# Energiespeicher im Antriebssystem von Werkzeugmaschinen zur Erhöhung der Energieeffizienz

Neugebauer, R.; Kolesnikov, A.; Koch, T.

## Abstract

Die Energie- und Ressourceneffizienz ist neben der Produktivität und der Verfügbarkeit einem der wichtigsten Auslegungskriterien für zu Werkzeugmaschinen geworden. Ein Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz kann durch die ganzheitliche Analyse und Optimierung der Spitzenleistung und Verlustenergien in Werkzeugmaschinenantrieben erreicht werden. Der Einsatz von Doppelschicht-Kondensatormodulen mit hoher Energiedichte ermöglicht es, die zurückgeführte Energie im Zwischenkreis temporär zu speichern und den Antrieben verlustarm für den nächsten Beschleunigungsvorgang zur Verfügung zu stellen. Die Wirkleistungsaufnahme Schwankungsbreite der aus dem Netz bei hochdynamischen Beschleunigungs- und Abbremsprozessen im Antriebsverband wird dadurch minimiert. Die Vorteile liegen in der Minderung der Spitzenleistung, in der Vermeidung der "notwendigen" Überdimensionierung des Ein-/Rückspeisemoduls des Antriebsverbandes und in einem stabilen und prognostizierbaren Leistungsaufnahmeniveau von Werkzeugmaschinen.

Im vorliegenden Beitrag wird auf die optimale Dimensionierung der Energiespeicher eingegangen. Weiterhin werden simulative und messtechnische Untersuchungen vorgestellt, die das Effizienzpotenzial der Energiespeichersysteme im Zwischenkreis von Werkzeugmaschinen bestätigen.

## 1 Einleitung

Die Steigerung der Energieeffizienz von Produktionsprozessen steht in den Ländern der europäischen Union im besonderen Fokus. Um die Energieverluste durch Leistungsspitzen bzw. Spannungseinbrüche innerhalb von Werkzeugmaschinen (WZM) zu vermeiden, bietet sich die Integration von zusätzlichen Energiespeichersystemen (ESS) in dessen Antriebsverband an [1, 2]. Dies erfordert die Entwicklung von Methoden zur optimalen Auslegung und zur effizienten Regelung von Energiespeichern. In den vergangenen Jahren wurde der Zwischenkreis in Antriebseinheiten von Produktionsmaschinen zur Integration von verschiedenen Speichersystemen verwendet. Diese Konzepte verwenden im Allgemeinen Elektrolyt-Kondensatoren bzw. Schwungräder [3, 4]. In [5] analysieren die Autoren einen Energiespeicher in WZM auf der Basis von Doppelschicht-Kondensatoren (DSK).

Technologiebedingt ist der Leistungsverbrauch in WZM diskontinuierlich und daher ursächlich für die Überdimensionierung vom netzseitigen Umrichter des Antriebsverbandes, die Verwendung eines abgestuften Stromtarifes und die maximale Leistungsbegrenzung in den Fabriken. Die Einbindung der Energiespeicher in den Zwischenkreis erlaubt die Reduzierung von Leistungsspitzen und verhindert die Rückspeisung von Bremsenergie ins Niederspannungsnetz. Dadurch ist es möglich, die Leistungsaufnahme zu glätten und den Energieverbrauch der Antriebe zu reduzieren. Darüber hinaus erlaubt die Maßnahme eine kleinere Auslegung des netzseitigen Umrichters und die Verringerung des Kabelquerschnitts der Anschlussleitungen.

Der Beitrag soll die Vorteile von ESS mit DSK im Zwischenkreis von Bearbeitungszentren (BAZ) und die Bereitstellung einer Methode zur optimalen Dimensionierung im Hinblick auf die Reduzierung des Energieverbrauchs und der Leistungsspitzen darlegen. Dieses Anliegen erforderte messtechnische Analysen und die Entwicklung eines simulativen Energieverbrauchsmodells des Antriebsverbandes von WZM. Das Modell wurde dabei aus den mechatronischen Modellen der elektrischen Antriebe in WZM abgeleitet und erlaubt die Vorhersage des Leistungs- und Energieverbrauchs im Antriebsverband mit ESS verschiedener Dimension. Die Gültigkeit des verwendeten Modells wird durch den Vergleich der messtechnischen und simulativen Energie- und Leistungsverbräuche in einer WZM validiert.

