

Potentiale und Möglichkeiten einer Energieeffizienzsteigerung von Stückgutstetigförderern durch optimierte Antriebssystemauswahl

Increasing the energy efficiency of continuous conveyors for unit loads through optimized drive system selection

Thomas Stöhr
Norbert Hafner

Institut für Technische Logistik (ITL)
Fakultät Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften
Technische Universität Graz

Fördergeräte der KLT Stückgutstetigfördertechnik sind wesentliche Gewerke von Intralogistiksystemen und relevante Energieverbraucher im Materialflusssystem (MFS). Forschungsergebnisse am Institut für Technische Logistik (ITL) haben gezeigt, dass die wesentlichsten Verluste von Fördergeräten im Antriebssystem (ATS) entstehen [LOT16]. Eine Ursache der hohen Verluste ist inakurate Dimensionierung und Auswahl der eingesetzten ATS. Um diese Lücke zu schließen und die Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz zu nutzen, wird im Folgenden eine Methode zur energieeffizienzoptimierten ATS-Auswahl für Stückgutstetigförderer, der Energieeffizienzrechner (EE-Rechner), vorgestellt sowie die Ergebnisse der Effizienzsteigerung ausgewiesen und messtechnisch validiert. Der EE-Rechner unterstützt die optimierte ATS-Auswahl beim Betrieb in dynamischen Betriebszuständen und leistet einen Beitrag zur Minimierung des Energiebedarfs von MFS.

[KLT Stückgutstetigfördertechnik, Energieeffizienz, Antriebssystemauswahl, Materialflusssystem]

Continuous conveyors for small scale unit loads are core components of intralogistics systems and relevant consumer of energy in Material Flow Systems (MFS). Optimization of their energy efficiency is an important issue. Research results at the Institute of Logistics Engineering brought to light that most energy efficiency losses occur in drive systems [LOT16]. One reason for these losses is inaccurate selection and dimensioning of the drive system. In order to close this gap and achieve overall efficiency we intend to depict an energy efficiency calculator model (EEC model) that has been worked out, verified and validated. The EEC model supports the optimized drive system selection for operation in dynamic load states and contributes to increasing the energy efficiency of material flow systems.

[continuous conveyor for unit loads, energy efficiency, drive system selection, material flow system]

1 EINLEITUNG

Die Steigerung der Energieeffizienz von MFS ist vor dem Hintergrund des Klimawandels und steigender Energiekosten von ökologischer und ökonomischer Wichtigkeit. Gleichzeitig steigen Anzahl und Dimension von installierten MFS und somit der Energiebedarf. Installierte innerbetriebliche Förderstrecken von 20km und mehr werden erreicht [SSI18]. Intensive Untersuchungen an KLT-Stückgutstetigförderer am ITL haben gezeigt, dass die wesentlichsten Energieverluste im Antriebssystem auftreten (Abbildung 1). Je nach Fördertechnik belaufen sich diese bei den untersuchten Seriengeräten zwischen 48,6% und 78%.

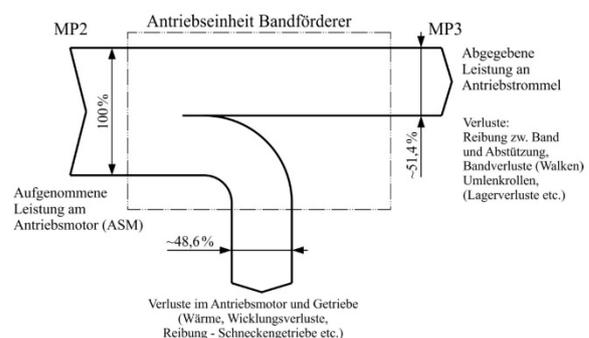


Abbildung 1. Leistungsverluste am Bandförderer bei 50kg Beladung [LOT16]

2 PROBLEMSTELLUNG

Die Ursache der hohen Verluste im Antriebssystem (ATS) ist eindeutig identifiziert: Aufgrund der starken Lastabhängigkeit der Wirkungsgradkennlinien von Standard-ATS ist der Bereich um den Nennpunkt des ATS jener mit dem höchsten Wirkungsgrad. Beim stationären Betrieb des Förderers liegt der resultierende Betriebspunkt weit un-

terhalb des Nennpunktes, im Bereich eines niedrigen Wirkungsgrades [LOT16]. Der Grund für den häufigen Betrieb im Bereich niedriger Wirkungsgrade liegt einerseits im dynamischen Lastbereich der Fördergeräte und andererseits in der häufigen Überdimensionierung. Die ATS erfüllen die logistische Förderleistung in einem Materialflusssystem. Die dabei auftretenden Betriebszustände eines Förderers variieren zwischen Stillstand, Leerlauf und Vollast. Dadurch sind die resultierenden mechanischen Belastungspunkte an der Antriebswelle ebenfalls vom dynamischen Betriebszustand am Förderer abhängig. Das ATS muss den sicheren Betrieb in jedem Betriebszustand gewährleisten und hat folglich einen entsprechenden Leistungsbereich abzudecken. Der häufige Betrieb im niedrigen Teillastbereich bei ungünstigen Wirkungsgraden ist die Folge. Überdimensionierungen wirken sich aufgrund der gegebenen Wirkungsgradkennlinien progressiv negativ aus.

