

Motor Systems Tool (MST)

Die fünf wichtigsten Punkte zur System-optimierung

1. Anlage richtig auf Bedarf auslegen
2. Betriebsstunden optimieren
3. Zeitgemässe, effiziente Komponenten verwenden
4. Anlage lastgeregt betreiben - keine Drosseln oder Bypässe
5. Energie Monitoring - Verbrauch überwachen und interpretieren

Kostenloser Download: www.topmotors.ch/tools

Ziel und Zielpublikum

Das Topmotors Merkblatt Nr. 28 thematisiert die systematische Analyse von effizienten, industriellen Antriebssystemen mit der neuen Version des Motor Systems Tool (MST). Das MST bietet technisch Interessierten (Anwendern, Planern, Installateuren, Energieberatern, etc.) die Möglichkeit, Antriebssysteme inklusive deren Leistungen und Wirkungsgrade aufeinander abzustimmen und das Resultat grafisch darzustellen. Es beinhaltet eine umfangreiche Datenbank von Normmotoren, Applikationen (Ventilatoren, Pumpen, etc.) sowie Transmissionen in Form von Getrieben und Riemen. Die hinterlegten Daten der Datenbank ermöglichen es, komplexe Antriebssysteme mit nur wenigen Daten detailgetreu abzubilden. Veränderungen am Antriebssystem werden unmittelbar dargestellt und deren Auswirkungen auf die Effizienz einzelner Komponenten, auf den Gesamtwirkungsgrad sowie auf den Energieverbrauch und die daraus resultierenden Energiekosten werden berechnet. Das MST erlaubt das Festlegen von bis zu 12 unterschiedlichen Betriebspunkten, um einen möglichst realistischen Jahresverlauf mit unterschiedlichen Betriebszuständen zu simulieren.

Grundlagen

Die Hälfte des weltweiten Elektrizitätsverbrauch entfällt auf elektrische Antriebssysteme. Nur wenn alle Komponenten eines Antriebssystems optimal auf einander abgestimmt sind, kann ein idealer Gesamtwirkungsgrad erreicht werden. Das bedeutet, dass die Komponenten einer Anlage auf den Betriebspunkt und den Bedarf des Prozesses ausgelegt sind.

Die wichtigsten Komponenten einer Antriebseinheit sind (siehe Abbildung 2: Antriebseinheit):

- Der elektrische Motor
- Der Frequenzumrichter
- Die mechanischen Elemente (Getriebe, Riemen, Bremse, Kupplung, Drossel, etc.)
- Die angetriebene Arbeitsmaschine (Pumpe, Ventilator, Kompressor, Förderband, Lift, Prozessmaschine, etc.)

Für die korrekte Dimensionierung aller Elemente und die Berücksichtigung aller relevanten Betriebszustände ist das MST ein wichtiges Hilfsmittel, das mit einer systemischen

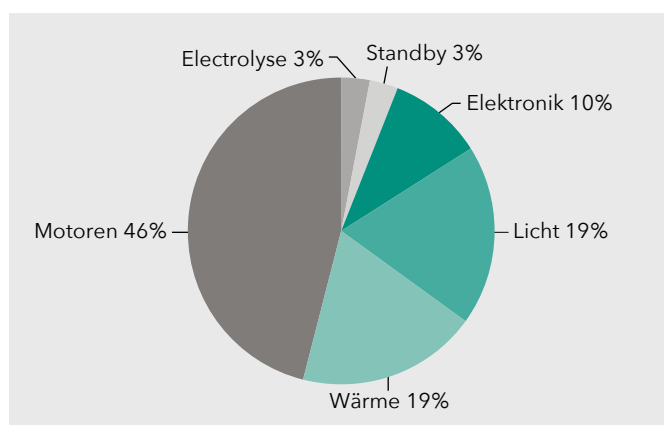


Abbildung 1: Anteile wichtiger Anwendungen am gesamten globalen Elektrizitätsverbrauch. Quelle: Paul Waide & Conrad U. Brunner, et al., IEA Energy Efficiency Series, Working Paper, 2011

Analyse die Verluste der einzelnen Komponenten berechnet und den gesamten Systemwirkungsgrad automatisch angibt. Damit kann der Jahresenergieverbrauch mittels ausgewählter Betriebspunkte einfach ermittelt werden.

Wirkungsgrade der einzelnen Komponenten

Motoren

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

- IE4 Super Premium Effizienz
- IE3 Premium Effizienz
- IE2 Hohe Effizienz (früher Eff1)
- IE1 Standard Effizienz (früher Eff2)

Der Gesamtwirkungsgrad ist die Summe aller Einzelwirkungsgrade. Daher ist es wichtig, dass jede Komponente einen guten Wirkungsgrad ausweist und im richtigen Betriebspunkt betrieben wird.

Frequenzumrichter (FU)

Der Wirkungsgrad von Frequenzumrichtern ist im Nennbetrieb bei 100% Drehmoment und 100% Drehzahl relativ hoch. Die genauen Zahlenwerte des Wirkungsgrads eines FU sind davon abhängig, wie der FU aufgebaut ist. Zudem haben Faktoren wie Taktfrequenz und Betriebspunkt einen Einfluss auf den Wirkungsgrad. Als Schätzgrösse kann man annehmen, dass der Frequenzumrichter ähnlich hohe Verluste besitzt wie der Motor. Weitere Informationen zu Frequenzumrichtern finden Sie im Topmotors Merkblatt Nr. 25: Frequenzumrichter (www.topmotors.ch/merkblaetter).