### 2 Strukturierung von elektrischen Leistungsflüssen in Werkzeugmaschinen

Der elektrische Leistungsfluss in WZM ist durch die eingespeiste Wirkleistung und die ins Netz zurück gespeiste Bremsleistung gekennzeichnet. Entsprechend der in Bild 1 dargestellten Energiekreisläufe ist neben der Wirk- auch die Blindleistung in WZM zu betrachten, die in die Grundschwingungsblindleistung (auch Verschiebungsblindleistung  $Q_V$ ) und Verzerrungsblindleistung  $Q_D$  eingeteilt werden kann. Um solche Leistungsflüsse zu systematisieren, wurden den Verbrauchergruppen verschiedene Spannungsebenen zugeordnet und deren jeweilige Nennanschlussleistungen aufgeführt [6]. Bild 1 zeigt das grundlegende elektrische System eines 3-Achs-Fräs-BAZ und dessen elektrische Leistungsflüsse. Der Leistungsfluss setzt sich aus Wirk- und Blindleistung (schwarze und hellgraue Pfeile) zusammen. Die dunkelgrauen Pfeile am rückspeisefähigen Ein-/Rückspeisemodul verdeutlichen, dass die Bremsleistung der Motorspindel und Vorschubantriebe in das Netz zurückfließt und somit ein Energiekreislauf gebildet wird.

Antrieb	Geschwindigkeit (U/min <sup>*,</sup> m/min <sup>**</sup> )	Bremsenergie (Ws)	Anteil der rück- gespeisten Bremsenergie (%)
Motorspindel <sup>*</sup>	20.000	18.783	51,24
	10.000	4.783	52,13
	5.000	890	28,84
Y-Achse**	65	400	28,81
Z-Achse**	65	335	55,46

Tabelle 1: Anteil der Energierückgewinnung

Die gemessenen Anteile zurückgeführter Bremsenergie sind in Tabelle 1 für einige Spindeldrehzahlen und Verfahrgeschwindigkeiten (Eilgänge) dargestellt. Die Ergebnisse belegen, dass von der eingespeisten kinetischen Energie nur maximal 55% der Energie der Vorschubantriebe und höchstens 52% der Energie der Motorspindel zurückgeführt wird.

$\left( \operatorname{Finspeisung} 42  \mathrm{k} \right) $		
3~/400V	Motorspindel	P=8,50kW)
	Vorschubantriebe	
ER-	X-Achse	P=22,5kW
modul	Y-Achse	P=14,5kW
400V	Z-Achse	P=14,5kW
	optionale Achse-1	P=1.90kW
	optionale Achse-2	P=1,48kW
		)
1~ 4000	WZW-Antrieb	P=0,20kW
3~ 2301/		
2300	Steckdosen	
	Beleuchtung	P=0, 156KVV
	Bremse für X,Y,Z	P=0,144kW
$3 \sim 24 \vee$	Schaltschrankkühlung	P=0,037kW
	Steuerstromkreis	P=0,192kW
	WZ-Magazin	P=0,096kW
	CNC-Steuerung	P=0,240kW
	KSS Niederdruckpumpe P=0,75kW	
	KSS Spülpumpe	P=0,75kW
	KSS-Hochdruckpumpe-1P=3,00kW	
	KSS-Hochdruckpumpe-2P=5,50kW	
4001/	Feinstfilterpumpe	P=0,75kW
4007	Bandfilter	P=0, I2KVV
	Spänofördoror	P = 1, 10 KVV
	Hydrauliknumne-1	P=0.23kW
	Hydraulikpumpe-2	P=0.42kW
- Blindleistung	Absaugung	P=0.53kW
- Wirkleistung	Kühlaggregatslüfter-1	P=0,08kW
- zurückgespeiste	Kühlaggregatslüfter-2	P=0,08kW
Bremsleistung	Kühlaggregatspumpe	P=0,50kW
	Schmierstoffpumpe	P=0,12kW

Bild 1: Elektrische Leistungsflüsse und Nennleistungen eines BAZ

### 3 Leistungsverbrauch und Energiespeichersysteme in Werkzeugmaschinen

Die verbrauchte Energiemenge und der Leistungsverlauf in WZM hängen von der Größe der Haupt- und Nebenantriebe sowie von der Bearbeitungstechnologie ab [7]. Folglich benötigt die Antriebseinheit unterschiedliche Energiemengen, die vom Betriebszustand der Spindel und der Achsantriebe abhängen. Der elektrische Energieverbrauch einer Antriebseinheit in WZM schwankt sehr stark. Während der Beschleunigungsphase der Motorspindel bzw. der Vorschubantriebe wird in die Antriebseinheit so viel elektrische Energie eingespeist, wie zur Deckung des kinetischen Energiebedarfs inklusive der Umwandlungsverluste nötig ist. In der Bremsphase wird kinetische Energie wieder in elektrische umgewandelt und ins Niederspannungsnetz zurückgespeist.