3 BEWERTUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ VON ANTRIEBSSYSTEMEN

Die Bewertung der Energieeffizienz von ATS ist europaweit mit dem IE-Code harmonisiert [NOR15]. Die IE-Klassifizierung nach IEC 60034-30-1 erfolgt durch Messung des Wirkungsgrades des Motors bei Betrieb im Nennpunkt. Der gemessene Wirkungsgrad, der Nennwirkungsgrad η_N , wird zur Bewertung einem Mindest-Nennwirkungsgrad η_{nenn} der entsprechenden IE-Klasse gegenübergestellt. Der Nennwirkungsgrad und die IE-Klasse werden am Leistungsschild des Motors ausgewiesen. Im Kontext der Anforderungen, resultierend aus dem Betrieb am Förderer, ergeben sich folgende Spezifika, wodurch der Nennwirkungsgrad bzw. die IE-Klasse kein aussagekräftiges Kriterium für den effizienten Betrieb am Fördergerät darstellen:

- 1) IEC 60034-30-1 bewertet den Wirkungsgrad nur im Nennpunkt des ATS und berücksichtigt keine Teillastbereiche. Diese sind aber aufgrund der resultierenden, dynamischen Betriebsbereiche am Fördergerät und anderen MFS essentiell für einen bewertbaren Vergleich.
- 2) Aufgrund der Drehzahl- und Drehmomentbereiche an der Antriebswelle von KLT-Stückgutstetigförderer, werden ATS-Konfigurationen mit Getriebe und Umrichter eingesetzt. Wirkungsgrade von Umrichter und Getriebe weisen auch eine Lastabhängigkeit auf. Folglich muss für eine belastbare Bewertung die Effizienz des Gesamtsystems, bestehend aus Umrichter, Motor und Getriebe, über das Lastspiel berücksichtigt werden.

Zur Bewertung der Effizienz von Antriebssystemen wurde mit der Normenreihe IEC 61800, welche im Rahmen der Ökodesignrichtlinien entstand, ein neuer Ansatz gewählt [EU18].

3.1 ÖKODESIGNRICHTLINIE ZUR GESTALTUNG ENERGIEEFFIZIENTER PRODUKTE

Übergeordnetes Ziel der Ökodesignrichtlinien ist die Gestaltung von energieeffizienten Produkten [EU18]. Im Kontext der ATS-Auswahl soll dieses Ziel durch eine transparentere Bewertungsmöglichkeit der Effizienz des ATS beim Betrieb an der Lastmaschine erreicht werden [NOR18-1]. Zwei zentrale Elemente dieses Ansatzes sind der erweiterte Produktansatz und das semi-analytische Berechnungsmodell (SAM). Der erweiterte Produktansatz umfasst das gesamte Produkt und unterscheidet die Teilsysteme Motorsystem, bestehend aus Umrichter und Motor, und Lastmaschine. Der erweiterte Produktansatz legt somit die Systemgrenzen fest. Auf Seite des Motorsystems umfassen diese nur Umrichter (Leistungsstellglied) und Motor – ohne Getriebe (Abbildung 2).

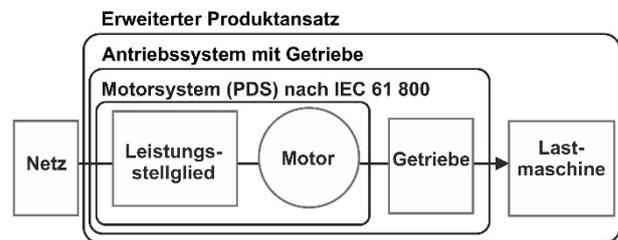


Abbildung 2. Systemgrenzen des erweiterten Produktansatzes

Das SAM ist ein auf Basis von Messungen abgeleitete Berechnungsmethode zur Bestimmung der Verluste jedes Teilsystems in normierten Betriebspunkten. Im erweiterten Produktansatz werden SAM des Motorsystems und SAM der angetriebenen Einrichtung, zur Bestimmung der relativen Verluste bzw. der Wirkungsgrade in mehreren Betriebspunkten, zusammengeführt, um die Energieeffizienz des erweiterten Produktes zu bestimmen (Abbildung 3).