Getriebe

Die Wirkungsgrade von Getrieben schwanken je nach ihrem mechanischen Aufbau. Es ist daher nur schwer möglich, allgemein gültige Aussagen zum Wirkungsgrad zu machen. Das Motor Systems Tool hilft hier, indem es anhand der Getriebedaten wie Bauform, Drehmoment und Drehzahl den dazugehörigen Wirkungsgrad für Schnecken-, Kegelrad- und Stirnradgetriebe ermittelt und alle auftretenden Kräfte und Verluste zuverlässig berechnet.

Riemen

Auch bei Transmissionsriemen gibt es wesentliche Unterschiede im Aufbau, in der Form und bei den Materialien. Dies bedeutet eine Vielzahl verschiedener Riemenarten mit unterschiedlichen Wirkungsgraden. Das Motor Systems Tool hilft auch hier und hält in seiner Datenbank eine Vielzahl von Riemenarten und Riemenvarianten bereit. Somit ist es möglich, mit nur wenigen Angaben zum Riemen alle nötigen Leistungen, Wirkungsgrade und Verluste aus der Datenbank abzurufen.

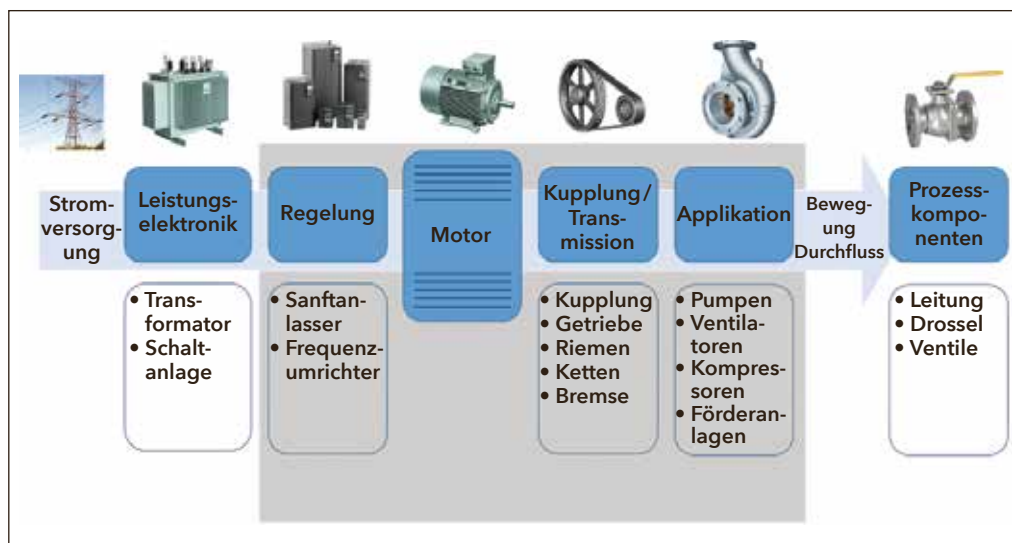


Abbildung 2: Antriebseinheit

Motor Systems Tool

Das Danish Technological Institute (www.dti.dk) hat im Jahre 2011 das Motor Systems Tool veröffentlicht. Es ist das einzige kostenlose, herstellerunabhängige Softwaretool zur systematischen Erfassung und Auswertung von elektrischen Antriebssystemen auf dem Markt. Seit der Veröffentlichung ist das Tool und die hinterlegte Datenbank stetig gewachsen. Seit 2017 sind neben einer englischen und dänischen auch eine deutsche und französische Sprachversion verfügbar.

Die Auswahl an Sprachversionen ist dadurch viel grösser, zudem wurden die hinterlegten Produktdatenbanken an die neuen IEC Normen (IEC 60034-30-1 und IEC 61800-9-2) angepasst und noch einmal deutlich erweitert. Die aktuelle MST-Version enthält heute folgende Komponenten inkl. der dazugehörigen Daten:

Motor

- Standardmotor
- Permanentmagnetmotor
- Synchron-Reluktanzmotor
- IEC-61800-9-2-Motor
- Anschlussmethode
 - Direkt am Netz
 - Sanftanlasser
 - Frequenzumrichter

Transmission

- Riemen
 - Keilriemen
 - Zahnkeilriemen
 - Keilrippenriemen
 - Zahnriemen
 - Flachriemen
- Getriebe
 - Schneckengetriebe
 - Kegelradgetriebe
 - Stirnradgetriebe

Anwendung (Arbeitsmaschine)

- Ventilator
- Wasserpumpe
- Hydraulikpumpe
- Druckluft
- Kältekompressor
- Sonstige Anwendungen

Das Motor Systems Tool kann die relevanten Grössen wie Leistung, Drehzahl und Drehmoment an 4 wählbaren Punkten des Antriebssystems berechnen:

- P1 - Aufgenommene Leistung Motor
- P2 - Wellenleistung Motor
- P3 - Aufgenommene Leistung Last
- P4 - Abgegebene Leistung Last

Das MST eignet sich für alle Anwendungsfälle von Antriebseinheiten. Im Folgenden wird anhand einer Lüftungsanlage der Weg vom Input zum Output exemplarisch dargestellt. Eine umfangreiche Gebrauchsanweisung für das MST findet sich unter:

www.motorsystems.org/motor-systems-tool

Anwendungsbeispiel 1: Lüftungsanlage

In diesem Anwendungsbeispiel geht es um die Optimierung einer bestehenden Lüftungsanlage, die vor und nach der Optimierung den gleichen Druck und die gleiche Luftmenge fördert.

