XIV.

15. Fachtagung Schüttgutfördertechnik 2010

Aktuelle Fragestellungen und Lösungen

Vergleich verschiedener Schiffsentladesysteme bezüglich ihres spezifischen Energiebedarfs

C. Tilke, S. Rakitsch, R. Mutschler, W. Günthner

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. W.A. Günthner

fml -Lehrstuhl für
Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München
Boltzmannstraße 15
85748 Garching

Dr.-Ing. R. Mutschler

FLSmidth KOCH MVT GmbH
Karl-Koch-Straße 1
66787 Wadgassen

Vergleich verschiedener Schiffsentladesysteme bezüglich ihres spezifischen Energiebedarfs

Die weltweite Diskussion bezüglich Kohlendioxidemissionen als Ursache für die globale Erwärmung, die wirtschaftlich schwierige Situation vieler Hafen-Umschlagsbetriebe aufgrund abnehmender Umschlagsmenge sowie die hohen Energiepreise waren die Beweggründe für die FLSmidth KOCH MVT GmbH gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml), Technische Universität München, eine Studie zum Thema spezifischer Energieverbrauch verschiedener Schiffsentladereinrichtungen für Schüttgüter, insbesondere Kohle, zu initiieren.

1 Die Bedeutung von Hartkohle als Primärenergieträger

Wie Abb. 1 zeigt, ist Hartkohle heute der zweitwichtigste Primärenergieträger nach Rohöl. Glaubt man internationalen Experten, so wird die Nachfrage an Hartkohle in den nächsten 20 Jahren deutlich schneller wachsen als die Rohölnachfrage. Der ansteigende Bedarf führt dazu, dass sich der Verbrauch im gleichen Zeitraum nahezu verdoppelt.

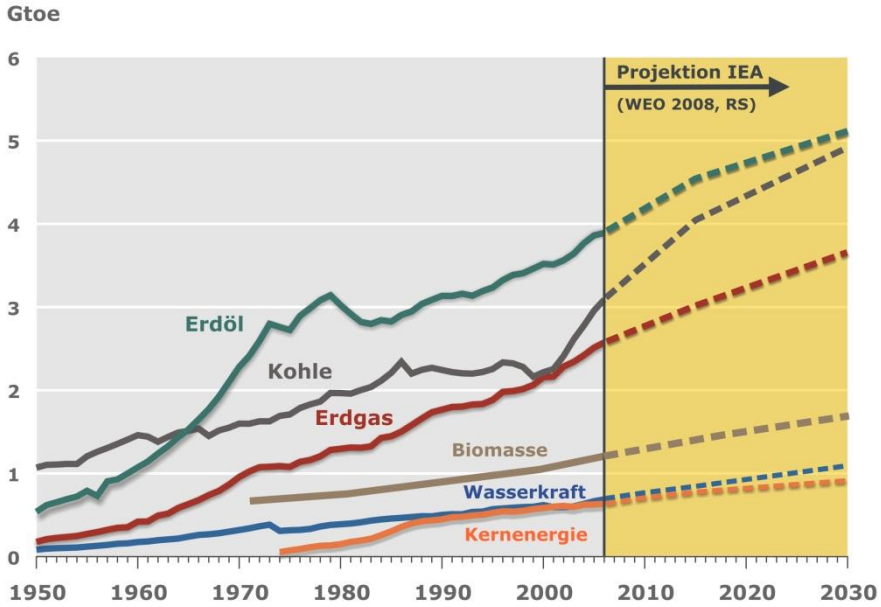

Abb. 1: Entwicklung des Primärenergieverbrauches weltweit (kumuliert) und Hochrechnung der IEA bis 2030 (Quellen: BP und [1])

Die wirtschaftliche Leistung der weltweiten Stahl- und Energieindustrie ist zu einem sehr hohen Grad von der Förderung und dem Import von Rohstoffen wie Hartkohle oder Eisenerz abhängig.

Betrachtet man beispielsweise Europa, so hat insbesondere Deutschland einen erheblichen Bedarf an Hartkohle für die Stahlherstellung und die Stromerzeugung. Da der Abbau von Steinkohle im Untertagebau aufgrund der hohen Kosten und der niedrigen Weltmarktpreise überall in Europa unrentabel geworden ist, wurden viele lokale Kohlebergwerke stillgelegt. Und mit hoher Wahrscheinlichkeit werden auch die wenigen deutschen

Bergwerke, die dank staatlicher Unterstützung immer noch betrieben werden, mit Auslauf der Subventionen 2018 schließen.

Da die Nachfrage in Europa nach Kohle in den letzten Jahren allerdings nicht deutlich gesunken ist, ist die Europäische Union (EU) dringend auf Importe aus kohlefördernden Ländern angewiesen. Abb. 2 zeigt diesen Zusammenhang am Beispiel fossiler Energieträger in Deutschland.

