

Energetische Bilanzierung und Bewertung von Werkzeugmaschinen

Götze, U.; Koriath, H.-J.; Kolesnikov, A.; Lindner, R.; Paetzold, J.; Scheffler, C.

Abstract

Für den Nachweis der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen (WZM) bedarf es aussagekräftiger, ausgereifter Instrumente und Methoden. Besondere Relevanz kommt den energetischen und energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierungs- und Bewertungsinstrumenten zu. Diese sollen technisches und wirtschaftliches Optimierungspotential der WZM aufdecken und die Vorbereitung, Durchführung und Kontrolle von Gestaltungsmaßnahmen unterstützen. Im Rahmen der energetischen Bilanzierung stehen speziell Energiebilanzen im Vordergrund, für die eine auf die Besonderheiten von WZM zugeschnittene Vorgehensweise vorgestellt wird. Die Datenermittlung erfolgt dabei experimentell und simulativ. Die Integration beider Vorgehensweisen erhöht die Aussagekraft der energetischen Bilanzierungsmodelle sowie der daraus gewonnenen Ergebnisse. Dies wird am Beispiel elektrischer Energiekreisläufe gezeigt. Für die energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung von WZM wird ein kombinierter Einsatz der energieorientiert auszurichtenden Instrumente im Rahmen eines integrierten Bilanzierungs- und Bewertungsinstrumentariums vorgeschlagen.

1 Einleitung

Die Nachhaltigkeit der Produktion und Nutzung von Werkzeugmaschinen (WZM) erfordert die Erfüllung der Kundenforderungen nach Arbeitsproduktivität, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit unter den Bedingungen eines globalen Wettbewerbs. Unter Ressourcenverknappung und steigenden Energiepreisen erreichen die Energiekosten vor allem während der Nutzung von WZM einen hohen Stellenwert.

Ein Ziel des Spitzentechnologieclusters eniPROD besteht folglich in der Verringerung des Energieverbrauches von WZM bei mindestens gleicher Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit. Wie können aber nun verschiedene WZM eines oder mehrerer Hersteller energetisch, wirtschaftlich und ökologisch vergleichbar gemacht werden? Zur Beantwortung dieser Frage bedarf es sowohl ausgereifter Bilanzierungs- und Bewertungsmethoden als auch aussagekräftiger Parameter und Kennzahlen. Die Motivation der Bilanzierung und Bewertung von WZM im Betrieb besteht demgemäß nun darin, energetisch-technische und energetisch-wirtschaftliche Sachverhalte von WZM adäquat abzubilden und folgende Aufgaben zu erfüllen:

- Erfassung, Dokumentation und Nachweis von Kenngrößen zu Energieverbrauch, Energiekosten u. ä. als Basis für Analysen und Vergleiche von WZM
- Vorbereitung von Entscheidungen zur energieeffizienteren Gestaltung von WZM unter Einbeziehung technischer, wirtschaftlicher und ökologischer Zielsetzungen und entsprechender Kenngrößen

Bisher war die Suche nach einem energieoptimalen Arbeitspunkt von WZM den optimalen Prozessbedingungen nachgeordnet, weshalb erforderliches Erfahrungswissen fehlt. Einen Beitrag zur Methodik der energetischen Bilanzierung von WZM sowie zur Entwicklung eines energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierungs- und Bewertungsinstrumentariums für diesen konkreten Anwendungsfall soll nachfolgend geleistet werden. Abschnitt 2 stellt hierfür zunächst eine allgemeine Vorgehensweise der energetischen Bilanzierung vor. Im Vordergrund stehen dabei die Identifikation, Quantifizierung und systematische Analyse auftretender energetischer Verluste in hoher Auflösung und Genauigkeit, die dem tatsächlich „wertschöpfenden“ Energiebedarf gegenüberzustellen sind. Darauf aufbauend erfolgt in Abschnitt 3 eine nähere Betrachtung der für die energetische Bilanzierung relevanten (sich gegenseitig beeinflussenden) Methoden der Datenermittlung, um das Zusammenspiel elektrischer Verbraucher exakt darzustellen und daraus resultierende, mögliche Lösungsansätze zur Senkung des Energiebedarfs zu analysieren und zu bewerten. Hierzu gehören die experimentelle Analyse zum einen und die Modellierung und Simulation von Energieflüssen zum anderen. Schließlich sollen in Abschnitt 4 Bausteine eines integrativen Instrumentariums zur Analyse, Bilanzierung und Bewertung der Wirtschaftlichkeit von (energetisch verbesserten) WZM dargestellt werden.

2 Energetische Bilanzierung von WZM

2.1 Vorbetrachtung und Zieldefinition

Eine Bilanz beinhaltet die Gegenüberstellung von Ein- und Ausgangsgrößen, die in ihren jeweiligen Summen einander entsprechen müssen. Die Übertragung auf die energetische Bilanz eines Produktionssystems führt zum Bild der zugeführten Energie E_{in} , der eine wertschöpfende Energie E_{wert} und eine Verlustenergie E_{ver} gegenüberstehen. Diese lässt sich in der einfachen Gleichung

$$E_{in} = E_{wert} + E_{ver} \quad (1)$$

oder spezifiziert auf die energetische Bilanzierung von WZM in

$$E_{WZM, zu} = E_{Prozess} + E_{WZM, Verlust} \quad (2)$$

ausdrücken. Dabei entsprechen sich jeweils die zugeführte Energie E_{in} und $E_{WZM, zu}$, die „wertschöpfende“ Energie E_{wert} und $E_{WZM, Prozess}$ sowie die Verlustenergie E_{ver} und $E_{WZM, Verlust}$. Anhand der betrachteten Energien in (2) lässt sich für eine zu definierende Zeitperiode ein prozessabhängiger, energetischer Wirkungsgrad $\eta_{WZM, E_Prozess}$ für WZM berechnen:

$$\eta_{WZM, E_Prozess} = \frac{E_{Prozess}}{E_{WZM, zu}} = \frac{E_{Prozess}}{E_{Prozess} + E_{WZM, Verlust}} \quad (3)$$

Bei der energetischen Bilanzierung können Fertigungsprozess und WZM nicht getrennt betrachtet werden. Die vom Fertigungsprozess geforderte Prozessenergie wird hier vorerst als eine gegebene, konstante Größe angenommen, da deren Optimierung ein eigenes, komplexes Themengebiet darstellt, welchem sich [1] widmet.

Die Erhöhung des Wirkungsgrades kann sowohl durch die Erhöhung der Prozessenergie als auch durch die Reduzierung der Verlustenergie erfolgen. Zudem sinkt der Wirkungsgrad während der Nebenzeit auf Null, da keine Prozessenergie benötigt wird. Für die Entwicklung energiebedarfsarmer WZM ließe sich zur Reduktion der Nebenzeiten u. a. die Erhöhung der Dynamik der Vorschubachsen ableiten. Große Beschleunigungen und hohe Vorschubgeschwindigkeiten bringen jedoch auch neue Herausforderungen mit sich.

Neben dem erhöhten Energiebedarf, dem bspw. durch

- die Reduzierung von Reibungsverlusten in Führungen,
- die Verringerung von bewegten Massen durch Leichtbaukomponenten [2]
oder
- rückspeisefähige Antriebe

begegnet werden kann und wird, führt der Einsatz größerer Antriebe zu

- hohen Anschlussleistungen und ausgeprägten Lastspitzen,
- höheren Verlusten im häufigen Teillastbetrieb und in den Antriebsmodulen,
- entsprechend groß zu dimensionierender Infrastruktur auf Maschinen- und Fabrikebene sowie
- größeren Netzzrückwirkungen (z. B. Blindleistung, Oberschwingungen).

Ein methodisches Vorgehen kann die Zusammenhänge und Rückkopplungseffekte aufzeigen sowie Optimierungsansätze identifizieren und verifizieren.

Im Rahmen der energetischen Bilanzierung wird dafür eine allgemeine Vorgehensweise vorgestellt, die folgende Schritte umfasst: Zieldefinition, Ziehen von Systemgrenzen, Festlegen von Randbedingungen, Strukturanalyse der WZM, Definition von Betriebszuständen und Bilanzzeiträumen sowie Aufstellen von Teil- und Gesamtbilanzen. Die Vorbereitung und Durchführung der Datenerhebung erfolgt experimentell und simulativ, wobei sich beide Methoden gegenseitig beeinflussen und ergänzen.