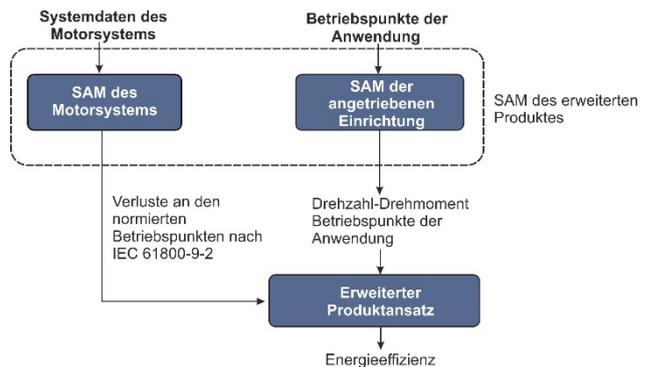


Abbildung 3. Erweiterter Produktansatz nach IEC 61800

Das SAM des Motorsystems liefert die Verluste oder Wirkungsgrade in den normierten Arbeitspunkten (Abbildung 4). Das SAM des Motorsystems wird von IEC 61800 definiert. Teil 1 der Normung, IEC 61800-9-1 [NOR18-1] definiert allgemeine Anforderungen an die Vorgehensweise zur Betrachtung der Energieeffizienz von drehzahlveränderbaren elektrischen Antrieben und deren

Antriebskomponenten und Teil 2, IEC 61800-9-2 [NOR18-2], hält fest wie diese umzusetzen und zu bewerten sind.

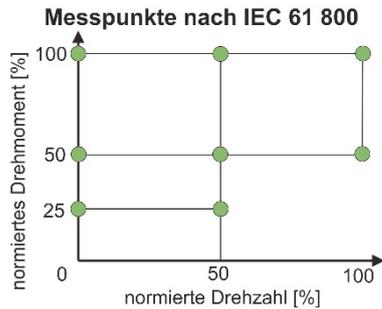


Abbildung 4. Normierte Arbeitspunkte zur Bestimmung der Verluste des Motorsystems nach IEC 61800

Das semi-analytische Berechnungsmodell (SAM) der angetriebenen Einrichtung stellt typische Drehmoment- und Drehzahlbereiche beim Betrieb in unterschiedlichen, repräsentativen Betriebszuständen bereit. Diese zu definieren liegt im Verantwortungsbereich des zuständigen Produktkomitees. Für KLT Stückgutstetigförderertechnik ist bisher kein SAM definiert.

Der erweiterte Produktansatz kombiniert das SAM des Motorsystems und das SAM der angetriebenen Einrichtung. Diese Kombination liegt in der Verantwortung des Herstellers des erweiterten Produktes. Der erweiterte Produktansatz verwendet anwendungsbezogene Daten, um den Energieeffizienz der Anwendung zu bestimmen. Damit wird der Vergleich der Energieeffizienz unterschiedlicher Motorsysteme für eine bestimmte Anwendung ermöglicht. Wichtige Elemente sind dafür die Daten über Lastabhängigkeiten bzw. die Zusammenhänge zwischen Drehzahl-Drehmoment und Belastung-Drehmoment der Anwendung [NOR18-1].

3.2 LÖSUNGSANSATZ

Die Effizienzsteigerung der optimierten ATS-Auswahl wird durch die Minimierung der Verluste beim Betrieb im realen Lastkollektiv erreicht. Dabei müssen die mechanischen Belastungszustände an der Antriebswelle des Fördergeräts, die aus dem Betrieb im Lastkollektiv resultieren, und die Wirkungsgradkennlinien der ATS, bestehend aus Umrichter, Motor und Getriebe, berücksichtigt werden.

Maßgebliche Größen zur Berechnung des elektrischen Energiebedarfs W_{elekt} eines Förderers ist die mechanische Leistung an der Antriebswelle P_{mech} und der Wirkungsgrad η_{ATS} des Antriebssystems beim Betrieb (1).

$$W_{elekt} = \int_0^T \frac{P_{mech}(t)}{\eta_{ATS}(P_{mech})} dt \quad (1)$$

Die mechanische Leistung P_{mech} ist das Produkt von Antriebsdrehmoment $M_T(t)$ und Winkelgeschwindigkeit

$\omega(t)$. Der Verlauf von $M_T(t)$ ist eine Funktion des Betriebszustandes sowie des konstruktiven Aufbaus des Fördergeräts. Der Betrag der Winkelgeschwindigkeit wird von der vorgegebenen zu erreichenden Fördergeschwindigkeit definiert. Da der Wirkungsgrad des ATS lastabhängig ist, müssen zur Minimierung des Energiebedarfs und zur gleichzeitigen Steigerung der Energieeffizienz beide Größen, P_{mech} und η_{ATS} , anhand eines Lastkollektivs bewertet bzw. optimiert werden.

