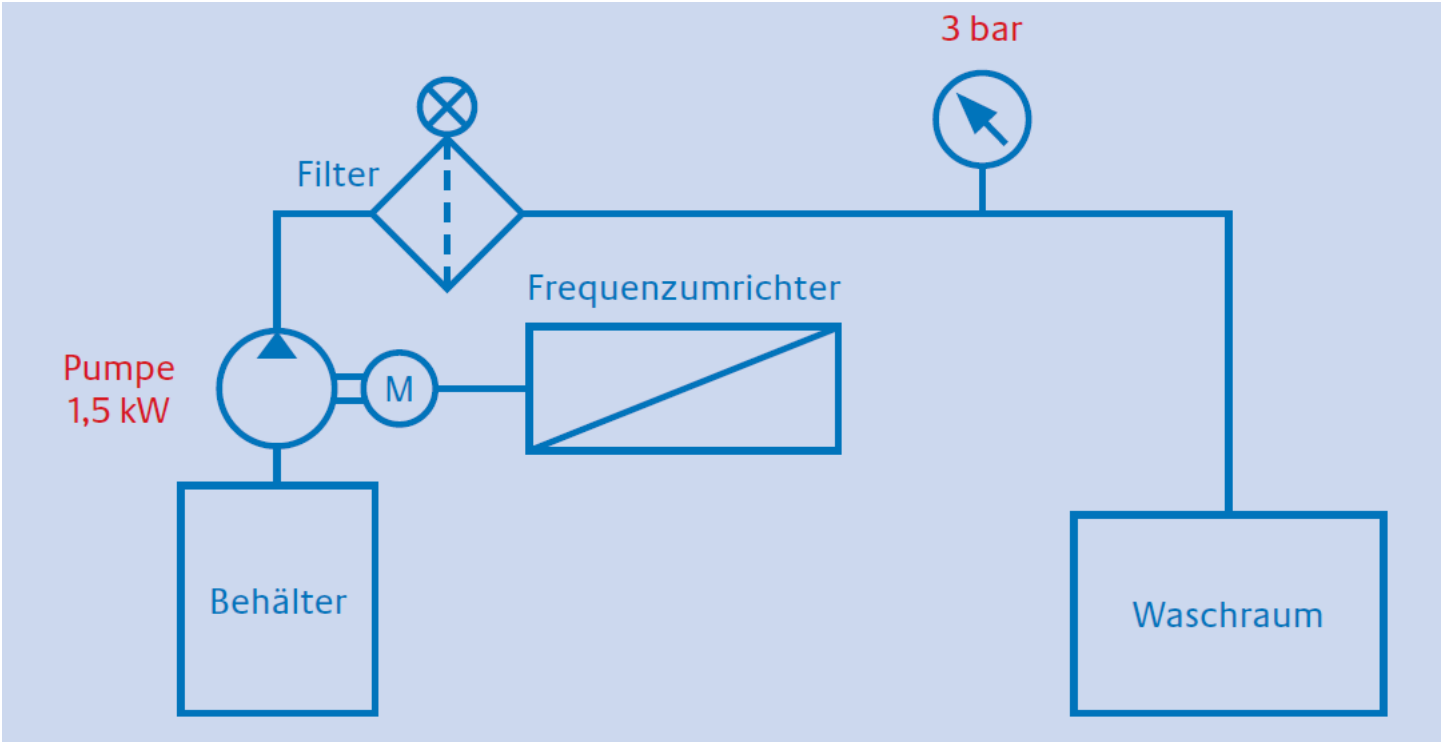
Waschpumpe in der Teilereinigung



vorher

Quelle: DENA

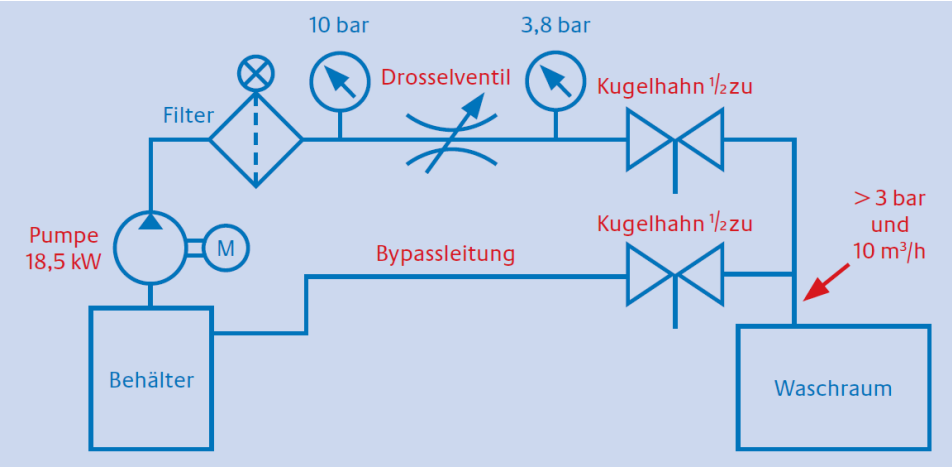
Beispiel 3: Daimler Untertürkheim Umbau Teilereinigung

