

# Die Qualität elektrischer Energie und deren Auswirkungen auf Maschinen und Anlagen (*The quality of electrical energy and its effects on machinery and equipment*)

Kolesnikov, A.<sup>1</sup>; Wabner, M.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TU Chemnitz, Professur für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik

<sup>2</sup> Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU)

## **Abstract**

Für die Verbesserung der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen (WZM) bedarf es der Modellbildung und Simulation von elektrischen Energieflüssen sowie deren Optimierung. Besonders relevant ist dabei die messtechnische und simulative Analyse der Verlustenergien in den Antriebskomponenten, die auch aufgrund von Qualitätsschwankungen der elektrischen Energie entstehen. Im vorliegenden Beitrag wird auf die Modellbildung und Simulation von elektrischen Energieflüssen in WZM und Fertigungssystemen eingegangen und es werden Einflüsse von Netzspannungsschwankungen und -unterbrechungen auf den Energieverbrauch diskutiert. Weiterhin werden Maßnahmen aufgezeigt, den Energieverbrauch durch Optimierung von Energieflüssen zu verringern.

*The improvement of the energy efficiency of machine tools requires the modeling and simulation as well as the optimization of electrical energy flows. Here, in particular, measurement- or simulation-based analyses of energy losses of drive components – often caused by fluctuations of the energy quality – are vitally important. The paper firstly provides an overview of the simulation of energy flows in machine tools and manufacturing systems. Secondly, the impacts of voltage fluctuations and interruptions on the energy demand are discussed. Finally, appropriate measures for the reduction of the energy demand by optimizing energy flows are presented.*

## **Keywords:**

elektrische Energie, Qualität elektrischer Energie, Werkzeugmaschinen  
*electrical energy, energy quality, machine tools*

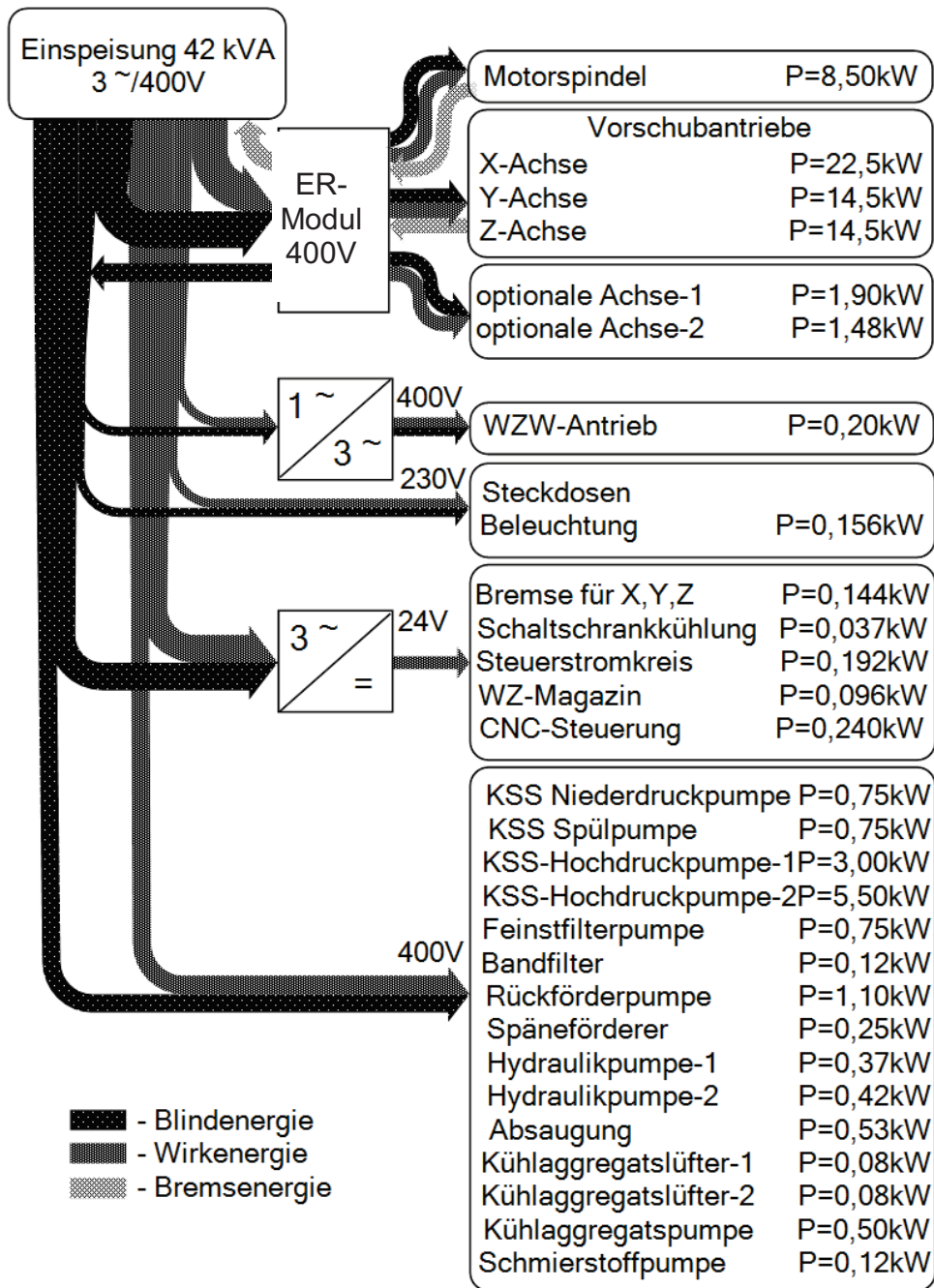
R. Neugebauer, U. Götze, W.-G. Drossel (Hrsg.), *Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung technischer Systeme – Erkenntnisse aus dem Spitzentechnologiecluster eniPROD*, Tagungsband zum 1. und 2. Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1 "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD, *Wissenschaftliche Scripten*, Auerbach, 2013.  
URN: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-109067>