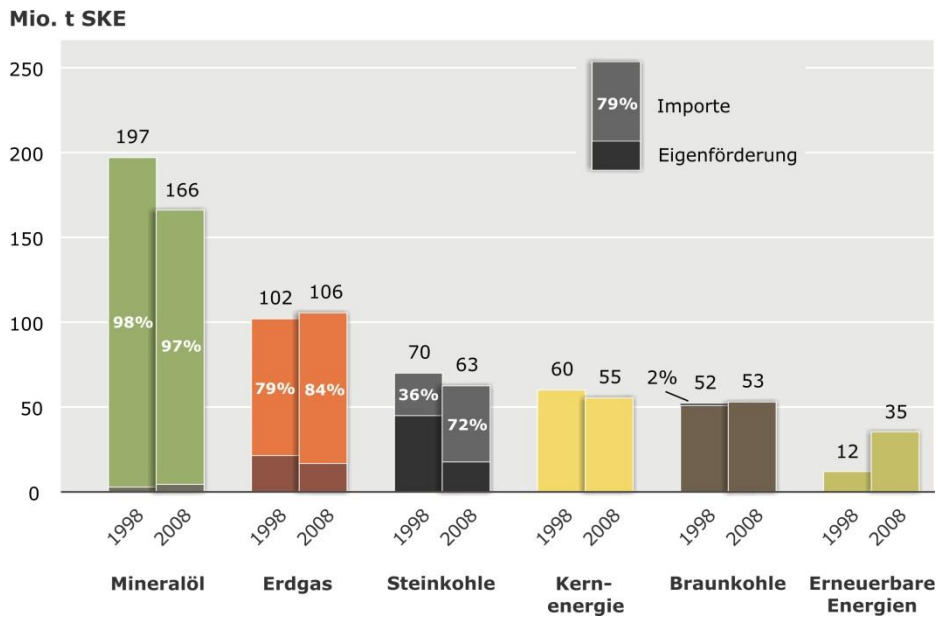

Abb. 2: Energieverbrauch und Importe in Deutschland in 1998 und 2008 [3] (Quellen: AGEB 2009, BGR Datenbank)

Globale Ressourcen, Reserven und Förderung

Vergleicht man die weltweite Versorgung mit Energieträgern, so zeigt sich, dass Hartkohle die größten Ressourcen und Reserven besitzt. Betrachtet man den Verbrauch im Jahr 2008, so war Kohle der zweitwichtigste Primärenergieträger nach Öl, welches 29% des Bedarfs deckte (Hartkohle: 27%, Braunkohle 2%). In der Stromerzeugung jedoch war Hartkohle mit 41% die wichtigste Energiequelle [2]. Die weltweite Kohleförderung betrug 2008 etwa 6.799 Mt. Dabei hatte Hartkohle den größten Anteil (5.733 Mt., 85%); der restliche Anteil war Braunkohle (1.025 Mt., 15%).

Da jede Wirtschaftsnation versucht, die Sicherheit ihrer Energieversorgung zu erhöhen, stellen sich die folgenden Fragen:

- Werden die wichtigsten, nicht erneuerbaren Energieträger in der Lage sein, die wachsende weltweite Nachfrage zu decken?
- Welche werden auf lange Sicht gesehen die zuverlässigsten sein?

Die Antwort gibt Abb. 3, darin wird der kumulierte Verbrauch über die nächsten 20 Jahre mit den derzeit bekannten Ressourcen und Reserven verglichen.

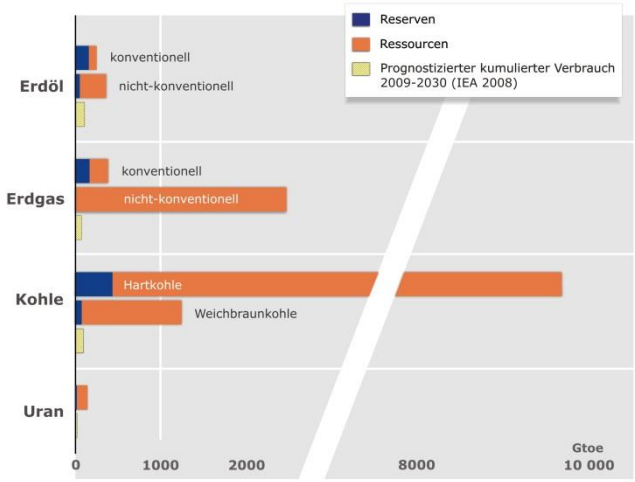

Abb. 3: Weltweite Angebotssituation fossiler Energierohstoffe 2008. [3]

Abb. 4 zeigt den gleichen Zusammenhang noch detaillierter. Daraus geht hervor, dass es im Vergleich zu herkömmlichem Öl, gigantische Hartkohlevorkommen gibt, mit denen man die Menschheit weitere 1.000 Jahre mit erschwinglicher Energie versorgen kann.

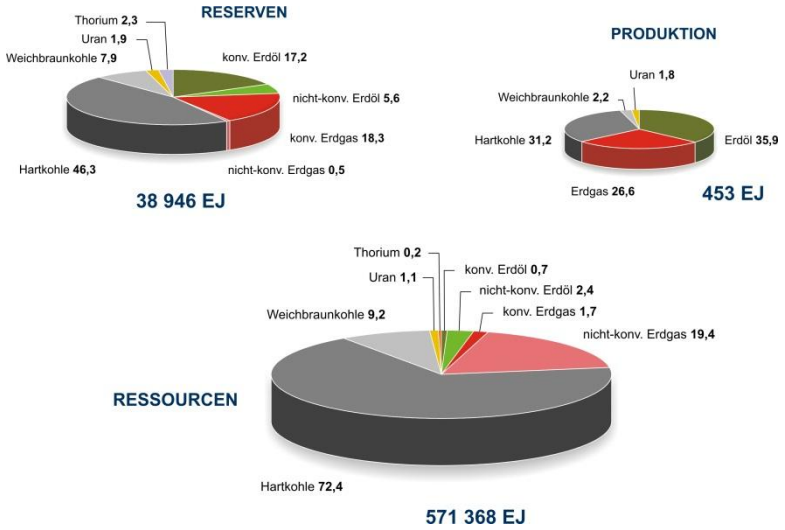

Abb. 4: Jährliche Förderung, Reserven und Ressourcen der nicht-erneuerbaren Energierohstoffe Ende 2008 [3] (Angegeben in Prozent)

Die regionale Verteilung von Reserven, Ressourcen und die geschätzte, kumulierte Hartkohleförderung seit 1950 zeigt Abb. 5. In Nordamerika gibt es die größten verbleibenden Hartkohlevorkommen, gefolgt von Austral-Asien und den Ländern der früheren Sowjetunion. Betrachtet man einzelne Länder, besitzt die USA die größten Vorkommen (32% der globalen Vorkommen), gefolgt von China (25%), Indien (11%), Russland (10%), Australien (5%) und der Ukraine (4%).