Zur Berücksichtigung der tatsächlichen Lastverhältnisse im Betrieb ist ein repräsentatives Lastkollektiv essentiell, um den realen Belastungsfall zu berücksichtigen. Der logistische Leistungsbereich (Volllast) ist im vorliegenden Fall mit einer Beladung von 35 kg/TE und dem Durchsatz von 2400 TE/h spezifiziert. Auf Grundlage der Daten werden die Spezifikationen der einzelnen Lastgrade abgeleitet. Das zur Bewertung eingesetzte, repräsentative Lastkollektiv beinhaltet die Lastgrade Voll- und Teillast sowie Leerlauf und Stillstand. Der Lastgrad Stillstand wird in die Bewertung miteinbezogen, um die Leistungsaufnahme Umrichterbetreiber ATS im Standby zu berücksichtigen (Abbildung 5).

Die Lastgrade sollten zukünftig jedenfalls standardisiert werden. Deren zeitliche Gewichtung wäre für einen neutralen Systemvergleich ebenfalls zu standardisieren. Für die Optimierung einer Einzelanlage wäre diese zeitliche Gewichtung betriebsspezifisch vorzunehmen.

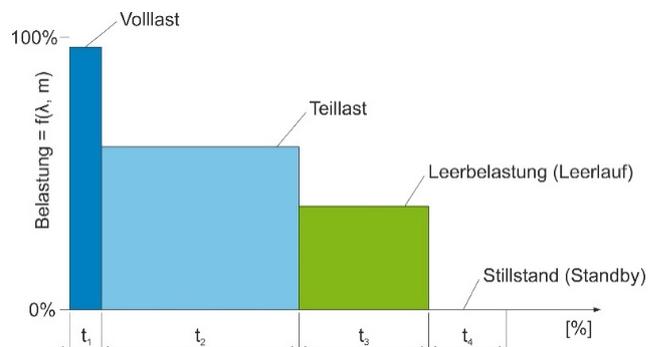


Abbildung 5. Referenzlastkollektiv

3.3 UNTERSUCHUNGEN AN ANTRIEBSSYSTEMEN

Zur Messung der Wirkungsgradkennlinien von ATS wurde am ITL ein Wirkungsgradprüfstand entwickelt (Abbildung 6) [HAF17].

Die Auswahl und Spezifikation der Komponenten von Aktorik, Sensorik, Messkette und Messauswertung erfolgte auf Basis der Anforderungen, welche wiederum aus der Anwendung im intralogistischen Leistungsbereich und der ATS-Konfiguration, bestehend aus Umrichter, Motor und Getriebe, resultieren. Konkret sind diese Anforderungen definiert von:

- Messbereiche für Ströme und Spannungen, Drehmomenten- und Drehzahlbereich,

- Messung an Frequenzumrichtern mit hohen Oberwellenanteilen
- zulässige Messunsicherheit (statisch und dynamisch)
- Bedienerunterstützung (Konfiguration, Messung und Auswertung)
- Funktionssicherheit und Sicherheit für Bedienung



Abbildung 6. Antriebsystemprüfstand mit Prüfling AT54

3.3.1 UNTERSUCHTE ANTRIEBSSYSTEME (ATS)

Um der hohen Variantenvielfalt an unterschiedlichen ATS im intralogistischen Leistungsbereich Rechnung zu tragen, decken die Spezifikationen der untersuchten ATS ein breites Spektrum ab (Tabelle 1). Untersucht wurden Asynchron- und Synchronmotoren (ASM/SM), IE-Klassen drei bis vier, variierende Nennleistungen P_N und Nenndrehmomente M_N sowie Ausführungen mit integriertem und abgesetztem Umrichter.

Tabelle 1. Spezifikationen der untersuchten ATS

ATS Nr.	IE Klasse	P_N W	M_N Nm	Motoraufbau	Umrichter
1	4	550	27	SM	integriert
2	4	840	39	SM	integriert
3	3	750	51	ASM	motornah
4	4	550	28	SM	integriert

3.3.2 ERGEBNISSE

Das in Abbildung 7 dargestellte Effizienzkennfeld ist ein exemplarisches Ergebnis der Untersuchungen (ATS3).

