

Einsatz von Energieeffizienzmaßnahmen im elektrischen Antriebsstrang von Kranen

Application of energy efficiency measures in electric drives of cranes

Meike Braun
Steffen Bolender
Tommi Kivelä
Markus Golder

*Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (IFL)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)*

Durch das gesteigerte Interesse der Industrie an nachhaltigen Themen und u. a. die Verschärfung gesetzlicher Rahmenbedingungen nimmt die Analyse von Energiebilanzen heutzutage einen immer größer werdenden Stellenwert ein. In diesem Beitrag sollen die Energiebedarfe verschiedener Hebezeugtypen unter verschiedenen Rahmenbedingungen und hinsichtlich Anschaffungs- und Betriebskosten analysiert und bewertet werden. Ziel ist es dabei verschiedene Handlungsempfehlungen für Betreiber und Hersteller von Hebezeugen abzuleiten, unter welchen Voraussetzungen Energieeffizienzmaßnahmen empfohlen werden können und wann es sinnvoller ist den Stand der Technik zu verwenden.

[Schlüsselwörter: Energieeffizienzmaßnahmen, Kran, elektrischer Antriebsstrang, Modellierung, Kostenbetrachtung]

Due to increased interest of the industry in sustainable topics and, amongst others, tightening of the legal framework, the analysis of energy balances has an increasing significance nowadays. In this paper, the energy demands in electric drives of various lifting equipment types are analyzed and evaluated under different conditions. Various types of costs in terms of acquisition and operating costs are also considered. The aim of the study is to set recommendations for operators and manufacturers of lifting equipment regarding the application of energy efficiency measures.

[Keywords: Energy efficiency measures, crane, electric drives, modelling, cost analysis]

1 EINLEITUNG UND MOTIVATION

Krane und Hebezeuge werden für vielfältige Hub- und Transportaufgaben in der Industrie und in der Bau- branche eingesetzt. Die meist verbreitete Kranbauart ist dabei der Brückenkran, der für den Gütertransport in Werkhallen und damit für den Umschlag von Stückgütern verwendet wird.

Brückenkrane zeichnen sich durch eine unregelmäßige Nutzung und damit geringeren Durchsätzen aus z. B. bei Regalbediengeräten aus. Im Betrieb werden jedoch meist hohe Lasten bewegt, sodass durch die Nutzung der erzeugten generatorischen Energie bei der Senkbewegung hohe Energieeinsparungen möglich wären. Damit stellt sich für Hersteller und Betreiber oft die Frage, ab wann speziell elektrische Energieeffizienzmaßnahmen bei Brückenkranen trotz der höheren Kosten sinnvoll sind und eingesetzt werden sollten?

Ausgehend von den Ergebnissen bereits existierender Untersuchungen wird für den Hubvorgang von Unstetigförderern meist mehr Energie benötigt als für die Fahrbewegung [Sch13], weshalb der Fokus dieses Artikels auf dem Hebezeug des Brückenkrans liegt. In diesem Beitrag sollen daher für verschiedene Hebezeugtypen die Energiebilanzen untersucht werden. Dabei werden verschiedene Konfigurationen auch unter der Analyse der jeweils anfallenden Kosten, wie Anschaffungs- oder Betriebskosten, betrachtet und zusammenfassend bewertet. Ziel ist die Ableitung von Handlungsempfehlungen für Betreiber und Hersteller von Krananlagen.

2 ANTRIEBSKONZEPTE VON HEBEZEUGEN

Die Antriebe von Brückenkranen bestehen in der Regel aus einzelnen Antriebssträngen, die jeweils für die unterschiedlichen Bewegungsrichtungen des Brückenkrans benötigt werden. Klassischerweise werden folgende Übertragungselemente des Antriebsstrangs unterschieden: die Getriebeeinheit, die elektrische Maschine und die Leistungselektronik. Für die Auslegung der einzelnen Komponenten werden verschiedene Parameter benötigt, z. B. die Geschwindigkeiten, Lastmomente oder Einsatzzeiten, damit das System für den Anwendungsfall am besten dimensioniert werden kann.

Die am häufigsten eingesetzte elektrische Maschine ist bei Hebezeugen der Drehstromasynchronmotor mit Käfigläufer. Aufgrund der kostengünstigen Herstellung, der Robustheit und der Wartungsarmut sind polumschalt-

bare Motoren als Ausführungsformen heutzutage dominierend. Je nach Transportaufgabe werden verschiedene Leistungsklassen dieses Elektromotors verwendet. Bei polumschaltbaren Asynchronmotoren lässt sich durch die Änderung der Polpaarzahl die Drehzahl anpassen. Diese Technik ist vergleichsweise einfach, aber auf vorgegebene Drehzahlverhältnisse und damit Geschwindigkeiten begrenzt. Hinzu kommt, dass mit größerer Polpaarzahl der Wirkungsgrad der Asynchronmaschine abnimmt. [Fis12]

Eine weitere Möglichkeit zur Anpassung der Drehzahl ist die Veränderung der Frequenz mithilfe eines Frequenzumrichters. Ein Frequenzumrichter, wie er als Leistungseinheit im Antriebsstrang z. B. bei Regalbediengeräten (RGB) eingesetzt wird, ist bei Brückenkränen aufgrund der hohen Kosten immer noch die Seltenheit. Der Vorteil von Frequenzumrichtern liegt jedoch darin, dass die Lastkennlinie des Motors durch Veränderung der Frequenz und Spannung beeinflusst werden kann. Dadurch sind eine Lastschwingungsdämpfung, sowie eine feinfühligere und damit schnellere Positionierung der Last möglich.