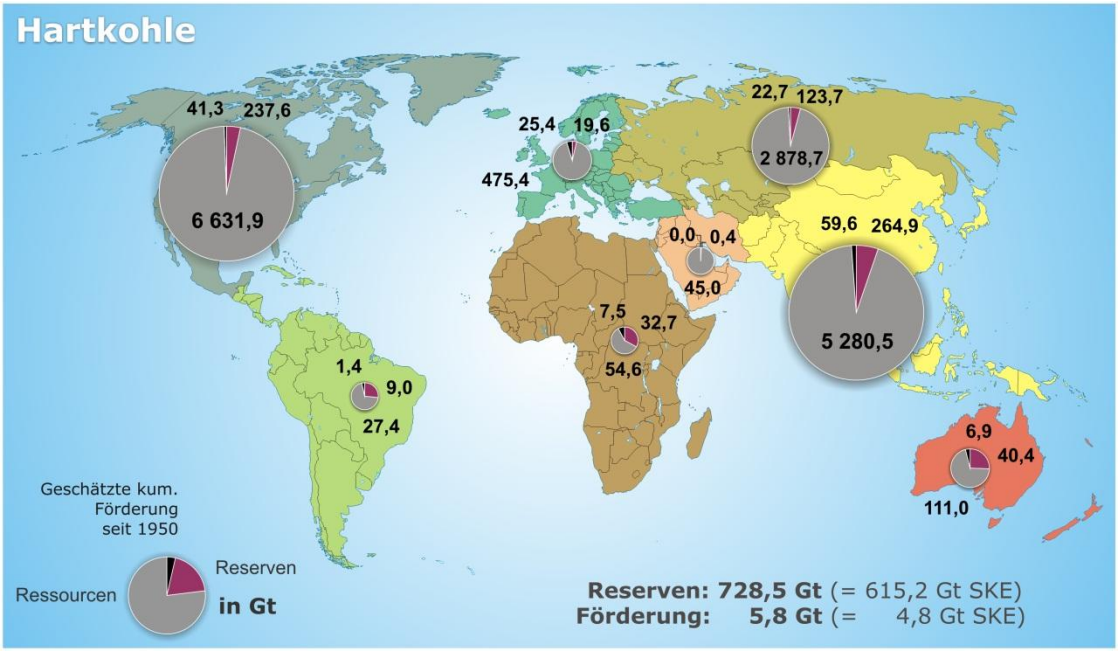

Abb. 5: Gesamtpotenzial Hartkohle 2008: Regionale Verteilung. [3]

Handelsverhältnis: Import und Export

Die drei größten Hartkohlefördernationen im Jahr 2008 waren China (45,8% der weltweiten Förderung), gefolgt von den USA (17,2%) und Indien (8,5%). Während Indien und China ihre Förderung um 7% gesteigert haben, betrug das Wachstum in den Vereinigten Staaten lediglich 3%.

Insgesamt 930 Mt. Hartkohle wurden international gehandelt, was etwa 16% der weltweiten Förderung entspricht. Wiederum ca. 839 Mt. (90%) davon auf dem Seeweg[2].

Mit 259,8 Mt. (28%) dominiert Australien den Exportmarkt, gefolgt von Indonesien mit 202,6 Mt. (21,8%) und Russland mit 97,9 Mt. (10,5%).

Die drei größten Kohleimporteure waren Japan, Südkorea und Taiwan. Diese drei Länder importierten zusammen 351,7 Mt. (37,8%); Indien folgte mit 59,8 Mt. (6,4%), anschließend Deutschland (44 Mt. / 4,7%), Großbritannien (43,9 Mt. / 4,7%) und China (40,8 Mt. / 4,4%).

Aspekte der Verfügbarkeit und des Umweltschutzes

Verglichen mit anderen nichterneuerbaren Ressourcen hat Kohle die größte geologische Verfügbarkeit. Zudem sind die Vorkommen nicht auf bestimmte Regionen konzentriert und die Gewinnung ist somit unter vielen Ländern und Betrieben aufgeteilt, wodurch auch für die nächsten Jahrzehnte eine günstige Versorgung sichergestellt sein dürfte. Dies dürfte der Grund sein, weshalb das in Abb. 1 gezeigte Szenario mit hoher Wahrscheinlichkeit eintritt und die weltweite Nachfrage nach Kohle weiter wachsen wird. Insbesondere auf den asiatischen Märkten.

Unter dem Aspekt der stetig steigenden Nachfrage werden die Emissionen des fossilen Verbrennungsprozesses heute allerdings sehr kontrovers diskutiert. Zwar verfügen mittlerweile viele industrielle Anlagen wie Kohlekraftwerke und Stahlhütten über moderne

Filtertechniken, um die Rauchgase von schädlichen Verbrennungsrückständen wie z.B. Schwefeldioxid oder Asche zu reinigen. Moderne Anlagen verringern somit schädliche Emissionen und steigern gleichzeitig die Energieeffizienz. Dennoch bleibt das Problem bestehen, dass die Emission des Treibhausgases CO_2 bisher nicht verringert werden kann und bedauerlicherweise ist nun gerade die Kohle derjenige fossile Energieträger mit den höchsten spezifischen CO_2-Emissionen.

Zwar gibt es Versuchsanlagen, welche Kohlendioxid aus den Rauchgasen abtrennen und verflüssigen können, allerdings geht dieser Prozess einerseits mit Einbußen in der Effizienz einher und andererseits ist die Suche nach einer angemessenen Endlagerstätte schwierig und stößt auf erheblichen Widerstand bei betroffenen Anwohnern. Ein weiteres Problem bezüglich der Stromerzeugung ist die mangelnde Flexibilität von Kohlekraftwerken. Für die Zukunft fordern Forscher und Ingenieure intelligente Netze, welche aus vielen verschiedenen Erzeugern und Verbrauchern bestehen, die sich gegenseitig nach ihren Bedürfnissen versorgen. Daher ist es notwendig, dass die großen Erzeuger (z.B. Kohlekraftwerke) in den Stromnetzen flexibel sind und ihre Leistung reduzieren, bzw. sogar abschalten können, wenn beispielsweise starker Wind zu hohen Energieerträgen aus Windkraftanlagen führt oder an Hochsommertagen Solarstrom im Überfluss zur Verfügung steht.