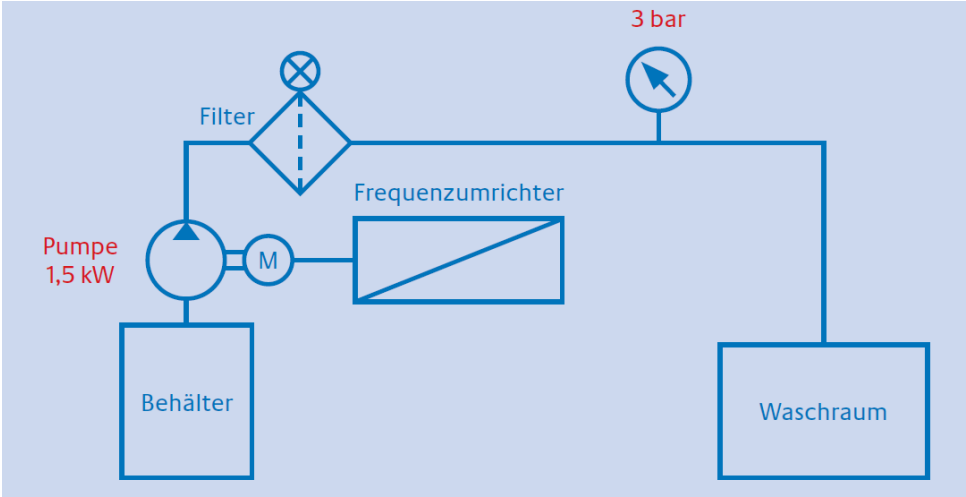


nachher
Verbrauch von 57.000 auf 5.590 kWh gesenkt

Quelle: DENA

Beispiel 3: Daimler Untertürkheim Einsparungen

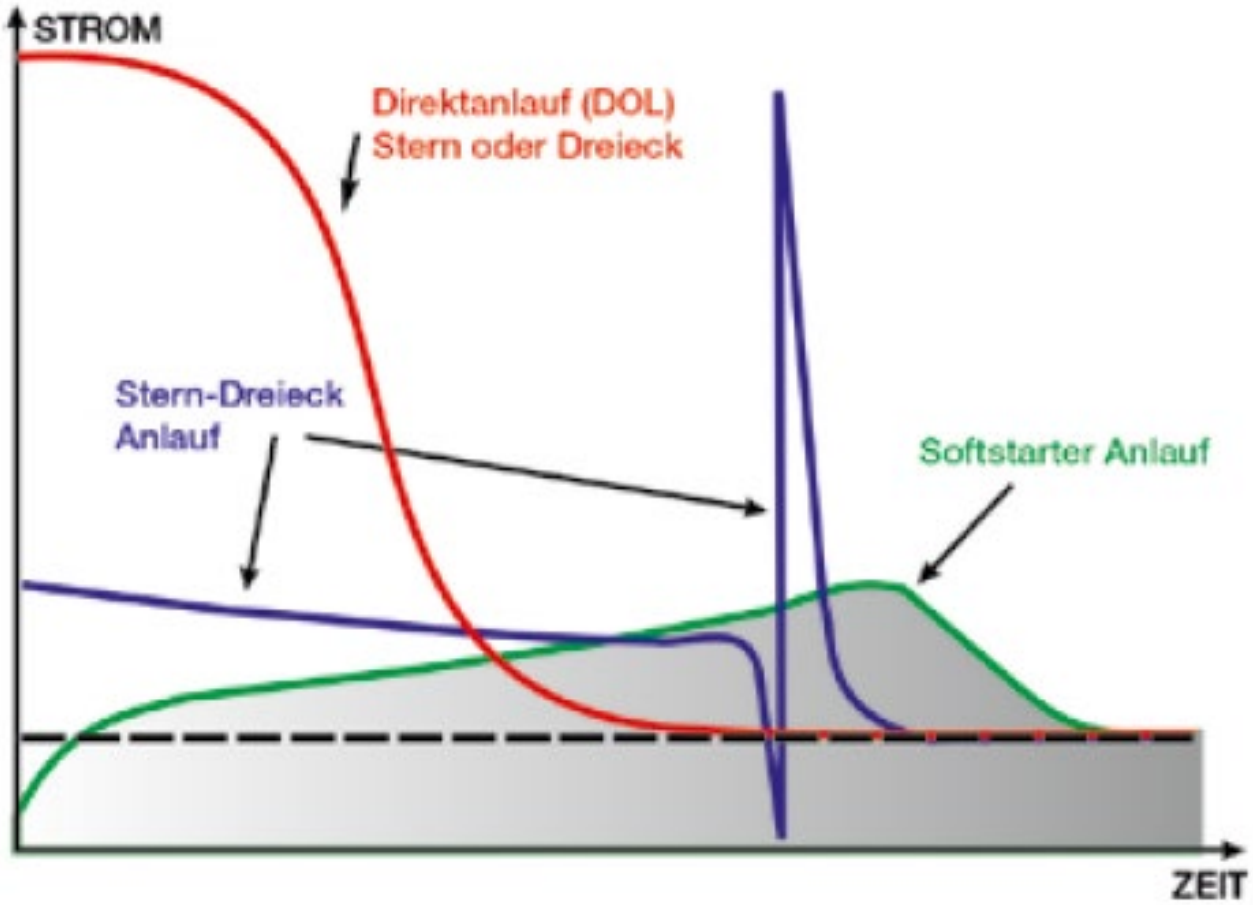




Senkung Stromverbrauch	51.410 kWh/Jahr
Prozentuale Stromeinsparung	90 %
CO_2-Reduzierung	33 t/Jahr[1]
Investition	3.800 €
Kostensenkung	6.170 €/Jahr[2]
Kapitalrendite	>100 %[2]

Quelle: DENA

Begrenzung des Anlaufstroms durch Softstarter schafft Effizienz



Vorteile Softstarter/Frequenzumrichter gegenüber Direktanlauf:

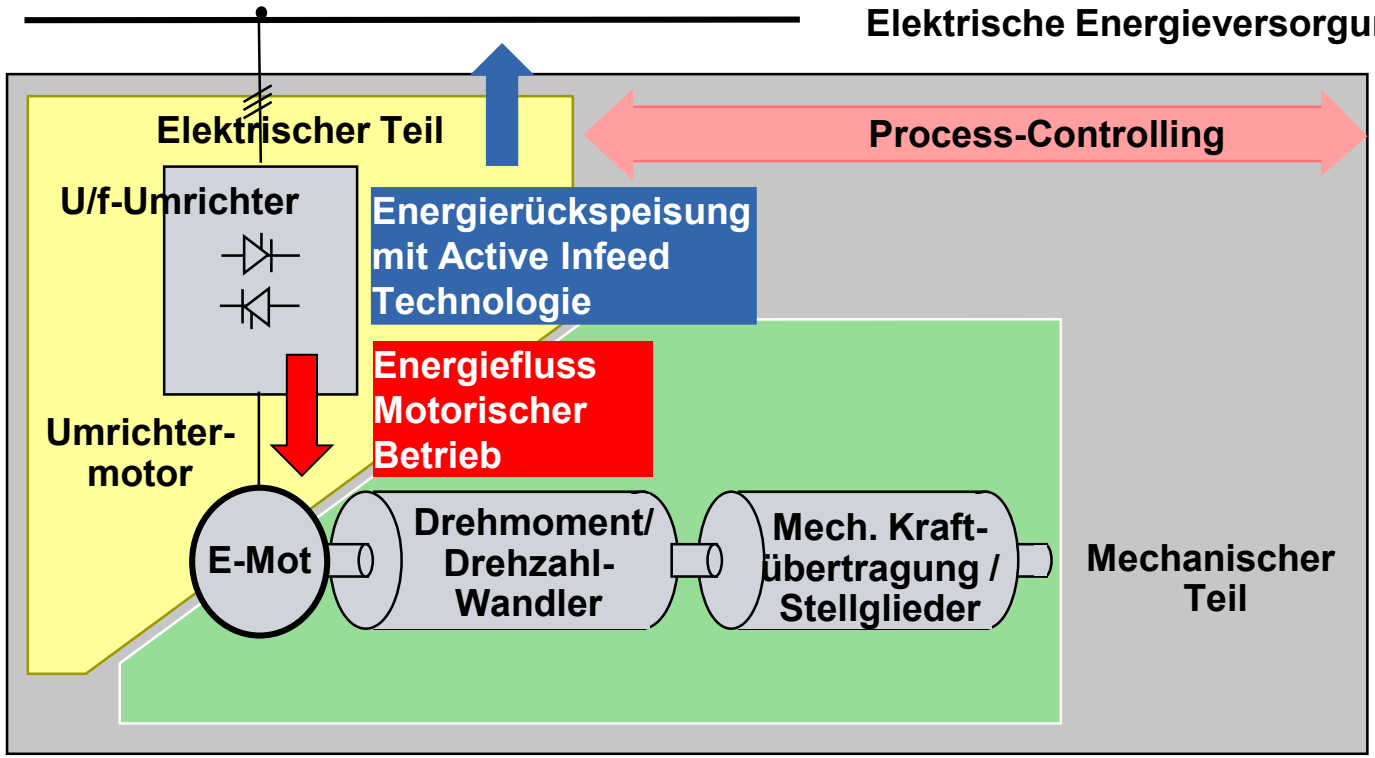
- hinreichend genaue Anpassung auf das beim Anlauf auftretende Lastmoment möglich
- Massive Reduzierung des Anlaufstromes während des Startvorgangs

Quelle: WEG Germany GmbH

Optimierung im Gesamtsystem

Antriebssysteme Energieeinsparung durch Systemoptimierung

Antriebssysteme werden heute nach Funktionalität, Anschaffungskosten, Zuverlässigkeit und Erfahrungswerten ausgewählt, selten wird der Energieverbrauch analysiert.