Außerdem können mit einem Frequenzumrichter verschiedene elektrische Energieeffizienzmaßnahmen umgesetzt werden. Im Senkbetrieb wandelt eine Asynchronmaschine die kinetische Energie wieder in elektrische Energie. Für die Rückspeisung der Senkenergie in das elektrische Netz wird ein netzgeführter Wechselrichter innerhalb eines Frequenzumrichter benötigt. Alternativ kann diese Senkenergie in einem Bremswiderstand in Wärme gewandelt werden oder für andere Antriebe verwendet werden, die am selben Zwischenkreis angeschlossen sind.

3 BERECHNUNG DES ENERGIEBEDARFS

Im folgenden Abschnitt werden der Berechnungsablauf und die Eingabewerte zur Bestimmung des Energiebedarfes erläutert. Die Berechnung des Energiebedarfes basiert dabei auf Normen und Richtlinien für Hubwerke und Elektromotoren. Für Werte und Parameter, die nicht in den Normen festgelegt sind, werden Erfahrungswerte von Herstellern und Abschätzungen verwendet.

3.1 ANNAHMEN DER BERECHNUNG

Nachfolgend werden die Annahmen der Berechnung zusammenfassend beschrieben.

3.1.1 LAUFZEITKLASSE

Die Laufzeitklassen beschreiben die durchschnittliche Laufzeit eines Hubwerks pro Tag, bzw. innerhalb eines Jahres. In der ISO 4301-1 werden für Hebezeuge die Laufzeitklassen T 0 (200 h/Jahr) bis T 8 (50.000 h/Jahr)

festgelegt [ISO4301-1]. Alle Laufzeitklassen werden für die weitere Berechnung verwendet.

Tabelle 1. Laufzeitklassen nach ISO 4301 [FEM9511]

Laufzeitklasse nach ISO 4301	Mittlere tägliche Laufzeit in Stunden	Rechnerische Gesamtlaufzeit in Stunden
T 0	$\leq 0,12$	200
T 1	$\leq 0,25$	400
T 2	$\leq 0,5$	800
T 3	≤ 1	1.600
T 4	≤ 2	3.200
T 5	≤ 4	6.300
T 6	≤ 8	12.500
T 7	≤ 16	25.000
T 8	> 16	50.000

3.1.2 NOMINALE GESCHWINDIGKEIT

Die betrachteten nominalen Hubgeschwindigkeiten entsprechen der in der VDI-Richtlinie 2388 [VDI2388] angegebenen Normenreihen. Es wird der Geschwindigkeitsbereich zwischen 2,5 und 16 m/min betrachtet.

3.1.3 ANTEIL UND GESCHWINDIGKEIT IM FEINHUB

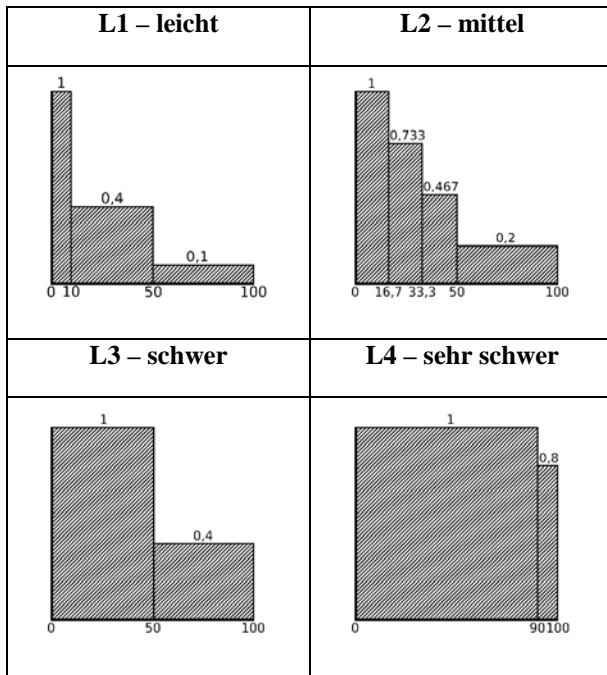
Für polumschaltbare Motoren wird ein Anteil des Feinhubbetriebs an der Gesamtlaufzeit von einem Drittel angenommen. Die Geschwindigkeit des Feinhubs beträgt 1/6 der nominellen Geschwindigkeit, dies entspricht beispielsweise einer Motorkonfiguration mit einer 2-Pol-Anordnung für den Haupthub und einer 12-Pol-Anordnung für den Feinhub.

Für Motoren mit Frequenzumrichter wird davon ausgegangen, dass während der gesamten Laufzeit mit der vollen Geschwindigkeit gefahren wird. Der Beschleunigungs- und Abbremsvorgang kann bei angemessener Hubhöhe vernachlässigt werden. Hierdurch würde der Frequenzumrichter jedoch mehr Arbeit in der gleichen Zeit verrichten und damit auch mehr Energie benötigen. Daher wird die Laufzeit so umgerechnet, dass insgesamt die gleiche Strecke zurückgelegt wird. Somit kann eine Vergleichbarkeit zwischen Frequenzumrichtern und polumschaltbaren Motoren erreicht werden.