Ziel der energetischen Bilanzierung soll es nun sein, die tatsächlich vorhandenen Energieflüsse zu spezifizieren. Hauptenergieträger spanender WZM und deshalb wichtigste Eingangs- und Bilanzierungsgrößen sind Druckluft und elektrische Energie. Letztere dominiert die von WZM ausgehende Umweltbelastung über deren gesamten Lebenszyklus mit weit über 90 % [3]. Deshalb fokussieren sich nachfolgende Betrachtungen überwiegend auf diese Energieform.

2.2 Systembetrachtung und Systemgrenzen

Die vorgestellte energetische Bilanzierung von WZM erfolgt auf Basis der Input-Output-Analyse. Das dafür angewandte Schema, welches sich an das in [4] Beschriebene anlehnt, zeigt Bild 1. Die Nutz- bzw. Prozessenergie liegt jedoch nunmehr außerhalb der Bilanzgrenzen auf der Output-Seite, da diese den thermischen

Verlusten infolge interner Wandlungs- und Transportprozesse gegenübergestellt werden sollen.

Für die Systemgrenzen, die jeweils auch Schnittstellen zu anderen Forschungsgebieten des Spitzentechnologieclusters eniPROD bilden, müssen exakte Übergabeparameter für ein zukünftiges Gesamtkonzept definiert werden. Auf der Input-Seite stellt die Werkhalle oder Fabrik über ihre Infrastruktur die erforderlichen Stoff- und Energieströme zur Verfügung. Als energetische Schnittstelle zum Fabrikssystem werden die Hauptanschlüsse der Energie- und Medienversorgung der WZM definiert. Auf der Output-Seite nimmt die Werkhalle die Verlustenergie auf, die in dieser Betrachtung den Bilanzierungsrahmen ungerichtet als Abwärme verlässt.

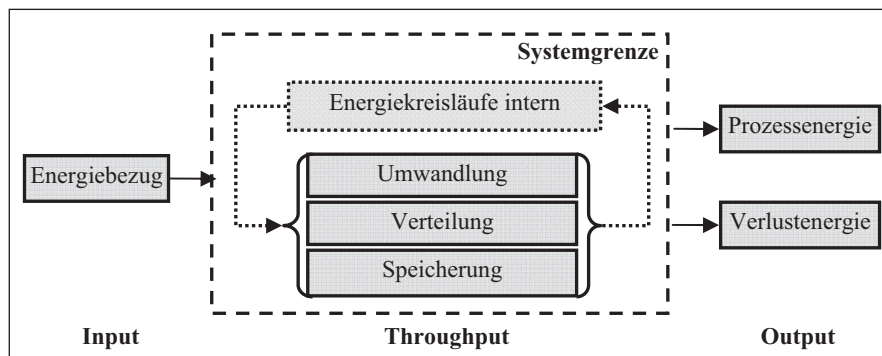


Bild 1: Bilanzierungsgrenzen einer WZM

Die Prozessenergie wird vorwiegend in Form von mechanischer Energie zur Formgebung und als Strömungsenergie der Hilfsstoffe (Kühlschmierstoffe) benötigt [5]. Die Schnittstellen zwischen Prozess und Maschine sind hierbei die in Kontakt stehenden Oberflächen von Werkstück und Werkzeug, welche die Prozesskräfte und -momente übertragen, sowie die Austrittsöffnungen der Hilfsstoffversorgung. Daneben müssen moderne Bearbeitungszentren (BAZ) Werkzeuge und Werkstücke räumlich und zeitlich in der geforderten Qualität und Quantität dem Fertigungsprozess zur Verfügung stellen. Alle Nebenzeiten, wie Werkzeugwechsel (WZW), Werkstückwechsel (WSW) und Positionierung werden dem Energieverbrauch der WZM zugerechnet.

2.3 Randbedingungen

Der Fertigungsprozess als ein bestimmender Faktor bei der Bilanzierung erfordert als Randbedingung die Festlegung zu betrachtender Fertigungsszenarien mit definierten Fertigungsverfahren, Werkzeugen und Referenzwerkstücken, welche die zur Bilanzierung erforderlichen Prozessparameter vorgeben. Während für Sondermaschinen, bspw. zur Bearbeitung von Nockenwellen, die Prozesse eindeutig und gut kalkulierbar sind, bereiten die großen Fertigungsbreiten von Universalmaschinen erhebliche Schwierigkeiten. Dies gilt insbesondere dann, wenn eine Betrachtung der gesamten Betriebsphase der WZM, die für NC-gesteuerte Maschinen ca. 10 Jahre [6] beträgt, angestrebt wird.

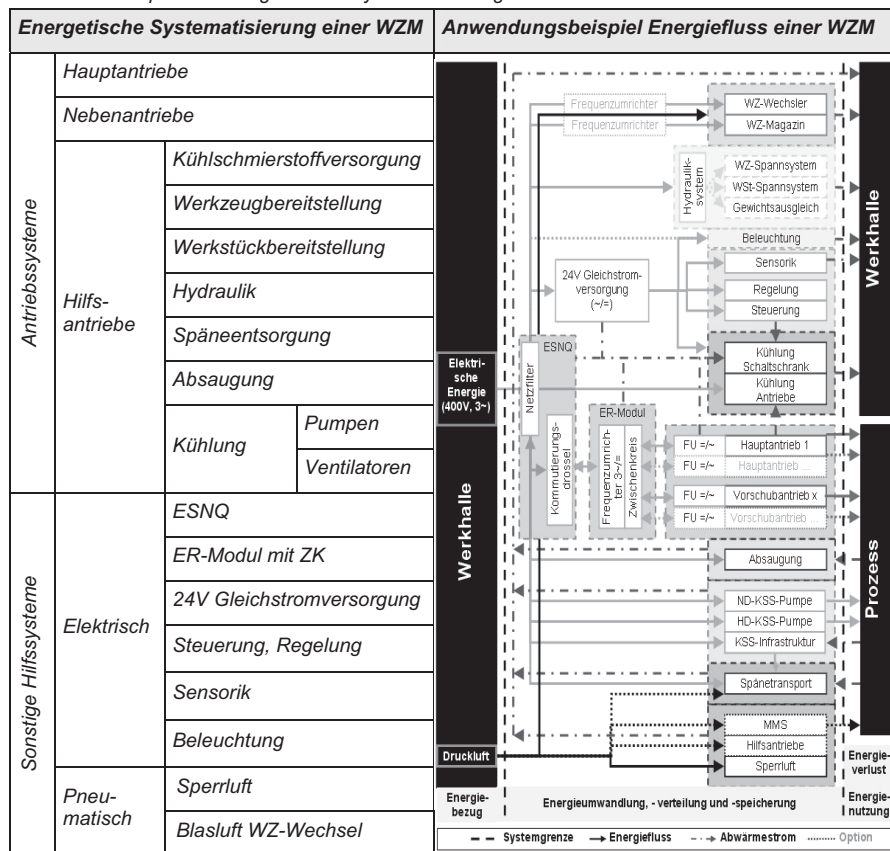
Aufgrund der Vielzahl an Bauformen und Fertigungsverfahren wird in [3] vorgeschlagen, energetische Verbesserungen jeweils nur anhand eines WZM-Typs eines Herstellers nachzuweisen. Die Herausforderung besteht an dieser Stelle darin, Werkstücke zu definieren, die typische Fertigungsprozesse und Bearbeitungszyklen für Universalmaschinen adäquat abbilden. Um eine breite Anwendbarkeit und Akzeptanz zu erreichen, bietet sich bspw. der Rückgriff auf die genormten Prüfwerkstücke der zurückgezogenen VDI 2851 zur Beurteilung des geometrisch-kinematischen Verhaltens von WZM an. Ausgehend von typischen Jahresstückzahlen für verschiedene Fertigungsarten (Massenfertigung, Serienfertigung, ...) und den daraus folgenden Betriebsweisen (Schichtbetrieb, Stillstand, Wartung, ...) werden entsprechende Fertigungsszenarien entwickelt.

2.4 Strukturanalyse

Die Strukturanalyse systematisiert die Sub- und Teilsysteme und zeigt vorerst qualitativ die wichtigsten Energieflüsse auf. Aufgrund der sinnvollen Fokussierung auf die elektrische Energie als Hauptenergieträger eignen sich hierfür deren Infrastruktur und Verbraucher. Dies erweist sich zudem als vorteilhaft bei der messtechnischen Erfassung und simulativen Analyse. Da ein großer Teil der elektrischen Energie in Antrieben in mechanische Energie umgewandelt wird, erfolgt die Einteilung zunächst nach diesen Verbrauchern in die Gruppen Haupt-, Neben- und Hilfsantriebe [7]. Geregelter Haupt- und Nebenantriebe werden meist aus einem gemeinsamen Ein- und Rückspeisemodul (ER-Modul) bestehend aus Frequenzumrichter und Zwischenkreis (ZK) versorgt und deshalb bei der Simulationsmodellbildung als Antriebsverband betrachtet. Netzfilter und Kommutierungsdrosseln werden als Einrichtungen zur Sicherung der Netzqualität (ESNQ) zusammengefasst.