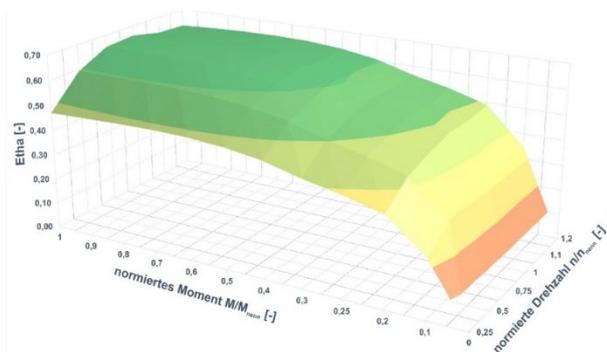


Abbildung 7. Wirkungsgradkennfeld AT53, exempl. Ergebnis

Die Gegenüberstellung des am Leistungsschild ausgewiesenen Nennwirkungsgrad η_N des Motors, mit dem gemessenen Wirkungsgrad des Gesamtsystems η_{N_ATS} bestätigt die Unzulänglichkeiten der IE-Klassifizierung für die Bewertung der Effizienz des Gesamtsystems (Tabelle 2).

Tabelle 2. Gegenüberstellung der Wirkungsgrade im Nennpunkt

ATS	IE Klasse	η_N [%]	η_{N_ATS} [%]
1	4	87,10	64,50
2	4	86,30	82,90
3	3	82,90	66,42
4	4	87,10	76,80

Die gemessenen Wirkungsgrade η_{N_ATS} zeigen Abweichungen vom Nennwirkungsgrad η_N von bis zu 22,6 Prozentpunkten.

Der Vergleich von η_{N_ATS} des AT53 (66,42%) mit AT51 (64,50%) veranschaulicht, dass der Systemwirkungsgrad eines Antriebssystems mit einem Motor der IE-Klasse 3 sogar höher ist als jener eines ATS mit einem Motor der IE Klasse 4. Die Notwendigkeit zur Messung der Wirkungsgradkennlinien des Gesamtsystems für eine Bewertung der Effizienz beim Betrieb am Fördergerät ist somit bestätigt.

3.4 UNTERSUCHUNGEN AN FÖRDERGERÄTEN



Abbildung 8. Fördertechnikkreislauf am ITL

Der Testkreislauf am Institut für Technische Logistik (ITL) wurde mit der Intension realisiert eine Vielfalt typischer KLT Fördertechniken zu kombinieren, um deren spezifische Anforderungen an die eingesetzten ATS messtechnisch untersuchen zu können. Auf einer Förderstrecke von über 30m sind Rollen-, Band- und Gliederbandförderer, Taktbänder sowie Ein- und Ausschleußer zu einem Testkreislauf kombiniert (Abbildung 8).

3.4.1 UNTERSUCHTE FÖRDERER

Die untersuchten Fördergeräte wurden als repräsentativ für die KLT Fördertechnik erachtet und sind im

Testkreislauf integriert. Die Spezifikationen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3. Spezifikationen der untersuchten Förderer

Nr.	Fördertechnik	Länge [m]
A	Bandförderer mit starrer Abstützung und Omegabandantrieb	2
B	Staurollenförderer mit Zentralriemenantrieb	6
C	Bandförderer mit teils rollender und starrer Abstützung und Omegabandantrieb	6
D	Bandförderer mit starrer Abstützung und Kopfantrieb	1

Die Versuchsdurchführung erfolgte indem der Förderer blockweise, entsprechend dem Betriebszustand im Lastkollektiv (Abbildung 5), beschickt wurde. Beim stationären Fördern in den einzelnen Betriebszuständen treten dynamische elektrische und mechanische Antriebsleistungen auf. Ursache dafür sind Effekte beim Ein- und Auslauf der einzelnen Transporteinheiten. Es erfolgt eine Mittelwertbildung über den gesamten Belastungszyklus des Betriebszustands (Abbildung 9).

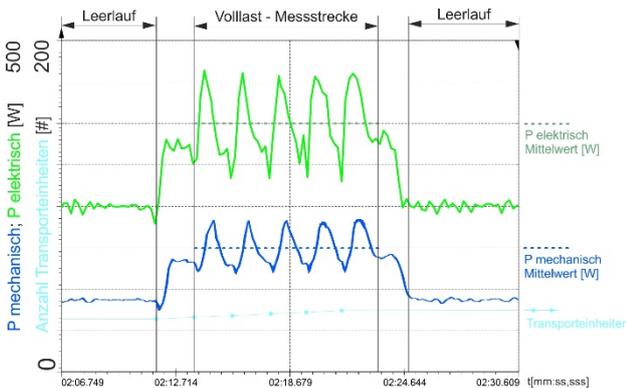


Abbildung 9. Elektrische und mechanische Leistung beim Fördern am Bandförderer 2m, exemplarisches Messergebnis

Die Auswertung und Mittelwertbildung erfolge an mindestens 20 Belastungszyklen bzw. Durchläufen.