Bei dem Beispiel handelt es sich um eine Anlage mit variablem Volumenstrom. Dieses Beispiel zeigt jedoch nur die Optimierung des Systems in einem Betriebspunkt: dem maximalen Betriebspunkt.

Neben dem Ventilator enthält das Antriebssystem eine Transmission, einen Motor und einen Frequenzumrichter zur Lastregelung.

Ist-Zustand

Ventilator

Es wurde gemessen, dass der Ventilator (mit rückwärts gekrümmten Schaufeln) bei einer Gesamtdruckerhöhung von Δp_t : 2200 Pa eine Fördermenge q_v von 4.0 m³/s liefert. Mit diesen Informationen berechnet sich die pneumatische Leistung (P4):

$$P_4 = q_v \cdot \Delta p_t = 8,8 \text{ kW.}$$

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass der Lüfter in diesem Betriebspunkt einen Wirkungsgrad von 84% ausweist. Zudem lässt sich ablesen, dass der Ventilator mit rund 1840 1/min, dreht um die gemessene Luftmenge beim definierten Druck zu liefern.

Diese Informationen werden später im MST eingegeben und bei den Berechnungen berücksichtigt.

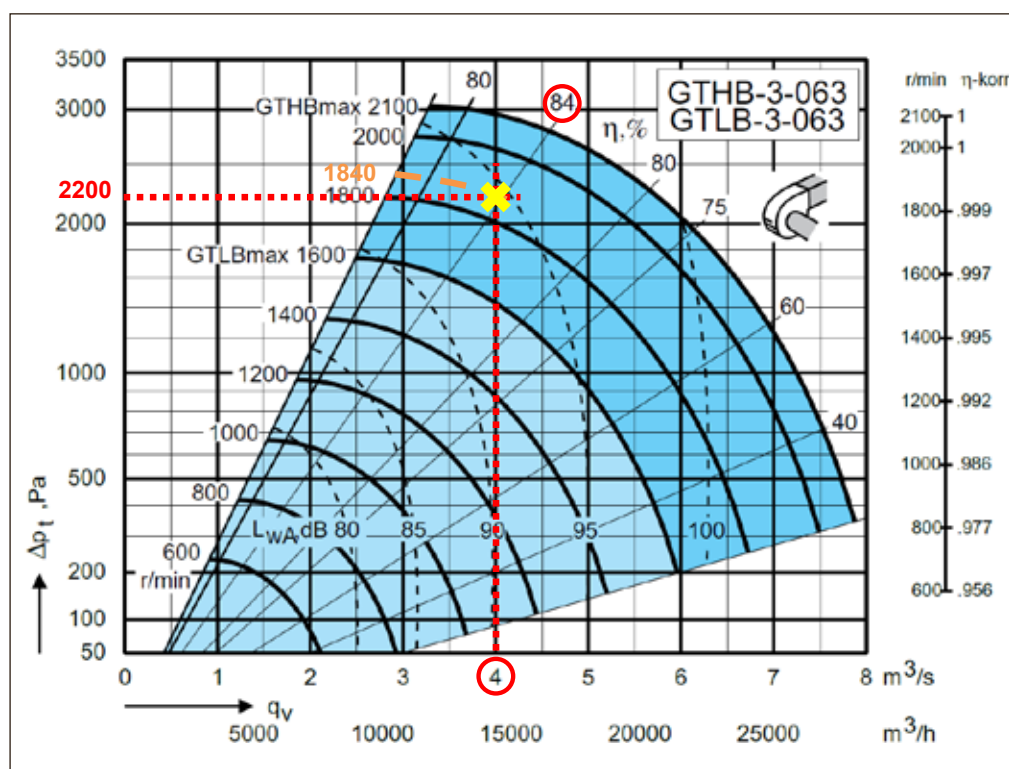
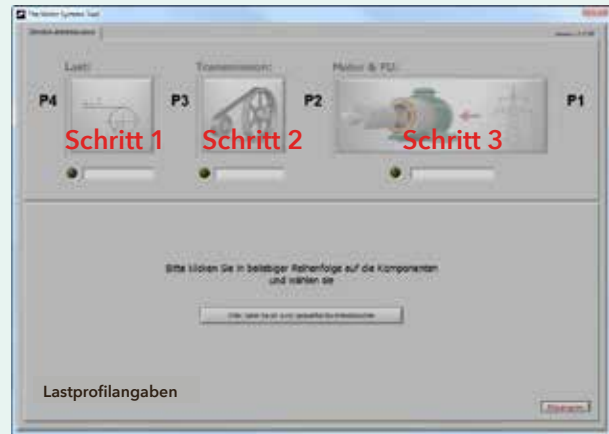