Daraus folgt die in Tabelle 1 vorgenommene energetische Systematisierung der Verbraucher. Im jeweils zu untersuchenden Einzelfall muss dann eine entsprechende Auswahl bzw. weitere Detaillierung und Erweiterung der Verbrauchergruppen erfolgen. Das Anwendungsbeispiel zeigt die Energieflussdarstellung einer WZM mit den Bilanzierungsgrenzen Werkhalle und Prozess.

Tabelle 1: Beispiel zur energetischen Systematisierung einer WZM



2.5 Betriebszustände

Die in der Strukturanalyse dargestellten Subsysteme können darüber hinaus in

- prozessunabhängige und
- prozessabhängige

Systeme unterschieden werden. Diese Gliederung stellt zudem einen Ansatz zur Abgrenzung von Betriebszuständen einer WZM dar. Der spezifische Leistungs- bzw. Energiebedarf und die jeweilige Verweildauer in diesen Zuständen bilden zentrale Elemente bei der Berechnung des Gesamtenergieverbrauchs während der Betriebsphase einer WZM. Dies verdeutlichen verschiedene Ansätze wie der in [8] zur Definition „zustandsbasierter Energieverbrauchsprofile“. Die Einteilung in neun Betriebszustände, die sich an der schrittweisen Zuschaltung einzelner Aggregate orientiert, ermöglicht dabei die Verbrauchsvorhersage für einen Fräsprozess mit einem Fehler von ca. 5 %.

Zur Systematisierung der Betriebszustände werden hier jedoch die in [4] verwendeten und den vom VDW definierten recht nahe kommenden Betriebszustände favorisiert. Der Betriebszustand „Produktivbetrieb“ wird jedoch, wie in Tabelle 2 dargestellt, weiter differenziert. Dabei beschränkt sich die Hauptzeit, auf deren Energiebedarf sich sämtliche Effizienzbetrachtungen beziehen, ausschließlich auf den Betriebszustand „Bearbeitung“.

Tabelle 2: Einteilung der Betriebszustände

REFA	Betriebszustand	Funktionen	
	Aus	Hauptschalter aus	
Nebenzeit	Stand-by	Hauptschalter an, Steuerung „hochgelaufen“ und Anzeigen aktiv	
	Fertigungsbereitschaft	+ Prozessunabhängige Systeme aktiv (z. B. Entwärmung) + Prozessabhängige Systeme bereit zur Bearbeitung (z. B. Achsen in Regelung)	
	Produktivbetrieb	Werkzeugwechsel	+ WZW inkl. erforderlicher Positionierungen
		Werkstückwechsel	+ WSW inkl. erforderlicher Positionierungen
		Positionierung	+ Positionierbedarf des Prozesses
Hauptzeit	Bearbeitung	+ Spanabnahme	

2.6 Bilanzzeiträume und Teilbilanzen

Das Ziel einer umfassenden und detaillierten Bilanzierung aller Subsysteme des komplexen Systems WZM sowie deren wechselseitige Beziehung erfordert die Aufteilung in Teilbilanzen. Vor allem die mathematischen Modelle der simulativen Bilanzierung verlangen ein strukturiertes Vorgehen, für welches die vorgestellte Systematisierung (Tabelle 1) eine Grundlage bietet. Zudem können messtechnische Gegebenheiten, wie die Erreichbarkeit von Messpunkten einen eigenen Bilanzrahmen erfordern. Die aufgestellten Teilbilanzen einzelner Subsysteme werden anschließend zur Gesamtbilanz der WZM zusammengefasst.

Der angestrebte Bilanzzeitraum erstreckt sich prinzipiell über die gesamte Betriebsphase einer WZM. Jedoch werden je nach Bilanzrahmen der Teilbilanzen übersichtliche, kürzere Zeitabschnitte gewählt, die dann als Basis für tiefergehende Analysen, Vergleiche zwischen den Perioden und/oder Hochrechnungen dienen. Unter Laborbedingungen reichen zur Verifizierung der in Abschnitt 3.2 vorgestellten Simulationsmodelle einfache Fertigungszyklen aus, während bei der Analyse eines Produktionseinsatzes eine Schicht oder besser 24 Stunden geeignet erscheinen. Bei Fertigungsbedingungen mit sehr langen Stückzeiten oder kleinen Maschinen mit sehr hoher Dynamik, die Messungen mit hohen Abtastraten und dementsprechend großen Datenmengen erfordern, sind ggf. andere Messzeiträume festzulegen.

3 Experimentelle Analyse und Simulation

3.1 Experimentelle Analyse

Die experimentelle Bilanzierung als spezifische Form der energetischen Bilanzierung beinhaltet die messtechnische Erfassung der ausgewählten Bilanzierungsobjekte. Sie hat die Aufgabe, eine reale Datenbasis für die energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und zur Bildung von Kennzahlen zu schaffen sowie den experimentellen Nachweis von Verbesserungen an Subsystemen und Komponenten von WZM zu erbringen. Darüber hinaus besteht eine enge Verknüpfung zur Modellierung und Simulation von Energieflüssen, da deren entwickelte Methoden und Modelle verifiziert und im Gegenzug Berechnungsverfahren für indirekt zu bestimmende Messgrößen geliefert werden.

Anhand der zuvor aufgestellten Systematisierung und des geforderten Detaillierungsgrades erfolgt die Festlegung der Messbedingungen.

Die Messmethoden müssen individuell auf die zu messenden Verbraucher oder Subsysteme abgestimmt sein. So sind unregelmäßige Hilfsantriebe und konstante, elektrische Verbraucher mit handelsüblichen Leistungsmessgeräten erfassbar. Ziel ist es jedoch, auch die hochdynamischen Vorgänge in den Servoantrieben zu untersuchen. Dafür besteht die Möglichkeit, Antriebsreglerdaten, z. B. über Wirkleistungen, Ströme und Drehzahlen, direkt über Trace-Funktionen der Steuerungen in ausreichend hoher Auflösung auszulesen. Dies ist jedoch nicht in jedem Fall realisierbar. Darüber hinaus benötigt die simulative Bilanzierung zur Validierung der mechatronischen Modelle eine genaue Quantifizierung der Energieströme im Antriebsverband. Hier erfordert vor allem die Messung zwischen Umrichter und frequenzgeregeltem Servoantrieb besondere Messtechnik. Deshalb wurden spezielle Leistungsumformer entwickelt, die in Verbindung mit schnellen Messkarten in einem NI PXI-System Aufzeichnungen mit Abtastfrequenzen bis in den Megahertz-Bereich gestatten. Die Verarbeitung und Sicherung der Messdaten erfolgt direkt auf dem Mess-PC mit Hilfe der Software LabView. Das System bietet zudem genügend Messkanäle, um alle Subsysteme einer WZM zeitsynchron zu messen und mit identischem Zeitstempel zu versehen, was die Auswertung der Messergebnisse erheblich erleichtert. Ein wichtiger Aspekt bei der Datenerfassung und -auswertung ist die exakte Zuordnung von Schaltzuständen und Bewegungsinformationen. Auch hier ist die Nutzung Trace-Funktionen ideal. Bei zeitgleicher Erfassung aller Subsysteme ermöglicht alternativ auch ein nachträglicher Abgleich mit dem NC-Programm eine exakte Zuordnung bei vertretbarem Aufwand.

Aufgrund der Datenmenge in Folge der hohen Abtastraten bzw. der Anzahl der Messstellen werden im ersten Schritt nur Spannung (U) und Strom (I) aufgezeichnet. Weitere Größen wie Phasenverschiebung (\cos_{ϕ}), Wirkleistung (P), Blindleistung (Q) oder Oberschwingungen können dann je nach Anforderungen zeitparallel (z. B. mit Mehrkern-Prozessoren) oder zu einem späteren Zeitpunkt auf einem normalen PC mit Auswertungssoftware berechnet werden. So ist es möglich, sowohl die Energiekreisläufe bei der Bremsenergieerückgewinnung zu untersuchen, als auch Aussagen zu Stromqualität und Netzurückwirkungen zu treffen, die beim zukünftig zu erwartenden verstärkten Einsatz von frequenzgesteuerten Antrieben zunehmend an Bedeutung gewinnen.