3.4.2 ERGEBNISSE DER MESSUNGEN

Die Analysen der gemessenen Antriebsmomente zeigen, dass die benötigten Antriebsmomente eine Funktion von Fördergerät und Beladungszustand sind. Die Darstellung des Antriebsmomentes als Funktion des Beladungszustandes, an allen untersuchten Förderer, zeigt eine unterschiedliche, weitestgehend lineare Lastabhängigkeit (Abbildung 10), die als Geradengleichung ausreichend genau beschreibbar ist.

Mit zwei Messpunkten kann somit die Antriebsmomentenkennlinie des Förderers spezifiziert werden.

Mit diesem semi-analytischem Ansatz, gemeinsam mit der erforderlichen Drehzahl, kann folglich jeder resultierende Be-

triebspunkt an der Antriebswelle des ATS, vom Betriebszustand am Fördergerät, zwischen den Schranken Leerlauf und Volllast, abgebildet werden.

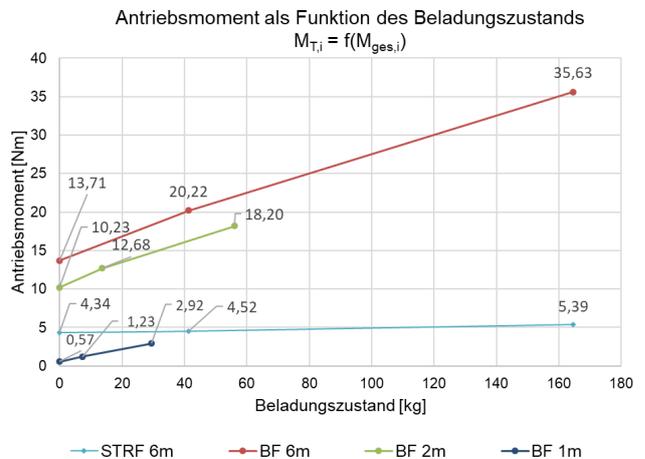


Abbildung 10. Antriebsmomentenkennlinien der untersuchten Förderer - Messergebnisse

4 OPTIMIERUNG DER ENERGIEEFFIZIENZ EE-RECHNER

Die gemeinsame Darstellung der Antriebsmomente der Förderer mit den Wirkungsgradkennlinien der ATS, veranschaulicht die Anforderungen an die optimierte ATS-Auswahl und die hohen Potenziale zur Effizienzsteigerung (Abbildung 11).

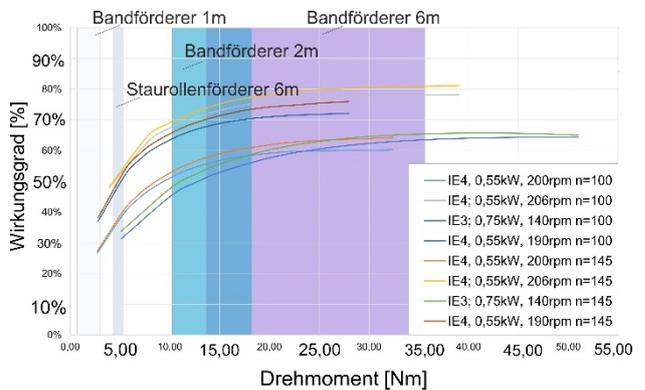


Abbildung 11. Wirkungsgradkennlinien der ATS und Antriebsmomente der Fördergeräte

Aus der Analyse der Wirkungsgradkennlinien der unterschiedlichen ATS können folgende Erkenntnisse abgeleitet bzw. bestätigt werden:

- In den Lastbereichen der Förderer weisen die Wirkungsgradkennlinien der ATS teilweise geringe Werte sowie hohe Lastabhängigkeiten auf.
- Die Lastabhängigkeiten der Wirkungsgradkennlinien sind vor allem im Teillastbereich signifikant hoch.

4.1 METHODE - ENERGIEEFFIZIENZRECHNER

Der EE-Rechner ist ein entwickeltes Softwaretool, das die EE-Bewertung und die optimierte Auswahl von ATS gezielt unterstützt. Im EE-Rechner kann das Lastkollektiv der zu optimierenden Antriebsaufgabe spezifiziert werden. In allgemeiner Form besteht diese aus Anzahl und zeitlicher Gewichtung der Lastgrade und der entsprechenden mechanischen Belastungen (Drehmoment und Drehzahl). Ergänzend werden die Antriebsmomentenkennlinien der Förderer als Funktion des Beladungszustandes integriert. Somit können die Betriebszustände des Lastkollektivs durch Spezifikation der entsprechenden Momente und deren Zeitanteile t_i gebildet werden.

