



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr,
Energie und Kommunikation UVEK

Bundesamt für Energie BFE

Standardisierte Massnahme MO-01

Ersatz von Antriebssystemen bis 75 kW

Dokumentation

Massnahmennummer

MO-01

Version

1.0 (11.2024)



1 Vorwort

Mit dem Bundesgesetz über eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien hat das Parlament in der Herbstsession 2023 eine neue Verpflichtung der Elektrizitätslieferanten zur Umsetzung von Stromeffizienzmassnahmen festgeschrieben. Gemäss Artikel 46b des Energiegesetzes (EnG; SR 730.0) müssen Elektrizitätslieferanten Massnahmen für Effizienzsteigerungen an bestehenden elektrisch betriebenen Geräten, Anlagen und Fahrzeugen bei schweizerischen Endverbraucherinnen und Endverbrauchern umsetzen oder entsprechende Nachweise erwerben, wenn Dritte die Massnahmen umsetzen. Das Bundesamt für Energie (BFE) bezeichnet jährlich eine Liste von standardisierten Massnahmen und deren anrechenbare Stromeinsparungen. Massnahmen, die nicht im Katalog der standardisierten Massnahmen enthalten sind, können dem BFE als sogenannte nicht standardisierte Massnahmen zur Zulassung vorgelegt werden.

Für jede standardisierte Massnahme stellt das BFE ein Einsparprotokoll zur Verfügung, mit dem Elektrizitätslieferanten die umgesetzten Massnahmen melden können. In der begleitenden Dokumentation wird die Methodik zur Bestimmung der anrechenbaren Stromeinsparungen nachvollziehbar erläutert. Die vorliegende Methodik schätzt pauschal die kumulierten Stromeinsparungen (Endenergie), welche durch die Umsetzung der entsprechenden Stromeffizienzmassnahme über die Wirkungsdauer ausgelöst werden können. Sie beruht auf einer Ex-ante-Berechnung und verwendet Annahmen und Faktoren, die durch geltende Normen, Marktstudien, die wissenschaftliche Literatur und Expertenbeiträge definiert werden konnten.

Die Dokumentation richtet sich an Elektrizitätslieferanten, Umsetzerinnen von Stromsparmassnahmen sowie an alle anderen Personen, die sich für die Stromeinsparungen im Rahmen der Effizienzsteigerungen nach Artikel 46b EnG interessieren.

2 Ziel

Das Ziel des vorliegenden Dokuments ist es, die Stromeinsparungen, welche durch den Ersatz von Elektromotoren ausgelöst werden, für folgende Standardfälle pauschal zu schätzen:

- i. Ersatz eines Motors mit konstanter Geschwindigkeit durch einen anderen Motor mit konstanter Geschwindigkeit
- ii. Ersatz eines Motors mit Frequenzumrichter durch einen anderen Motor mit Frequenzumrichter

Das Nachrüsten mit einem Frequenzumrichter oder spezielle Massnahmen zur Drehmoment- oder Leistungsregelung sind in dieser Dokumentation nicht enthalten.

3 Symbole, Begriffe und Einheiten

Lateinische Buchstaben

Symbol	Begriff	Einheit
\dot{E}	Elektrische Leistung	kW
E	Jährlicher Stromverbrauch	kWh/a
ΔE_{eco}	Anrechenbare Stromeinsparungen	MWh
f	Faktor	-
N_s	Standardwirkungsdauer	a
P_m	Mechanische Leistung	kW
t	Jährliche Betriebsstunden	h/a

Griechische Buchstaben

Symbol	Begriff	Einheit
τ	Motorlast	-
η	Wirkungsgrad	-

Indizes



x	Zustand (alt, neu)
M	Motor
T	Transmission
CF	Frequenzumrichter

4 Beschreibung der Ex-ante-Berechnung

4.1 Anrechenbare Stromeinsparungen

Die anrechenbaren Stromeinsparungen ΔE_{eco} der Massnahme berechnen sich aus der Differenz zwischen dem aktuellen (bestehender Zustand) E_{alt} und dem neuen (sanierter Zustand) Stromverbrauch E_{neu} über die Standardwirkungsdauer N_s .