3.2 Modellierung und Simulation von Energieflüssen

In Erweiterung der experimentellen Analyse, mit welcher aktuell auftretende Größen bestimmt werden, soll die simulative Modellierung und Simulation messtechnisch schwierig erfassbare Werte liefern, um die Energieflüsse in WZM zu analysieren und zu optimieren sowie Effizienzpotenziale verschiedener Maschinenkonfigurationen vorherzusagen. Dafür erfolgt die Untersuchung der Kreisläufe des Hauptenergieträgers, der elektrischen Energie, wie in Bild 2 beispielhaft dargestellt. Da dynamische Beschleunigungs- und Bremsprozesse, Grund- und Verzerrungsblindleistung sowie Netzurückwirkungen sogar Energieverluste nicht nur in WZM erzeugen, sollen diese Faktoren mittels Modellierung und Simulation abgebildet, untersucht, quantitativ abgeschätzt und energetisch optimiert werden.

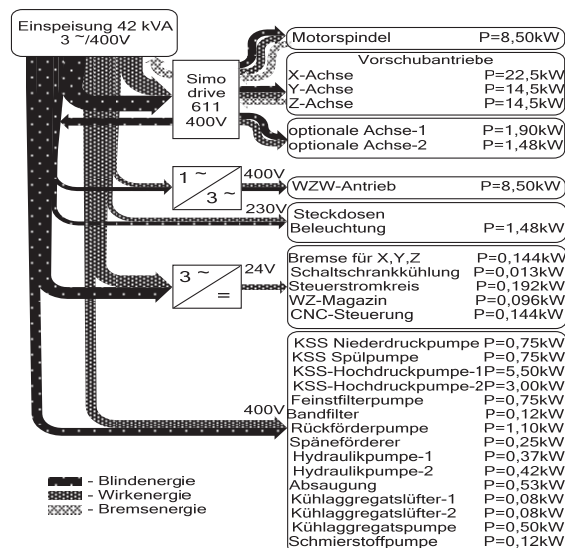


Bild 2: Elektrische Energiekreisläufe und Nennleistungen eines Bearbeitungszentrum

Da noch kein Modell mit dem Schwerpunkt auf elektrischen Energiekreisläufen in WZM existiert, wird dieses im ersten Schritt mit ausreichender Genauigkeit für die genannten Untersuchungen erstellt. Das in Bild 3 dargestellte Simulationsmodell lässt sich in drei Betrachtungsebenen einteilen:

- die Ebene aller Verbraucher, die sowohl den geregelten Antriebsverband mit Haupt- und Nebenantrieben als auch ungeregelte Hilfsantriebssysteme beinhaltet (Betrachtungsebene A),
- die einzelnen Umrichter des Antriebsverbands (Betrachtungsebene B) und
- die einzelnen Antriebe des Antriebsverbands (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 Spannungszwischenkreis (ZK) die Prozesse der Bremsenergiespeicherung sowie der Rückspeisung ins Netz ablaufen. Dem Modell liegt Starrkörpermechanik zugrunde, welche über eine Zustandsraumnachbildung (aus Modaldaten der Mechanik) noch verbessert werden kann.

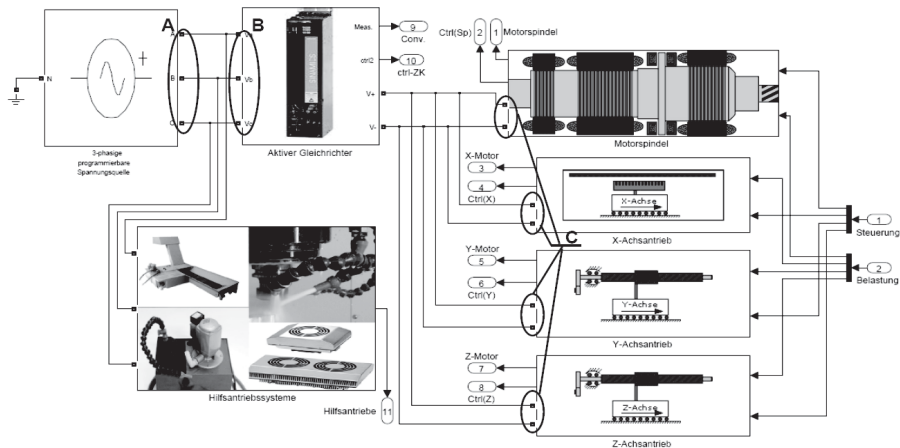


Bild 3: Antriebssysteme des Bearbeitungszentrums in Matlab

Einen großen Anteil an der Leistungsaufnahme haben dynamische Prozessverläufe. Die Beeinflussung dieser Dynamikeigenschaften ist daher von großer Bedeutung. Vor der Formulierung eines Modells sind daher die entsprechenden Zusammenhänge abzubilden. Die Beziehungen zwischen Energiebilanz- und Dynamikmodell soll Bild 4 deutlich machen.

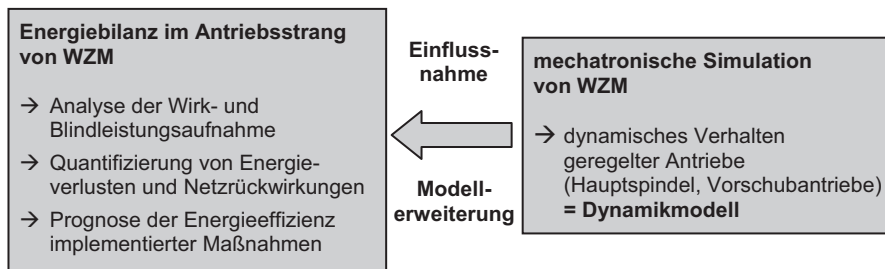


Bild 4: Verbindung Energiebilanzmodell \Leftrightarrow Dynamikmodell

Zur Darstellung der Leistungs- und Energieaufnahme werden die Komponenten des Modells entsprechend erweitert. Die last- (Strom) und drehzahlabhängigen Verluste der Servomotormodelle, verursacht durch Eisen und Reibung, wurden nach Auskunft der Siemens AG in Abhängigkeit der Parameter $P_{Fe,Nenn}$ und R_{Strom} zu

$$P_{Fe}(n) = P_{Fe,Nenn} \cdot \left(\frac{n}{n_{Nenn}} \right)^{3/2} \quad (4)$$

und

$$P_{Cu}(M) = 3 \left(\frac{M + M_{Reib}}{K_T} \right) \cdot R_{Strom}, \text{ mit}$$

$$M_{Reib}(n) = \frac{P_{Fe}(n)}{2\pi \cdot n_{Nenn}} \cdot \left(\frac{n}{n_{Nenn}} \right) \quad (5)$$

berechnet. Für die Umrichter wird entsprechend der Angaben in [9] ein umrichterspezifischer, konstanter Anteil (taktfrequenzabhängig) und ein stromabhängiger Anteil in Abhängigkeit der drei Parameter K_1 , K_2 und P_{Steuer} angenommen:

$$P_{verl} = (K_1 \cdot f_{Takt} + K_2) \cdot I_{Str} + P_{Steuer} \quad (6)$$

Der Anteil der Leistungselektronik wird am Antriebsverband der untersuchten Maschine durch Messung verifiziert. Die eigentlich in der Maschinensteuerung durchgeführte Bahnplanung kann ein nachgebildeter Interpolator (beschleunigungsbegrenzt, Ruckbegrenzung über Filter möglich) anhand der CNC-Befehls-

syntax [10] übernehmen, welcher den Sollwert und Vorsteuergrößen für das Modell liefert.

Zur Bearbeitungsbahn sind zeitlich konsistent gegebene Prozesskräfte notwendig. Zerspankräfte wurden in ersten Versuchen messtechnisch ermittelt und wirken als Störgröße auf das Mechanikmodell. Diese Angaben können auch aus einem Prozessmodell stammen. Für vorgegebene Prozesskräfte ist dieses simulative Energiebilanzmodell somit zur Parametervariationen u. ä. einsetzbar.

Für die Analyse der Bremsenergiekreisläufe wurde die Leistungsaufnahme in unterschiedlichen Antrieben des Antriebsverbands untersucht. Damit ist es möglich, die Bremsenergieerückspeisung sowohl beim Generatorbetrieb der Servoantriebe in den ZK als auch aus dem ZK ins Netz (Bild 5) und somit die Bestimmung des Einsparpotenzials durch die Optimierung der Bremsenergiekreisläufe darzustellen.