Im Bild 2 ist der ungleichmäßige Leistungsverlauf am Anschluss des bereits beschriebenen BAZ bei einem typischen Fräsprozess zu erkennen. Obwohl die Anschlussleistung des BAZ 42 kVA beträgt (Bild 1), wird dieser Wert in der Praxis nur selten und kurzzeitig erreicht. Weitere messtechnische und simulative Analysen haben bestätigt, dass nicht nur die Anschlussleistungen der WZM, sondern auch die Nennleistungen einzelner Antriebskomponenten, wie die Ein-/Rückspeiseeinheit, zumeist überdimensioniert sind. Ein Grund dafür sind die hochdynamischen Beschleunigungs- und Bremsprozesse, auf dessen Grundlage die Auslegung des Antriebsverbandes erfolgt. Darüber hinaus führen diese ungleichmäßigen Prozesse zu ungleichförmigen und nicht prognostizierbaren Leistungsverläufen in WZM und ganzen Werkhallen.



Bild 2: Gemessenes Wirkleistungsprofil am Anschluss des BAZ

Die eingesetzten Elektrolyt-Kondensatoren und Schwungräder als Energiespeicher in Produktionsmaschinen haben sich als Stand der Technik etabliert. Schwungräder decken dabei eine große Bandbreite an spezifischer Leistung für die Speicherung von Bremsenergie zwischen 100 W/kg und 50 kW/kg ab. Diese Art der Speicherung ist für BAZ jedoch ungünstig, da die hier vorliegenden dynamischen Prozesse einen leichten rotatorischen Energiespeicher mit Drehzahlen bis zu 100.000 U/min erfordern würden. Weiterhin ist die Speicherung unterschiedlicher Energiemengen über einen längeren Zeitraum notwendig [8]. Daher würden derartige Schwungräder große Investitionskosten erfordern und gleichzeitig einen schlechten Wirkungsgrad aufweisen.

Konventionelle Elektrolyt-Kondensatoren besitzen eine effektive Leistungsdichte von ca. 100 kW/kg. Ihre geringe Energiedichte (<0,1 Wh/kg) ist jedoch auf Grund des benötigten Bauraumes für den Einsatz in BAZ mit begrenzten äußeren Abmessungen nicht geeignet [9]. Deswegen wurden dafür moderne DSK, Lithium-Ionen-Batterien oder die Kombination von beiden Speichersystemen (Hybrid-Batterien) in Betracht gezogen.

Lithium-Ionen-Batterien besitzen eine geringe Leistungsdichte (weniger als 1 kW/kg). Ihre alleinige Nutzung in BAZ zur Vermeidung der Leistungsspitzen ist daher ungünstig. Der Einsatz eines Hybridbatteriesystems mit DSK besitzt durch die höhere Leistungsdichte die erforderlichen Eigenschaften zur Vermeidung von Leistungsspitzen. Diese ESS werden bereits im Bereich der erneuerbaren Energien und Elektrofahrzeuge erfolgreich angewandt [10, 11]. Aus ökonomischen Gründen sind DSK gegenüber den Hybridbatterien zu bevorzugen. Außerdem besitzen DSK mit ca. 10 kW/kg eine ausreichende Leistungsdichte. Aus diesen Gründen wird im Folgenden der Einsatz von DSK im Zwischenkreis des BAZ betrachtet.

### 4 Modellierung und Simulation von elektrischen Leistungsflüssen

Für die Untersuchung der elektrischen Leistungsaufnahme im Zwischenkreis wurde ein Energieverbrauchsmodell [12, 13] des Antriebsverbandes entwickelt, welches aus einem Spindelantrieb und drei Vorschubantrieben eines typischen BAZ besteht. Das vorliegende Modell ermöglicht die Analyse der verschiedenen ESS in WZM, wie z. B. DSK, und die Prognose ihrer Effizienz [14]. In Bild 3 lässt sich die Einteilung des Simulationsmodells in drei Betrachtungsebenen erkennen.



Bild 3: Antriebssysteme des Antriebsverbandes, dargestellt in Matlab/Simulink SimPowerSystems

#### 4.1 Betrachtungsebene A: einzelne Antriebe mit Wechselrichtern

Diese Ebene besteht aus den einzelnen geregelten Antrieben (Bild 3) mit ihren leistungselektronischen Stellgliedern. Für die Modellbildung der Motorspindel und der Vorschubantriebe wurde die SimPowerSystems Toolbox von Matlab/Simulink genutzt. Für die mathematische Beschreibung der Motoren und der Stromrichter auf der Basis konventioneller Halbleiter wurden die in [15], [16] genannten Veröffentlichungen genutzt. Die Motordrehzahlregelung mit den PI-Reglerstrukturen der Umrichter entspricht dem Stand der Technik.