Um die natürliche Erneuerungs- und Optimierungsrate von Geräten und Anlagen zu berücksichtigen, die ohne gesetzliche Verpflichtungen zu einer Senkung des Energieverbrauchs führt, werden die anrechenbaren Stromeinsparungen mit Hilfe eines Reduktionsfaktors f_{eco} von 0.75 reduziert.

$$\Delta E_{eco} = 0.001 \cdot (E_{alt} - E_{neu}) \cdot f_{eco} \cdot N_s$$

ΔE_{eco}	Anrechenbare Stromeinsparungen, in kWh
E_{alt}	Jährlicher Stromverbrauch des alten Zustandes, in kWh/a
E_{neu}	Jährlicher Stromverbrauch des neuen Zustandes, in kWh/a
f_{eco}	Reduktionsfaktor
N_s	Standardwirkungsdauer, in Jahren

4.2 Jährlicher Stromverbrauch

4.2.1 Ersatz eines Systems ohne Verbrauchsprofil

Fehlen Daten zu der jährlichen Leistungsaufnahme, wird der Stromverbrauch anhand der Nennleistung des Motors (an der Welle) $P_{m,x}^{nom}$, der jährlichen Betriebsstunden t , der mittleren jährlichen Motorlast τ_x und des Wirkungsgrads bei Nennleistung η_x berechnet. Um die zusätzlichen Effizienzeinbussen bei kleineren Teillasten zu berücksichtigen, wird ein Reduktionsfaktor des Wirkungsgrades $f_{M,x}$ hinzugefügt. Auch der Wirkungsgrad eines allfälligen ersetzten oder eines abgeschafften Antriebssystems $\eta_{T,x}$ wird mitberücksichtigt. Der Index x steht für den bestehenden (*alt*) beziehungsweise den sanierten (*neu*) Zustand.

$$E_x = \frac{P_{m,x}^{nom} \cdot \tau_x}{\eta_{M,x} \cdot f_{M,x} \cdot \eta_{T,x} \cdot (\eta_{CF,x} + \Delta\eta_{CF,x})} \cdot t$$

E_x	Jährlicher Stromverbrauch, in kWh/a
$\eta_{M,x}$	Nennwirkungsgrad des Motors
$\eta_{T,x}$	Wirkungsgrad der Transmission
$\eta_{CF,x}$	Wirkungsgrad der Drehzahlregelung
$\Delta\eta_{CF,x}$	Zusätzliche Verluste der Drehzahlregelung bei Teillast
τ_x	Mittlere jährliche Motorlast
$f_{M,x}$	Reduktionsfaktor des Wirkungsgrades
$P_{m,x}^{nom}$	Mechanische Nennleistung (an der Welle), in kW
t	Jährliche Betriebsstunden, in h/a

Wenn ein Antriebssystem mit einer Drehzahlregelung ausgestattet und kein Verbrauchsprofil verfügbar ist, können die Verluste oder der Wirkungsgrad der Drehzahlregelung $\eta_{CF,x}$ bei Nennbedingungen in Abhängigkeit der jeweiligen Nennleistung des Motors (an der Welle) [4] ausgedrückt werden:



$$\eta_{CF,x} = 0.79 + 0.22 \cdot \left(1 - \frac{1}{\log_{10}(40 \cdot P_{m,x}^{nom})}\right)$$

$\eta_{CF,x}$ Wirkungsgrad der Drehzahlregelung
 $P_{m,x}^{nom}$ Mechanische Nennleistung (an der Welle), in kW