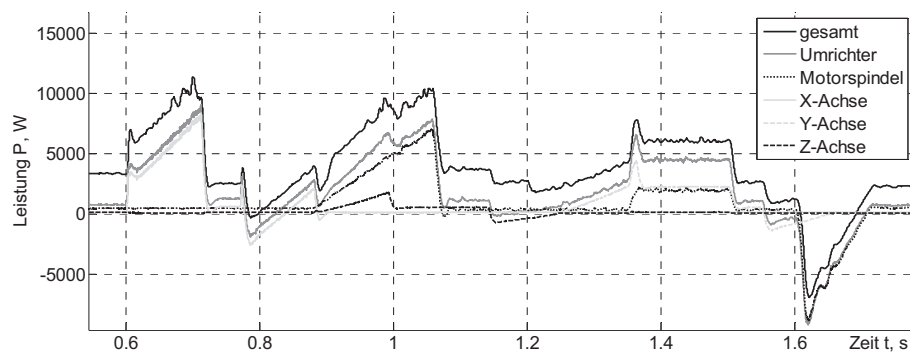


Bild 5: Oszillogramme der Leistungsaufnahme der Betrachtungsebenen A, B und C (vgl. Bild 3)

Die Potenziale der Bremsenergienutzung liegen einerseits in der Speicherung der Energie im ZK zur Senkung der entnommenen Energie aus dem Netz und andererseits in der Minderung von Lastspitzen. Bild 6 zeigt das Untersuchungsergebnis für die Variation der Speicherkapazitäten des Zwischenkreises. Das Vorgehen ermöglicht eine genaue Dimensionierung des Umrichters und somit die Senkung der bei der Rückspeisung entstehenden Verluste.

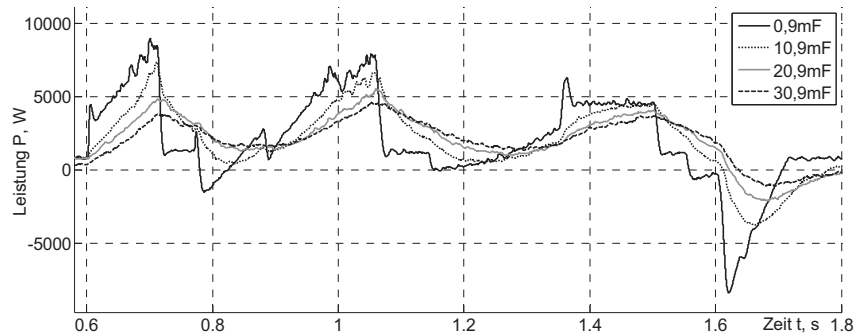


Bild 6: Oszillogramme der Leistungsaufnahme bei verschiedenen Kapazitäten im Zwischenkreis

Die Hilfssysteme bestehen im Wesentlichen aus unregelmäßigen Antrieben mit relativ hohem Blindleistungsanteil (Q), was zum Anstieg der Scheinleistung (S) führt. Dies verschlechtert den Leistungsfaktor der gesamten WZM und verursacht zusätzliche Verluste. Die mögliche Lösung des Problems ist eine aktive Blindleistungkompensation (BLK) durch die Arbeit des Umrichters im jeweiligen Quadranten (Bild 7).

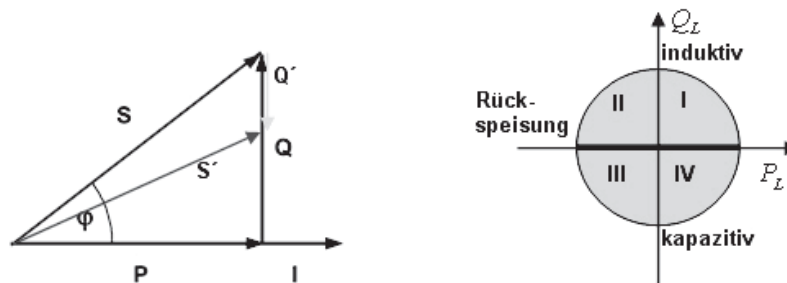


Bild 7: Vektordiagramm und Quadranten der Leistung in rückspeisefähigen Umrichtern

Die durch das Modell ermittelte aktive BLK durch den Umrichter ist in Bild 8 dargestellt. Obwohl damit zusätzliche Kompensationsanlagen vermieden werden können, führen existierende Konzepte der aktiven BLK zu zusätzlichen Strömen des Umrichters und in Folge dessen zu Verlusten bei einem niedrigeren Leistungsfaktor.

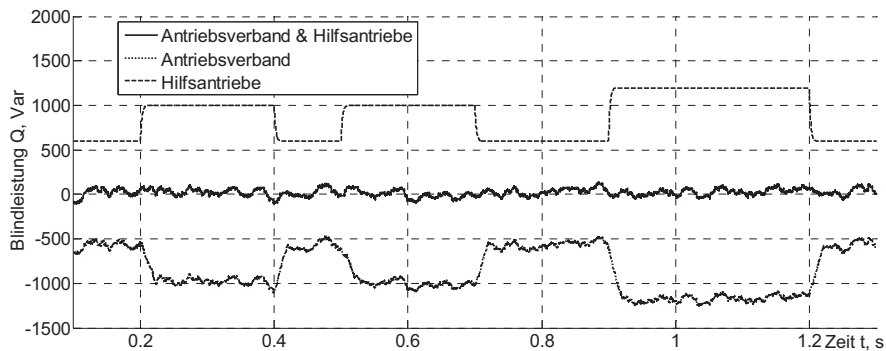


Bild 8: Diagramme der Blindleistungsaufnahme eines Bearbeitungszentrums

Eine andere Möglichkeit zur Minderung der Blindleistungsaufnahme liegt in der synergetischen Erweiterung. Hierbei werden Teile des unregulierten Hilfsantriebsystems als stromrichterregelte Antriebe geschaltet und über den Zwischenkreis gespeist. Bild 9 zeigt das Einsparpotential, welches bei einem Hilfsantrieb mit 3 kW Leistungsaufnahme entsteht.

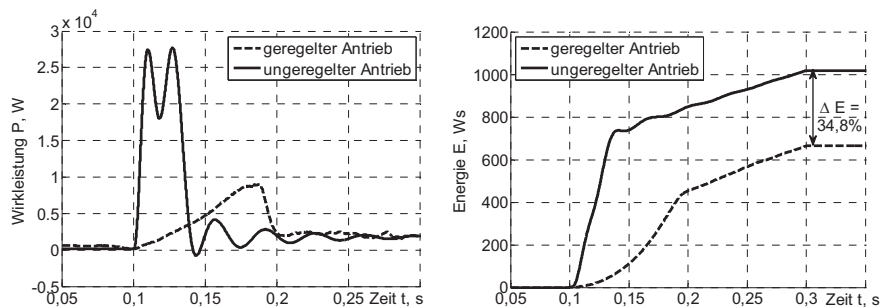


Bild 9: Oszillogramme der Wirkleistungs- und Energieaufnahme der unregulierten und geregelten Antriebe im BAZ

Eine weitere Einsatzmöglichkeit des simulativen Energieverbrauchsmodells liegt in der Untersuchung der Netzurückwirkungen, d. h. der Netzqualität und deren Auswirkungen auf WZM, sowie der Rückwirkungen der WZM auf das Versorgungsnetz. Energiequalitätsparameter wie Spannungsänderungen, Spannungsunsymmetrien, Oberschwingungen usw. wirken sich auf den Energieverbrauch von WZM aus und sind durch die Modellbildung analysier- und optimierbar.

Auch die in Bild 10 dargestellten Spannungseinbrüche, die in Niederspannungsnetzen meist eine Dauer von 10 bis 180 ms aufweisen, führen zur Erhöhung des Energieverbrauchs. Das Simulationsmodell zeigt hier einen Anstieg des Energieverbrauchs um 24,3 % bei einem Spannungseinbruch im Netz um 40 % der Normalspannung.

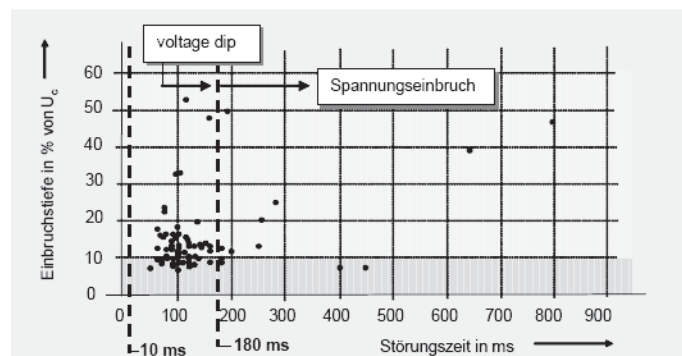


Bild 10: statistische Auswertung der Spannungseinbrüche im Niederspannungsnetz [11]

Abschließend ist festzuhalten, dass sich mit Hilfe der simulativen Modellbildung ausgewählte Maßnahmen zur Optimierung der Elektroenergiekreisläufe in WZM qualitativ und quantitativ abschätzen lassen. So kann bspw. die Eignung von Energiespeichern und passenden Reglern hinsichtlich verschiedener Anwendungen und Einsatzmöglichkeiten untersucht werden. Durch Verbesserungen des Hilfssystemmodells ist zudem der Anteil der durch den ZK gespeisten Hilfsantriebe bestimmbar. Da die Messstellen des PXI-Energieerfassungssystems den Positionen im Modell entsprechen, an denen Leistungen dargestellt und analysiert werden, ist einerseits eine Grundlage zur Validierung des Modells anhand von Messungen geschaffen und andererseits die Übertragbarkeit der Berechnungsmethodik auf das Energieerfassungssystem gegeben.