Betrachtungsebene A dient der Bestimmung der Leistung, die beim Bremsprozess aus verschiedenen Geschwindigkeiten zurückfließt. Der durch das Bremsen entstehende Energieanteil, der für den nächsten Beschleunigungsprozess der Motorspindel und der Vorschubantriebe genutzt werden kann, lässt sich durch die folgende Gleichung berechnen [17]:

$$E_{dyn} = \frac{1}{2 \cdot 9,55} \left( M_{mot} \left( n_{mot \max} - n_{mot \min} \right) \cdot \eta_{Gr} \right) \cdot t + \frac{1}{2} \left( F_{mot} \left( V_{mot \max} - V_{mot \min} \right) \cdot \eta_{Gl} \right) 1 \cdot t,$$
(1)

$$\eta_{G} = \eta_{M} \cdot \eta_{WR}, \text{ - für Bremsen}$$
(2)  
$$\eta_{G} = \frac{1}{\eta_{M} \cdot \eta_{WR}}, \text{ - für Beschleunigung}$$
(3)

mit

 $E_{dvn}$  - Energieanteil für dynamische Vorgänge,

 $M_{mot}$  - max. Motormoment beim Bremsen oder Beschleunigen,

 $n_{mot \max}$  - Maximaldrehzahl am Beginn oder Ende des Vorgangs,

 $n_{mot\,min}$  - Minimaldrehzahl am Beginn oder Ende des Vorgangs,

 $F_{\scriptscriptstyle mot}\,$  - max. Motorkraft beim Bremsen oder Beschleunigen,

 $V_{motmax}$  - Maximalgeschwindigkeit am Beginn oder Ende des Vorgangs,

 $V_{motmin}$  - Minimalgeschwindigkeit am Beginn oder Ende des Vorgangs,

 $\eta_{\scriptscriptstyle Gr}\,$  - Gesamtwirkungsgrad für rotatorische Antriebe,

 $\eta_{\scriptscriptstyle Gl}$  - Gesamtwirkungsgrad für lineare Antriebe,

 $\eta_{G}$  - Gesamtwirkungsgrad für rotatorische und lineare Antriebe,

 $\eta_{\scriptscriptstyle M}\,$  - Wirkungsgrad Motor,

 $\eta_{\scriptscriptstyle W\!R}$  - Wirkungsgrad Wechselrichter,

t - Zeit des Vorgangs.

#### 4.2 Betrachtungsebene B: Energiespeichersystem

Die Ebene B in Bild 3 beinhaltet die für die Modellbildung und Optimierung der Leistungsflüsse notwendige ESS, die mit dem Zwischenkreis verbunden ist. Sie ist entscheidend für die Ermittlung der Energiemenge, die in den DSK gespeichert werden kann, für die Abschätzung der potentiellen Spitzenleistungsreduktion und für die Energieverbrauchsminimierung im Antriebsverband.

Das im Modell analysierte ESS mit DSK erreicht in Abhängigkeit von seiner Größe und der Art des Speichersystems (aktiv oder passiv) eine Gesamteffizienz von 85-98 %. Durch den Einsatz eines aktiven Systems mit einem DC/DC-Wandler zwischen den DSK und dem Zwischenkreis gewinnt das Speichersystem weiter an Flexibilität [18]. Die Effizienz aktiver Systeme ist jedoch durch die Energieverluste im DC/DC-Wandler – der Wirkungsgrad liegt bei maximal 95 % – beeinträchtigt. Aus diesem Grund wurde im Modell für die Senkung des Energieverbrauchs und die Vermeidung von Spitzenleistungen die Einbindung eines passiven Speichersystems analysiert. Hierbei sind die DSK direkt mit dem Zwischenkreis verbunden. Die Beschreibung zum Modell und zur Vorgehensweise bei der Dimensionierung des untersuchten ESS erfolgt in Kapitel 5.

#### 4.3 Betrachtungsebene C: Ein-/Rückspeiseeinheit

Ebene C beinhaltet den netzseitigen Umrichter inklusive dem Netzfilterpaket, bestehend aus Netzfilter und Netzdrossel. Die mathematische Beschreibung des netzseitigen Umrichters basiert auf den in 4.1 benannten Regeln. Die Regelung der Zwischenkreisspannung wird durch einen PI-Regler umgesetzt, dessen typisches Blockschaltbild in Bild 4 dargstellt ist. Die Parameter des als der PI-Regler ausgeführten Einspeisereglers ( $K_p$ ,  $K_i$ ) sind für den Energieverbrauch bei hochdynamischen Betriebsbedingungen entscheidend, da sie über die Intensität und die Menge der Bremsenergiespeicherung bzw. der -rückspeisung bestimmen.