Um die tatsächliche Wirkung bei Teillast zu berücksichtigen, können die zusätzlichen Verluste der Drehzahlregelung in Abhängigkeit der jeweiligen Nennleistung des Motors (an der Welle) und der mittleren jährlichen Motorlast [4] ausgedrückt werden:

$$\Delta\eta_{CF,x} = \left(10 - 9.5 \cdot (1 - e^{-0.6 \cdot P_{m,x}^{nom}})\right) \cdot \frac{1 - \tau_x}{0.5}$$

$\Delta\eta_{CF,x}$ Zusätzliche Verluste der Drehzahlregelung bei Teillast
 τ_x Mittlere jährliche Motorlast
 $P_{m,x}^{nom}$ Mechanische Nennleistung (an der Welle), in kW

4.2.2 Ersatz eines Systems mit Verbrauchsprofil

Wenn die jährlichen Verbrauchswerte bekannt sind, basiert der Berechnungsansatz auf dem geordneten Profil der entsprechenden elektrischen Leistungsaufnahmen. Zuerst wird die mittlere Leistungsaufnahme (ausserhalb der Stillstandzeiten) $\dot{E}_{av,alt}$ bestimmt. Im Beispiel von Abbildung 1 beträgt dieser Wert 98.7 kW. Kürzer Verbrauchsprofile von weniger als einem Jahr können verwendet werden, sofern diese für den Betrieb der Anlage repräsentativ sind. In einem solchen Fall werden die jährlichen Betriebsstunden t mittels Extrapolation geschätzt. Das Profil entspricht in diesem Beispiel 50.5 % x 8'760 h/a, also 4'424 h/a. Der Stromverbrauch des bestehenden Systems wird folgendermassen definiert:

$$E_{alt} = \dot{E}_{av,alt} \cdot t$$

E_x Jährlicher Stromverbrauch, in kWh/a
 $\dot{E}_{av,x}$ Mittlere elektrische Leistung im Betrieb, in kW
 t Jährliche Betriebsstunden, in h/a

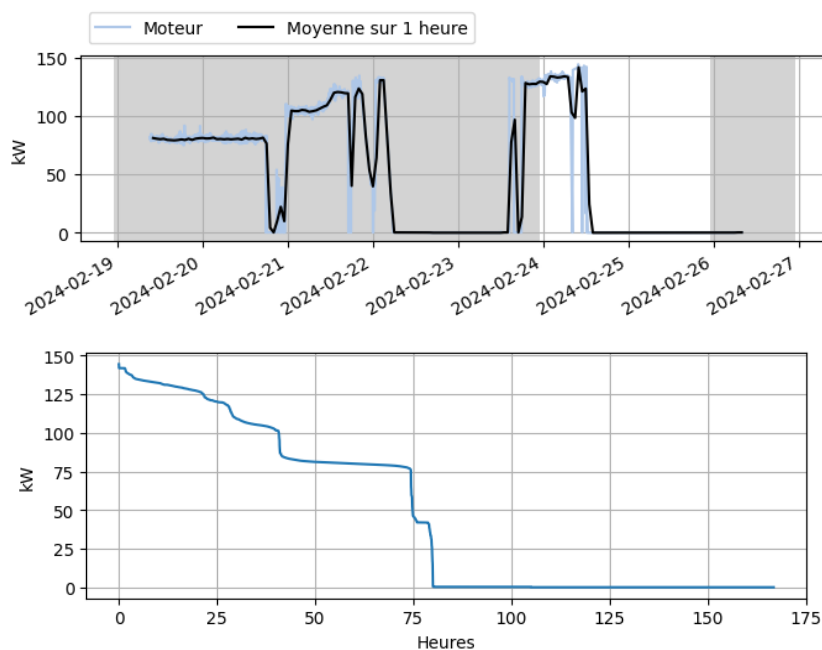




Abbildung 1 Beispiel eines Verbrauchsprofils (oben) und geordnete Profil (unten) [5]

