

# Beitrag zu Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit von Kranen für den Binnenschiffs-/ Feederumschlag

Klaus-Peter Franke

Fakultät für Produktionstechnik und Produktionswirtschaft  
Hochschule Ulm

**G**rundlage für die Wirtschaftlichkeit internationaler Wertschöpfungsketten ist die Effizienz multimodaler Transportketten. Der Transport von Material und Produkten erfolgt entlang der Kanten von Transportnetzwerken, wobei der Spediteur bestrebt ist, die Effizienz des Transports durch die Nutzung von Skaleneffekte entlang Teilstrecken zu maximieren. Die Knoten der Netzwerke sind Mittel zum Zweck, um die Güter zwischen Transportmitteln „umsteigen“ zu lassen. Waren zunächst rein ökonomische Kriterien Treiber für den Wechsel des Transportmittels, gewinnen zunehmend ökologische Anforderungen an Relevanz: Die Transportketten sollen nicht nur wirtschaftlich darstellbar sein, sondern vernünftigerweise auch noch über einen möglichst „grünen Fußabdruck“ verfügen. Gegenstand der folgenden Betrachtungen sind in diesem Zusammenhang die Umschlagprozesse in den Knoten des Transportnetzwerks, speziell in Feeder- und Binnenschiffterminals. Es sollen Antworten gegeben werden auf die Fragen, inwieweit die Wahl des Primäranstriebs von Kranen Einfluss auf Energieverbrauch und Umweltfreundlichkeit des Güterumschlags hat und welchen Zusatznutzen in diesem Zusammenhang die Rekuperation eingepprägter Energien während des Umschlagprozesses bringt.

[Schlüsselwörter: Hafenumschlag, Krane, Energieeffizienz, CO<sub>2</sub>-Emissionen]

## 1 ZUM STAND DER ANTRIEBSTECHNIK VON HAFENKRANEN

### 1.1 KRANE FÜR DEN UMSCHLAG IN SEE- UND BINNENWASSERHÄFEN

Hafenkrane unterscheiden sich hinsichtlich Funktionalität, Tragwerkskonfiguration sowie technischen Komponenten der Energiebereitstellung und Leistungsübertragung.

Insofern es sich nicht um ein hoch spezialisiertes Terminal für den Containerumschlag handelt (vergl. /1/, S. 53), sind in vielen Häfen dieser Welt Drehkrane in Portalbauweise die erste Wahl. Der Grund: flexible und vielfältige Einsetzbarkeit! Mit diesen Kranen können Massengut, klassisches Stückgut und Container umgeschlagen werden. Es gibt sie für alle üblichen Ausladungen und Nutzlasten. Der um die Hochachse drehbare Oberwagen mit Ausleger in Ein- oder Doppellenkerausführung ist i.d.R. mittig auf dem parallel zum Schiff verfahrbaren Portal angeordnet.

Moderne Drehkrane in Portalbauweise sind mit innovativer Antriebs- und Steuerungstechnik ausgerüstet, die insbesondere auch eine Rekuperation überschüssiger kinetischer bzw. potentieller Energie erlaubt. Die Krane werden idealerweise am stationären Stromnetz betrieben. Trotz Spurführung trifft man auch auf Krane, die mit die-selektischen oder dieselhydraulischen Antrieb ausgerüstet sind. Hier wurden die Standardoberwagen von Hafemobilkranen 1 : 1 auf Portale gesetzt. Der Vorteil, dass Portaldrehkrane mit Standardaufbauten von Hafemobilkranen billiger in der Anschaffung sind, wird allerdings dadurch wieder zunichte gemacht, dass Hafenbetreiber aus ökologischen Gründen vermehrt Wert darauf legen, ihr Umschlagequipment am stationären Stromnetz zu betreiben (vergl. /2/), was entsprechenden Umrüstungsaufwand zur Folge hat. (An dieser Stelle sei auch auf den diesbezüglichen „Hype“ bei RTGs (Rubber Tyred Gentries) für den Containerumschlag hingewiesen.)

### 1.2 NETZRÜCKSPEISUNG VERSUS LOKALE ENERGIESPEICHERUNG

Der klassische auf Schienen fahrende Portaldrehkran, wie er beispielsweise von Ardelit angeboten wird, ist in idealer Weise auf den Betrieb am stationären Mittelspannungsnetz ausgelegt. Hub-, Dreh- und Wippwerk werden elektrisch betrieben. Überschüssige kinetische bzw. potentielle Energie kann mit vergleichsweise geringen Verlusten über eine Stromsammelschiene im Zwischenkreisbereich zwischen Verbrauchern umverteilt oder bei Nichtbedarf ins Netz zurückgespeist werden.

Vorteil der NetZRückspeisung im Vergleich zur Nutzung lokaler Energiespeicher ist, dass das Stromnetz in seiner Kapazität nicht beschränkt ist. Die beschränkte Kapazität lokaler Energiespeicher kann zum Problem werden, wenn über mehrere Zyklen hinweg beim Senken der Hublasten mehr Energie frei wird, als für das nachfolgende Heben erforderlich ist. Das ist z.B. dann der Fall, wenn Container von Deckslagen abgehoben und auf der tiefer liegenden Kaje abgesetzt werden. Die Folge: Die überschüssige Energie muss in Form von Wärme dissipiert werden, das Rekuperationspotential sinkt. Im umgekehrten Fall, dass über mehrere Zyklen hinweg beim Senken weniger Energie zurückgespeist wird, als für das Heben benötigt wird, kann das Problem auftauchen, dass die Leistung des Dieselmotors infolge Downsizings nicht mehr ausreicht, um die Leistungsspitzen beim Heben abzudecken. Das führt dann z.B. zu einer reduzierten Hubgeschwindigkeit.

### 1.3 TECHNISCHE LÖSUNGEN ZUR ENERGIEREKUPERATION BEI DIESELBETRIEBENEN KRANEN

Dieselbetriebene Krane haben überall dort ihre Berechtigung, wo diese flächenbeweglich einsetzbar sein müssen (Mobil-, Schwimmkrane) oder für den Betrieb nur ein instabiles oder gar kein elektrisches Netz zur Verfügung steht. Es gibt diesel-elektrische und diesel-hydraulische Varianten. Beide können optional mit Speichersystemen für die Energierekuperation ausgerüstet werden.