#### Bild 4: Blockschaltbild des Reglers der Zwischenkreisspannung [19]

In Werkhallen mit strengen Anforderungen elektromagnetische an die Verträglichkeit ist der Umrichter zusätzlich mit einem Netzfilter und einer ausgerüstet (Netzfilterpaket im Netzdrossel Bild 3), um ausgehende leitungsgebundene Störungen auf die Grenzwerte nach EN 61800-3 zu begrenzen. Die Netzdrossel wird für die Reduzierung der niederfrequenten Harmonischen und die Entlastung des Umrichters benötigt. Die Dämpfungseigenschaften des Netzfilters sind so abgestimmt, dass sie den Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit für den Frequenzbereich ab 2 kHz entsprechen.

Sie schließen den Frequenzbereich zwischen 150 kHz bis 30 Mhz mit ein. Dadurch wird eine Netzanpassung mit unbekannten Netzeigenschaften erreicht.

#### 4.4 Validierung des Modells

Für die Simulation werden zeitlich variable, realistische Prozesslasten benötigt, die sich aus der Bearbeitungsbahndynamik und den Prozesskräften zusammensetzen. Die Zerspankräfte wurden in Versuchen messtechnisch ermittelt und wirken als Störgröße auf das Antriebsmodell [20]. Alternativ können die Daten auch aus einem Prozessmodell ermittelt werden. Das Energieverbrauchsmodell ist damit universell für unterschiedliche Bearbeitungstechnologien anwendbar.



Bild 5: Gemessene und simulative Energie- und Leistungsaufnahme des Bearbeitungszentrums

Die Validierung des Modells wurde durch Energiemessungen am Antriebsverband im BAZ durchgeführt. Bild 5 zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der Leistungsund Energieverläufe von Simulation und Messung während eines typischen Fräsprozesses. Mit dem Modell ist eine Analyse der Bremsenergieflüsse im Zwischenkreis während der Bremsprozesse möglich, wodurch der Energieverbrauch und die quantitative Abschätzung der ins Netz zurück gespeisten Bremsleistung ermittelt werden kann.

### 5 Optimierung der Bremsenergiekreisläufe

Die Dimensionierung des Energiespeichers mit DSK zur Speicherung der Bremsenergie kann auf Basis folgender Überlegungen berechnet werden. Der Leistungsbedarf im Antriebsverband von WZM unterliegt bei Beschleunigungs- und Bremsprozessen starken Schwankungen. Wie aus Tabelle 1 folgt, zieht die Motorspindel während der Beschleunigungsvorgänge die größte Energiemenge aus dem Netz und verursacht dabei die höchsten Spitzenleistungen. Im Bild 6 sind die Profile der gemessenen Energie- und Leistungsverläufe bei Drehzahlwechsel der Spindel bis zu 20.000 U/min dargestellt. Die Leistungsverläufe sind gekennzeichnet durch die dynamischen Systemeigenschaften und zeigen eine Leistungseinspeisung von bis zu 24,6 kW und eine Leistungszurückspeisung von -16,2 kW. Die nicht betrachtete Grundlast beträgt in dieser Anwendung ca. 2,1 kW Beim Beschleunigen der Motorspindel wird elektrische Energie in kinetische Energie umgewandelt. Beim Bremsen wird diese Energie, reduziert um die Verluste, wieder zurück ins Netz gespeist.



Bild 6: Energie- und Leistungsaufnahme während der Bescheunigung und Abbremsung der Spindel auf bzw. von 20.000 U/min

Um derartige Leistungsverläufe durch DSK-Module effizient auszugleichen, müssen die Energiespeicher optimal dimensioniert werden, wozu die Leistungsprofile genutzt werden. Der Anteil der benötigten Energie und Wirkleistung im

Antriebsverband ist durch die Spindelbeschleunigung und deren maximale Drehzahl definiert (Bild 6). Die Energie, die dem Zwischenkreis während des Beschleunigungsvorganges entnommen wird. sollte nicht zu einer Spannungsabsenkung Nominalspannung (600V) von mehr als der regelungsdefinierte ±20 V führen. Daher wird die zulässige Energiemenge auf folgender Basis berechnet:

$$E = \frac{1}{2} C \left( U_{\text{nom}}^2 - U_{\text{min}}^2 \right) ,, \tag{4}$$

wobei  $U_{\rm nom}$  und  $U_{\rm min}$  die nominalen und minimalen Spannungen im Zwischenkreis darstellen.