# 1 Strukturierung von elektrischen Energieflüssen in Werkzeugmaschinen

Im Bild 1 ist zu erkennen, dass die Wirkleistung nicht nur aus der eingespeisten elektrischen Leistung, sondern auch aus der ins Netz zurückgespeisten Bremsenergie besteht. Außerdem ist für WZM die Blindleistung, welche in Grundscheinleistung (auch Verschiebungsblindleistung  $Q_V$ ) und Verzerrungsblindleistung ( $Q_D$ ) eingeteilt werden kann, relevant [1]. Um solche Energieflüsse zu systematisieren, wurden den Verbrauchergruppen verschiedene Spannungsebenen zugeordnet und deren jeweilige Nennanschlussleistungen aufgeführt [2]. Bild 1 zeigt prinzipiell das elektrische System eines 3-Achs-Fräsbearbeitungszentrums (BAZ) und dessen elektrische Energieflüsse. Der Energiefluss setzt sich aus Wirk- und Blindleistung (schwarze und dunkelgraue Pfeile) zusammen. Die hellgrauen Pfeile am Ein-Rückspeisungs-Modul (ER-Modul) deuten an, dass die Bremsenergie der rückspeisefähigen Haupt- und Nebenantriebe in das Netz zurückfließt und somit ein Energiekreislauf gebildet wird. Die gemessenen Anteile zurückgeführter Energie sind in Tabelle 1 für einige Spindeldrehzahlen und Verfahrgeschwindigkeiten (Eilgänge) dargestellt. Es zeigt sich, dass die eingespeiste kinetische Energie der Vorschubantriebe zu etwa 30 % und 44 %, die Energie der Motorspindel zu höchstens 62 % zurückgeführt wird.

**Tabelle 1:** Anteil der Energierückgewinnung

	<b>Geschwindigkeit (U/min* [m/min]**)</b>	<b>Bremsenergie (Ws)</b>	<b>Anteil der rück- gespeisten Brems- energie (%)</b>
<i>Motorspindel*</i>	20.000	20.206	62,36
	10.000	4.870	56,83
	5.000	1.019	45,80
<i>Y-Achse**</i>	65	3.751	29,49
<i>Z-Achse**</i>	65	1.962	43,86