3.1.4 LASTKOLLEKTIVE

Das Lastkollektiv enthält die Angabe, welchen Beanspruchungen relativ zur Höchstbeanspruchung das Hubwerk in welchem Maße ausgesetzt ist. In der ISO 4301-1 werden vier Lastkollektive zwischen L1 „leicht“ und L4 „sehr schwer“ unterschieden [ISO4301-1]. Zur Berechnung des Energiebedarfs werden alle Lastkollektive verwendet.

Tabelle 2. Lastkollektive nach ISO 4301 [FEM9511]



3.1.5 TRAGFÄHIGKEIT DES HUBWERKS

Die betrachteten Tragfähigkeiten der Hubwerke entsprechen der in der VDI-Richtlinie 2388 [VDI2388] angegebenen Normenreihe. Es werden Traglasten zwischen 1.000 kg und 100 t betrachtet.

3.1.6 MECHANISCHER WIRKUNGSGRAD

Für die mechanischen Prozesse wird ein konstanter Wirkungsgrad von 85 % angenommen, da der Fokus dieses Beitrags auf dem elektrischen Wirkungsgrad liegt.

3.1.7 ELEKTRISCHER WIRKUNGSGRAD

Die Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades basiert auf der Norm DIN EN 50598-2, welche Berechnungsmethoden zur Abschätzung der Energieeffizienz von Elektromotoren an verschiedenen Betriebspunkten enthält [EN50598-2]. Die Wirkungsgrade für die verwendeten Asynchronmaschinen werden aus der DIN EN 60034-30-1 entnommen, welche minimale Wirkungsgradangaben für 2- bis 8-polige Asynchronmotoren für die Energieeffizienzklassen IE1 bis IE4 enthält [EN60034-30-1]. Da für höherpolige Asynchronmaschi-

nen keine Wirkungsgradangaben vorliegen, werden für 12-polige Motoren die Wirkungsgrade für 8-polige Asynchronmaschinen als Abschätzung verwendet. Eine Verwendung der Wirkungsgradklassifizierung von Wechselstrommotoren mit variabler Drehzahl (DIN IEC 60034-30-2, IE1V bis IE5V) für den Frequenzumrichterbetrieb ist nicht möglich, da die Wirkungsgrade in dieser Norm auf einem Mischwert aus den Wirkungsgraden in verschiedenen charakteristischen Betriebspunkten basieren und damit nicht direkt mit den Wirkungsgraden für die Klassen IE1 bis IE4 verglichen werden können [IEC60034-30-2].

Die Wirkungsgrade werden auf einen Mindestwirkungsgrad von 15 % begrenzt, da die Abschätzung insbesondere im unteren Leistungsbereich sehr niedrige Werte annimmt. Der elektrische Wirkungsgrad ist sowohl für den Motor- als auch den Generatorbetrieb der Asynchronmaschine identisch.

3.1.8 WEITERE ANNAHMEN

Weitere Abstraktionen der Berechnung sind:

- Der Energiebedarf für Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge, sowie im Stillstand wird nicht berücksichtigt, es wird ausschließlich die Energiebilanz für den konstanten Hub- und Senkbetrieb betrachtet.
- Die verwendeten Leistungsstufen und Wirkungsgrade werden durch die DIN EN 60034-30-1 beschränkt. Dadurch wird für einige Fälle eine Motorleistung gewählt, die für den betrachteten Anwendungsfall überdimensioniert ist und damit weniger effizient als der üblicherweise im Hubwerk verwendete Motor.
- Da die Angaben in der Norm auf 2- bis 8-polige Motoren limitiert sind, müssen die Wirkungsgrade für den 12-poligen Motor im polumschaltbaren Betrieb abgeschätzt werden. Hierzu werden die Wirkungsgrade für 8-polige Asynchronmotoren verwendet. Diese sind vermutlich etwas höher als die Wirkungsgrade der in der Realität verwendeten 12-poligen Asynchronmotoren.
- Für den Generatorbetrieb der Asynchronmaschine wird angenommen, dass die generierte Energie vollständig ohne weitere Verluste genutzt, bzw. in das übergeordnete Netz rückgespeist werden kann.
- Für den Frequenzumrichterbetrieb ohne Rückspeisung wird angenommen, dass die Senkenenergie vollständig in Wärme gewandelt wird und nicht weiter genutzt werden kann.

3.2 BERECHNUNGSABLAUF

Zunächst wird basierend auf der nominalen Geschwindigkeit und der Tragfähigkeit die benötigte mechanische Leistung berechnet und hieraus für die entsprechende Leistungsklasse der Elektromotor ausgewählt. Für den polumschaltbaren Betrieb wird dies für die Nominalgeschwindigkeit sowie zusätzlich für den Feinhub mit einem Sechstel der Nominalgeschwindigkeit durchgeführt. Ausgehend von den Wirkungsgraden in der EN 60034-30-1 und den Berechnungsmethoden der DIN EN 50598-2 wird der elektrische Wirkungsgrad für diesen Motor und jede im Lastkollektiv vorgegebene Belastungsstufe berechnet. Die Gesamtwirkungsgrade ergeben sich aus der Multiplikation der elektrischen Wirkungsgrade mit dem mechanischen Wirkungsgrad. Anschließend wird mit den verschiedenen Gesamtwirkungsgraden, der Motorleistung, den Zeitanteilen der verschiedenen Belastungen und Geschwindigkeiten und der durchschnittlichen jährlichen Laufzeit der Gesamtenergiebedarf pro Jahr berechnet. Hierbei wird davon ausgegangen, dass jeweils die Hälfte der Laufzeit im Hub- bzw. Senkbetrieb gearbeitet wird.