Das Energieprofil im Bild 6 zeigt einen Energieverbrauch von  $\Delta E = 36,9$  kWs bei der Beschleunigung der Spindel. Mit Hilfe der Gleichung (4) kann die benötige Kapazität des Energiespeichers unter der Bedingung, dass die Spannungsänderungen aufgrund der internen Widerstände nicht mehr als 5V betragen dürfen, berechnet werden:

$$C_r = \frac{2 \cdot \Delta E}{\left(U_{\text{nom}}^2 - U_{\text{min}}^2\right)}.$$
(5)

In der Praxis kann die definierte Kapazität  $C_r$  von ca. 4,55 F mithilfe von 11 DSK-Modulen mit jeweils 50 F/56 V erreicht werden. Der gesamte innere Widerstand im Energiespeicher von 132  $m\Omega$  ist dabei geringer als der maximal zulässige von 170  $m\Omega$ , der die definierte Spannungsänderung von 5 V verursachen würde.

Bild 7 zeigt die simulierte Energie- und Leistungsaufnahme vom Antriebsverband des BAZ und bestätigt die Möglichkeit der Spitzenleistungsreduktion und Energieverbrauchssenkung durch Energiespeicher. Die Diagramme zeigen, dass die Anwendung des passiven Energiespeichers zur Senkung der Leistungsspitzen um 84,1% sowie zu Senkung des Energieverbrauchs um 6,4% beiträgt. Das ESS kann dabei fast die komplette Speicherung der kinetischen Energie ermöglichen.



**Bild 7** Simulierte Energie- und Leistungsaufnahme eines Antriebsverbandes mit und ohne Energiespeicher

weitere Einsatzmöglichkeit des ESS liegt in der Stützung Eine der Zwischenkreisspannung bei Spannungseinbruch und Spannungsunterbrechung. Diese wirken sich negativ auf den Energieverbrauch von WZM aus, was durch die Simulation mithilfe des beschriebenen Modells nachgewiesen wurde [21]. Dafür wurden in das Modell sowohl die bereits erwähnte Leistungselektronik als auch eine entsprechende 3-phasige, programmierbare Spannungsquelle implementiert. Im Ergebnis zeigt sich ein Anstieg des Energieverbrauchs um 24,3 % bei einem Spannungseinbruch im Netz von 40 % gegenüber der Normalspannung. Solche Einbrüche können, ebenso wie Spannungsunterbrechungen, den Betriebsablauf (Steuerungsausfall) stören oder im schlimmsten Fall zum Stillstand bringen. Kurze Spannungseinbrüche von bis zu 20 ms können bspw. auftreten, wenn der lokale Energieversorger zwischen zwei Netzen umschaltet. Aufgrund schlechter Netzqualität, besonders in Schwellenländern, oder durch das Starten von Maschinen mit hoher Anlaufleistung im firmeninternen Netz entstehen oft Unterbrechungen von bis zu 200 ms. Länger andauernde Unterbrechungen lassen sich in der Regel auf Defekte oder schwere Kurzschlüsse in der Energieinfrastruktur zurückführen [22].

### 6 Messtechnische Analyse der Leistungsflüsse im Zwischenkreis mit Doppelschicht-Kondensatoren

Die messtechnischen Untersuchungen des Energieverbrauchs im Zwischenkreis wurden an einem Versuchsstand durchgeführt, der über einen ESS mit 280 DSK in Reihenschaltung und insgesamt 600 F verfügt. Der Versuchsstand enthält die für WZM typische Ein-/Rückspeiseeinheit inklusive Netzfilterpaket und wurde bei den Vergleichsmessungen mit und ohne Energiespeicher genutzt.

Die messtechnischen Untersuchungen belegen die Reduzierung der Spitzenleistung im Antriebsverband beim Betrieb des Zwischenkreises mit DSK (Bild 8). Die Spannungsänderungen im Zwischenkreis bleiben dabei in den vorgeschriebenen Grenzen. Außerdem wird der erforderliche Spitzenstrom komplett durch den Energiespeicher abgedeckt.



Bild 8: Leistungs-, Zwischenkreisspannungs- und Stromprofile während der Beschleunigung und Abbremsung eines elektrischen Antriebes

Bild 9 bestätigt die flexible Einsatzmöglichkeit der DSK, da die im ESS gespeicherte Energie ausreichend ist, um die Spitzenleistungen bei verschiedenen Beschleunigungsprozessen abzudecken. Darauffolgend wurde die Abhängigkeit der gespeicherten Energiemenge im Hinblick auf die eingestellten Parameter des Zwischenkreisspannungsreglers berücksichtigt. Durch weitere, im Bild 10 dargestellte Messungen konnte nicht nur eine signifikante Senkung der Spitzenleistung sondern auch eine Verringerung des Netzenergiebezuges beim Anlauf des Motors mithilfe des ESS nachgewiesen werden. Für den effizienten Einsatz dieses Systems in verschiedenen Szenarien ist daher eine Anpassung der Parameter für die Regelung der Zwischenkreisspannung nötig.