Die genannten Umstände könnten in den nächsten Jahren zumindest in Europa zu einer geringeren Kohlenachfrage für die Stromerzeugung führen, als in Abb. 1 vorhergesagt. Dennoch ist es gegenwärtig nur schwer vorstellbar, wie zukünftig der weltweite Energiebedarf ohne die Kohle gedeckt werden kann.

2 Forschungsprojekt

Vor dem Hintergrund steigender Energiekosten und einem wachsenden ökologischen Interesse, gewinnt der Aspekt des spezifischen Energiebedarfs von Schiffsentladeanlagen zunehmend an Bedeutung.

Da der Abbau europäischer Kohle in den letzten Jahren stark rückläufig war, der Verbrauch der Industrie aber im gleichen Zeitraum mehr oder weniger stagnierte und es zahlreiche Planungen für neue Kohlekraftwerke gibt, ist die Umschlagsmenge von Importkohle in den letzten Jahrzehnten stark angestiegen. Durch einen Vergleich des Energiebedarfs unterschiedlicher Entladesysteme können Hafenbetreiber den Aspekt der Energieeffizienz im Rahmen von Neuinvestitionen und der Modernisierung von Anlagen besser berücksichtigen.

Typische Entladesysteme für Massengüter

Zum Umschlag von Massengütern wie Eisenerz oder Kohle gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Verfahren: Die kontinuierlichen und die unstetigen, greiferbasierten Entladesysteme. Abb. 6 ordnet die verschiedenen Bauarten der Schiffsentlader nach dem zugrunde liegenden Verfahren.

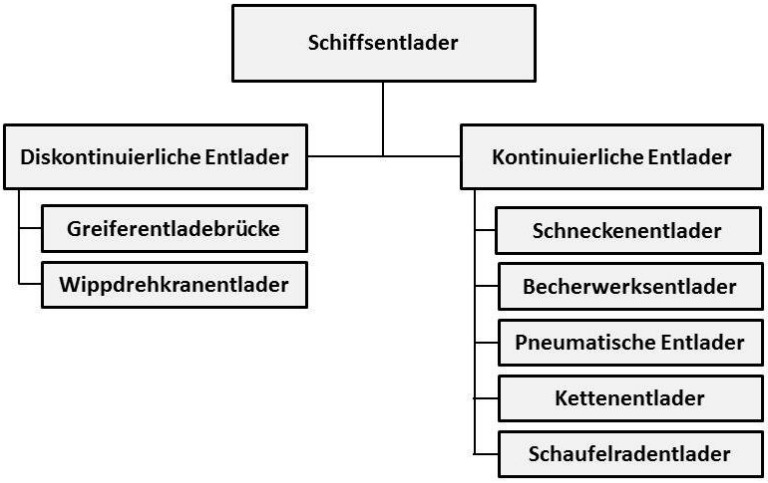

Abb. 6: Klassifikation verschiedener Schiffsentladersysteme für Massengüter

Für das Massengut Kohle werden üblicherweise die folgenden Entladesysteme in größeren Hafenumschlagsanlagen eingesetzt:

- Greiferentlader
- Schneckenentlader
- Becherwerksentlader

Abb. 7: Greiferentlader, Vertikalschneckenentlader und Becherwerksentlader zum Entladen von Kohle aus Hochseeschiffen

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Bauart der Entladesysteme ergeben sich verschiedene Vor- und Nachteile. Vor der Investition in ein neues Entladesystem müssen deshalb neben dessen spezifischen Energiebedarf, viele weitere Aspekte berücksichtigt werden.

Messtechnik

Das Ziel des Forschungsprojektes war es, den spezifischen Energieverbrauch verschiedener Schiffsentladesysteme zu ermitteln. Viele Systeme haben einen Stromzähler und eine Bandwaage eingebaut, um die nötigen Werte zu messen. Um den Verbrauch einzelner Antriebseinheiten zu messen sind jedoch tragbare Leistungsmessgeräte nötig.

Es gibt zwei verschiedene Messmethoden, um die Leistung in Gleich- und Wechselstromsystemen zu messen:

Die Drei-Wattmeter-Methode:

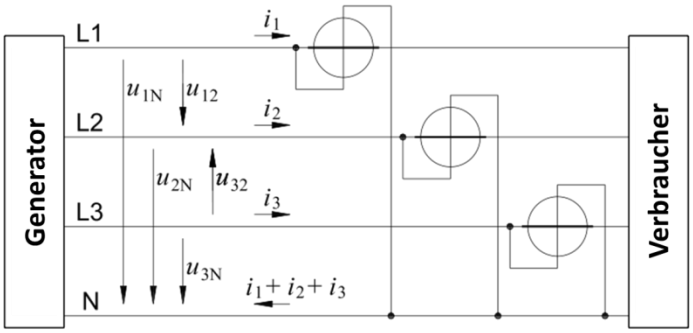

Abb. 8: Die Drei-Wattmeter-Methode zur Leistungs- und Verbrauchsmessung in. [4]

Mit der Drei-Wattmeter-Methode ist es relativ einfach, die verbrauchte Leistung genau zu ermitteln, da man, wie in Abb. 8 ersichtlich, die tatsächliche Leistung in jeder einzelnen Phase misst. Man erhält sofort den Gesamtverbrauch des Systems, indem man die Werte der einzelnen Messgeräte addiert. Um den gesamten Stromverbrauch zu berechnen, muss man die gemittelten Messwerte je Messintervall über die Messdauer summieren, wie in den folgenden Formeln gezeigt [4]:

$$p(t) = u_{1N} \cdot i_1 + u_{2N} \cdot i_2 + u_{3N} \cdot i_3 \tag{1}$$

$$W = \int p(t)dt, \tag{2}$$

Die Ein-Wattmeter-Methode (einphasig):

In dreiphasigen Systemen erhält man mit der Ein-Wattmeter-Methode nur dann korrekte Ergebnisse, wenn die Phasen gleichmäßig belastet sind, wie es beispielsweise bei Antriebsmaschinen der Fall ist. Zudem ist es wichtig, den Leistungsfaktor cos φ zu wissen bzw. zu bestimmen, da die Leistung nach folgender Formel berechnet wird:

$$p(t) = 3 \cdot u_1 \cdot i_1 \cdot \cos\varphi \tag{3}$$

Moderne Messgeräte kombinieren die beiden beschriebenen Methoden in einem einzigen Gerät und sind zudem für Messungen in Gleich- und Wechselstromsystemen geeignet.