3.3 AUSGABEWERTE DER BERECHNUNG

Ausgegeben wird der Energiebedarf in kWh innerhalb eines Zeitraums von mehreren Jahren basierend auf den jeweiligen Eingabedaten. Durch Multiplikation mit dem Strompreis lassen sich die eingesparten Stromkosten berechnen und mit dem notwendigen Mehrpreis für die Leistungselektronik vergleichen. Diese Kosten werden als Betriebskosten im weiteren Verlauf bezeichnet.

4 ERGEBNISSE DER ENERGIEBEDARFSANALYSEN

Im Folgenden wird die Energiebilanz für die verschiedenen Motorkonzepte zunächst für einige ausgewählte Anwendungsfälle betrachtet. Anschließend wird der Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Energiebilanz analysiert.

4.1 EINFLUSS DER WAHL DES KRANTYPS AUF DEN ENERGIEBEDARF

4.1.1 UNIVERSALKRAN 3,2 T / 5 M/MIN

Zunächst wird ein Universalkran mit einer Traglast von 3,2 t und einer Hubgeschwindigkeit von 5 m/min, der zum gelegentlichen Transport von schweren Lasten in Werkstätten benutzt wird, betrachtet. Diese Krane werden oft nur selten benutzt und bewegen selten die maximale Last, auf die sie ausgelegt sind. Daher wird die Laufzeitklasse T 0 und das Lastkollektiv L1 gewählt.

Zum Heben der vorgegebenen Last mit der angegebenen Hubgeschwindigkeit wird eine minimale Leistung

von 2,6 kW benötigt. Die elektrische Leistung der berechneten Motoren beträgt 3 kW.

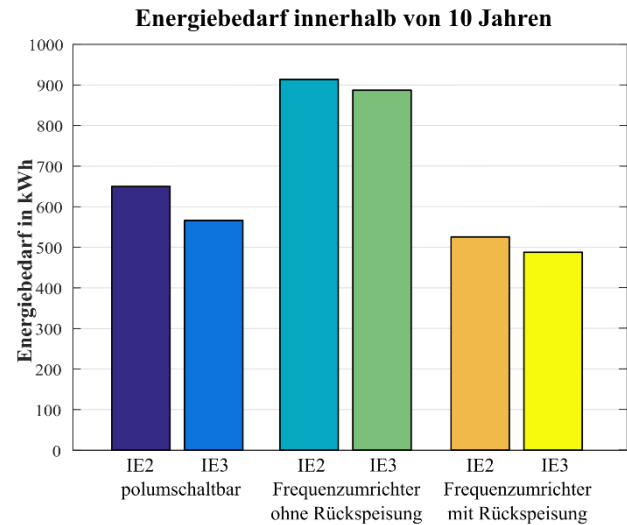


Abbildung 1. Energiebedarf Universalkran 3,2 t und 5 m/min innerhalb von 10 Jahren

Für das angenommene Szenario beträgt die benötigte Gesamtenergie nach 10 Jahren Einsatzzeit ca. 650 kWh bei Verwendung eines polumschaltbaren Motors der Energieeffizienzklasse IE2. Durch Verwendung eines Motors mit Frequenzumrichter und Rückspeisung der Energieeffizienzklasse IE2 beträgt der Energiebedarf nur noch 530 kWh, bei Verwendung der Energieeffizienzklasse IE3 werden nur 490 kWh benötigt. Die Verwendung eines Frequenzumrichters ohne Rückspeisung ist aus energetischer Sicht nicht ratsam.

4.1.2 PROZESSKRAN 5 T / 16 M/MIN

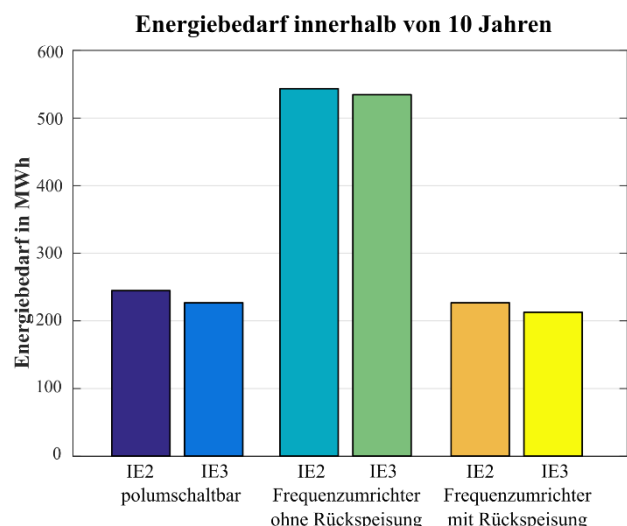


Abbildung 2. Energiebedarf Prozesskran 5 t und 16 m/min innerhalb von 10 Jahren

Als weiteres Beispiel wird ein Prozesskran betrachtet, wie er zum Beispiel zum Handling von Papierrollen in Papierrollenlagern verwendet wird. Diese Krane sind

mehrere Stunden pro Tag im Betrieb und die zulässigen Traglasten werden meist voll ausgenutzt. Daher wird für diesen Anwendungsfall die Laufzeitklasse T 6 und das Lastkollektiv L3 gewählt.

Die benötigte mechanische Leistung beträgt 13,1 kW, die Leistung des verwendeten Motors beträgt 15 kW.