Abbildung 3: Betriebskurven des Ventilators «Centrimaster GT3»

https://oelandonline.dk/docs/Arkiv/GTLB_3_630_teknData_EN.pdf

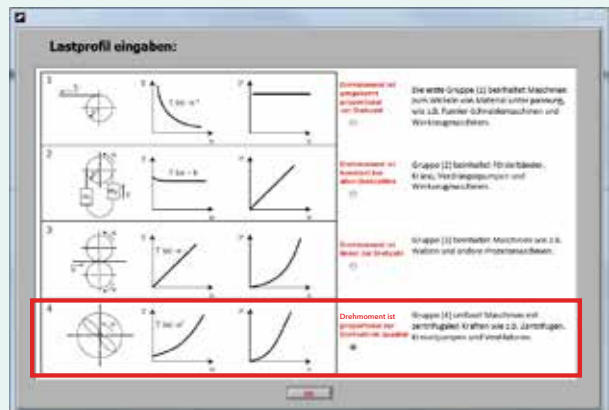
Nach dem Starten des Motor Systems Tool erscheint der Startbildschirm mit den 3 Komponenten des Antriebssystems. In diesem Beispiel werden Sie schrittweise durch die Erstellung eines Antriebssystems geführt.

- Schritt 1: Last
- Schritt 2: Transmission
- Schritt 3: Motor & FU



Schritt 1: Lastprofil wählen

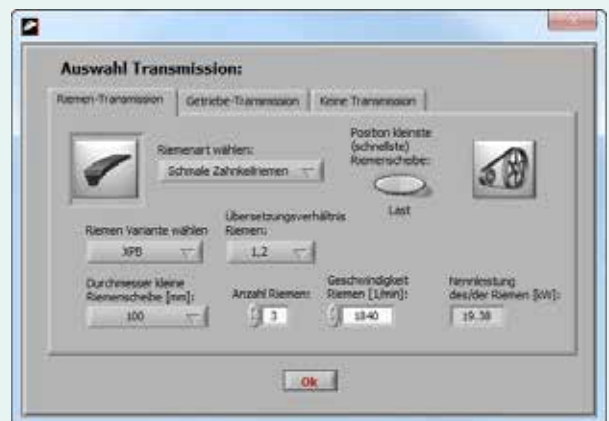
Als erstes wird die Art der Last gewählt. Bei diesem Beispiel mit einer Lüftungsanlage handelt es sich um eine Anwendung mit quadratischer Kennlinie nach dem «Lastprofil 4: Drehmoment ist proportional zur Drehzahl im Quadrat».



Schritt 2: Transmission

In diesem Beispiel wird eine Transmission in Form von Riemen verwendet. Stellen Sie bitte die Transmission gemäss der Abbildung ein und bestätigen Sie Ihre Eingabe mit dem OK-Button unten.

P.S.: Bei der «Geschwindigkeit Riemen [1/min]: 1840» handelt es sich um die Drehzahl (gemäss Diagramm) des Ventilators.



Schritt 3: Motor & FU

Im aktuellen Beispiel wird ein Motor verwendet, dessen Typenschild nicht mehr lesbar ist. Es ist lediglich bekannt, dass es sich um einen 18.5-kW-Asynchronmotor mit 4 Polen handelt. Da alle weiteren Angaben fehlen, wird angenommen, dass es sich um einen IE1-Motor handelt.

Klicken auf den Button «Std. motor öffnen», um einen entsprechenden Motor aus der Datenbank zu wählen.

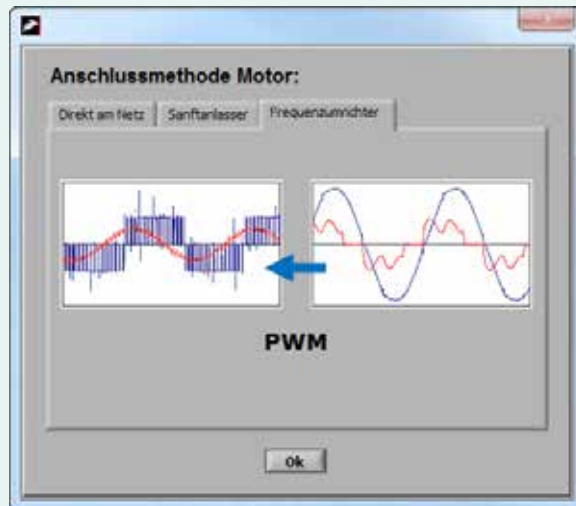


Schritt 3.1: Anschlussmethode Motor

Nachdem die Auswahl des Motors mit «Motordata OK» bestätigt wurde, erscheint die Auswahl der Anschlussmethode des Motors. Hier können Sie zwischen folgenden 3 Anschlussmethoden wählen:

1. Direkt am Netz (Direct On Line (DOL))
2. Sanftanlasser (Softstarter)
3. Frequenzumrichter (FU)

Es handelt sich in diesem Beispiel um eine Anlage mit variablem Volumenstrom mittels Frequenzumrichter.