**Bild 1:** Elektrische Energiekreisläufe und Nennleistungen eines Bearbeitungszentrums

## 2 Anforderungen an die Energiequalität im Niederspannungsnetz

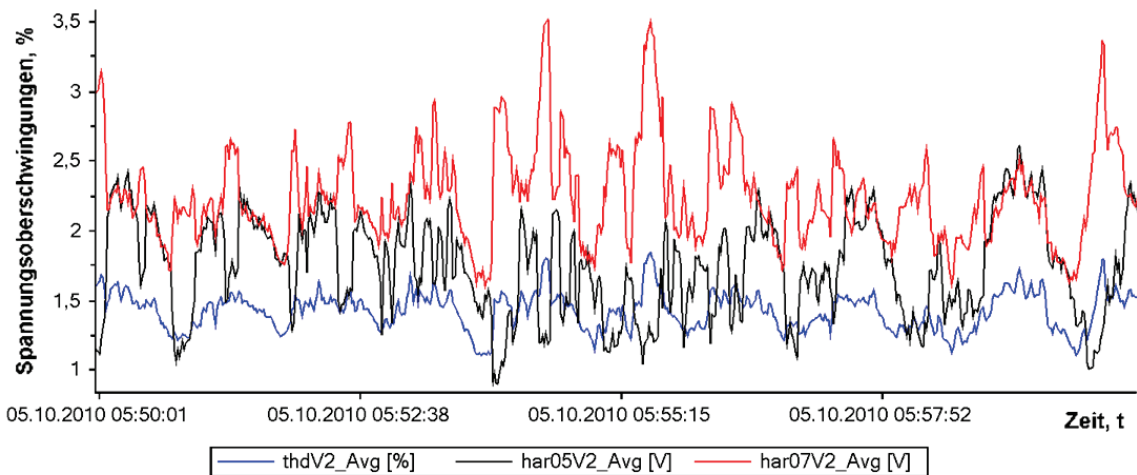
Die Anforderungen an die Qualitätsparameter der Elektroenergie im Niederspannungsnetz, wie z. B. Oberschwingungen, Spannungsunsymmetrien, Spannungseinbrüche und Spannungsänderungen, sind reglementiert und in Tabelle 2 dargestellt [3]. Die allgemeinen Tarife beinhalten die Bedingungen, dass der Gebrauch der Elektrizität mit einem Leistungsfaktor von 0,8 und bei einem Verschiebungsfaktor  $\cos \varphi_1$  zwischen 0,9 kapazitiv und 0,8 induktiv erfolgt [4]. Schwankungen dieser Qualitätsparameter beeinflussen die Energieeffizienz in WZM meist negativ. Oberschwingungen bspw. erhöhen die Strombelastung der Motoren und stören die Stromrichtersteuerungen, rufen ein oszillierendes Drehmoment bei Motoren hervor und erzeugen einen Stromfluss mit 150 Hz in Nullleitern. Spannungsschwankungen führen zum Abschalten und zur Fehlfunktion von Motoren und elektronischen Geräten. Spannungsunsymmetrien führen bei elektrischen Maschinen zu stärkerer Erwärmung und gegenläufigen Drehmomenten, was eine höhere mechanische Beanspruchung zur Folge hat und bei leistungselektronischen Schaltungen eine erhöhte Welligkeit der Gleichspannung und eine Verstärkung der Störaussendung nichtcharakterisierter Oberschwingungen hervorruft. Auch einphasiger und zweiphasiger Anschluss von Verbrauchern führt bei gleicher Leistung zu einer höheren Strombelastung der Anschlussleitungen und zu nicht vollständiger Belastung der Drehstromtransformatoren.

**Tabelle 2:** Anforderungen an die Qualität der Elektroenergie (alle Grenzwerte gelten für Anschlusspunkte in industrieller Umgebung nach DIN EN 50160 und DIN EN 61000-2)

<b>Qualitätsparameter im Niederspannungsnetz</b>	<b>Reglementierte Werte</b>
Blindleistungsaufnahme $Q$	$\cos \varphi_1 = 0,9$ (kap., $Q_1 < 0$ ) ... $1(Q_1 = 0)$ ... $0,8$ (ind., $Q_1 > 0$ )
Flickerstärke (während 95% der Woche)	Flickerpegel $P_{it} \leq 1$
Oberschwingungen (95% der 10 min-Mittelwerte)	$THD \leq 8\%$ für $v = 2..40$
Frequenz (10 s-Mittelwert der Grundfrequenz)	50 Hz $\pm 1\%$ während 95% einer Woche 50 Hz + 4% / -6% während 100% einer Woche
Spannungshöhe	Dreileiter-Drehstromnetze $U_n = 400$ V zw. zwei Außenleitern Vierleiter-Drehstromnetze $U_n = 230$ V zw. Außenleiter und Neutralleiter

Spannungsunsymmetrien (95% der 10 min-Effektivwerte einer Woche)	$U_{\text{gegen}}/U_{\text{mit}} \leq 2\%$ $U_{\text{gegen}}/U_{\text{mit}} \leq 3\%$ (bei teilweise ein- und zweiphasigem Anschluss von Verbrauchern)
Spannungseinbrüche	$10\% < \Delta u \leq 70\%$ für $t \leq 1\text{s}$ zw. 10 und 1000 Mal pro Jahr
Schnelle Spannungsänderungen	$\Delta u \leq 5\%$ , bis zu 10 % mehrmals kurzzeitig am Tag
Langsame Spannungsänderungen (95% der 10 min-Mittelwerte der Netzspannung)	$U = U_n \pm 10\%$
Kurzzeitunterbrechungen	$t \leq 1\text{ s}$ für 70 % aller Unterbrechungen, zw. 10 und 500 Mal pro Jahr
Langzeitunterbrechungen	$t > 3\text{ min}$ , 10 – 50 Mal pro Jahr

Die Analyse der elektrischen Energie in einer Werkhalle bestätigt die negativen Einflüsse von Oberschwingungen und kurzzeitigen Spannungsimpulsen auf die Energieeffizienz. In Bild 2 sind die fünfte und siebente Oberschwingung dargestellt, welche durch die Leistungselektronik der WZM verursacht werden. Die in Tabelle 3 dargestellten Spannungsimpulse, die auch die Qualität elektrischer Energie charakterisieren, können auf Kommutierungsprozesse in der Werkhalle zurückgeführt werden.