Die benötigte Energie des polumschaltbaren Motors beträgt nach 10 Jahren ca. 246.000 kWh, für die Asynchronmaschine mit Frequenzumrichter und Rückspeisung beträgt der Energiebedarf nur 228.000 kWh für IE2-Motoren und 213.000 kWh für IE3-Motoren. Es können also innerhalb von 10 Jahren zwischen 18.000 und 33.000 kWh eingespart werden. Einen Einsatz von Motoren mit Frequenzumrichter ohne Rückspeisung ist auch für diesen Anwendungsfall aus energetischer Sicht nicht zu empfehlen.

4.1.3 KRAFTWERKKRAN 100 T / 3,2 M/MIN

Es wird ein Wartungskran mit einer Traglast von 100 t betrachtet, wie er zum Beispiel zur Konstruktion und Wartung von Turbinen in Kraftwerken eingesetzt wird. Diese Krane werden zunächst sehr intensiv beim Bau des Kraftwerks und dann nur noch selten in Wartungsphasen eingesetzt. Daher wird die Laufzeitklasse T 1 und das Lastkollektiv L4 verwendet.

Die maximal benötigte mechanische Leistung beträgt für diesen Anwendungsfall 41 kW, der gewählte Elektromotor hat eine Nennleistung von 45 kW.

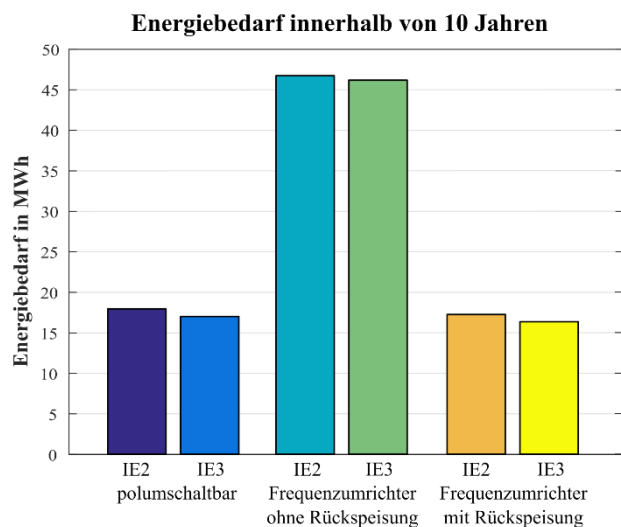


Abbildung 3. Energiebedarf Kraftwerkkran 100 t und 3,2 m/min innerhalb von 10 Jahren

Der Energiebedarf innerhalb von 10 Jahren beträgt für diesen Anwendungsfall 17.900 kWh bei Verwendung eines polumschaltbaren Motors. Durch den Einsatz eines Frequenzumrichters mit Rückspeisung verringert sich der Energiebedarf auf 17.200 kWh (IE2), bzw. 16.400 kWh

(IE3). Die Energieeinsparung beträgt hiermit zwischen 700 und 1.500 kWh.

4.1.4 PROZESSKRAN 50 T / 3,2 M/MIN

Als letztes Beispiel wird ein Prozesskran mit einer Traglast von 50 t betrachtet, wie er zum Beispiel in der Stahlindustrie verwendet wird. Hierfür wird die Laufzeitklasse T 5 und das Lastkollektiv L3 verwendet.

Die maximal benötigte mechanische Leistung beträgt für diesen Anwendungsfall 26,2 kW, der gewählte Elektromotor hat eine Nennleistung von 30 kW.

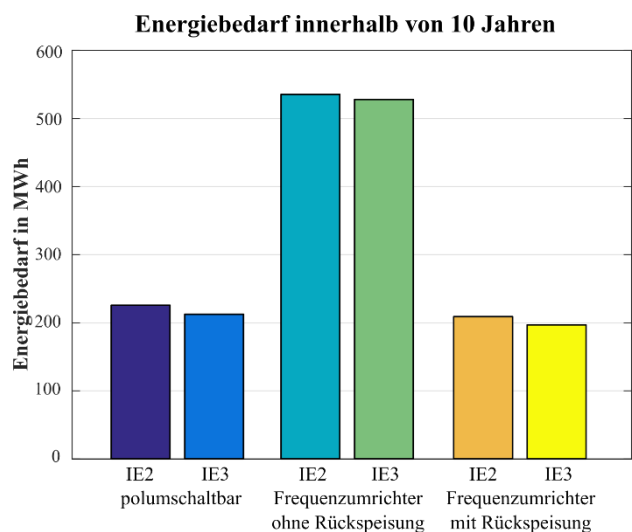


Abbildung 4. Energiebedarf Prozesskran 50 t und 3,2 m/min innerhalb von 10 Jahren

Der Energiebedarf innerhalb von 10 Jahren beträgt für diesen Anwendungsfall 226 000 kWh. Durch den Einsatz eines Frequenzumrichters mit Rückspeisung verringert sich der Energiebedarf auf 210.000 kWh (IE2), bzw. 198.000 kWh (IE3). Die Energieeinsparung beträgt hiermit zwischen 16.000 und 28.000 kWh.