Um den durchschnittlichen Wirkungsgrad des aktuellen Motors zu bestimmen, muss die mittlere Last des bestehenden Zustands berechnet werden. Da die Zusatzverluste der Drehzahlregelung bei Teillast $\Delta\eta_{CF,x}$ selbst von der aktuellen mittleren Last abhängen, wird dieser Faktor in der nachfolgenden Gleichung nicht berücksichtigt. Der Unterschied wird jedoch als vernachlässigbar erachtet.

$$\tau_{alt} = \dot{E}_{avg,alt} \cdot \frac{\eta_{M,alt} \cdot \eta_{CF,alt}}{P_{m,alt}^{nom}}$$

$P_{m,x}^{nom}$	Mechanische Nennleistung (an der Welle), in kW
$\dot{E}_{avg,x}$	Mittlere elektrische Leistung im Betrieb, in kW
$\eta_{M,x}$	Nennwirkungsgrad des Motors
$\eta_{CF,x}$	Nennwirkungsgrad der Drehzahlregelung
τ_x	Mittlere jährliche Motorlast

Anschliessend wird die mittlere mechanische Leistungsabgabe $P_{nom,u}$ berechnet. Die zusätzliche Effizienzeinbusse bei kleineren Teillasten wird mithilfe des Reduktionsfaktors f_M (der in Abhängigkeit der mittleren Motorlast definiert wird) berücksichtigt.

$$P_m^u = \dot{E}_{avg,alt} \cdot (\eta_{CF,alt} + \Delta\eta_{CF,alt}) \cdot \eta_{M,alt} \cdot f_{M,alt} \cdot \eta_{T,alt}$$

P_m^u	Mechanische Leistung, in kW
$P_{el,avg,x}$	Mittlere elektrische Leistung im Betrieb, in kW
$f_{M,x}$	Reduktionsfaktor des Wirkungsgrades
$\eta_{M,x}$	Nennwirkungsgrad des Motors
$\eta_{T,x}$	Wirkungsgrad der Transmission
$\eta_{CF,x}$	Wirkungsgrad der Drehzahlregelung
$\Delta\eta_{CF,x}$	Zusätzliche Verluste der Drehzahlregelung bei Teillast
τ_x	Mittlere jährliche Motorlast

Auf der Grundlage der durchschnittlich abgegebenen mechanischen Leistung kann der neue Motor für den tatsächlichen Bedarf ausgelegt werden [3]. Die Last des neuen Motors ist ungefähr das Verhältnis der mechanischen Leistungen:

$$\tau_{neu} = \frac{P_m^u}{P_{m,neu}^{nom} \cdot \eta_{T,neu}}$$

P_m^u	Abgegebene mechanische Leistung, in kW
$P_{m,x}^{nom}$	Mechanische Nennleistung (an der Welle), in kW
τ_x	Mittlere jährliche Motorlast

Schliesslich kann der jährliche Stromverbrauch des neuen Systems nach den vorherigen Gleichungen wie folgt ausgedrückt werden:

$$E_{neu} = \dot{E}_{avg,neu} \cdot t = \frac{P_{m,neu}^{nom} \cdot \tau_{neu}}{(\eta_{CF,neu} + \Delta\eta_{CF,neu}) \cdot \eta_{M,neu} \cdot f_{M,neu} \cdot \eta_{T,neu}} \cdot t$$

E_x	Jährlicher Stromverbrauch, in kWh/a
$\dot{E}_{avg,x}$	Mittlere elektrische Leistung im Betrieb, in kW
t	Betriebszeit, in Stunden pro Jahr
$P_{m,x}^{nom}$	Mechanische Nennleistung (an der Welle), in kW
$f_{M,x}$	Reduktionsfaktor des Wirkungsgrades



$\eta_{M,x}$	Nennwirkungsgrad des Motors
$\eta_{T,x}$	Wirkungsgrad der Transmission
$\eta_{CF,x}$	Wirkungsgrad der Drehzahlregelung
$\Delta\eta_{CF,x}$	Zusätzliche Verluste der Drehzahlregelung bei Teillast