Schritt 3.2: Aufnahmeleistung bekannter Betriebspunkt

Nachdem der OK-Button geklickt wurde, öffnet sich das dargestellte Fenster: Das Tool benötigt einen bekannten Punkt zum Berechnen aller weiteren Punkte. In diesem Fall kennen wir den Punkt P4 mit den berechneten 8.8 kW («Ist-Zustand»). Zudem kennen wir die nötige Drehzahl des Ventilators von 1840 1/min. Damit sind alle nötigen Eingaben gemacht und die Berechnung erfolgt mit dem Klick des OK-Buttons.



Ohne weitere Angaben rechnet das MST mit einem Ventilator-Wirkungsgrad von 65%. Diese Angabe lassen sich durch Klicken auf «Eingabe bekannter Betriebspunkt» weiter präzisieren.

Schritt 4: Eingabe bekannter Betriebspunkt

In diesem Schritt werden die von Beginn an verfügbaren Informationen über die Lüftungsanlage in das Tool eingegeben.

■ Luftstrom: 14400 m³/h

■ Druck: 2200 Pa

■ Neu berechnete Effizienz: 84%

Nun ist der Ist-Zustand des Antriebssystem vollständig erfasst.

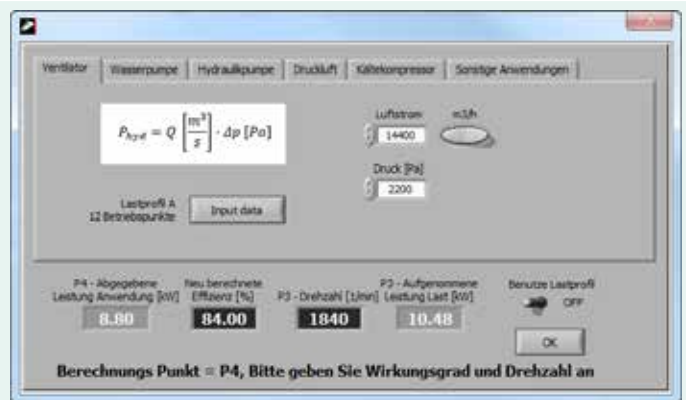
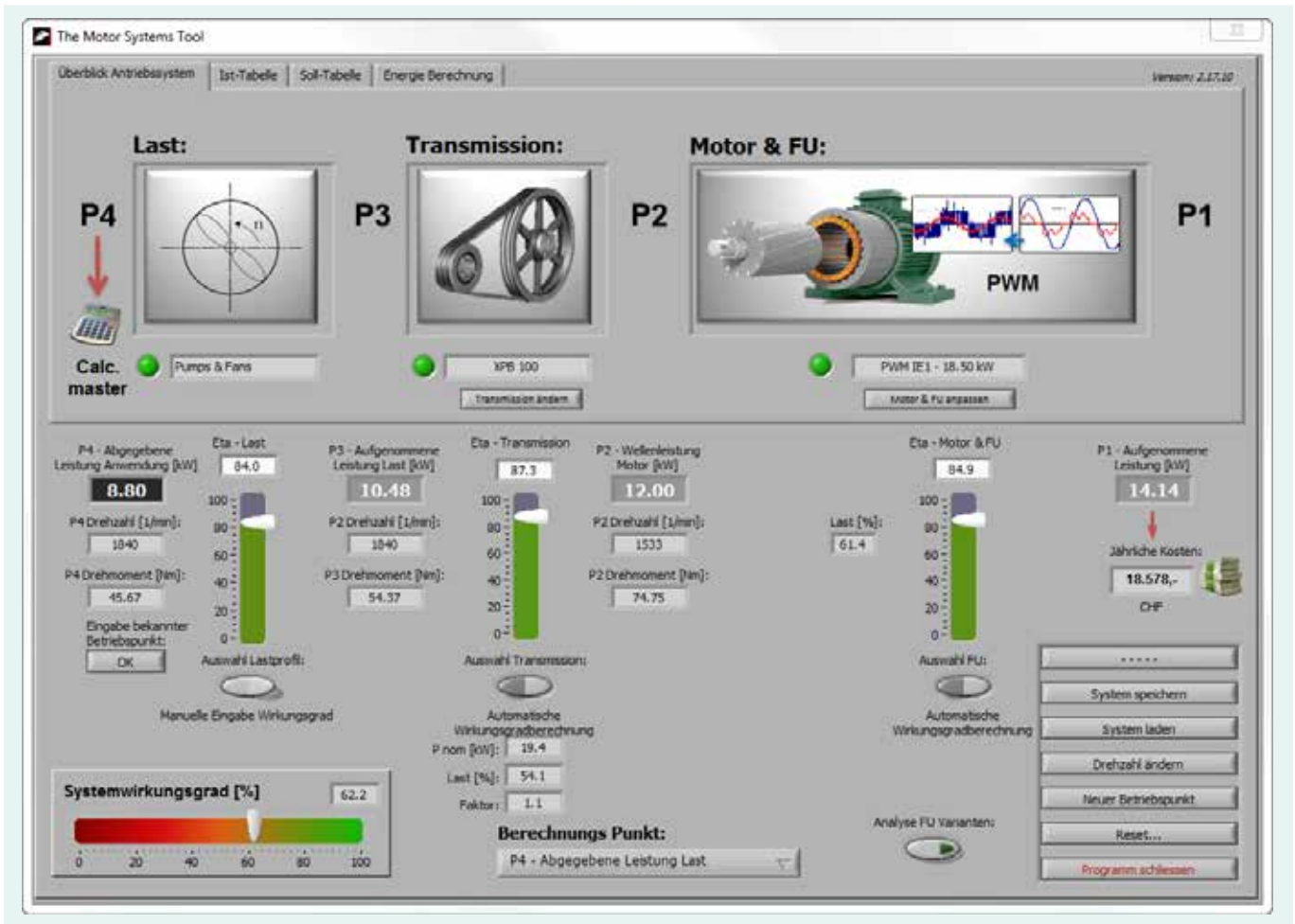