Die Umsetzbarkeit des Simulink-Modells in C-Code oder ausführbare exe-Dateien mit Hilfe der vorhandenen Simulink Toolbox Real-Time Workshop 7.4 wurde an einfachen Modellen geprüft und festgestellt, dass sich diese Vorgehensweise besonders als Schnittstelle für die Visualisierung der Energieflüsse in der Virtuellen Realität eignet. Inwieweit sich dies mit komplexen Modellen durchführen lässt, bedarf weiterer Untersuchungen.

4 Instrumentarium zur energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung

4.1 Methoden im Überblick

Mit Hilfe der energetischen Bilanzierung und Bewertung können technische und ökologische Schwachstellen von WZM identifiziert werden. Jedoch muss eine energetisch optimierte Maschine nicht gleichzeitig auch dem Kriterium der Wirtschaftlichkeit genügen. Daher erscheint es sinnvoll und notwendig, WZM nicht nur aus dem energetisch-technischen, sondern auch aus dem ökonomischen Blickwinkel heraus zu bilanzieren und zu bewerten und damit eine integrierte, auch wirtschaftlich ausgerichtete Analyse und Gestaltung von WZM zu ermöglichen.

Bilanzierung umfasst in diesem Kontext, ähnlich wie in der Rechnungslegung, die aggregierte Abbildung der für energetisch-technische und/oder wirtschaftliche Entscheidungen relevanten Sachverhalte. Sie ist eng mit der Bewertung dieser Sachverhalte sowie darauf bezogener Handlungsalternativen verbunden, so dass eine strenge Trennung kaum möglich erscheint und auch hier ein integriertes Instrumentarium für die energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung *und* Bewertung konzipiert werden soll.

Um ein entsprechendes Instrumentarium zu entwickeln, ist es sinnvoll, zunächst bestehende Methoden zu sichten und diese auf ihre Eignung zu prüfen. Bild 11 vermittelt eine Übersicht über potentiell geeignete Ansätze.

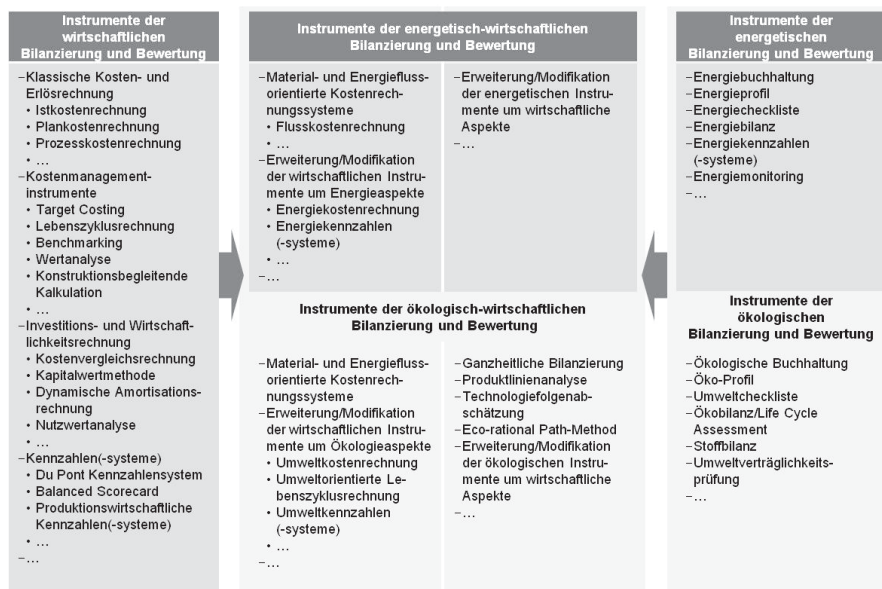


Bild 11: Übersicht existierender energetisch-wirtschaftlicher Bilanzierungs- und Bewertungsansätze (eigene Abb. auf Basis von [12], [13], [14], [15])

Ausgangspunkt sind rein ökonomisch (ganz links) und rein energetisch bzw. ökologisch orientierte Ansätze (ganz rechts). Energetische (bzw. energetisch-wirtschaftliche) Betrachtungen werden häufig als Vorstufe oder Teilaufgabe der ökologischen (bzw. ökologisch-wirtschaftlichen) Bilanzierung, Bewertung und Analyse dargestellt (siehe [16] und [17]). Die Methoden zur energetischen (und auch energetisch-wirtschaftlichen) Bilanzierung und Bewertung werden daher hier als Teilmenge der ökologisch bzw. ökologisch-wirtschaftlich orientierten Ansätze eingeordnet. Den energetischen Aspekten kommt unter diesen eine besondere Bedeutung zu; zum einen aufgrund der Relevanz der Energieproblematik, zum anderen, da sie eine wichtige Basis für die ökologischen Betrachtungen darstellen. Einen angemessenen Stellenwert innerhalb der ökologischen bzw. ökologisch-wirtschaftlichen Ansätze erreichen sie bislang in der Literatur jedoch nicht (siehe [12] und [13]).

Die hier im Vordergrund stehenden und in der Mitte der Abbildung aufgeführten energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierungs- und Bewertungsansätze lassen sich in zwei Kategorien untergliedern, je nachdem, ob sie primär eine wirtschaftliche oder eine energetische bzw. ökologische Ausrichtung bzw. Herkunft aufweisen.

Zu den relevanten Instrumenten der wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung zählen vorrangig die Systeme der Kosten- und Erlösrechnung, Methoden des Kostenmanagements (mit einer zusätzlichen, über die Bilanzierung und Bewertung hinausgehenden Gestaltungskomponente), die Investitions- und Wirtschaftlichkeitsrechnung sowie Kennzahlen und Kennzahlensysteme. Eine modifizierte und verfeinerte Ausgestaltung erfahren diese Instrumente durch die zusätzliche Einbeziehung energetischer Betrachtungen – hin zu verschiedenen Formen von energiebezogenen Kostenrechnungen, Energiekennzahlen und -systemen, dem Energiebenchmarking etc. Ein relativ eigenständiger Ansatz ist die Material- und Energieflussorientierte Kostenrechnung, bei deren Konzeption eine weitgehende Lösung von der klassischen Kostenrechnung erfolgt ist. Die Schaffung einer energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierungsmethodik kann zudem von den energiebezogenen Ansätzen wie der Energiebuchhaltung, Energiebilanzen etc. ausgehen, die dazu um ökonomische Gesichtspunkte zu erweitern sind. So ermöglicht u. a. die Ergänzung von Kosteninformationen auch wirtschaftliche Aussagen. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die Abgrenzung der Ausrichtungen und Methoden zum Teil nicht eindeutig möglich ist, da Übergänge fließend sind (z. B. zwischen der Material- und Energieflussorientierten Kostenrechnung und der Energiekostenrechnung), Instrumente (wie Energiekennzahlen, Stoff- und Energiebilanzen oder die Material- und Energieflussorientierte Kostenrechnung) gleichzeitig mehreren Gruppen zuordenbar sind und schließlich manche Methoden wirtschaftliche wie energetisch/ökologische Wurzeln aufweisen (wie die Material- und Energieflussorientierte Kostenrechnung, bei der aber der wirtschaftliche Ursprung als dominierend angesehen wird).

Der Einsatz der aufgeführten Instrumente und die energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung insgesamt erfordern zahlreiche wirtschaftliche, technische und energiebezogene Informationen. Diese Informationen stammen einerseits aus Vorsystemen wie der Betriebsdatenerfassung, der kaufmännischen Buchführung usw. Andererseits sind gerade für energetisch-wirtschaftliche Betrachtungen die im Rahmen der energetischen Bilanzierung experimentell oder simulativ generierten Informationen von besonderer Bedeutung. Sie stellen einen Input der energetisch-wirtschaftlichen Ansätze wie einer Energiekostenrechnung dar und beeinflussen daher deren Aussagekraft maßgeblich. Diese hängt zusätzlich von der Art der im Rahmen der energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung selbst eingesetzten Methoden ab. Nachdem ein Überblick über potentielle Bilanzierungs- und Bewertungsansätze gegeben wurde, sollen nun im folgenden Abschnitt Bausteine eines geeigneten Instrumentariums zur energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung folgen.