Die Berechnungsmethode identifiziert die im Lastkollektiv spezifizierten, resultierenden Betriebspunkte i im Wirkungsgradkennfeld des ausgewählten ATS und berechnet über die identifizierten Wirkungsgrade η_i die elektrischen Leistungen $P_{el,i}$. Aus den zeitlich gewichteten elektrischen Leistungen in den einzelnen Lastgraden des Lastkollektivs wird die repräsentative Leistung P_{rep} (1) berechnet. Die repräsentative Leistung ist ein Maß für den Leistungsbedarf des ATS beim Erfüllen der Antriebsaufgabe im definierten Lastkollektiv.

$$P_{rep} = \sum_{i=1}^n P_{el,i} \cdot t_i + P_{el,s} \cdot t_s = \sum_{i=1}^n \frac{P_{mech,i}}{\eta_i} \cdot t_i + P_{el,s} \cdot t_s \quad (1)$$

Die Umsetzung des EEkMFS-Rechners zur optimierten ATS-Auswahl erfolgte in einer browserbasierten Anwendung.

4.2 EXEMPLARISCHE ERGEBNISSE DER OPTIMIERUNG

Zur optimierten ATS-Auswahl wurde das repräsentative Lastkollektiv, das die tatsächlichen Belastungen im MFS abbildet, mit den in Tabelle 4 dargestellten Koeffizienten spezifiziert. Die Koeffizienten sind als relative Größen definiert und beziehen sich auf den logistischen Leistungsbereich (Nennwerten) des MFS.

Tabelle 4. Spezifizierte Koeffizienten des Referenzlastkollektivs zur optimierten ATS-Auswahl

i	Betriebszustand	Zeitanteil t_i	Durchsatz λ_i	Beladung m_i	Geschwindigkeit v_i
1	Volllast	20%	90%	90%	100%
2	Teillast	50%	50%	50%	100%
3	Leerlauf	20%	0%	0%	100%
4	Stillstand (Standby)	10%	-	-	-

Bei der vergleichenden Gegenüberstellung der repräsentativen Leistung P_{rep} werden die Leistungsbedarfe der

untersuchten ATS beim Betrieb an den Fördergeräten ersichtlich. Der Vergleich von P_{rep} identifiziert das ATS 2 als das am effizientesten arbeitende ATS an allen betrachteten Fördergeräten. Im Vergleich zum derzeit eingesetzten ATS ist der Wert von P_{rep} um 35,35% bis 29,97% verringert, bezogen auf den Wert des aktuell eingesetzten ATS 0 (Tabelle 5).

Tabelle 5. Ergebnis der optimierten ATS-Auswahl

A Bandförderer mit starrer Abstützung und Omegabandantrieb - 2m				
ATS 1	ATS 2	ATS 3	ATS 4	ATS 0
229,61	176,91	250,38	188,24	268,28
B Staurollenförderer mit Zentralriemenantrieb - 6m				
ATS 1	ATS 2	ATS 3	ATS 4	ATS.0
176,67	125,04	209,77	130,95	178,57
C Bandförderer mit rollender und starrer Abstützung und Omegabandantrieb - 6m				
ATS 1	ATS 2	ATS 3	ATS 4	ATS.0
Außer Betriebsbereich ATS	266,89	346,89	Außer Betriebsbereich ATS	412,80

Die Validierung des EE-Rechners erfolgte indem der berechnete Wert der repräsentativen Leistung P_{rep} dem am Förderer im Testkreislauf messtechnisch ermittelten gegenübergestellt wird.



Abbildung 12. ATS2 beim Betrieb am Staurollenförderer 6m

Die Methode zur optimierten ATS-Auswahl wurde am Staurollenförderer 6m mit zwei unterschiedlichen Antriebssystemen validiert:

- 1.) ASM-Getriebemotor ohne Umrichter: Relative Abweichung von 1,3% P_{rep}
- 2.) SM-Getriebemotor mit integriertem Umrichter: Relative Abweichung von 4% P_{rep} . (Abbildung 12).

Die Ergebnisse der Validierung bestätigen die Methode und Umsetzung des EE-Rechners für die optimierte ATS-Auswahl.

Der validierte EE-Rechner ist zur optimierten ATS-Auswahl für jede vergleichbare Antriebsaufgabe einsetzbar und nicht auf die Anwendung in der Fördertechnik beschränkt.

5 FAZIT UND AUSBLICK

Es sind hohe Potentiale zur Steigerung der Energieeffizienz von KLT Stückgutstetigförderer durch optimierte Auswahl der Antriebssysteme (ATS) vorhanden.