Bereits 1983 wurde im Hafen von Rotterdam von MAN ein 32-t Schwimmkran, der über einen diesel-elektrischen Antrieb mit mechanischem Schwungradspeicher (unterhalb des Drekkranzes) verfügte, in Betrieb genommen /3/, /4/. Durchgesetzt haben sich Schwungradspeicher, die auch über Jahre hinweg in Bussen und Bahnen eingesetzt wurden, nicht. Sie haben sich in Bezug auf die Lagerung der extrem schnell laufenden Rotoren als problematisch erwiesen /5/, /6/.

Stattdessen werden heute von Gottwald in diesel-elektrisch betriebenen Drehkränen (G HMK) Doppelschichtkondensatoren (SuperCaps) für die Energiespeicherung eingesetzt. Im Gegensatz zu konventionellen Batterien zeichnen sich diese durch die erforderliche hohe Leistungsdichte aus /5/. Für Rekuperationspotential aus der hydraulisch betätigten Wippbewegung kann der Energiespeicher nicht genutzt werden. Jedoch kann auch hier bedarfsangepasst eine Umverteilung rekuperierter Energiebeträge zwischen elektrischen Verbrauchern (siehe oben) erfolgen.

Liebherr Nenzing setzt bei seinen diesel-hydraulisch betriebenen Drehkränen (LHM) auf einen hydro-pneumatischen Kolbenspeicher, der beim Senken gleichzeitig mit der freiwerdenden potentiellen Energie der Hublast und der vom weiterlaufenden diesel-hydraulischen Antrieb gelieferten Energie beaufschlagt wird. Laut Liebherr wird der Kolbenspeicher für Rekuperationspotential aus Dreh- und Wippbewegung nicht genutzt. Allerdings würden die beim Drehen/ Wippen freiwerdenden Energiebeträge via hydraulischem Verteilergetriebe anderen Verbrauchern angeboten, bevor diese in Form von Wärme vernichtet würden (Analogie zur Sammelschiene bei elektrischen Antrieben, siehe oben!). So ließe sich bspw. die Grundlast des Krans reduzieren.

Weiter oben wurde schon darauf hingewiesen, dass manche Terminalbetreiber aus Umweltschutzgründen darauf Wert legen, dass zunächst für den Dieselbetrieb ausgelegte Krane auf Elektrobetrieb am stationären Netz umgerüstet werden. Das bedeutet beim Hydraulikkran, den Dieselmotor, der das Hydraulikaggregat treibt, durch einen Elektromotor zu ersetzen und damit einen konzeptionellen Nachteil. Konnte man den Dieselmotor zuvor leis-

tungsmäßig „downsizen“, weil dieser Zeit während des Hebens und Senkens hat, um die von ihm geforderte Hubarbeit zu leisten, so muss nun wegen 100 % Einschaltdauer ein entsprechend größerer Elektromotor gewählt werden.

War die Diskussion bis hierher rein qualitativ, so sollen im Folgenden Energiebedarfe und CO<sub>2</sub>-Emissionen der vorgestellten Antriebsvarianten auf der Basis von Wirkungsgradbetrachtungen quantifiziert werden. Dazu wird in Kap. 2 zunächst ein spezifischer Endenergiebedarf  $e_E$  formuliert. Dieser soll den allgemeinen Zusammenhang zwischen Endenergiebedarf  $E_E$  einerseits und gegebenem Rekuperationspotential  $E_{POT}$  aus Lage- oder Bewegungsenergie andererseits herstellen. Eine Quantifizierung der spezifischen Endenergiebedarfe  $e_E$  der verschiedenen Antriebsstrangkonfigurationen wird deren Unterschiede in Bezug auf Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit augenfällig machen. In Kap. 3 werden schließlich im Rahmen zweier Case Studies mit Hilfe der zuvor ermittelten antriebsstrangtypischen spezifischen Endenergiebedarfe  $e_E$  Endenergiebedarfe und CO<sub>2</sub>-Ausstoß über den gesamten Lebenszyklus quantifiziert. In beiden Case Studies geht es um einen Vergleich der verschiedenen Antriebsstrangkonfigurationen beim Lasthub, wobei einmal der Umschlag von Schüttgut und einmal der von Containern im Fokus steht.

## 2 SYSTEMSPEZIFISCHE ANALYSE DER VERSCHIEDENEN KRANANTRIEBSVARIANTEN

### 2.1 VERLUSTE BEI DER ENERGIEREKUPERATION

Sind Krane mit Systemen für die Energierückgewinnung ausgerüstet, so lassen sich für die einzelnen Triebwerksachsen Rekuperationswirkungsgrade  $\eta_{rek,TW}$  formulieren (Formel 1).

$$\eta_{rek,TW} = \eta_{TW} \cdot \eta_{sp\pm} \cdot \eta_{TW} = \eta_{sp\pm} \cdot \eta_{TW}^2 \quad (1)$$

Der Wirkungsgrad  $\eta_{rek,TW}$  berücksichtigt die Verluste bei der Rekuperation potentieller bzw. kinetischer Energie via Triebwerk ( $\eta_{TW}$ ) zum Speicher ( $\eta_{sp\pm}$ ) hin und zurück. Die im Weiteren betrachteten Triebwerkswirkungsgrade von Hubwerk  $\eta_{HW}$  und Drehwerk  $\eta_{DW}$  werden in beiden Richtungen als jeweils betragsmäßig gleich groß angenommen (vergl. /6/, S. 4).

Die Wirkungsgrade  $\eta_{HW}$  (Tabelle 1) hängen vom Hubwerksdesign ab.