Abbildung 4 zeigt das Ergebnis des Ist-Zustandes des Antriebssystems.



Es ist deutlich erkennbar, dass die Einzelwirkungsgrade von Last, Transmission und Motor & FU im Bereich von 84.0% bis 87.3% liegen, der Systemwirkungsgrad mit 62.2% aber deutlich tiefer ist.

Der Systemwirkungsgrad ist die Summer der Einzelwirkungsgrade:

$$\eta_{\text{System}} = \eta_{\text{Last}} \cdot \eta_{\text{Transmission}} \cdot \eta_{\text{Motor \& FU}}$$

$$\eta_{\text{System}} = 84.0\% \cdot 87.3\% \cdot 84.9\% = 62.2\%$$

Das Motor Systems Tool ermöglicht es nun, Komponenten oder Betriebszustände zu ändern. Die Auswirkungen der Veränderungen auf Leistungen, Wirkungsgrade und Drehzahlen sind unmittelbar sichtbar.

Ebenfalls werden die «Jährlichen Kosten» für Elektrizität berechnet und es bieten sich einfache Vergleichsmöglichkeiten für verschiedene Varianten und Optimierungen. Durch einen Klick auf das Geld-Symbol lassen sich die Betriebsstunden pro Jahr, der Preis je kWh sowie die Währung individuell anpassen.

Soll-Zustand

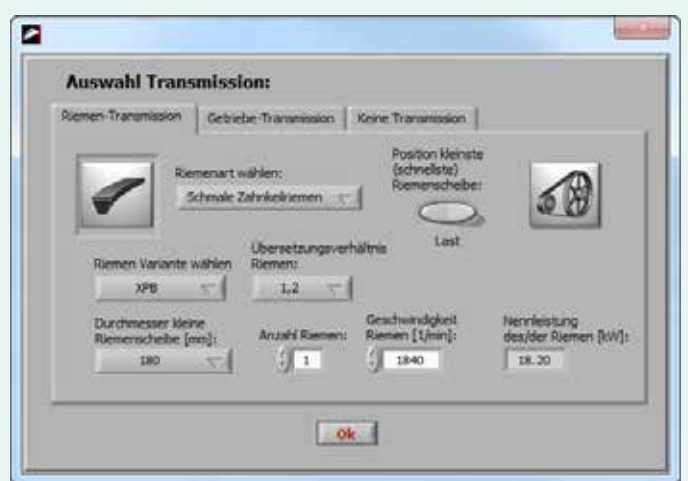
Bei näherer Betrachtung der Darstellung des aktuellen Antriebssystems fällt auf, dass die Transmission (Riemen) mit 87.3% einen relativ schlechten Wirkungsgrad arbeitet. Das kommt daher, dass die Riemenscheiben mit 100 mm und 120 mm einen kleinen Durchmesser haben und die Riemen daher sehr stark gebogen werden (kleiner Radius). Diese starke Biegung verursacht verhältnismässig grosse Verluste.

Der Wirkungsgrad des Motors & FU ist mit 84.9% in der aktuellen Konfiguration ebenfalls relativ niedrig. Diese Tatsache beruht darauf, dass zum einen ein nicht mehr zeitgemässer IE1-Motor mit einem vergleichsweise schlechten Wirkungsgrad verwendet wird und zudem der Lastfaktor mit 61.4% nicht optimal ist. Der effektive Wirkungsgrad von Elektromotoren sinkt bei abnehmender Last. Motoren mit einem permanenten Lastfaktor von weniger als 60% sind nach der Definition von Topmotors überdimensioniert und verursachen unnötige Kosten.

Um den Gesamtwirkungsgrad zu verbessern, werden daher zwei Optimierungen am System vorgeschlagen.

Anpassung der Transmission

Die bisherigen Riemenscheiben werden durch grössere Scheiben (grössere Durchmesser) mit gleichem Übersetzungsverhältnis (1:1.2) ersetzt. Dadurch sinken die Biegeverluste und zudem können grössere Kräfte übertragen werden. Wird bei der Transmission neu eine Riemenscheibe von 180 mm statt der bisherigen 100 mm ausgewählt, fällt auf, dass neu mit nur einem Riemen statt der bisherigen 3 Riemen annähernd die gleiche Kraft übertragen werden kann. Die Reduzierung der Anzahl Riemen hat weitere Vorteile. Neben den Biegeverlusten im Riemen entstehen weitere Verluste beim Einpressen und Lösen des Riemens in der Riemenscheibe. Weniger Riemen reduzieren diese Verluste deutlich.