5 Eingabevariablen

Allgemein

- Mechanische Nennleistung, in kW (*Zahl*)
- Anzahl Pole (*Mehrfachauswahl*)
- Baujahr des Motors (*Mehrfachauswahl*)
- Art der Transmission (*Mehrfachauswahl*)
- Drehzahlregelung (*boolesche Auswahl*)
- Jährliche Betriebsstunden, in h/a (*ganze Zahl*)

Mit Verbrauchsprofil

- Aufgenommene mittlere elektrische Leistung, in kW (im Betrieb; *Zahl*)

6 Annahmen und Daten

Allgemein

- Für Motoren mit einer Leistung von mehr als 20 kW wird eine Standardwirkungsdauer N_s von 25 Jahren und für kleinere Motoren von 15 Jahren angenommen.
- Die Anzahl der jährlichen Betriebsstunden t bleibt nach der Sanierung unverändert.
- Der Wirkungsgrad der Motoren entspricht den Mindestanforderungen gemäss den Energieeffizienzklassen (IE) der Verordnung (EU) 2019/1781 [1]. Die Effizienzklasse des alten Motors wird in Abhängigkeit des Baujahrs nach Tabelle 1 bestimmt.
- Tabelle 1** Effizienzklasse nach Baujahr [4]

Baujahr	Klasse
< 1999	IE1
1999–2008	IE2
2008–2016	IE3
≥ 2016	IE4

- Der Leistungsverlust der Motoren bei Teillast wird Tabelle 2 entnommen.

Tabelle 2 Leistungsverlust der Motoren bei Teillast [2]

P_m [kW]	Motorlast τ_x [%]													
	5	10	15	20	25	30	35	40	50	60	70	80	90	100
0.1	18.1	36.2	48.8	61.5	69.9	77.7	82.3	86.9	91.5	96.2	97.7	99.2	99.6	100
1.8	19.4	38.7	51.8	64.9	73.4	82.0	86.5	91.1	94.6	98.1	98.9	99.6	99.8	100
3.7	20.6	41.2	54.7	68.2	77.2	86.1	90.6	95.1	97.6	100	100	100	100	100
5.5	24.4	48.8	61.5	74.1	81.6	89.0	92.4	95.7	97.9	100	100	100	100	100
7.4	28.1	56.3	68.1	80.0	85.9	91.9	94.1	96.3	98.1	100	100	100	100	100
12.9	31.7	63.5	73.4	83.4	88.1	92.8	94.7	96.7	98.3	100	100	100	100	100
18.4	35.3	70.6	78.7	86.8	90.3	93.8	95.4	97.1	98.5	100	100	100	100	100
31.2	37.5	75.1	81.9	88.6	91.5	94.3	95.8	97.3	98.6	100	100	100	100	100



44.1	39.8	79.6	85.0	90.5	92.7	94.9	96.2	97.4	98.7	100	100	100	100	100
58.8	41.1	82.2	87.3	92.4	94.4	96.4	97.2	98.0	99.0	100	100	100	100	100
73.5	42.4	84.4	89.5	94.2	96.0	97.8	98.2	98.6	99.3	100	100	100	100	100

- v. Die Wirkungsgrade der häufigsten Arten der Transmission sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3 Wirkungsgrade der Transmissionssysteme [3,4]

Transmissionssystem	Wirkungsgrad $\eta_{T,x}$ [-]
Kein System / Direktantrieb	1.000
Kabel / Kette	0.930
Riemen aus Gummi oder vollsynthetischer Riemen	0.830
Zahn- oder Flachriemen	0.980
Keilriemen	0.905
Getriebe (einstufig)	0.985
Getriebe (zweistufig)	0.970
Getriebe (dreistufig)	0.955
Schneckengetriebe (9:1)	0.900
Schneckengetriebe (20:1)	0.850
Schneckengetriebe (40:1)	0.800
Schneckengetriebe (70:1)	0.650
Schneckengetriebe (240:1)	0.300