Im Falle der hier in Diskussion stehenden Hafendrehkrane berechnen sich die Hubwerkswirkungsgrade (keine Einscherung der Seile!) nach Formel 2a.

$$\eta_{HW} = \eta_{G/Tr} \cdot \eta_R^i \quad (2a)$$

Krantyp	Auslegertyp	Einsicherung	Seiltrieb, Typ <sup>1)</sup>	i <sup>2)</sup>	$\eta_{G/Tr}$	$\eta_R$	$\eta_{HW}$
Drehkran (G HMK, LHM)	Einlenker	keine	2/2-2	4	0,941 <sup>3)</sup>	0,985 <sup>3)</sup>	0,886
Drehkran (Tukan, MAN)	Doppellenker	keine	2/2-2	3			0,900
Cont.Brücke (Feederserver)	(Krankatze)	einfach	4/8-4	3	0,931 <sup>4)</sup>	0,980 <sup>4)</sup>	0,867

<sup>1)</sup> n/z-c mit n= Anz. Seilstränge, z =Anz. gezogene Seilenden, c = Anz. Seile, <sup>2)</sup> Anz. Führungsrollen, <sup>3)</sup> Angabe Ardelt, <sup>4)</sup> Angabe KOCKS

Tabelle 1. Ermittlung von Hubwerkswirkungsgraden  $\eta_{HW}$

„Speichertyp“	Prinzip	$\eta_{T-S}$	$\eta_S$	$\eta_{S-T}$	$\eta_{sp\pm}$
Netzurückspeisung (Tukan)	elektrisch	0,87 <sup>1)</sup>	1,00 <sup>2)</sup>	0,87 <sup>1)</sup>	0,76
SuperCaps (G HMK)	elektrostatisch - chemisch	0,88 <sup>2)</sup>	0,95 <sup>3)</sup>	0,88 <sup>2)</sup>	0,74
Hydraul. Druckspeicher (LHM)	hydro-pneumatisch	0,90 <sup>4)</sup>	0,96 <sup>5)</sup>	0,90 <sup>4)</sup>	0,78
Schwungradspeicher (MAN)	elektro-kinetisch	0,88 <sup>2)</sup>	0,79 <sup>6)</sup>	0,88 <sup>2)</sup>	0,62
Netzurückspeisung (Feederserver)	elektrisch	0,89 <sup>7)</sup>	1,00 <sup>2)</sup>	0,89 <sup>7)</sup>	0,79

<sup>1)</sup>Angaben Ardelt, <sup>2)</sup>Eigene Berechnungen, <sup>3)/5/4)</sup>Schätzung Sauer-Danfoss, <sup>5)</sup>Angabe Liebherr Nenzing, <sup>6)</sup>Angabe rosseta Technik, <sup>7)</sup>Angabe KOCKS

Tabelle 2. Ermittlung der Speicherwirkungsgrade  $\eta_{sp\pm}$

Krantyp	Speichertyp	Auslegertyp	$\eta_{sp\pm}$	$\eta_{HW}$	$\eta_{rek,HW}$
Tukan	Netzurückspeisung	Doppellenker	0,76	0,900	0,61
G HMK	SuperCaps	Einfachlenker	0,74	0,886	0,58
LHM	Hydraul. Druckspeicher	Einfachlenker	0,78	0,886	0,61
MAN	Schwungradspeicher	Doppellenker	0,62	0,900	0,50
Feederserver	Netzurückspeisung	(Krankatze)	0,79	0,867	0,59
N.N.	ohne Energierückspeisung	N.N.	0,0	N.N.	0,0

Tabelle 3. Ermittlung der Rekuperationswirkungsgrade  $\eta_{rek,HW}$  für die Hubwerke

Drehkrantyp	Speichertyp	$\eta_{sp\pm}$	$\eta_{DW}$	$\eta_{rek,DW}$
Tukan	Netzurückspeisung	0,76	0,90 <sup>1)</sup>	0,61
G HMK	SuperCaps	0,74		0,60
MAN	Schwungradspeicher	0,62		0,50
N.N.	ohne Energierückspeisung	0,0	N.N.	0,0

<sup>1)</sup> Verschoof, J.: Cranes – Design, Practice and Maintenance (1999)

Tabelle 4. Ermittlung der Rekuperationswirkungsgrade  $\eta_{rek,DW}$  für die Drehwerke

Der Hubwerkswirkungsgrad  $\eta_{HW}$  der Drehkrane berücksichtigt die Verluste  $\eta_{G/Tr}$  von Getriebe (hier Planetengetriebe) und Seiltrommel sowie der Führungsrollen  $\eta_R^i$  mit i = Anzahl Rollen. Bei der Betrachtung der verschiedenen Drehkrane werden die Wirkungsgrade vergleichbarer Hubwerkskomponenten betragsmäßig gleich groß angesetzt.

Zu Vergleichszwecken soll weiterhin das Rekuperationsvermögen einer Containerbrücke vom Typ Containerfeeder (KOCKS) mit seilgezogener Katze betrachtet werden. Hier berechnet sich der Hubwerkswirkungsgrad wegen der einfachen Seileinsicherung nach Formel 2b.

$$\eta_{HW} = \eta_{G/Tr} \cdot \eta_R^3 \cdot \frac{(1 - \eta_R^2)}{2 \cdot (1 - \eta_R)} \quad (2b)$$

Unabhängig von der konkreten Ausführung des Triebwerks kann ein Speicherwirkungsgrad  $\eta_{sp\pm}$  definiert werden (Formel 3).

$$\eta_{sp\pm} = \eta_{T-S} \cdot \eta_S \cdot \eta_{S-T} = \eta_S \cdot \eta_{T-S}^2 \quad (3) \quad \text{mit } \eta_{T-S} = \eta_{S-T}$$

Der Speicherwirkungsgrad  $\eta_{sp\pm}$  (Tabelle 2) berücksichtigt die Verluste zwischen Triebwerk u. Speichereingang  $\eta_{T-S}$ , im Speicher an sich  $\eta_S$  sowie zwischen Speichereingang und Triebwerk  $\eta_{S-T}$ . Die Verluste  $\eta_{T-S}$  auf dem Weg zum Speicher werden als betragsmäßig gleich groß angenommen wie die Verluste  $\eta_{S-T}$  vom Speicher weg (Vergl. /4/, S. 4)! Im Übrigen werden, unabhängig vom jeweiligen Krantyp, die Wirkungsgrade vergleichbarer elektrischer Komponenten betragsmäßig gleich angesetzt.