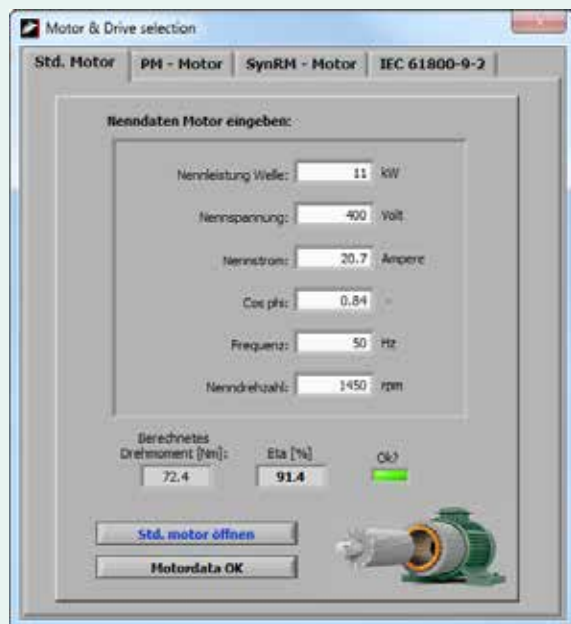


Anpassung des Motors & FU

Der bisherige IE1-Motor wird durch einen effizienteren IE3-Motor ersetzt. Der neue IE3-Motor arbeitet mit einem generell höheren Wirkungsgrad von neu 91.4% (vorher 84.9%; der Motor ermöglicht auch konstant höhere Wirkungsgrade im Teillastbereich und verbessert somit die Systemeffizienz in jedem Betriebspunkt.

Zur Verbesserung des Lastfaktors des neuen Motors, sollte die Motorengrösse ideal an die neuen Bedürfnisse angepasst werden.

Durch die neue Transmission sinkt der benötigte Bedarf im Punkt «P2-Wellenleistung Motor» von ursprünglich 12 kW auf 10.84 kW. Somit ist neu ein 11-kW-Motor (das heisst mit 11 kW mechanisch abgegebener Leistung an der Welle) ausreichend, um das Antriebssystem permanent sicher zu betreiben.