**Bild 2:** Verlauf des prozentualen Anteils ausgewählter Spannungsüberschwingungen in einer Werkhalle

**Tabelle 3:** Spannungsimpulse in einer Werkhalle

<b>Phase</b>	<b>Start</b>	<b>Up/Down</b>	<b>Peak+ (V)</b>	<b>Peak- (V)</b>	<b>Delta+ (V)</b>	<b>Delta- (V)</b>	<b>F/S</b>
1	04.10.2010 20:48:02.13	Down	-34,00	-348,00	213,00	100,00	S
3	04.10.2010 21:03:59.36	Up	304,00	37,00	267,00	0,00	S

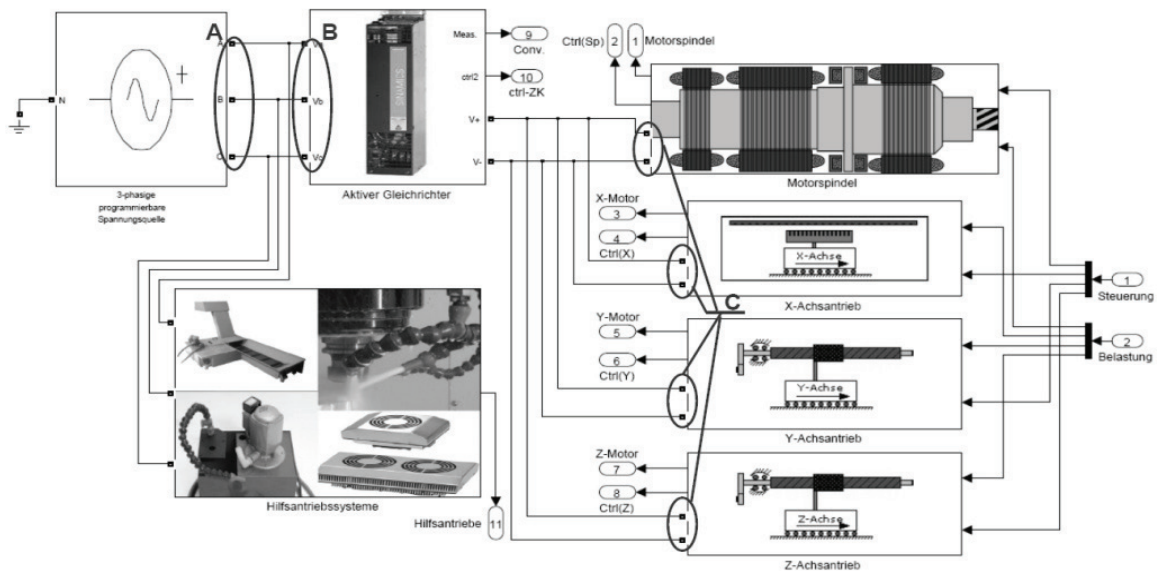
### **3 Modellierung und Simulation von elektrischen Energieflüssen**

Für die Untersuchung der Energieflüsse wurde ein Energieverbrauchsmodell [5, 6, 7] entwickelt, welches sowohl aus dem Antriebsverband als auch aus den Hilfssystemen und Hilfsantrieben besteht. Das vorliegende Modell ermöglicht die Untersuchung der Effizienzpotentiale verschiedener Maßnahmen, wie z. B. Bremsenergieerückspeisung, aktive Blindleistungskompensation (BLK), Erweiterung des Spannungszwischenkreises (ZK) für die geregelten Hilfsantriebssysteme und Netzurückwirkungsoptimierung in WZM.

Das in Bild 3 dargestellte Simulationsmodell lässt sich in drei Betrachtungsebenen einteilen [2]:

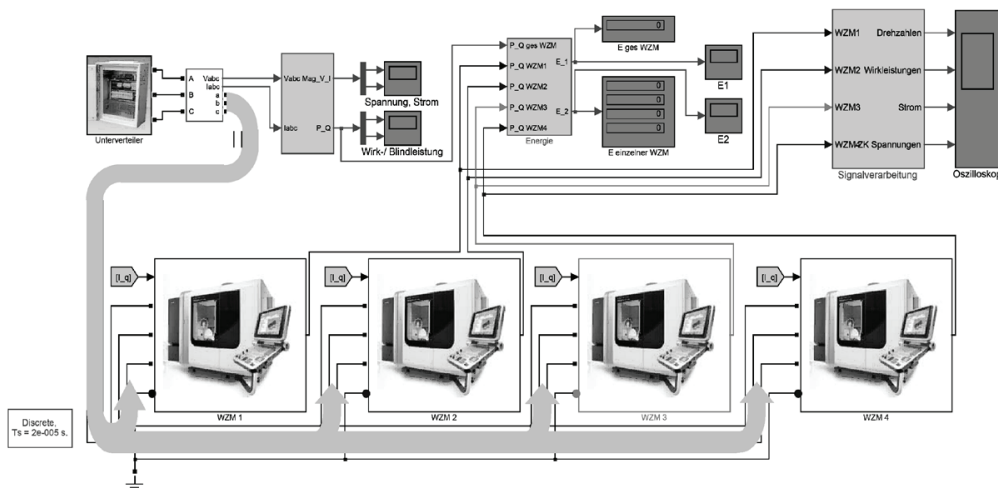
- Die Gesamtleistungsaufnahme, die sowohl den geregelten Antriebsverband mit Haupt- und Nebenantrieben als auch unregelmäßige Hilfsantriebssysteme beinhaltet (Betrachtungsebene A),
- die einzelnen Umrichter des Antriebsverbandes (Betrachtungsebene B) und
- Wechselrichter der einzelnen Antriebe wie Motorspindel, Linearmotor und klassische Linearachsen mit Kugelgewindetrieben (Betrachtungsebene C).