Unter Berücksichtigung der zuvor bestimmten Wirkungsgrade  $\eta_{HW}$  und  $\eta_{sp\pm}$  lassen sich mit Formel 1 die Rekuperationswirkungsgrade  $\eta_{rek,HW}$  für die Hubwerke der verschiedenen Krankonfigurationen berechnen (Tabelle 3).

Die Rekuperationswirkungsgrade  $\eta_{rek,DW}$  für die in Diskussion stehenden (elektrisch angetriebenen) Drehwerke (Tabelle 4) errechnen sich entsprechend.

Die ermittelten Rekuperationswirkungsgrade  $\eta_{rek,HW}$  und  $\eta_{rek,DW}$  bei Kranen mit Energierückgewinnung legen den Schluss nahe, dass bei den heute in Hafendrehkränen üblicherweise eingesetzten Antriebs-/ Speichersystemen (d.h. ohne Berücksichtigung der diesel-elektrischen Variante mit Schwungradspeicher) etwa 40 % der frei werdenden potentiellen bzw. kinetischen Energie beim Rekuperationsprozess als Wärme dissipiert werden. (Dasselbe gilt für die Hubachse des Feederservers.)

Daher wird bei den nachfolgenden Betrachtungen zu den Kranen mit Energierückgewinnung, unabhängig vom Antriebssystem, von einem Rekuperationswirkungsgrad (unter günstigen Betriebsbedingungen, siehe oben)

$$\eta_{rek} = \eta_{rek,HW} = \eta_{rek,DW} = 0,60$$

ausgegangen. Die Verluste bei der Rekuperation i.H. von

ca. 40 % sind durch den Einsatz von Endenergieträgern (Diesel bzw. Strom aus dem Netz) zu kompensieren.

Anmerkung: Die hier nicht weiter thematisierten Rekuperationswirkungsgrade bei der Umverteilung von Energie zwischen Verbrauchern via Stromsammelschiene bzw. hydraulischem Verteilergetriebe (siehe oben) sind wegen der „kürzeren Wege“ tendenziell betragsmäßig größer als die o.g. 60 %!

## 2.2 VERLUSTE BEI DER UMWANDLUNG VON ENDENERGIE IN NUTZENERGIE

Die Wärmeverluste bei der Umwandlung von Endenergie (E) in Nutzenergie (N), d.h. zwischen Tank des Dieselmotors bzw. Klemmen zum öffentlichen Netz u. Triebwerkseingang (Motorwelle), sind durch Wirkungsgrade  $\eta_{E-N}$  zu berücksichtigen (Tabelle 5).

## 2.3 SPEZIFISCHER ENDENERGIEBEDARF BEI DER REKUPRATION

Der spezifische Endenergiebedarf  $e_E$  in kWh je 1 kWh kinetische bzw. potentielle Energie am Wirkort der Triebwerksachsen berechnet sich nach Formel 4.

$$e_E = \frac{1 - \eta_{rek}}{\eta_{E-N} \cdot \eta_{TW}} \quad (4)$$

Antriebstyp	Massgebliche verlustbehaftete Antriebskomponenten	$\eta_{E-N}^{1)}$	
		elektr.	Diesel
elektrisch-elektrisch	Leitungen, Kabeltrommel, Trafo, Umrichter, Elektromotor	0,87-0,89	
elektro-hydrostat.	Leitungen, Kabeltr., Trafo, E-Motor, Hydr.P., Verrohrung, (Speicher), Hydr.Mot.	0,73	
diesel-elektrisch	Dieselmotor, Generator, Umrichter, Elektromotor		0,36
diesel-hydrostatisch	Dieselmotor, Hydr.Ppe, Verrohrung, (Speicher), Hydr.Motor		0,34

<sup>1)</sup> Eigene Berechnung

Tabelle 5. Wirkungsgrade  $\eta_{E-N}$  verschiedener Antriebsstränge bei der Umwandlung von Endenergie in Nutzenergie

Krantyp	Antriebstyp	$\eta_{E-N}$	Speichertyp	$\eta_{rek}$	$\eta_{TW}$			$e_E$ [kWh/kWh]		Krantyp
					Einf.-lenker	Dopp.-lenker	Drehwerk	Elektr.	Diesel	
Heben										
Tukan	elektrisch-elektrisch	0,87	Netz	0,60		0,900		0,51		Tukan
G HMK	diesel-elektrisch	0,36	SuperCaps	0,60	0,886			0,52	1,25	G HMK
G HMK (Netz)	elektrisch-elektrisch	0,87								G HMK (Netz)
LHM	diesel-hydrostatisch	0,34	hydropneumatisch	0,60	0,886			0,61	1,33	LHM
LHM (Netz)	elektro-hydrostatisch	0,73								LHM (Netz)
Feederserver	elektrisch-elektrisch	0,89	Netz	0,60	Katze: 0,867			0,52		Feederserver
Drehen										
Tukan/ G HMK	elektrisch-elektrisch	0,87	Netz	0,60				0,90	0,51	Tukan/ G HMK
G HMK	diesel-elektrisch	0,36	SuperCaps	0,60				0,90	1,23	G HMK
zum Vergleich: Krane ohne System zur Energierekuperation										
G HMK	diesel-elektrisch	0,36	ohne Speich.	0,0	0,886				3,13	G HMK
LHM	diesel-elekt./ hydraul.	0,34	ohne Speich.	0,0	0,886				3,32	LHM
G HMK	diesel-elektrisch	0,36	ohne Speich.	0,0			0,90		3,09	G HMK

Tabelle 6. Ermittlung der spezifischen Energiebedarfe  $e_E$  beim Heben u. Drehbeschleunigen

In Bezug auf den Ressourcenverbrauch (Primärenergiebedarf) der Krane mit Energierückgewinnung relativiert sich die Tatsache, dass der spezifische Endenergiebedarf in kWh/kWh bei Betrieb des Krans am elektrischen Netz nur knapp halb so groß ist wie derjenige bei Betrieb des Krans per Dieselmotor. Grund: Der Wirkungsgrad  $\eta_{P-E,el} = 0,32$  bei Erzeugung und Übertragung von elektrischem Strom ist unter den heutigen Gegebenheiten (Kraftwerksmix Dtl., zentrale Energieerzeugung) evident schlechter als  $\eta_{P-E,foss} = 0,87$  bei Raffinierung und Transport von Erdölderivaten.