4.2 EINFLUSS DER TRAGFÄHIGKEIT AUF DEN ENERGIEBEDARF

In Abbildung 5 ist der relative Energiebedarf der einzelnen Motorkonzepte im Vergleich zu einem polumschaltbaren Motor der Energieeffizienzklasse IE2 dargestellt. Erkennbar ist hier zum einen, dass der Einsatz eines Frequenzumrichters ohne Rückspeisung aus energetischer Sicht nicht sinnvoll ist. Im Bereich von Traglasten unter 10 Tonnen kann der Einsatz jedoch durchaus sinnvoll sein, wenn hierdurch weitere finanzielle Einsparungen wie zum Beispiel eine Verringerung der Arbeitszeit möglich sind, da der Energiebedarf nur ca. 50 % über einem polumschaltbaren Motor liegt. Kann der Frequenzumrichter Strom in das Netz zurück speisen, ist die Energiebilanz für einen Großteil der Anwendungsfälle deutlich besser. Insbesondere im Bereich von Traglasten

unter zehn Tonnen wird bis zu 20% weniger Energie benötigt.

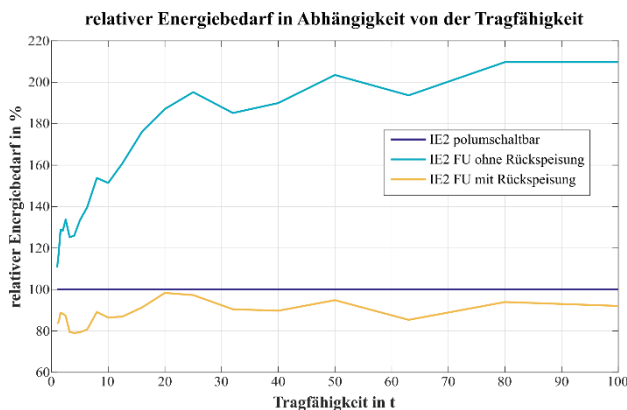


Abbildung 5. Relativer Energiebedarf in Abhängigkeit von der Tragfähigkeit ($v=2,5$ m/min)

Die Schwankungen in der Kurve stammen von der Auswahl der Motoren, da hier üblicherweise nicht immer die optimale Leistungsstufe ausgewählt werden kann, sondern nur eine beschränkte Auswahl zur Verfügung steht.

4.3 EINFLUSS DER HUBGESCHWINDIGKEIT AUF DEN ENERGIEBEDARF

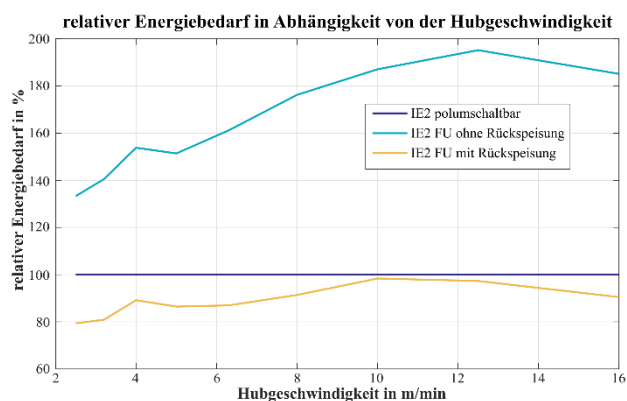


Abbildung 6. Relativer Energiebedarf in Abhängigkeit von der Hubgeschwindigkeit ($m=5$ t)

Betrachtet man den Einfluss der Hubgeschwindigkeit auf den Energiebedarf ist ein ähnliches Bild zu erkennen. Auch hier fällt die Energiebilanz für Motoren mit Frequenzumrichter für kleine Hubgeschwindigkeiten besser aus.

5 ERGEBNISSE DER KOSTENANALYSE

Beim Betrachten der Energieeinsparung muss nicht nur die Verringerung des Energieverbrauchs im Betrieb berücksichtigt werden, sondern auch die Mehrenergie und die Investitionskosten, die zur Produktion der benötigten Leistungselektronik (Umrichter, Rückspeiseeinheit, Bremswiderstand) aufgewendet werden.

Im Folgenden werden die Betriebskosteneinsparungen, sowie die Beschaffungsmehrkosten für die jeweiligen Anwendungsfälle betrachtet. Dabei werden ausschließlich die Energiekosten der Motoren betrachtet, andere Faktoren wie zum Beispiel Arbeitskosteneinsparungen werden nicht berücksichtigt.

Als Strompreis wird ein Preis von 15,00 ct/kWh angenommen. Dies entspricht dem durchschnittlichen Strompreis für Industriebetriebe (Jahresverbrauch 160 bis 20.000 MWh) der Jahre 2012 bis 2016 inklusive Steuer und Abgaben nach den Daten des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. [BDEW2016]

5.1 UNIVERSALKRAN 3,2 T / 5 M/MIN

Die Energieeinsparung für diesen Anwendungsfall beträgt 120 kWh innerhalb von 10 Jahren und damit einer Kostenersparnis von 18,34 Euro. Der Mehrpreis für eine Asynchronmaschine mit Frequenzumrichter beträgt ca. 1.300 Euro, dazu kommen noch die Kosten für eine Rückspeiseeinheit. Aus ökonomischer Sicht lohnt sich der Einsatz eines Frequenzumrichters für diesen Anwendungsfall somit nicht.