Abb. 9: Leistungsmessgeräte zur Messung des Verbrauchs der Antriebsmotoren und des Gesamtsystems

Wie in Abb. 9 gezeigt, wurden in diesem Forschungsprojekt zwei verschiedene Arten von Leistungsmessgeräten verwendet. Rechts sieht man einen Fluke 1735 Power Logger, der zur Messung mittels Drei-Wattmeter-Methode eingesetzt werden kann. Im linken Bild sieht man einen LEM Analyst 2060, welcher für die Messung per Ein-Wattmeter-Methode geeignet ist. Beide Energiemessgeräte haben einen Datenspeicher, sodass Messwerte über einen gewissen Zeitraum aufgezeichnet werden können.

Messungen von Entladesystemen

Das folgende Beispiel anhand einer Greiferentladebrücke zeigt die typische Untersuchung von Entladesystemen, insbesondere welche Werte gemessen werden können und welche Schlüsse man daraus ziehen kann.

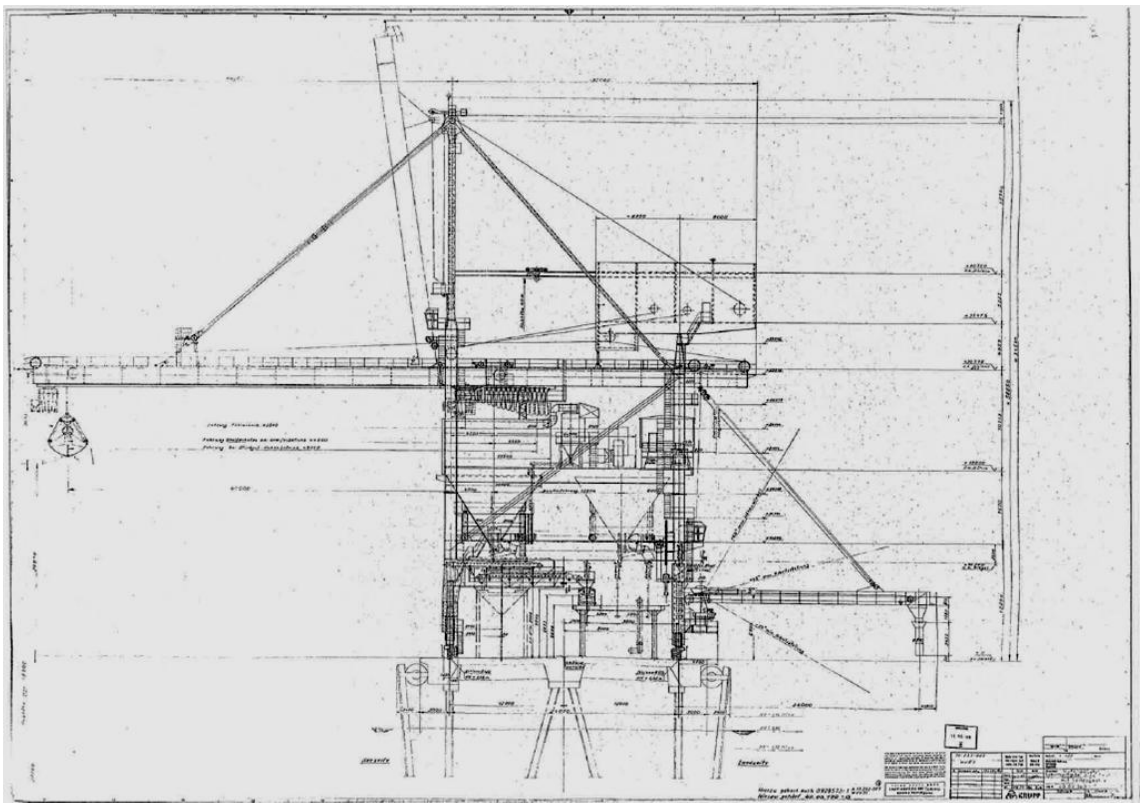

Abb. 10: Technische Zeichnung einer Entladebrücke

Abb. 10 zeigt eine technische Zeichnung des betrachteten Kranes. Die Zeichnung entspricht einem typischen Aufbau einer Greiferentladebrücke mit kabelgeführtem Katzfahrwerk. Die Hauptantriebe für Schließ- und Haltewerk sowie Katzfahrwerk sind Gleichstrommotoren. Die beiden Antriebe des Hubwerkes haben eine verfügbare Leistung von 490 kW und der Katzfahrwerksantrieb stellt eine Leistung von 250 kW zur Verfügung. Neben diesen Hauptantrieben gibt es die üblichen Nebenverbraucher wie z.B. Fahrwerksmotoren, Auslegerkippvorrichtung, Beleuchtung etc. Die folgende Tabelle (Abb. 11) zeigt die technischen Daten des Entladekranes.

Hersteller	Krupp
Baujahr	1979
Max. Hakengewicht	35 t
Greifergewicht	12 t (19 m³)
Hubhöhe über Pier	ca. 20 m
Horizont. Fahrweg	ca. 25 m
Förderleistung max.	ca. 1.200 t/h
Förderleistung eff.	ca. 1.000 t/h
Install. Nennleistung	ca. 1,7 MW
Schüttgüter	Kraftwerkskohle
Personaleinsatz	2+2
Eigengewicht	ca. 1.000 t

Abb. 11: Technische Daten der Entladebrücke.