Mit Hilfe der spezifischen Endenergiebedarfe  $e_E$  (Tabelle 6) lassen sich für gegebene Rekuperationspotentiale  $E_{POT}$  aus Lage- bzw. Bewegungsenergie die absoluten Endenergiebedarfe  $E_E$  ermitteln (Formel 5).

$$E_E = e_E \cdot E_{POT} \quad (5)$$

Energiebedarf und CO<sub>2</sub>-Emissionen sind proportional zueinander. Insofern lassen sich aus dem Endenergiebedarf  $E_E$  mit Hilfe der kumulierten spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen  $m_{CO_2,spez}$  (Tabelle 7) die absoluten CO<sub>2</sub>-Emissionen  $m_{CO_2}$  errechnen (Formel 6).

$$m_{CO_2} = E_E \cdot m_{CO_2,spez} \quad (6)$$

Life Cycle	Kraftwerksstrom <sup>1)</sup>	fossil (Diesel) <sup>2)</sup>
EU	0,45 t/MWh	
Deutschland (D)	0,58 t/MWh	
China/ Russland	1,00 t/MWh	
Welt		0,32 t/MWh

<sup>1)</sup> /7/, <sup>2)</sup> Vergl. /8/

Tabelle 7. Kumulierte spezif. CO<sub>2</sub>-Emissionen  $m_{CO_2,spez}$  von Kraftwerksstrom u. Dieseldieselkraftstoff (Endenergiebetrachtung)

### 3 CASE STUDIES

#### 3.1 CASE STUDY 1: QUANTIFIZIERUNG VON ENERGIEBEDARFEN UND CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN INFOLGE HUBARBEIT BEIM SCHÜTTGUTUMSCHLAG ÜBER 2 MIO. ARBEITSSPIELE (U7)

##### 3.1.1 INHALT

Mit  $n = 2$  Mio. Arbeitsspielen/ LifeCycle (Um-schlagklasse U7 nach DIN EN 14985),  $h=10,5$  m mittlerer Hubweg sowie eine mittlere Hublast  $m_{brt} = 14,8$  t bei einem Greifergewicht von  $m_{para} = 5,8$  t ergeben sich zu leistende Hubarbeit  $W_{Hub,U7}$  und Rekuperationspotential aus Lageenergie  $E_{POT} = E_{pot,U7}$  zu:

$$W_{Hub,U7} = 2 \cdot 10^6 \cdot 14,8 \cdot 9,81 \cdot 10,5 \text{ kNm} = 847 \text{ MWh}$$

$$E_{pot,U7} = 2 \cdot 10^6 \cdot 5,8 \cdot 9,81 \cdot 10,5 \text{ kNm} = 332 \text{ MWh}$$

Bei der Berechnung des Endenergiebedarf an Strom bzw. Dieseltreibstoff  $E_{E,Hub,U7}$  (Tabelle 8) wird davon ausgegangen, dass das Schüttgut am Ende des Hubwegs  $h$  abgeworfen wird, d.h. beim Senken nur noch das Eigengewicht des Greifers für die Energierückgewinnung zur Verfügung steht (Formel 7):

$$E_{E,Hub} = \frac{W_{Hub} - E_{POT}}{\eta_{E-N} \cdot \eta_{HW}} + e_E \cdot E_{POT} = \frac{W_{Hub} - \eta_{rek} \cdot E_{POT}}{\eta_{E-N} \cdot \eta_{HW}} \quad (7)$$

Endenergie:

$$E_{E,Hub,U7} = \frac{(847 - 0,6 \cdot 332) \text{ MWh}}{\eta_{E-N} \cdot \eta_{HW}} = \frac{648 \text{ MWh}}{\eta_{E-N} \cdot \eta_{HW}}$$

mit:  $(\eta_{rek} \cdot E_{POT}) / W_{Hub} = 24 \%$

bei:  $2.000.000 \cdot 14,8 \text{ t} = 29,6 \text{ Mt}$  kumulierter Nettolast

Krantyp	Antriebstyp	Speichertyp	$\eta_{E-N}$	$\eta_{HW}$	$E_{E,Hub,U7}$ [MWh]		$E_{E,Hub,t}$ [kWh/t]	CO <sub>2</sub> [t]		$\Delta$ CO <sub>2</sub>
					elektr. Netz	Diesel		elektr. (D)	Diesel	
Tukan	elektrisch-elekt.	Netz	0,87	0,900	830	2.030	0,028	480	650	$\pm 0 \%$
G HMK	diesel-elekt.	SuperCaps	0,36	0,886	840		0,069	490	690	+ 35 %
G HMK (Netz)	elektrisch-elekt.		0,87							
LHM	diesel-hydrostat.	hydropneumatisch	0,34	0,886	1.000		0,073	580	900	+ 44 %
LHM (Netz)	elekt.-hydrostat.		0,73							
zum Vergleich: Krane ohne System zur Energierückgewinnung (kein Speicher, keine Umverteilung)										
G HMK	diesel-elekt.	ohne	0,36	0,886		2.660	0,090		850	+ 77 %
LHM	diesel-hydrostat.	ohne	0,34	0,886		2.810	0,095		900	+ 87 %

Tabelle 8. Endenergiebedarf u. CO<sub>2</sub>-Emission verschiedener Antriebskonzepte von Drehkränen beim Lasthub (Schüttgutumschlag in Binnenhäfen, LifeCycle-Betrachtung)

##### 3.1.2 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Die quantitativen Vorteile von Kranen mit der Möglichkeit zur Energierückgewinnung gegenüber Kranen ohne eine solche in Bezug auf Energieeffizienz und Schadstoff-

emissionen sind augenfällig. Insofern soll im Weiteren auf die Vorteile einer Netzzurückspeisung gegenüber lokalen Energiespeichern eingegangen werden.

Der spezifische Energieverbrauch liegt bei den voll-elektrischen Kranen mit 0,028 KWh je umgeschlagene Tonne Greifergut am günstigsten, unabhängig davon, ob überschüssige Energie ins Netz zurückgespeist oder lokal gespeichert wird.