Die genaue Kenntnis über das Zusammenspiel der Hilfsantriebssysteme mit dem Antriebsverband ermöglicht die Analyse der Blindleistung und ihre Optimierung. Der Antriebsverband an sich ist entscheidend für die Untersuchung der Bremsenergie, da in seinem gemeinsamen ZK die Prozesse der Bremsenergiespeicherung sowie der Rückspeisung ins Netz ablaufen [8]. Die Untersuchung der Oberschwingungen und anderer Qualitätsparameter wird durch die simulierte Leistungselektronik und die einstellbare Energiequelle ermöglicht.



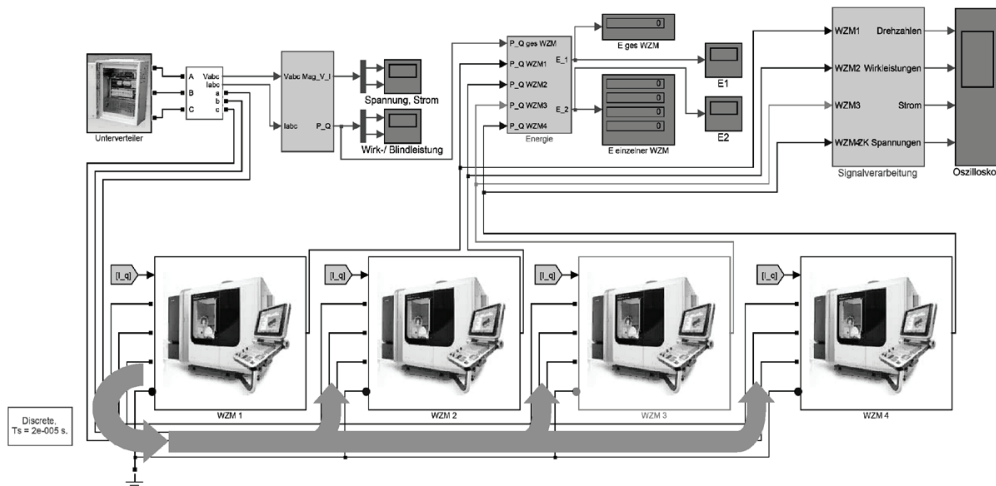
**Bild 3:** Antriebssysteme des Bearbeitungszentrums, dargestellt in Matlab/SIMULINK SimPowerSystems

Für die Analyse der Netzrückwirkungen auf der Fertigungssystemebene wurden sowohl die bereits erwähnten Messungen durchgeführt als auch ein entsprechendes Simulationsmodell erarbeitet. Das vorliegende Modell ermöglicht die Untersuchung der Blindleistungskreisläufe, wie in Bild 4 dargestellt, der Bremsenergierückspeisung, der Spannungseinbrüche und Netzspannungsschwankungen sowie der Einflüsse des Stromrichters und unsymmetrischer Belastungen zwischen mehreren WZM.



**Bild 4:** Blindleistungsaufnahme auf Fertigungssystemebene

Eine bereits analysierte Maßnahme zur Optimierung der Netzqualität zeigt Bild 5. Aufgrund der aktiven BLK zwischen mehreren WZM wird die Blindleistungsaufnahme durch das Netz vermieden. Das Modell ermöglicht mit geringem Aufwand die gleichzeitige Analyse der Qualität der elektrischen Energie an mehreren Messstellen. Es kann gezeigt werden, wie groß die Blindleistungsaufnahme einzelner WZM ist und wie sie den gesamten Energieverbrauch beeinflusst.