Bild 9 Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge eines Antriebes



**Bild 10** Energie- und Leistungsaufnahme eines Antriebs an der Ein-/Rückspeiseeinheit bei der Beschleunigung auf 1100 U/min (links) und 1400 U/min (rechts) mit und ohne ESS

Die simulativen and messtechnischen Analysen der elektrischen Energie in WZM bestätigen den negativen Einfluss von Spannungsschwankungen auf die Energieeffizienz. Die DIN EN 50160 erlaubt schnelle Spannungsänderungen in Niederspannungsnetzen von bis zu 10 %. Liegen diese darüber, wird bei Änderungen zwischen 10 % und 90 % von Spannungseinbrüchen und ab 90 % von Spannungsunterbrechungen gesprochen. Spannungseinbrüche mit einer Dauer von weniger als einer Sekunde dürfen nach DIN EN 50160 bis zu 1000 Mal jährlich auftreten. Bild 11 stellt Spannungseinbrüche in Niederspannungsnetzen dar, die eine Dauer von 10 ms bis 60 s aufweisen und somit auch zur Erhöhung des Energieverbrauchs aufgrund des größeren Einspeisestromes führen.



Bild 11 Statistische Auswertung der Spannungseinbrüche in Niederspannungsnetzen [23]

Die Messergebnisse im Bild 12 bestätigen, dass das ESS in der Lage ist, sogar bei dauerhaften Spannungsunterbrechungen die Zwischenkreisspannung in den vorgeschriebenen Grenzen zu halten. Wird die aus der Analyse ableitbare Empfehlung zur Verbesserung der Stromzufuhr umgesetzt, hilft dies, Produktionsfehler (Ausschuss) und Stillstandszeiten zu vermeiden, welche in 7 % der Fälle aus einer unzureichenden Netzqualität resultieren [24].



**Bild 12:** Leistungs-, Zwischenkreisspannungs- und Stromverläufe während der Spannungsunterbrechungen

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde ein ESS mit DSK für den Zwischenkreis von WZM vorgeschlagen, welches mit Hilfe eines Energieverbrauchsmodells analysiert und an einem Versuchsstand messtechnisch untersucht wurde.

Die Simulationsergebnisse zeigen die Machbarkeit und die Effizienz des vorgeschlagenen Speichersystems. Insbesondere wurde die Vermeidung von netzseitiger Spitzenleistung bei gleichzeitiger Steigerung der Gesamteffizienz erreicht. Allgemein lassen sich durch den Einsatz von DSK im Zwischenkreis des Antriebsverbandes von WZM folgende Vorteile ableiten:

- Verringerung des Netzenergiebezugs bei Beschleunigungsvorgängen im Antriebsverband,
- kleinere Dimensionierung der Eingangsbaugruppen durch die Begrenzung der aus dem Netz gezogenen Spitzenleistung,

- Vermeidung von Stillstandszeiten aufgrund von Netzausfällen durch die Nutzung der in den DSK gespeicherten Energie,
- optimale Dimensionierung der Ein-/Rückspeiseeinheiten von Antriebsverbänden,
- · Minimierung von Ausfallzeiten und Produktionsfehlern durch Netzausfälle und
- Speicherung regenerativ erzeugter Energie auf Anlagenebene (energieautarke Fabrik).

Im nächsten Schritt wird der Zwischenkreis des Antriebsverbandes einer WZM durch eine optimal dimensionierte ESS, basierend auf DSK, erweitert. In den folgenden Untersuchungen werden die Energieverluste aufgrund des inneren Widerstandes und die Lebensdauer der DSK analytisch und messtechnisch abgeschätzt und statistisch beurteilt.

### Literaturangaben

- [1] Neugebauer, R.; Kolesnikov, A.; Richter, M.: Energy Efficient Storage Systems in the DC Link for the Drive Unit of Machine Tools, Proceedings of the 14<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications EPE-2011, Birmingham, UK, September 2011, ISBN: 9789075815153, pp. 1-10
- [2] Neugebauer, R.; Kolesnikov, A.; Richter, M.; Paetzold, J.: Improvement of the Power Factor Correction in Machine Tools, Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC-2010 in Ohrid, Macedonia, September 2010, T13 pp. 11-16
- [3] Reichl, G.; Schäfers, E.; Dietz, B.: Dimensionierung und optimale Bewegungsführung von Servopressen, Tagungsband SPS/IPC/DRIVES/Elektrische Automatisierung Systeme und Komponenten, Nürnberg, November 2011, S. 301-308
- [4] Krejtschi, J.: Energieoptimale Bewegungsführung von Servopressen: Antriebsdimensionierung, Simulation und Validierung, 3<sup>rd</sup> International Conference on Accuracy in Forming Technology ICAFT 2009, Chemnitz, Germany, November 2009, pp. 349-361
- [5] Diaz, N.; Helu, M.; Jarvis, A.; Tönissen, S.; Dornfeld, D.; Schlosser, R.: Strategies for Minimum Energy Operation for Precision Machining, The Proceedings of Machine Tool Technologies Research Foundation (MTTRF),