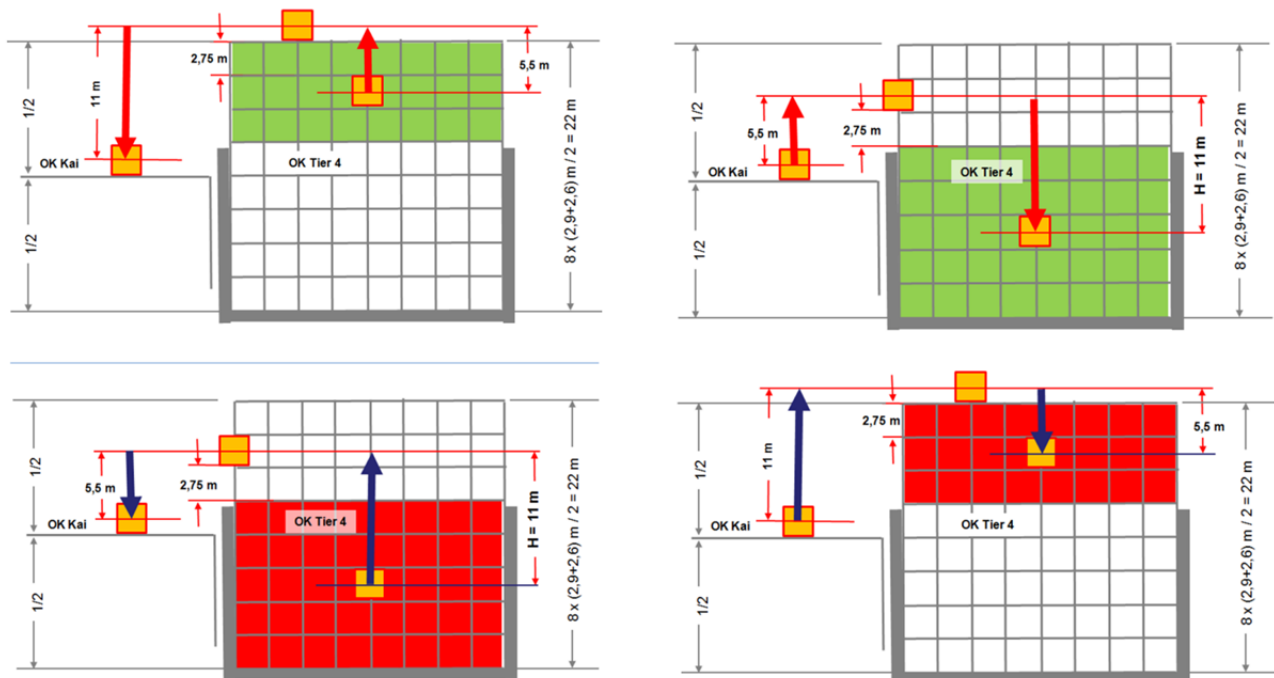
Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Ausstoß der elektro-hydrostatischen Antriebsvariante liegen etwa 20 % über den voll-elektrischen Kranen

In puncto Schadstoffemission ist der Nachteil dieselbetriebener Krane gegenüber solchen mit Stromspeisung aus dem Netz augenfällig: Bei dem zugrundegelegten praxisrelevanten Betriebsprogramm erzeugen Hafendrehkrane im diesel-elektrischen Betrieb 35 %, im diesel-hydraulischen Betrieb sogar ca. 45 % mehr CO<sub>2</sub> als bei Betrieb der voll-elektrischen Krane.

### 3.2 CASESTUDY 2: QUANTIFIZIERUNG VON ENERGIEBEDARFEN UND CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN INFOLGE HUBARBEIT BEIM CONTAINERUMSCHLAG ÜBER 4 MIO. ARBEITSSPIELE (U8)

#### 3.2.1 INHALT

Bei der Be- und Entladung von Containerschiffen wird die Umschlagklasse U8 (nach DIN EN 14985), gleichbedeutend mit n = 4 Mio. Arbeitsspiele/ LifeCycle, zugrundegelegt.



**Bild 1:** Repräsentative Hubwege bei der vollständigen Ent-/ Beladung von Feederschiffen des Typs Sietas 168

Bei diesem Fallbeispiel wird davon ausgegangen, dass es sich um ein auf Containerumschlag spezialisiertes Terminal handelt. Insofern ersetzt im Vergleich eine speziell auf den Feederumschlag zugeschnittene voll-

Bei einem mittleren Gewicht je TEU von 14 t und 60 % Anteil von 40'- Containern ergibt sich ein mittleres Gewicht je Box i.H. von 22,4 t. Es wird nur Single-Lift-Betrieb betrachtet. Das Leergewicht von Spreader plus Rotator (beim Drehkran) bzw. plus Headblock (bei der Containerbrücke) addiert sich zu 9 t plus 2,6 t = 11,6 t.

Es wird weiterhin angenommen, dass Feederschiffe (hier: Sietas Typ 168) im Hubterminal komplett ent- und beladen werden, so dass man repräsentative Stellplätze für Container an Deck und unter Deck bestimmen kann. Den repräsentativen Stellplätzen können Handlingshäufigkeiten (37,5 % Deckscontainer, 62,5 % Container unter Deck) sowie mittlere Wege bei der Be- bzw. Entladung (siehe Bild 1 im Anhang) zugeordnet werden.

Unter Berücksichtigung der Handlingshäufigkeit, der mittleren Hubwege sowie des mittleren Gewichts je Box sind während der Lebensdauer am „Haken“ des Krans  $W_{Hub,U8} = ca. 4.100$  MWh an Hubarbeit zu leisten. Bei Netzrückspeisung kann die gesamte potentielle Energie  $E_{pot,U8} = W_{Hub,U8} = 4.100$  MWh für die Rekuperation genutzt werden. Demgegenüber stehen bei Kranen mit einem lokalen Energiespeicher wegen der weiter oben bereits angesprochenen Asymmetrie zwischen Hubarbeit und Rekuperationspotential - infolge der Höhendifferenz zwischen Quelle und Senke bei gegebener Arbeitssequenz - nur ca.  $0,84 \times E_{pot,U8} = 3.430$  MWh als Rekuperationspotential  $E_{POT}$  zur Verfügung.

elektrische Containerbrücke vom Typ Feederserver (siehe oben) den entsprechenden Drehkran.