Ergebnisse der Messungen

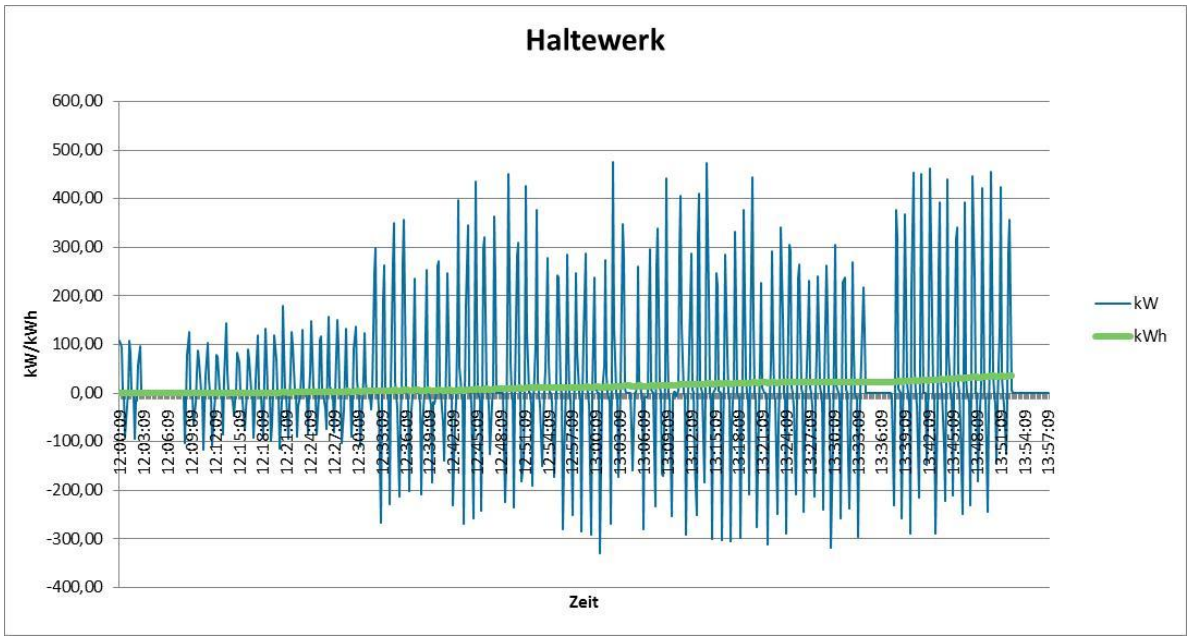

Abb. 12: Leistungs- und Verbrauchsdiagramm des Haltewerks.

Abb. 12 zeigt ein Diagramm mit den Messergebnissen zu Arbeit und Leistung des Haltewerks. Man kann leicht die verschiedenen Phasen des Entladeprozesses erkennen: beispielsweise ist zwischen 12 und 12:30 Uhr die benötigte Leistung geringer, da der Kran bei der Restentleerung einer Luke den Greifer nur halb gefüllt hatte. Anschließend wechselte er die Luke und man erkennt, dass die Leistungsspitzen auf das Maximum der Antriebsleistung steigen. In der kurzen Pause um 13:35 Uhr wechselte der Kranführer.

Die negativen Werte entstehen beim Senken des leeren Greifers in die Luke, wenn der Antrieb als dynamische Bremse wirkt. Da kein Rückspeisesystem installiert ist, wird die entstehende Energie in Widerständen vernichtet.

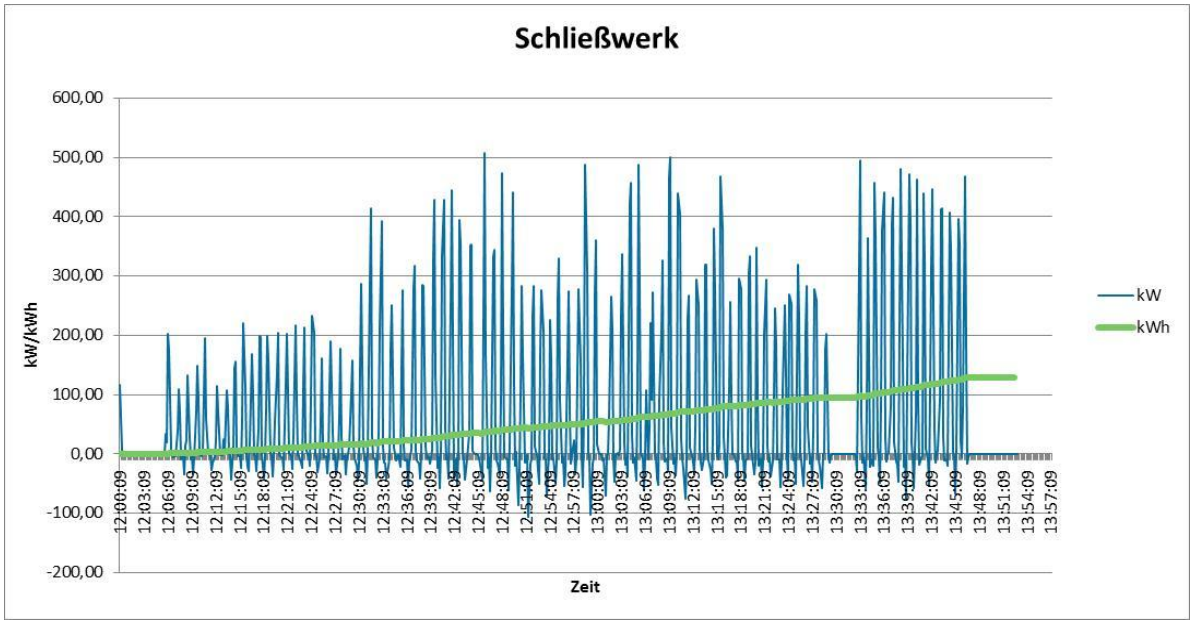

Abb. 13: Leistungs- und Verbrauchsdiagramms des Schließwerks.