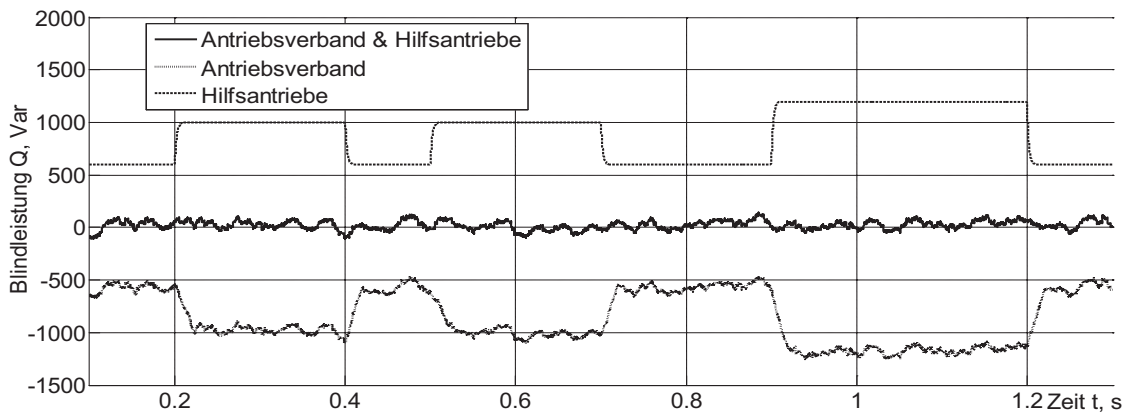


**Bild 5:** Aktive Blindleistungskompensation auf Fertigungssystemebene

## 4 Minderung der Blindleistungsaufnahme

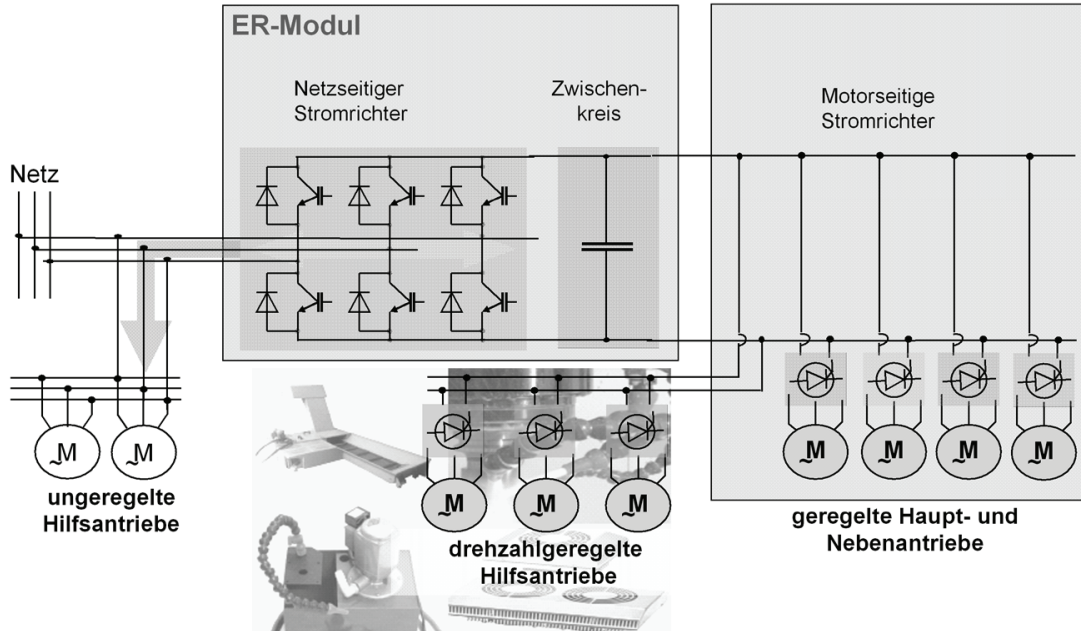
Ein möglicher Optimierungsansatz für die Blindleistungskompensation ist in Bild 6 dargestellt. Es wird gezeigt, dass die Blindleistungsaufnahme für Hilfsantriebssysteme durch das ER-Modul kompensierbar ist. Das Modell der aktiven BLK durch den Umrichter ist in Bild 7 dargestellt. Obwohl damit zusätzliche Kompensationsanlagen vermieden werden können, führen existierende Konzepte der aktiven BLK zu zusätzlichen Strömen im Umrichter und in Folge dessen zu höheren Verlusten bei einem niedrigeren Leistungsfaktor.