5.2 PROZESSKRAN 5 T / 16 M/MIN

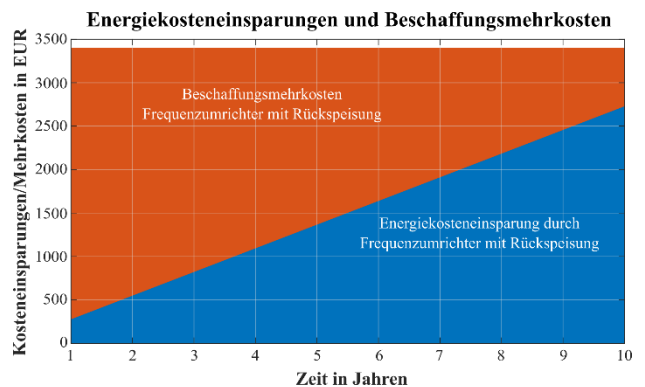


Abbildung 7. Energiekosteneinsparungen und Mehrkosten bei Nutzung eines Frequenzumrichters mit Rückspeisung anstatt eines polumschalbaren Motors für einen Prozesskran mit 5 t Tragfähigkeit.

In Abbildung 7 sind die eingesparten Energiekosten, sowie die benötigten Beschaffungsmehrkosten für die Asynchronmaschine mit Frequenzumrichter aufgezeigt. Auch in diesem Fall werden die Beschaffungsmehrkosten am Ende der Lebensdauer von 10 Jahren nicht durch Energieeinsparungen kompensiert. Bei Beschaffungsmehrkosten von 3.400 Euro für den Frequenzumrichter mit Rückspeisung müsste man das Hubwerk mindestens 13 Jahre betreiben um diese Mehrkosten durch Energiekosteneinsparungen zu kompensieren. Üblicherweise werden Hubwerke für eine Lebensdauer von 10 Jahren ausgelegt.

5.3 KRAFTWERKKRAN 100 T / 3,2 M/MIN

Die Energiekosteneinsparung bei Verwendung eines Frequenzumrichters mit Asynchronmaschine beträgt ca. 100 Euro innerhalb von 10 Jahren. Zu beachten ist jedoch, dass die Lebensdauer dieser Krane aufgrund ihres seltenen Einsatzes oft mehr als 10 Jahre beträgt. Des Weiteren sind polumschaltbare Motoren mit dieser Leistung vergleichsweise teuer. Je nach konkretem Anwendungsfall kann es also durchaus sinnvoll sein einen Antrieb mit Frequenzumrichter umzusetzen.

5.4 PROZESSKRAN 50 T / 3,2 M/MIN

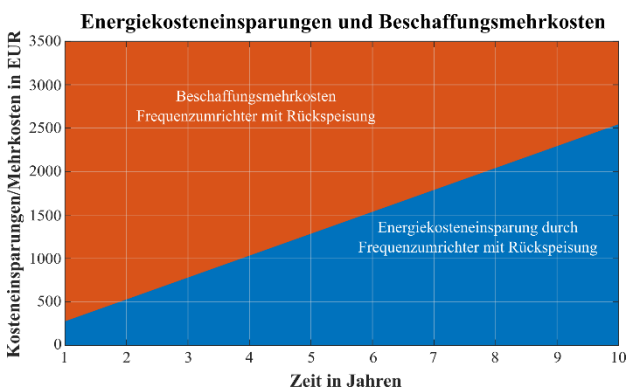


Abbildung 8. Energiekosteneinsparungen und Mehrkosten bei Nutzung eines Frequenzumrichters mit Rückspeisung anstatt eines polumschaltbaren Motors für einen Prozesskran mit 50 t Tragfähigkeit.

Auch in diesem Anwendungsfall sind die Beschaffungsmehrkosten für den Betrieb mit Frequenzumrichtern höher als die Energiekosteneinsparungen, die innerhalb von 10 Betriebsjahren entstehen. Geht man von einem Mehrpreis von 3.500 Euro für den Frequenzumrichterbetrieb mit Rückspeisung aus, hätten sich diese Mehrkosten erst im 14. Betriebsjahr durch Energieeinsparungen amortisiert.

6 HANDLUNGSEMPFEHLUNG FÜR BETREIBER UND HERSTELLER VON KRANANLAGEN

Die Erkenntnisse dieser Analyse sind eindeutig. Während bei isolierter Betrachtung der Höhe des Energiebedarfs zwingend Energieeffizienzmaßnahmen, z.B. in Form von Frequenzumrichtern mit Rückspeiseeinheiten statt polumschaltbarer Maschinen, empfohlen wird, kehrt sich die Empfehlung bei einer vollständigen Kostenbetrachtung weitestgehend um.

Für reine Energiebetrachtungen werden daher folgende Empfehlungen gegeben:

- Der Einsatz eines Frequenzumrichters im Hebezeug lohnt sich nur dann, wenn eine Rückspeiseeinheit verwendet wird.

- Der geringste Energiebedarf kann für alle Lastkollektive und Laufzeitklassen mit einem Frequenzumrichter mit Rückspeiseeinheit erzielt werden.
- Polumschaltbare Maschinen sind in jedem Fall Frequenzumrichtern ohne Rückspeiseeinheit vorzuziehen.

Werden jedoch zu den Energiekosten die Anschaffungskosten hinzugezogen, so muss eindeutig von einem Einsatz mit Frequenzumrichtern abgeraten werden. Die Vorteile der günstigen, robusten polumschaltbaren Maschinen stehen dabei den Mehrkosten des Frequenzumrichters mit Rückspeiseeinheit gegenüber.