Der Endenergiebedarf an Strom bzw. Dieseltreibstoff  $E_{E,Hub,U8}$  (Tabelle 9) errechnet sich analog den Betrachtungen beim Schüttgutumschlag mit Formel 7.

Endenergiebedarf bei NetZRückspeisung:

$$E_{E1,Hub,U8} = \frac{(4.100 - 0,6 \cdot 4.100)MWh}{\eta_{E-N} \cdot \eta_{HW}} = \frac{1.640MWh}{\eta_{E-N} \cdot \eta_{HW}}$$

mit:  $(\eta_{rek} \cdot E_{POT1}) / W_{Hub} = 60 \% = \text{Max}$

Endenergiebedarf bei lokalem Energie-Speicher:

$$E_{E2,Hub,U8} = \frac{(4.100 - 0,6 \cdot 3.430)MWh}{\eta_{E-N} \cdot \eta_{HW}} = \frac{2.040MWh}{\eta_{E-N} \cdot \eta_{HW}}$$

mit:  $(\eta_{rek} \cdot E_{POT2}) / W_{Hub} = 50 \%$

je bei:  $4.000.000 \cdot 22,4 t = 89,6 \text{ Mt}$  kumulierter Nettolast

### 3.2.2 DISKUSSION DER ERGEBNISSE

Noch augenfälliger als beim Schüttgutumschlag sind zunächst die quantitativen Vorteile der Energierekuperation beim Containerumschlag, die in dem höheren Rekupe-rationspotential von 50 % bzw. 60 % beim Containerum-schlag gegenüber 24 % beim Schüttgutumschlag begründet sind.

Im Weiteren geht es darum, die Vorteile der Netz-rückspeisung gegenüber den lokalen Energiespeichern zu diskutieren.

Aufgrund der Tatsache, dass ein lokaler Speicher unter gewissen Bedingungen nicht mehr ausreichend Energie aufnehmen bzw. abgeben kann (siehe oben!), nimmt der voll-elektrische Kran mit NetZRückspeisung, was niedrigen Verbrauch und Umweltfreundlichkeit anbetrifft, den Spitzenplatz ein!

Krantyp	Antriebstyp	Speicher-typ	$\eta_{E-N}$	$\eta_{TW}$	$E_{E,Hub,U8}$ [MWh]		$E_{E,Hub/t}$ [kWh/t]	$CO_2$ [t]		$\Delta CO_2$
					elektr.Netz	Diesel		elektr. (D)	Diesel	
Feederserver	elektrisch-elekt.	Netz	0,89	0,867	2.130		0,024	1.240		$\pm 0 \%$
G HMK	diesel-elektrisch	SuperCaps	0,36	0,886		6.400	0,071		2.050	+ 65 %
G HMK (Netz)	elektrisch-elekt.		0,87		2.650		0,030	1.540		+ 24 %
LHM	diesel-hydrostat.		hydropneu-matisch		0,34		7.140	0,080		2.280
LHM (Netz)	elekt.-hydrostat.		0,73		3.150		0,035	1.830		+ 48 %
<i>zum Vergleich: Krane ohne System zur Energierekuperation (kein Speicher, keine Umverteilung!)</i>										
G HMK	diesel-elektrisch	ohne	0,36	0,886		12.850	0,152		4.110	+ 230 %
LHM	diesel-hydrostat.	ohne	0,34	0,886		13.610	0,152		4.360	+ 250 %

Tabelle 9. Endenergiebedarf u.  $CO_2$ -Emissionen verschiedener Antriebskonzepte von Hafenkranen beim Lasthub (Containerumschlag in Feederhäfen, LifeCycle-Betrachtung) mit  $E_{POT,U8} = 0,84 \times E_{pot,U8}$  im Falle lokaler Speicher

Krantyp	Antriebstyp	Speicher-typ	$\eta_{E-N}$	$\eta_{TW}$	$E_{E,Hub,U8}$ [MWh]		$E_{E,Hub/t}$ [kWh/t]	$CO_2$ [t]		$\Delta CO_2$
					elektr.Netz	Diesel		elektr. (D)	Diesel	
Feederserver	elektrisch-elekt.	Netz	0,89	0,867	2.130		0,024	1.240		$\pm 0 \%$
G HMK	diesel-elektrisch	SuperCaps	0,36	0,886		5.140	0,057		1.640	+ 32 %
G HMK (Netz)	elektrisch-elekt.		0,87		2.130		0,024	1.240		$\pm 0 \%$
LHM	diesel-hydrostat.		hydropneu-matisch		0,34		5.440	0,061		1.740
LHM (Netz)	elekt.-hydrostat.		0,73		2.540		0,028	1.470		+ 19 %
<i>zum Vergleich: Krane ohne System zur Energierekuperation (kein Speicher, keine Umverteilung!)</i>										
G HMK	diesel-elektrisch	ohne	0,36	0,886		12.850	0,152		4.110	+ 230 %
LHM	diesel-hydrostat.	ohne	0,34	0,886		13.610	0,152		4.360	+ 250 %

Tabelle 10. Endenergiebedarf u.  $CO_2$ -Emissionen verschiedener Antriebskonzepte von Hafenkranen beim Lasthub (Containerumschlag in Feederhäfen, LifeCycle-Betrachtung) mit  $E_{POT,U8} = 1 \times E_{pot,U8}$  im Falle lokaler Speicher

Der Anteil rekuperierbarer Energie wird allerdings in praxi eher größer sein als 85 %, da es bei Rückspeisung im gegebenen Falle mehrerer Verbrauchern zur Umverteilung von Energie vor Speicherung (siehe oben) kommt.

Legt man insofern der Berechnung von spezifischem Energiebedarfen und  $CO_2$ -Emissionen das „andere Extrem“, dass auch bei Kranen mit lokalem Energiespeicher

das gesamte Rekupe-rationspotential i.H. von 4.100 MWh zur Verfügung steht, zugrunde (Tabelle 10), so ergibt sich ein ähnliches Bild wie beim Schüttgutumschlag (Tab. 8).