Annual Meeting 2009, [online] available: http://sustainablemanufacturing.biz/10564.html

- [6] Götze, U.; Koriath, H.-J.; Kolesnikov, A.; Lindner, R.; Paetzold, J.; Scheffler, C.: Energetische Bilanzierung und Bewertung von Werkzeugmaschinen, 1. Internationales Kolloquium eniPROD, Chemnitz, 2010, S. 157-184
- [7] Avram, O. I.; Xirouchakis, P.: Evaluating the use phase energy requirements of a machine tool system, Journal of Cleaner Production, 2011, no. 19, pp. 699-711
- [8] Ribeiro, P.F.; Johnson, B.K.; Crow, M.L.; Arsoy, A.; Liu, Y.: Energy storage systems for advanced power applications, Proceedings of the IEEE, December 2001, Vol. 89 pp. 1744-1756
- [9] Beres, T.; Olejar, M.; Dudrik, J.: Bi-directional DC/DC Converter for Hybrid Battery, Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC-2010, Ohrid, Macedonia, September 2010, T9 pp. 78-81
- [10] Tankari, M. A.; Camara, M. B.; Dakyo, B.; Nichita, C.: Efficient management of energy transfer in wind diesel hybrid system-battery and Ultracapacitors, Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC-2010, Ohrid, Macedonia, September 2010, T12 pp. 108-113
- [11] Richter, M., Zinser, S., Stiegeler, M., Mendes, M., Kabza, H.: Energy Management for Range Enlargement of a Hybrid Battery Vehicle with Battery and Double Layer Capacitirs, Proceedings of the 14<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications EPE-2011, Birmingham, UK, September 2011, ISBN: 9789075815153, pp. 1-6
- [12] Dietmair, A.; Verl, A.; Wosnik, M.: Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile. In: wt Werkstatttechnik online, 2008, 98 (7/8), S. 640-645
- [13] Blank, F.; Roth-Stielow, J.: Vergleich der Energieeffizienz von Antriebssystemen durch Simulation, Tagungsband SPS/IPC/DRIVES/Elektrische Automatisierung Systeme und Komponenten, Nürnberg, November 2011, S. 481-489
- [14] Neugebauer, R.; Kolesnikov, A.; Hoffmann, M.: Simulative Analyse des elektrischen Energieverbrauchs von Produktionsanlagen, Tagungsband des Internationalen ETG-Kongresses 2011, Würzburg, November 2011, Paper 5.22, S. 1-8

- [15] Bose, B. K.: Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, 2002
- [16] Mohan, N.; Undeland, T. M.; Robbins, W. P.: Power Electronics, John Wiley & Sons, Hoboken, 2003
- [17] Configuration Manual SIMODRIVE 611 digital Drive Converters, 05/2008,
   [online] available: http://www.automation.siemens.com/doconweb/content.asp?item=12410&cd= sinumerik\_simodrive\_04\_2010\_e&scope=all
- [18] Ciccarelli, F.; Iannuzzi, D.; Tricoli, P.: Speed-based supercapacitor state of charge tracker for light railway vehicles, Proceedings of the 14<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications EPE-2011, Birmingham, United Kingdom, September 2011, pp. 1-12
- [19] List Manual SINAMICS S120/S150, 10/2008, [online] available: http://www.automation.siemens.com/doconweb/pdf/SINAMICS\_1008\_E/LH1.p df?p=1
- [20] Zirn, O.; Weikert, S.: Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme - Eine praxisnahe Einführung, Springer Verlag, Berlin, 2006
- [21] Kolesnikov, A.; Wabner, M.: Die Qualität elektrischer Energie und deren Auswirkungen auf Maschinen und Anlagen, Tagungsband des Methodenworkshops "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung", Chemnitz, Oktober 2010, S. 55-66
- [22] Schäfer, R.: Messgerät zeigt Qualitätsprobleme in der Stromversorgung auf. In: MM Maschinenmarkt, 2009, Ausgabe 44, S. 42-43
- [23] Power Engineering Guide: Transmission and Distribution, Siemens, 4-th Edition, 2006
- [24] Fromm, L.: Stromqualität messen. In: VDI-Z Integrierte Produktion, 2010, Nr.6, S. 58