- Energieoptimierte Arbeitsprozesse
- Schutz und Sicher-heitsfunktionen

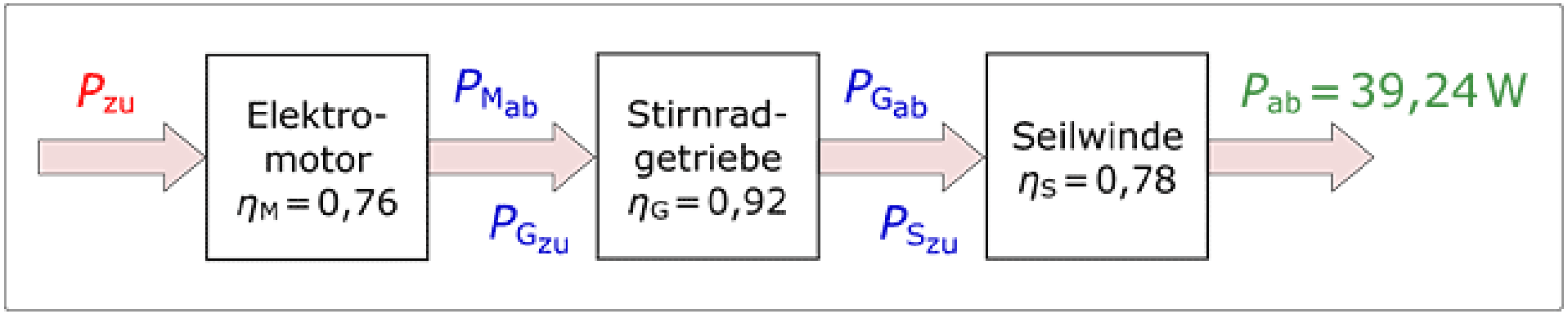
Mechanische Leistung

- Drehmoment/ Drehzahl
- Betriebsmodus
- Dynamik

In der Gesamtbetrachtung gehen folgende Wirkungsgrade ein:
Umrichter (93-96%), Asynchronmotoren (70-96%), Getriebemotoren (48-98%)

Quelle: Siemens AG

Wirkungsgrad eines Gesamtsystems



$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \eta_M \cdot \eta_G \cdot \eta_S = 0{,}76 \cdot 0{,}92 \cdot 0{,}78 \qquad \eta = 0{,}55 = 55\,\%$$

Der Gesamtwirkungsgrad einer Energieübertragungskette ergibt sich aus der **Multiplikation der Wirkungsgrade** der einzelnen Teilsysteme.

Effizienz durch Wartung

Wartung bei Elektromotoren

- Die Lebensdauer eines Motors kann zwischen **30.000 und 40.000 Betriebsstunden** liegen, bei geeigneter Wartung wird die Lebensdauer jedenfalls erhöht. Unter bestimmten Umständen - in besonders korrosiver oder aggressiver (Stäube!) Umgebung - geschieht die Abnutzung besonders rasch. In solchen Fällen sollten Spezialmotoren mit besonderer Schutzklasse beschafft werden.
- Die beste Vorbeugung gegen **Wärmeschäden** sind der Schutz vor Schmutz, Über- oder Unterspannung, Spannungsasymmetrie, Oberschwingungen, vor zu hohen Umgebungstemperaturen, zu geringer Belüftung und vor Überlastungen.
- **Lagerversagen** stellen neben Überlastung, Verschmutzung und Korrosion die Hauptursache für Motorversagen dar. Falls sie nicht zur rechten Zeit entdeckt werden, können sie zur Überhitzung führen und die Isolierung zerstören oder dem Motor irreparable mechanische Schäden zuführen. Daher sollten immer die Herstellerinformationen bezüglich der Schmierung befolgt werden.

Quelle: Annex Motorsystems des Implementing Agreements Energy Efficient Electric End-Use Equipment (IEA 4E)

Wartung bei Frequenzumrichtern

Kompakte Umrichter sind heutzutage sehr zuverlässig und bei entsprechend sachgerechter Wartung je nach Leistungsgrösse für eine Lebensdauer von **12 bis 20 Jahren** ausgelegt.

Als häufigste Ursache für Ausfälle gelten **drei Effekte**; sie sind besonders zu beachten, um lange Betriebszeiten zu ermöglichen.

- Verschmutzungen durch Nichtbeachten der entsprechenden Schutzklasse.
- Nicht ausreichender Turnus der Reinigung von Filtermatten des Schaltschrankes.
- Erhöhte Kühllufttemperaturen über 40 °C aufgrund von hohen Umgebungstemperaturen oder starker Luftzirkulation innerhalb des Schaltschrankes.

Quelle: Topmotors.ch

Fazit

- Bei elektrischen Antriebssystemen sind immer noch Einsparpotenziale zu heben
- Je weiter die Systemgrenzen gefasst werden, desto mehr Effizienz kann erreicht werden
- Je nach Anwendungsfall kann es energetisch und wirtschaftlich sinnvoll sein, Frequenzumrichter einzusetzen
- Auch die Wartung spielt für die Energieeffizienz eine große Rolle
- Für bestehende Systeme sollte zur Optimierung eine Messung der Betriebsparameter erfolgen, um Potenziale zu finden

Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Martina Hofmann
Hochschule Aalen
Anton-Huber-Strasse 25, 73430 Aalen

Martina.hofmann@hs-aalen.de