Mit der neuen Methode des EE-Rechners wurde eine validierte Vorgehensweise zur Erschließung dieser ATS-Effizienzpotentiale vorgestellt. Es wurden Steigerungen bis zu 35% beim Betrieb in einem repräsentativen Lastkollektiv messtechnisch nachgewiesen.

Es wurde eine validierte Grundlage für ein semi-analytisches Modell zur Bestimmung der vorhandenen, für die Bewertung notwendigen, Lastkennlinien am ATS der KLT Stückgutstetigförderer erarbeitet und validiert.

Es wurde eine Kennzahl in Form der repräsentativen Leistung P_{rep} zur Bewertung der Effizienz von ATS beim Betrieb am Fördergerät entwickelt und validiert. Diese erfüllt im Kontext der Ökodesignrichtlinie [EU18] die Anforderungen zur Bewertung der Effizienz des „Erweiterten Produkts“ (Fördergerät) und berücksichtigt die realen Betriebsszenarien.

Ausblick:

- Die Anwendung des EE-Rechners zur zuverlässigen Effizienzbewertung bzw. optimierten ATS-Auswahl und Dimensionierung soll auch für weitere Materialflusssysteme (MFS) erfolgen, z.B. für RBG-Antriebe.
- Die hohe Lastabhängigkeit der ATS-Wirkungsgradkennfelder erfordert, für eine zuverlässige EE-Beurteilung eines MFS, eine genaue Beurteilung der Lastmaschine und des Antriebsstrangs. Die Ansätze der Normenreihe IEC 61800 erscheinen nicht geeignet belastbare EE-Beurteilungen bzw. –Nachweise vorzunehmen. In einem nächsten Schritt sollen diese Einschränkungen der Normanwendung qualitativ und quantitativ beurteilt werden. Ergänzend soll ein Semi-analytischer Ansatz für die mechanische Struktur von KLT-Stückgutstetigförderern erarbeitet werden, der die zuverlässige EE-Beurteilungen ermöglicht und im Hinblick auf den Anwendungsaufwand industrietauglich ist.

Wir stehen für Rückmeldungen, Diskussionen, Anregungen und gemeinsame weitere Vorhaben gerne zur Verfügung.

6 DANKSAGUNG

Die vorgestellten Inhalte wurden im Rahmen eines Arbeitspakets des Forschungsprojektes „Energieeffizienz komplexer Materialflusssysteme“ (EEKMFS,) erarbeitet. Das Projekt wurde von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft FFG im Rahmen des „Bridge 1“ Programms gefördert (Projektnummer: 848452). Die drei

Industriepartner waren SSI Schäfer Automation GmbH, SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG und Anton Paar GmbH.

7 LITERATUR

- [EU18] Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. Neufassung.
- [HAF17] Hafner, N.; Stöhr, T.: Antriebssystemprüfstand zur energieeffizienzoptimierten Antriebssystemauswahl. In: Tagungsband der 5. Tagung Innovation Messtechnik, 11. Mai 2017.
- [LOT16] Lottersberger, F.: Beitrag zu einer energieeffizienten Materialflusstechnik. Grundlagen zur Ermittlung, zum Vergleich und zur Steigerung der Energieeffizienz. Dissertation, Graz, 2016.
- [NOR15] ÖVE/ÖNORM EN 60034-30-1: Drehende elektrische Maschinen. Wirkungsgrad-Klassifizierung von netzgespeisten Drehstrommotoren (IE-Code), Wien, 2015.
- [NOR18-1] OVE EN 61800-9-1: Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe - Allgemeine Anforderungen für die Erstellung von Normen zur Energieeffizienz von Ausrüstungen mit Elektroantrieb nach dem erweiterten Produktansatz (EPA) und semi-analytischen Modellen (SAM), Wien, 2018.
- [NOR18-2] OVE EN 61800-9-2: Drehzahlveränderbare elektrische Antriebe - Indikatoren für die Energieeffizienz von Antriebssystemen und Motorstartern, Wien, 2018.
- [SSI18] SSI Schäfer: Case Studies nach Sektoren. <https://www.ssi-schaefer.com/de-at/branchen/retail-wholesale/case-study-knv-47306>, 08.03.2018.

Dipl.-Ing. Thomas Stöhr, Universitäts-Projektassistent am Institut für Technische Logistik.

Tel: +43 316 873 7824; E-Mail: thomas.stoehr@tugraz.at

Ass.Prof. DI Dr.techn. Norbert Hafner, stellv. Institutsleiter Institut für Technische Logistik

Tel: +43 316 873 7329; E-Mail: norbert.hafner@tugraz.at

Adresse: Institut für Technische Logistik, Technische Universität Graz, Inffeldgasse 25e, 8010 Graz, Österreich