Abb. 13 zeigt das Arbeits- und Leistungsdiagramm des Schließwerkes. Wenn man dieses Diagramm mit Abb. 12 vergleicht, so kann man die gleichen Entladephasen erkennen. Der Unterschied ist, dass die Leistungsspitzen geringfügig höher sind, da die Kraft auf das Schließwerk höher als beim Haltewerk sein muss, um den Greifer geschlossen zu halten. Zudem sind die negativen Werte deutlich kleiner, da der Greifer geöffnet abgesenkt wird.

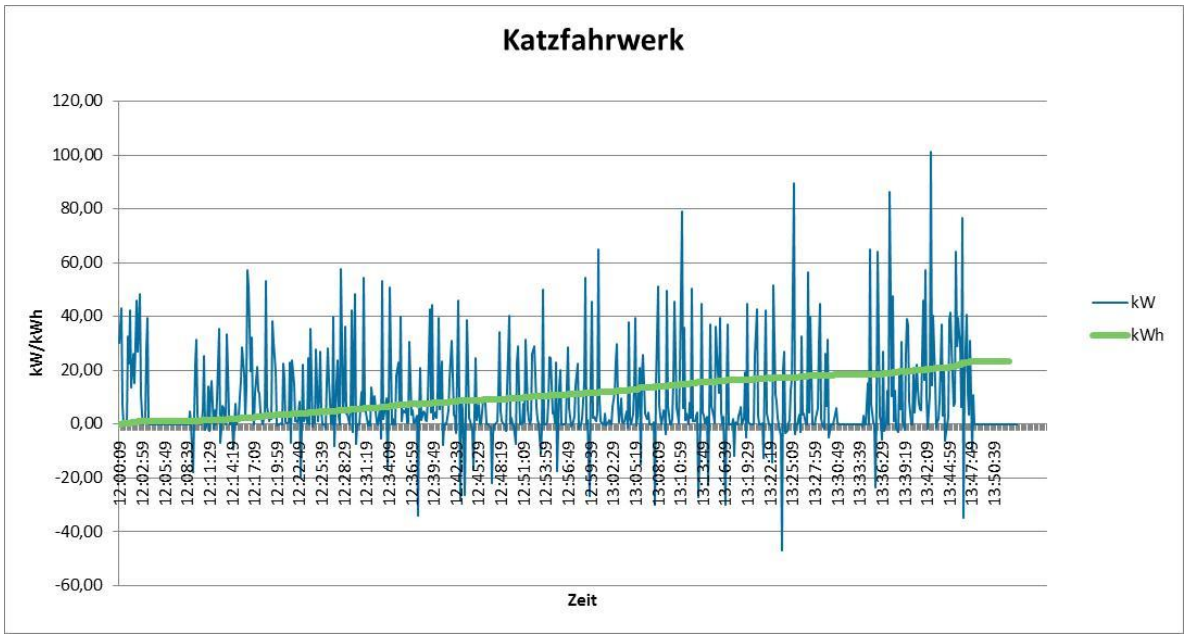

Abb. 14: Leistungs- und Verbrauchsdiagramm des Katzfahrwerkes

Abb. 14 zeigt das Leistungs- und Arbeitsdiagramm des Katzfahrwerks. Die Leistungsspitzen sind weitestgehend unabhängig von der Entladephase, da die horizontale Bewegung im Allgemeinen die gleiche ist. Lediglich nach einem Kranführerwechsel um 13:35 Uhr sind die Ausschläge leicht erhöht.

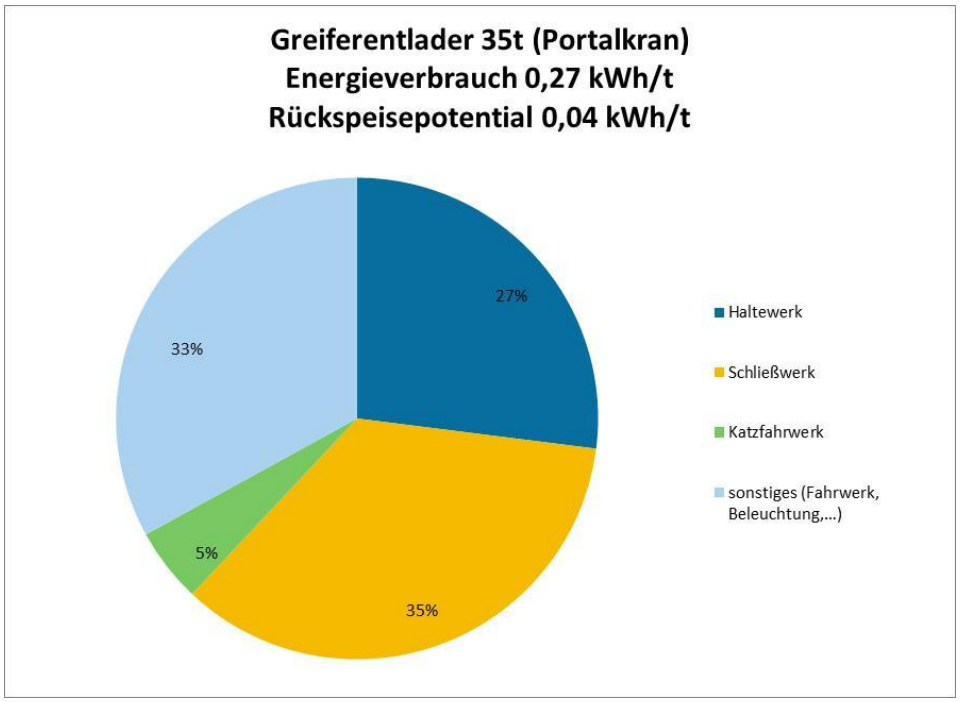

Abb. 15: Aufteilung des Energieverbrauches der Greiferentladebrücke

Abb. 15 zeigt das Ergebnis der Energieverbrauchsuntersuchung des Kranes. Der spezifische Energieverbrauch ist mit 0,27 kWh/t relativ gering und könnte weiter gesenkt werden, wenn der Betreiber in ein Energierückspeisesystem investieren würde. Das Rückspeisepotential durch generatives Bremsen beträgt 0,04 kWh/h. Der Anteil des Schließwerkes ist wie erwartet deutlich höher als der des Haltewerks, was am Nachgreifen der Kohle und der höheren, nötigen Seilkraft liegt, die zum geschlossen Halten des Greifers benötigt wird. Der Anteil anderer Verbraucher ist mit über 30% recht hoch. Der Grund hierfür ist die große Anzahl weiterer Verbraucher, beispielsweise ein Förderband zum seitlichen Abtransport der Kohle vom Kran.