4.2 Bausteine eines geeigneten Instrumentariums

Ziel des zu konzipierenden Instrumentariums soll die Abbildung energetisch-wirtschaftlicher Sachverhalte und Zusammenhänge sowie die energieorientierte Analyse, Bewertung und Beeinflussung der Wirtschaftlichkeit von WZM und ihren Gestaltungsalternativen einschließlich Energieeffizienzmaßnahmen sein. Um in hohem Maße zur Entscheidungsvorbereitung geeignet zu sein, muss das Instrumentarium eine Reihe von Anforderungen erfüllen, zu denen die Verständlichkeit und Nachvollziehbarkeit, die Wirtschaftlichkeit sowie die hohe Aussagekraft der Ergebnisse zählen.

Ausgehend von diesen eher allgemeinen Anforderungen - und dabei vor allem mit Blick auf die Aussagekraft - werden nun spezifischere Vorgaben für das Instrumentarium formuliert, die als Basis für dessen Konzeption dienen und vor allem die gezielte Auswahl bzw. Ausgestaltung geeigneter Instrumente ermöglichen sollen. Die Strukturierung dieser Vorgaben kann in Anlehnung an die typischen Elemente betriebswirtschaftlicher Entscheidungsmodelle (Ziele, Alternativen, Umweltzustände und Ergebnisfunktion) sowie unter Berücksichtigung der zeitlichen Komponente erfolgen [18]:

- Zeit:
 - Betrachtung der relevanten Phasen des Lebenszyklus (Konzeption und Definition, Entwurf und Entwicklung, Herstellung, Einbau, Betrieb und Instandhaltung sowie Stilllegung/Entsorgung) der WZM, um sämtliche für die Entscheidung maßgeblichen Wirkungen ebenso erfassen zu können wie Veränderungen im Zeitablauf
 - Aufgliederung des Betrachtungszeitraums in Zeitabschnitte zur differenzierten Erfassung und Berücksichtigung der energetischen und wirtschaftlichen Effekte, Erhöhung der Transparenz sowie Integrierbarkeit kurzfristiger Rechnungen
- Ziele:
 - Erfassung der relevanten energetischen, technischen und wirtschaftlichen Zielvorstellungen und ihrer Beziehungen zueinander, um diese der (auch wirtschaftlichen) Beurteilung von Gestaltungsalternativen von WZM zugrunde legen zu können (Hintergrund ist unter anderem der Gedanke, dass keine Verschlechterung der Wirtschaftlichkeit energetisch optimierter WZM gegenüber hinsichtlich technischer Eigenschaften vergleichbaren existierenden WZM erfolgen soll)

- Adäquate Einbeziehung langfristiger Wirkungen (z. B. der wirtschaftlichen Effekte in einem Kapitalwert)
- Möglichkeit zur Integration mehrerer kurz- und langfristiger Zielgrößen (inklusive (Energie-)Kosten und (Energie-)Erlöse sowie Lebenszykluskosten der WZM)
- (Entscheidungs-)Alternativen: Berücksichtigung der relevanten, energetisch-technischen und energetisch-wirtschaftlichen Entscheidungsalternativen wie alternative Baugruppen der WZM, eingesetzte Energieträger etc.
- (Umwelt-)Zustände: Einbeziehung der ergebnisbeeinflussenden physikalischen, technischen, organisationalen, wirtschaftlichen und weiteren Einflussgrößen, wie die Ausfallhäufigkeit von Baugruppen oder die verschiedenen Betriebszustände der WZM
- Ergebnisfunktion:
 - Abbildung der Konsequenzen von Gestaltungsalternativen wie energieeffizienzbezogene Maßnahmen bezogen auf mögliche Umweltzustände, d. h. bspw. die Prognose bzw. Erfassung von Energieverbräuchen und Kostenkomponenten verschiedener Baugruppen oder der WZM als Ganzes je Periode
 - Adäquate Aggregation der Effekte verschiedener Perioden (z. B. der langfristigen wirtschaftlichen Wirkungen unter Einbeziehung von Zins- und Zinseszinsseffekten in dynamischen Kapitalwertmodellen)
 - Gute Interpretierbarkeit der Ergebnisse im Hinblick auf die Vorbereitung von Entscheidungen

Die in Bild 11 aufgeführten energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierungs- und Bewertungsansätze erfüllen die definierten Anforderungen auf unterschiedliche Weise. Da aus der energetisch-ökologischen Perspektive stammende Ansätze einer energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung bisher allenfalls in Grundzügen vorliegen, liegt im Folgenden der Fokus auf den Ansätzen mit wirtschaftlichem Ursprung (linke Spalte der in Bild 11 aufgeführten energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierungsansätze). Material- und energieflussorientierte Kostenrechnungsansätze sowie die bezüglich Energieaspekten verfeinerte Kosten- und Erlösrechnung stellen periodische und kurzfristig ausgerichtete Rechnungen dar, die sich zwar zur Beurteilung der Vorteilhaftigkeit von kurzfristig wirkenden Handlungsalternativen wie Nutzungsvarianten von WZM eignen, jedoch langfristige, auf den gesamten Lebenszyklus der Maschine bzw. mehrere seiner Phasen bezogene Effekte

vernachlässigen. Zur Vorbereitung von Entscheidungen, die sich über mehrere Phasen auswirken, sind Rechnungen erforderlich, die die relevanten Lebenszykluskosten und -erlöse abbilden. Beispielsweise ist während der Konstruktion einer WZM die Frage der Dimensionierung von Baugruppen zu klären. Die zu treffende Entscheidung hat maßgeblichen Einfluss auf die Höhe der Herstellkosten der Maschine und die während des Betriebs wiederkehrend anfallenden Energiekosten. Auch führen Entscheidungen zu den beim Betrieb der WZM eingesetzten Energieträgern unter gegebenen Annahmen zu Preisen für die Druckluft, elektrische Energie etc., zu verschiedenen hohen Lebenszykluskosten. Eine aussagekräftige Beurteilung entsprechender Entscheidungsalternativen ist mittels Lebenszyklusrechnungen möglich, die zweckmäßigerweise als dynamische Rechnungen (z. B. Kapitalwertrechnungen) durchgeführt werden, um den zeitlichen Unterschied im Anfall der Kosten (und Erlöse) bzw. der damit verbundenen Zahlungen zu berücksichtigen. Um die Auswirkungen von Umweltveränderungen zu erfassen, lassen sich in solchen Rechnungen auch Variationen unsicherer Größen integrieren (Sensitivitätsanalysen).

Bei der Gestaltung von WZM bspw. im Rahmen energetisch-technischer Verbesserungen sollte, wie eingangs erwähnt, die Wirtschaftlichkeit der WZM nicht verschlechtert werden. Daher kann es angebracht sein, für die Lebenszykluskosten, aber auch für die Energieverbräuche Zielwerte vorzugeben. So liegt es im konkreten Fall nahe, die Ausgangs-WZM zunächst hinsichtlich zuzurechnender Kosten und Erlöse zu analysieren und auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse (energetisch-)wirtschaftliche und (energetisch-)technische Zielwerte für modifizierte WZM bzw. die Maßnahmen an diesen abzuleiten – die (Folge-)Kosten sollten dann diese Vorgaben nicht überschreiten. Entsprechende Vorgaben sollten auch im Rahmen des zu schaffenden Instrumentariums für die energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung berücksichtigt werden können. Hierfür bietet sich das Target Costing an, da es eine systematische Einbeziehung derartiger Vorgaben bei der Gestaltung von WZM und deren Elementen ermöglicht.

Langfristig ausgerichtete Instrumente wie Lebenszyklusrechnungen und das Target Costing bilden zwar wesentliche Elemente des zu schaffenden Bilanzierungs- und Bewertungsinstrumentariums, eine (energieorientierte) Kosten- und Erlösrechnung ist aber nicht verzichtbar, da sie die notwendigen Kostendaten bereitstellt. Des Weiteren sollten Kennzahlen und Kennzahlensysteme Bestandteil des Instrumentariums werden.

Durch die komprimierte Darstellung von Informationen, bspw. zu energetischen, technischen und wirtschaftlichen Einflussgrößen, die den monetären Rechnungen zugrunde liegen, eignen sie sich zu deren Fundierung und darüber hinausgehend zur Kommunikation energetisch-wirtschaftlicher Tatbestände.