Diese Handlungsempfehlungen gelten für den Stand der Technik sowie die heutige Kostenlage. Eine Veränderung dieser Empfehlung kann nur dann ausgesprochen werden, wenn sich am Status Quo, z.B. an Strom- oder Anschaffungspreisen der Leistungselektronik, Veränderungen zeigen.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Energiebilanzen und der Einsatz von Energieeffizienzmaßnahmen stehen durch das gesteigerte Interesse der Industrie an nachhaltigen Themen und u.a. die Verschärfung gesetzlicher Rahmenbedingungen immer mehr im Fokus der Betrachtung. Dabei muss jedoch je nach vorhandenem System und der jeweiligen Transportaufgabe evaluiert werden, ob Energieeffizienzmaßnahmen sinnvoll eingesetzt werden können oder nicht.

Dieser Beitrag beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit Hebezeugen von Brückenkranen. Dabei wurde eine Energiebedarfsberechnung unter Annahmen für u. a. unterschiedliche Lastfälle, Lastkollektive und elektrische Wirkungsgrade aufgestellt und für verschiedene Hebezeugtypen untersucht. Die Ergebnisse der Energiebedarfsberechnung zeigten, dass der Einsatz von Frequenzumrichtern mit Rückspeiseeinheiten gegenüber polumschaltbaren Maschinen ohne Frequenzumrichter für jeden Hebezeugtyp zu bevorzugen ist.

Werden jedoch Kostenanalysen zu den Energiebedarfsberechnungen hinzugezogen, verändert sich diese Empfehlung. Durch die erhöhten Kosten der Leistungselektronik sind nach Stand der Technik die bestehenden Systeme mit polumschaltbaren Maschinen deutlich zu bevorzugen.

Diese Handlungsempfehlungen gelten für den heutigen Status Quo und müssen bei veränderten Rahmenbedingungen neu analysiert und bewertet werden.

LITERATUR

- [BDEW2016] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V.: *BDEW-Strompreisanalyse Mai 2016*. Online-Publikation: <https://www.bdew.de/internet.nsf/id/bdew-strompreisanalyse-de>, aufgerufen am 12.08.2016.
- [EN50598-2] DIN EN 50598-2: *Ökodesign für Antriebssysteme, Motorstarter, Leistungselektronik und deren angetriebene Einrichtungen - Teil 2: Indikatoren für die Energieeffizienz von Antriebssystemen und Motorstartern*. Deutsches Institut für Normung. Beuth-Verlag, Berlin, 2015.
- [EN60034-30-1] DIN EN 60034-30-1: *Drehende elektrische Maschinen - Teil 30-1: Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren*. Deutsches Institut für Normung. Beuth-Verlag, Berlin, 2014.
- [FEM9511] *FEM 9.511: Berechnungsgrundlagen für Serienhebezeuge – Einstufung der Triebwerke*. Fédération Européenne de la Manutention. Brüssel, 1986.
- [Fis12] Fischer, Rolf: *Elektrotechnik für Maschinenbauer*. Vieweg+Teubner Verlag. ISBN 978-3-8348-8304-9, 2012
- [IEC60034-30-2] DIN IEC 60034-30-2 Entwurf: *Drehende elektrische Maschinen - Teil 30-2: Wirkungsgrad-Klassifizierung von Wechselstrommotoren mit variabler Drehzahl*. Deutsches Institut für Normung. Beuth-Verlag, Berlin, 2014.
- [ISO4301-1] ISO 4301-1: *Cranes - Classification - Part 1: General*. International Organization for Standardization, Genf, 2016.
- [Sch13] Schilling, Timo; Amberger, Matthias; Braun, Meike: *Analyse und Quantifizierung der Umweltauswirkungen von Fördermitteln in der Intralogistik*. Hg. v. Rainer Bruns, Willibald A. Günthner und Kai Furmans. Helmut-Schmidt-Universität - Lehrstuhl für Maschinenelemente und Technische Logistik (Hamburg-Wandsbek); Technische Universität München - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (München); Karlsruher Institut für Technologie - Institut für Fördertechnik und Logistiksysteme (Karlsruhe) 2013
- [VDI2388] VDI 2388: *Krane in Gebäuden – Planungsgrundlagen*. Verband Deutscher Ingenieure. Beuth Verlag, Berlin, 2007

Dipl.-Ing. Meike Braun, is working as head of the department of Warehouse and Material Handling Technology, Institute for Material Handling and Logistics (IFL), Karlsruhe Institute of Technology (KIT).

Between 2006 and 2011 Meike Braun studied mechanical engineering at KIT. Since November 2011 she works at IFL, in July 2016 she graduated. Her research topics are simulation, measurements, and improvement of overall energy efficiency of material handling systems.
E-Mail: Meike.Braun@kit.edu

M.Sc. Steffen Bolender, Research Assistant at the Institute for Material Handling and Logistics (IFL), Karlsruhe Institute of Technology (KIT).

Steffen Bolender studied Mechanical Engineering at Karlsruhe Institute of Technology (KIT) from 2009 to 2015. Since November 2015 he is a research assistant in the department of Warehouse and Material Handling Technology at IFL.
E-Mail: Steffen.Bolender@kit.edu

M.Sc. Tommi Kivelä, Research Assistant at the Institute for Material Handling and Logistics (IFL), Karlsruhe Institute of Technology (KIT).

E-Mail: Tommi.Kivela@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Markus Golder, head of the chair of Safe Mechatronic Systems for Intralogistics (SIMESI) at the Institute for Material Handling and Logistics (IFL), Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

E-Mail: Markus.Golder@kit.edu

Address: Institute for Material Handling and Logistics (IFL), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Gotthard-Franz-Straße 8, 76131 Karlsruhe,
Phone: +49 (0)721/608-48638