Ohne Verbrauchsprofil

- vi. Der alte Motor (und die Drehzahlregelung) wird durch einen neuen Motor (und eine neue Drehzahlregelung) gleicher Grösse ersetzt.
- vii. Reichen die vorliegenden Informationen nicht aus, um die Teillast des aktuellen Motors zu bestimmen, wird standardmässig der von der Grösse des Motors nach Tabelle 4 abhängige Faktor berücksichtigt. Die durchschnittliche Last von elektrischen Antrieben mit Drehzahlregelung ist im Durchschnitt 15 Prozent tiefer als die Last ohne Regelung gleicher Grösse.

Tabelle 4 Standardmässige Last [4]

Mechanische Leistung P_{nom}	Motorlast τ_x [-]	
	Mit Drehzahlregelung	Ohne Drehzahlregelung
0 kW bis 1 kW	0.30	0.40
1 kW bis 10 kW	0.35	0.50
> 10 kW	0.45	0.60

- viii. Der Ersatz eines alten Motors durch einen gleich grossen, neuen Motor der Klasse IE4 oder höher wird bei gleicher Leistung zu einem niedrigeren Lastfaktor des neuen Motors führen.¹

Mit Verbrauchsprofil

¹ Bei Asynchronmotoren führt der Austausch eines alten Motors gegen einen neuen Motor mit hoher Effizienzklasse zu einem geringeren Schlupf, der die Drehzahl des Motors mit einer besseren Leistung als beim alten Motor erhöht (z. B. wird der Luftstrom des Ventilators mit dem neuen Motor bei 50 Hz stärker), und damit steigt auch die Leistung an der Welle. Ein manchmal erheblicher Teil der Steigerung des Wirkungsgrads schlägt sich daher nicht vollständig im Stromverbrauch nieder. Dieser Effekt wird hier nicht mitberücksichtigt.



- ix. Die abgegebene mechanische Leistung $P_{m,nom,u}$ wird nach der Sanierung beibehalten.

7 Resultate

Angeichts der präsentierten Annahmen und Daten werden die anrechenbaren Stromeinsparungen in Bezug auf die vorgenannten Eingabevariablen mithilfe der Monitoringliste MO-01a ermittelt.

8 Beispiel

Szenario A: Ersatz der Motoren, 5.5 kW Leistung (Baujahr 2002), von zwei Antriebssystemen mit Flachriemen ohne Drehzahlregelung, die zwölf Stunden täglich das ganze Jahr über in Betrieb sind. Die neuen Motoren arbeiten mit einem Nennwirkungsgrad von 95.5 %. Es sind weder Lastgangmessung noch Stromverbrauchsprofil vorhanden.

Modell	Betriebsdauer	Anrechenbare Stromeinsparungen	
	[h/a]	[MWh/Einheit]	[MWh]
Ohne Verbrauchsprofil	4'830	13.2	26.4
Total			26.4

9 Literatur

- [1] Europäische Kommission, *Verordnung (EU) 2019/1718 der Kommission vom 1. Oktober 2019 zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Elektromotoren und Drehzahlregelungen gemäss der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 641/2009 im Hinblick auf die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von externen Nassläufer-Umwälzpumpen und in Produkte integrierten Nassläufer-Umwälzpumpen und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 640/2009 der Kommission*, Brüssel, 2019.
- [2] C. Burt, X. Piao, F. Gaudi, B. Busch, and N. Taufik, *Electric Motor Efficiency under Variable Frequencies and Loads*, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 134 (2), S. 129–136, April 2008.
- [3] A. Huser, A. Huber und G. Huser, *RAVEL Industrie-Handbuch; Begriffe und Daten der Energiebetriebswirtschaft*, Bundesamt für Energie (BFE), Bern, 1994.
- [4] *Ersatz eines elektrischen Antriebssystems*, Programm PEIK, Bern, 2019.
- [5] *Courbes de charge tirées de cas pratique*, Planair SA, 2024.