**Bild 6:** Verläufe der Blindleistungsaufnahme eines Bearbeitungszentrums

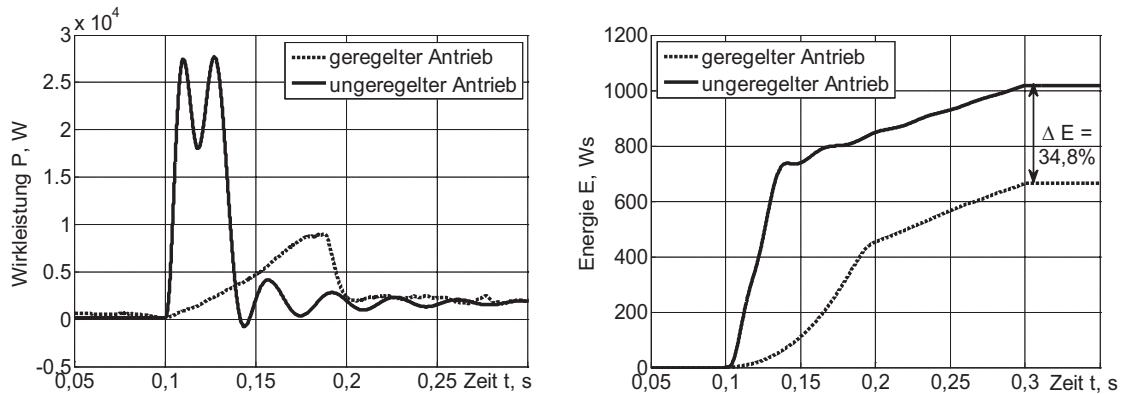
Eine weitere Möglichkeit zur Minderung der Blindleistungsaufnahme liegt in der synergetischen Erweiterung. Es wird die Möglichkeit untersucht, geregelte Hilfsantriebe, die bereits vermehrt zur Steigerung der Energieeffizienz in WZM eingesetzt werden, direkt aus dem ZK zu speisen, wie in Bild 7 dargestellt. Dabei würden keine Blindleistungen entstehen und eine optimale Dimensionierung der Gleichrichter wäre möglich. Hierbei werden Teile des unregulierten Hilfsantriebssystems als stromrichtergergelte Antriebe geschaltet und über den ZK gespeist.



**Bild 7:** Modell der aktiven BLK durch den Umrichter

Bild 8 zeigt das Einsparpotential, welches bei einem Hilfsantrieb mit 3 kW Leistungsaufnahme entsteht. In den Diagrammen werden jeweils geregelte (gestrichelte Linie) und unregelte (durchgehende Linie) Hilfsantriebe gegenübergestellt. Links ist die jeweilige Leistungsaufnahme, rechts die Aufnahme an Wirkenergie im glei-

chen Zeitraum dargestellt. Darüber hinaus verursacht der unregelmäßige Antrieb zusätzlich Blindleistung in Höhe der Wirkleistung. Für diesen Hilfsantrieb kann so eine Energieeinsparung von ca. 35% erzielt werden.



**Bild 8:** Verläufe der Wirkleistungs- und Wirkenergieaufnahme der unregelmäßigen und geregelten Antriebe im BAZ

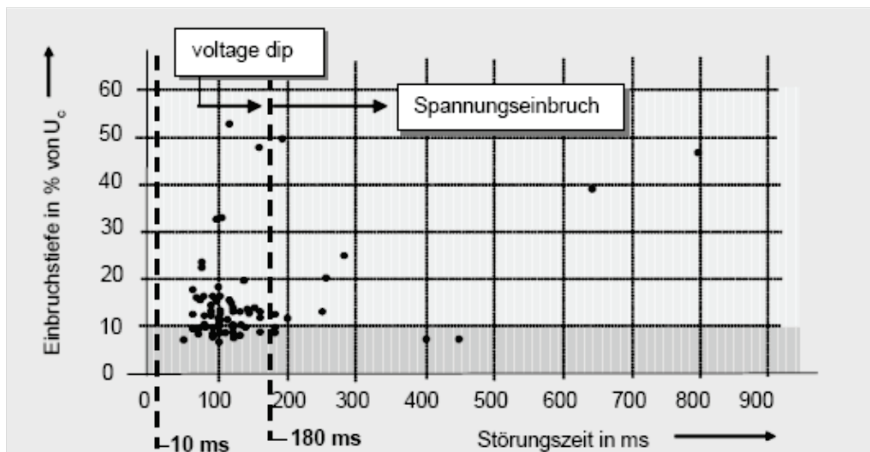
## 5 Optimierung der Netzurückwirkungen

Eine weitere Einsatzmöglichkeit des simulativen Energieverbrauchsmodells liegt in der Untersuchung von Netzurückwirkungen, d. h. die Wirkung des Netzes auf WZM und umgekehrt. Energiequalitätsparameter, wie Spannungsänderungen, Spannungsunsymmetrien, Oberschwingungen usw., wirken sich auf den Energieverbrauch von WZM aus und sind durch die Modellbildung analysier- und optimierbar [9].