3 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

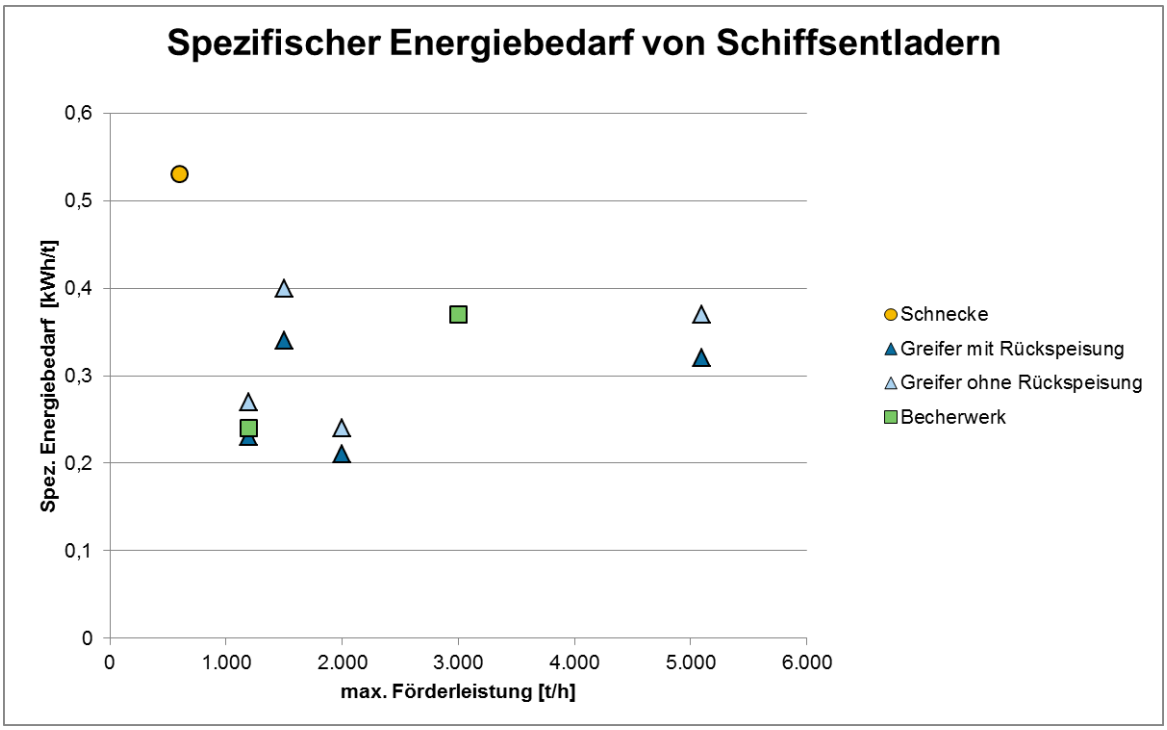

Abb. 16: Vergleich des spezifischen Energieverbrauchs aller gemessenen Schiffsentlader

Abb. 16 zeigt einen Vergleich des spezifischen Energieverbrauches aller im Rahmen dieser Studie untersuchten Schiffsentlader in Abhängigkeit ihrer Nennkapazität.

Als erstes Ergebnis kann festgestellt werden, dass der spezifische Energiebedarf aller gemessenen Greiferentlader zwischen 0,2 bis 0,4 kWh/t liegt. Aufgrund der energieintensiven Transportmethode hat der einzige Schneckenentlader in dieser Untersuchung den höchsten spezifischen Energieverbrauch. Dazwischen liegen die Becherwerksentlader. Dieses Ergebnis überrascht, da Becherwerke als sehr effiziente Fördergeräte gelten.

Insgesamt muss gesagt werden, dass sehr viele Faktoren einen Einfluss auf die Bewertung der Eignung eines Entladesystemes ausüben. Beispielsweise steigen mit der Kapazität des Entladers die Kosten für die Stromversorgung und dessen Gesamtgewicht, was wiederum zu höheren Baukosten des Anlegers führt. Dennoch lohnt es sich, den Energieverbrauch der Geräte stärker zu berücksichtigen, insbesondere wenn der Energieverbrauch nicht nur von finanziellem, sondern auch von ökologischem Interesse ist.

Bisher enthält die Übersicht erst eine geringe Zahl gemessener Anlagen, jedoch ist für die Zukunft geplant, weitere Anlagen zu untersuchen und in eine Datenbank aufzunehmen, sodass die Aussagekraft des Vergleichs weiter erhöht werden kann.

4 Quellenverzeichnis

[1] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY:
World Energy Outlook 2008
Paris 2008

[2] VEREIN DER KOHLENIMPORTEURE:
Jahresbericht 2009 – Fakten und Trend
2008/2009. - 107 S.; Hamburg.

[3] BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, DEUTSCHLAND
Jahresbericht 2009:Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen
Hannover 2009
Download:
http://www.bgr.bund.de/cln_144/nn_335082/EN/Themen/Energie/Downloads

[4] HERING E.; GUTEKUNST J.:
Elektrotechnik für Maschinenbauer
Springer, Berlin 1999