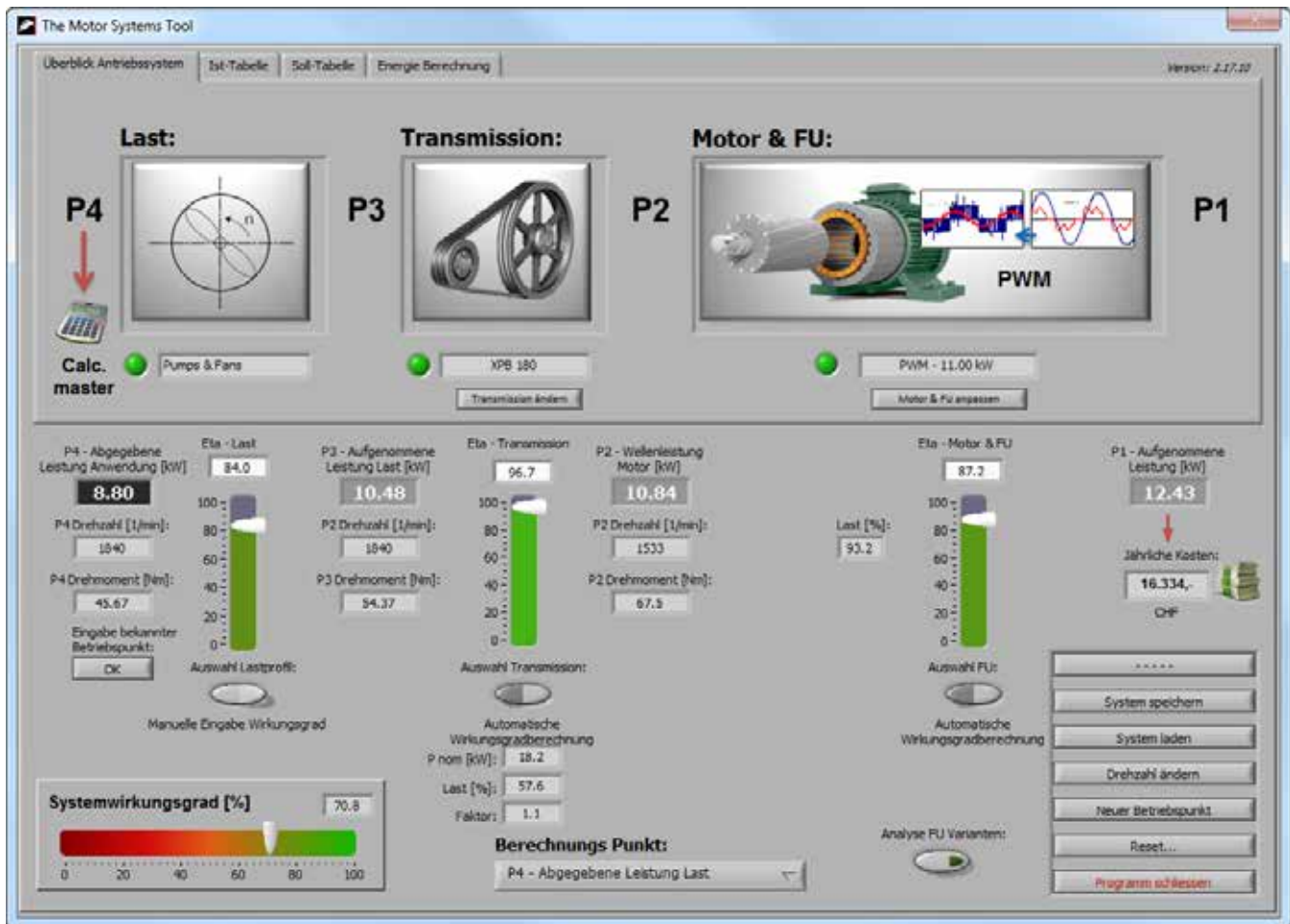


Abbildung 5: Soll-Zustand des Antriebssystems

Ist-Soll-Vergleich

		IST		SOLL		Differenz	
Punkt P4	Leistung	8.80	kW	8.80	kW	-	
	Drehzahl	1840	1/min	1840	1/min	-	
	Drehmoment	45.67	Nm	45.67	Nm	-	
Punkt P3	Leistung	10.48	kW	10.48	kW	-	
	Drehzahl	1840	1/min	1840	1/min	-	
	Drehmoment	54.37	Nm	54.37	Nm	-	
Punkt P2	Leistung	12.00	kW	10.84	kW	-1.16	kW
	Drehzahl	1533	1/min	1533	1/min	-	
	Drehmoment	74.75	Nm	67.50	Nm	-7.25	Nm
Punkt P1	Leistung	14.14	kW	12.43	kW	-1.71	kW
	Jährliche Kosten	18578	CHF	16334	CHF	-2244	CHF (-12%)
		IST		SOLL		Differenz	
Wirkungsgrade	Last	84.0%		84%		-	
	Transmission	87.3%		96.7%		+9.4%	
	Motor & FU	84.9%		93.2%		+8.3%	
Lastfaktor	Motor & FU	61.4%		70.8%		+9.4%	

Fazit

Die systemische Analyse ist der beste Ansatz, um Effizienzsteigerungen bei elektrischen Antriebssystemen zu erreichen. Nur durch effiziente Komponenten und ein gut koordiniertes Zusammenspiel lassen sich gute Systemwirkungsgrade erreichen. Wie in diesem Beispiel dargestellt, lassen sich mit einer einfachen Anpassung der Transmission und einem effizienteren Motor auf einfache Art und Weise 12% der jährlichen Energiekosten einsparen.

Ein effizientes Antriebssystem ist zuverlässiger als ein ineffizientes. Verluste in Form von Reibung bzw. Wärme haben immer auch negative Auswirkungen auf die Lebensdauer.

Einzelne Ergebnisse der Berechnung zeigen:

- Ein stark gebogener Riemen wird strukturell stärker beansprucht als Riemen mit grösseren Biegeradien und verschleisst und ermüdet daher auch schneller.
- Ebenso wirken sich Verluste in Form von Wärme negativ auf die Lebensdauer von z. B. Lagern aus.
- Zudem kann ungewollte Wärme hohe Folgekosten verursachen, wenn Räume, beispielsweise in der Lebensmittelindustrie, permanent energieintensiv auf ein niedriges Niveau gekühlt werden müssen.

Diese sekundären Effizienzgewinne lassen sich nur schwer abschätzen. Oft sind diese Art von Einsparungen aber grösser als die Einsparung der elektrischen Energie im Antriebssystem selber.

Editorischer Vermerk

Das Merkblatt Motor System Tool wurde von Impact Energy im Rahmen des Umsetzungsprogrammes für effiziente Antriebssysteme Topmotors erstellt. Es wurde von Conrad U. Brunner (iE), Petar Klingel (iE) und Rolf Tieben (iE) erarbeitet. Lektorat und graphische Umsetzung: Faktor Journalisten AG.

Das Copyright des Motor Systems Tool und aller gezeigten Grafiken gehören dem Danish Technological Institute (www.dki.dk).

Normen und Standards

- IEC 60034-30-1:2014 Drehende elektrische Maschinen – Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren (IE-Code).
- IEC 61800-9-2:2017 Drehzahlveränderbare elektrische Antriebssysteme – Teil 9-2: Ökodesign für elektrische Antriebssysteme, Motorstarter, Leistungselektronik und deren angetriebene Anwendungen – Energieeffizienzindikatoren für elektrische Antriebssysteme und Motorstarter.

Zusätzliche Informationen

Eine detaillierte Gebrauchsanweisung sowie das Video eines Webinars zum Motor Systems Tool finden Sie unter: www.motorsystems.org/motor-systems-tool