DIN EN 50160 erlaubt schnelle Spannungsänderungen in Niederspannungsnetzen von bis zu 10 %. Liegen diese darüber, kann zwischen 10 % und 70 % von Spannungseinbrüchen und ab 70 % von Spannungsunterbrechungen gesprochen werden. Spannungseinbrüche mit einer Dauer von weniger als einer Sekunde dürfen nach DIN EN 50160 bis zu 1000 Mal jährlich auftreten. Diese können, genauso wie Spannungsunterbrechungen, den Betriebsablauf aufgrund von Steuerungsausfällen stören oder bringen ihn im schlimmsten Fall völlig zum Stillstand. Kurze Spannungseinbrüche bis zu 20 ms können bspw. auftreten, wenn der lokale Energieversorger zwischen zwei Netzen umschaltet. Aufgrund der schlechten 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.

Bild 9 stellt Spannungseinbrüche dar, die eine Dauer von 10 bis 180 ms aufweisen und somit auch zur Erhöhung des Energieverbrauchs aufgrund des größeren Einspeisungsstromes führen. Das Simulationsmodell zeigt hier einen Anstieg des

Energieverbrauchs um 24,3 % bei einem Spannungseinbruch im Netz um 40 % gegenüber der Normalspannung. Wird die aus der Analyse ableitbare Empfehlung, die Stromzufuhr zu verbessern, umgesetzt, hilft dies Produktionsfehler (Ausschuss) und Stillstandszeiten zu vermeiden, die in 7 % der Fälle aus einer unzureichenden Netzqualität resultieren [10].



**Bild 9:** Statistische Auswertung der Spannungseinbrüche im Niederspannungsnetz [9]

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Analysen haben gezeigt, dass bei der Untersuchung und Implementierung energieeffizienter Maßnahmen in WZM nicht nur der Energieverbrauch der einzelnen WZM, sondern auch die damit einhergehende, sich ändernde Rückwirkung der Energieverbraucher berücksichtigt werden muss. Diese muss auf Basis von Werkzeugmaschinen Gruppen auf Fertigungssystemebene untersucht werden, da die energetischen Wechselwirkungen der WZM eine wichtige Rolle spielen.

Schlussfolgerungen der Analyse elektrischer Energiequalität sind:

- In WZM ist nicht nur die Energiemessung, sondern auch die Überwachung der Qualitätsparameter elektrischer Energie hinsichtlich der Energieeffizienz erforderlich.
- Bei der Betrachtung der Netzurückwirkungen hinsichtlich der Energieeffizienz sind nicht nur einzelne WZM, sondern auch ganze Gruppen von WZM auf Fertigungssystemebene und ihre Wechselwirkungen zu betrachten.
- Es ist notwendig, durch weitere messtechnische und simulative Untersuchungen die Kennwerte der Blindleistungen, Netzurückwirkungen und Bremsenergiekreisläufe auf Fertigungssystemebene zu ermitteln.

- Die Verallgemeinerung und Erweiterung des SimPowerSystems-Modells ermöglicht die Analyse der Blind- und Bremsenergiekreisläufe zwischen mehreren verschiedenen Werkzeugmaschinentypen.
- Zusätzliche Energieverluste durch Blindleistungen, Spannungseinbrüche, Netzspannungsschwankungen, Einflüsse des Stromrichters, unsymmetrische Belastungen usw., auf verschiedenen Ebenen einer Fabrik, sollten quantitativ abgeschätzt werden.

### Acknowledgement

Die Autoren danken der europäischen Union (Europäischer Fonds für regionale Entwicklung) und dem Freistaat Sachsen für die Förderung des Spitzentechnologieclusters „Energieeffiziente Produkt- und Prozessinnovationen in der Produktionstechnik“ (eniPROD®).



### Literaturangaben

- [1] 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*
- [2] 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*
- [3] Hormann, W.; Just, W.; Schlabbach, J.: *Netzurückwirkungen, 3. Aufl., VDE Verlag GmbH, Berlin, 2008*
- [4] Just, W.; Hofmann, W.: *Blindstromkompensation in der Betriebspraxis, VDE Verlag GmbH, Berlin, 2003*
- [5] Dietmair, A.; Verl, A.; Wosnik, M.: *Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile. In: wt Werkstatttechnik online, 2008, 98 (7/8), S. 640-645*
- [6] Zirn, O.; Weikert, S.: *Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme - Eine praxisnahe Einführung, Springer Verlag, Berlin et al., 2006*

- 
- [7] Blank, F.; Roth-Stielow, J.: *Bewertungsmethode für die Energieeffizienz eines elektrischen Antriebssystems*, Tagungsband *Elektrische Automatisierung*, Nürnberg, November 2010, S. 321-329
  - [8] Gloor, R.; u. a.: *Antriebstechnik im Maschinenbau*, RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1995
  - [9] Heck, T.: *Beschreibung der Elektroenergiequalität an der Schnittstelle zwischen Elektroenergieversorgungsnetz und Elektroenergieabnehmer*, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2004
  - [10] Schäfer, R.: *Messgerät zeigt Qualitätsprobleme in der Stromversorgung auf*. In: *MM Maschinenmarkt*, 2009, Ausgabe 44, S. 42-43