#### 4 ZUSAMMENFASSUNG

Für den kaigebundenen Binnenschiffs- bzw. Feederumschlag kommen in erster Linie Hafendrehkrane in Portalbauweise in Frage. Diese sind multi-purpose-fähig. Alternativ bieten sich speziell für den Boxenumschlag Containerbrücken an.

Auf Schienen fahrende Krane werden in aller Regel mit Energie aus dem stationären Stromnetz versorgt. Würden komplette Standard-Oberwagen von Mobilkranen auf Portale montiert, so nutzen diese den vorkonfigurierten diesel-elektrischen/ -hydrostatischen Antrieb bzw. können nach Umrüstung ebenfalls am Stromnetz betrieben werden.

Alle genannten Antriebsvarianten bieten grundsätzlich die Möglichkeit zur Rückgewinnung potentieller bzw. kinetischer Energie, indem sie überschüssige Energie direkt auf andere Verbraucher verteilen bzw. bei Nichtbedarf für den späteren Gebrauch zwischenspeichern.

Alternativ zur Rückspeisung ins elektrische Netz wurden kranseitig antriebsabhängig zu installierende Schwungradspeicher, SuperCaps und hydropneumatische Kolbenspeicher untersucht. Wegen des vergleichsweise niedrigen Speicherwirkungsgrads wurde die Lösung mit Schwungradspeicher sogleich verworfen.

Die Untersuchungen deuten im Weiteren darauf hin, dass Netzspeisung und kranseitige Speichersysteme auf der Basis von SuperCaps bzw. hydropneumatischem Kolbenspeicher ähnlich effizient arbeiten, d.h. dass bis zu 60 % des Rekuperationspotentials aus freiwerdender kinetischer oder potentieller Energie am selben Wirkort wiederverwendet werden können. Bei direkter Nutzung freigewordener Energie durch andere Verbraucher ergeben sich tendenziell geringere Verluste.

Im Rahmen zweier Case-Studies wurden für verschiedene Energiespeicherkonzepte die lebenslangen Energieverbräuche und CO<sub>2</sub>-Emissionen infolge Hubarbeit ermittelt, einmal für den Schüttgutumschlag im Binnenhafen und einmal für den Containerumschlag am Feederliegeplatz. Grundsätzlich sind voll-elektrische Krane mit Netzspeisung allen anderen Kranen, insbesondere denen mit Dieselantrieb, hinsichtlich Verbrauch und CO<sub>2</sub>-Emissionen eindeutig überlegen. Selbst wenn man beim Containerumschlag vorteilhafterweise davon ausgeht, dass die Kapazität der kranseitig installierten Energiespeicher das Rekuperationspotential beim Senken nicht nennenswert einschränken, zeigt sich beispielsweise, dass der elektro-hydrostatisch betriebene Kran größenordnungsmäßig etwa 20 %, der diesel-elektrisch betriebene Kran etwa 30 – 35 % und der diesel-hydrostatisch betriebene Kran etwa 40 – 45 % mehr CO<sub>2</sub> emittieren als am Stromnetz betriebene Krane. Demgegenüber emittieren dieselbetriebene Krane ohne die Möglichkeit zur Energie- rekuperation bis zu 3,5 mal mehr CO<sub>2</sub> als am Stromnetz

betriebene Krane mit Netzspeisung. Die spezifischen Verbräuche je Hub am Binnen-/ Feederschiffs- liegeplatz bei gleichem Rekuperationspotential variieren zwischen 0,024 und 0,034 kWh/t bei Kranen am stationären Stromnetz bzw. zwischen 0,057 und 0,073 kWh/t bei dieselbetriebenen Kranen mit lokalen Energiespeichern. Dieselbetriebene Krane ohne die Möglichkeit zur Energie- rekuperation haben einen bis zu 6-fachen Endenergiebedarf in kWh.

#### 5 LITERATURHINWEISE

- /1/ Ferrer, J.: Flexibility keeps market buoyant. (Mobile harbour cranes.) Container Management, September/ October 2012, S. 53 – 55. UK.
- /2/ Page, P.: Then there were two. (Mobile harbour cranes.) Container Management, March 2012, S. 51 – 53. UK.
- /3/ Van Deijk, J.D.A.; Struna, A.: Ein 32-t-Schwimmkran erhöht die Umschlagleistung bei Massengut. Fördern & heben 34 (1984) Nr. 2, S. 126.
- /4/ Carbon, L.: Antriebe mit Thyristorstromrichtern auf Schwimmkränen: Siemens-Energetechnik Heft 3 (Mai/ Juni 1984), S. 146 – 149.
- /5/ Beiteltschmidt, M. et al.: Effiziente Energiere- kuperation in dieselelektrischen Hafenmobilkränen. Be- gleitband zur Kranfachtagung am 3. September 2010 in Bochum. S. 167 ff. E-Book.
- /6/ Böhler, T.: SuperCap heißt das Zauberwort. In- dustrieanzeiger 21/2011, S.12.
- /7/ Klell, M.; Cona, P.: Wirkungsgrade und CO<sub>2</sub>- Emissionen verschiedener Energieketten. HyCentA, Be- richt Nr. Hy8-2009 MKPC CO2 eta, S. 7, 8. Graz, 2009. <http://www.hycenta.tugraz.at/Image/Report%20Hy8-2009%20HyCentA%20Research%20GmbH.pdf>
- /8/ N.N.: Neue Umrechnungsfaktoren für Transport und Logistik. VerkehrsRUNDSCHAU 20/2012, S. 30.

---

#### Prof. Dr.-Ing. Klaus-Peter Franke

Professor für Logistik, Institut für Betriebsorganisation und Logistik, Fakultät Produktionstechnik und Produkti- onswirtschaft, Hochschule Ulm.

Adresse: Hochschule Ulm,  
Prittwitzstraße 10, 89075 Ulm, GERMANY

Telefon: +49 731 50 28296 or +49 731 50 28121,  
Fax: +49 731 50 28458, E-Mail: [franke@hs-ulm.de](mailto:franke@hs-ulm.de),  
<http://www.hs-ulm.de/franke>