Es wird deutlich, dass die alleinige Anwendung einer energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierungs- und Bewertungsmethode den spezifizierten Anforderungen nicht gerecht wird. Es ist daher vielmehr ein kombinierter Einsatz der energieorientierten Instrumente Lebenszyklusrechnung, Target Costing, Kosten- und Erlösrechnung sowie Kennzahlen und Kennzahlensystemen im Rahmen eines integrierten Bilanzierungs- und Bewertungsinstrumentariums anzustreben (siehe Bild 12).

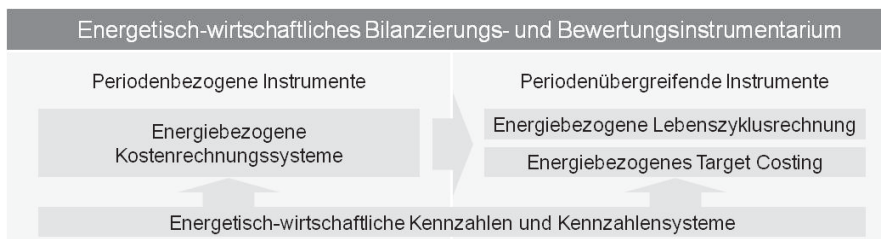


Bild 12: Instrumentarium der energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung

Es ist jedoch festzustellen, dass die ausgewählten Methoden im Hinblick auf die energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung, Analyse und Bewertung von WZM nicht ausgereift sind. Es gibt zwar einerseits einzelne energetisch-wirtschaftliche Bilanzierungs- und Bewertungsansätze, insbesondere in Form von Energiekostenrechnungen und Energiekennzahlen(-systemen) (bspw. [19] und [20]), jedoch ist nach erster Bestandsaufnahme festzustellen, dass diese bisher noch keine zufriedenstellende methodische Reife erreicht haben und nicht auf den spezifischen Anwendungsfall der WZM zugeschnitten sind. Andererseits existieren einige wenige Ansätze, die das Bilanzierungsobjekt WZM betrachten (für die Lebenszyklusrechnung bspw. siehe [21] und [22]), allerdings finden hier energetisch-wirtschaftliche Sachverhalte keine angemessene Berücksichtigung. Um eine adäquate Unterstützung bei Entscheidungen über die energieeffizienzorientierte Gestaltung von WZM bzw. Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz zu ermöglichen, ist demgemäß eine Weiterentwicklung der bestehenden Ansätze bzw. die Neuentwicklung zusätzlicher Instrumente der energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung (z. B. eines energieeffizienzorientierten Target Costing) vor dem besonderen Hintergrund der Anwendbarkeit auf WZM erforderlich.

Zudem werden weitere Arbeiten zur Integration dieser Ansätze über den bisherigen Forschungsstand hinaus hin zu einem umfassenden Analyse- und Bewertungsinstrumentarium als notwendig angesehen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurden zwei Schwerpunkte gesetzt: Die energetische sowie die darauf aufbauende energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung und Bewertung von WZM. Die vorgestellte energetische Bilanzierungsmethodik auf Grundlage einer Input-Output-Analyse wurde an die Besonderheiten von WZM angepasst. Die dabei gezogenen Systemgrenzen bilden die Schnittstellen zu angrenzenden Forschungsgebieten innerhalb des Spitzentechnologieclusters eniPROD. Die energieflussorientierte Systematisierung der Verbraucher unterstützt die experimentelle und simulative Analyse und Modellierung. Detaillierte Messungen hochdynamischer Beschleunigungsprozesse ermöglichen die Verifizierung von Simulationsmodellen, welche zur Analyse und Optimierung der elektrischen Energiekreisläufe sowie der Energiequalität eingesetzt werden. Die modellgestützte Vorhersage des Energieverbrauches mit verfügbaren Methoden und Werkzeugen ergibt eine gute Übereinstimmung mit der Realität. Potenziale zur aktiven BLK sind ebenso darstellbar wie die exakte Dimensionierung von Energiespeichern. Die Reduzierung von Energieverlusten, Erhöhung des Wirkungsgrades und das Schließen von Energiekreisläufen kann somit vor einer kostenintensiven Investition bzw. Modernisierung am Modell analysiert und bewertet werden. Anders als bei der energetischen Bilanzierung existieren bisher hinsichtlich der energetischen Bewertung kaum ausgereifte Ansätze. Gerade um einen energetisch-technischen Vergleich verschiedener WZM zu ermöglichen, sind entsprechende Methoden und Parameter (in Kombination mit energetisch-wirtschaftlichen Kenngrößen) zu entwickeln.

Zur Konzeption einer energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierungs- und Bewertungsmethode wurden ein Überblick über existierende Instrumente erarbeitet sowie allgemeine und spezifische Anforderungen an die Methode formuliert. Da sich zeigte, dass diese Anforderungen mit einem Bilanzierungs- und Bewertungsinstrument allein nicht erfüllt werden können, wird vorgeschlagen, Lebenszyklusrechnungen, Target Costing, Kosten- und Erlösrechnung sowie Kennzahlen und Kennzahlensysteme in ein umfassendes energieeffizienzbezogenes Instrumentarium zu integrieren.

Bezüglich der energieorientierten Ausgestaltung dieser Kernelemente, ihrer Ausrichtung auf WZM und ihrer Integration besteht allerdings, vor allem auch im Hinblick auf energetisch-wirtschaftliche Vergleiche verschiedener WZM, noch erheblicher Entwicklungsbedarf, auf den sich zukünftige Forschungsarbeiten richten werden.

Literatur

- [1] Götze, U.; Helmberg, C.; Rüniger, G.; Schubert, A.; Goller, S.; Krellner, B.; Lau, A.; Sygulla, R.: *Integrating energy flows in modeling manufacturing processes and process chains of powertrain components*, 1. Internationales Kolloquium eniPROD, Chemnitz, 2010
- [2] Kroll, L.; Frieß, U.; Eulitz, J.; Klärner M.: *Leichtbaukomponenten für hochproduktive Maschinen*, 1. Internationales Kolloquium eniPROD, Chemnitz, 2010
- [3] CECIMO: *Concept Description for CECIMO's Self-Regulatory Initiative (SRI) for the Sector Specific Implementation of the Directive 2005/32/EC (EuP Directive)*, 2009
- [4] Neugebauer, R.; Frieß, U.; Paetzold, J.; Wabner, M.; Richter, M.: *Approach for the development of energy-efficient machine tools*, XXI International CIRP Sponsorship Conference on Supervising and Diagnostics of Machining Systems, Karpacz, Poland, 2010
- [5] Neugebauer, R.; Wabner, M.; Rentzsch, H.; Kocourek, P.; Ihlenfeldt, S.: *Structure Principles of Energy Efficient Machine Tools*, 1. Internationales Kolloquium eniPROD, Chemnitz, 2010
- [6] Hagemann, D.: *Die energieeffiziente Werkzeugmaschine - Rahmenbedingungen und Lösungen für eine nachhaltige Fertigungstechnik*, Symposium „Die energieeffiziente Werkzeugmaschine“, Düsseldorf, 2010
- [7] Hirsch, A.: *Werkzeugmaschinen Grundlagen*, Verlag Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden, 2000, S. 109
- [8] Dietmair, A.; Verl, A.; Wosnik, A.: *Zustandsbasierte Energieverbrauchsprofile*, In: *wt Werkstatttechnik online*, 2008, Band 98, Nr. 7/8, S. 640-645
- [9] Jäckle, B.: *Antriebstechnik im Maschinenbau*, Kap. 5 Frequenzumrichter, RAVEL, Bundesamt für Konjunkturfüragen, Best.-Nr. 724.333 D, Bern, 1995, S. 29-34

- [10] Zirn, O.; Weickert, S.: *Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme - Eine praxisnahe Einführung*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006
- [11] Heck, T.: *Beschreibung der Elektroenergiequalität an der Schnittstelle zwischen Elektroenergieversorgungsnetz und Elektroenergieabnehmer*, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 2004, S. 27
- [12] Baum, H.-G.; Albrecht, T.; Raffler, D.: *Umwelt- und Ressourcenschutz als Unternehmensziel: Steigerung des Unternehmenswerts durch Ressourcenmanagement*, Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 2007, S. 118
- [13] Schaltegger, S.; Sturm, A.: *Öko-Effizienz durch Öko-Controlling: zur praktischen Umsetzung von EMAS und ISO 14'001; mit Anwendungsbeispielen der Unternehmen Flumroc AG, Mohndruck GmbH, Bank Sarasin & Cie., Schäffer-Poeschel Verlag für Wirtschaft-Steuern-Recht, Stuttgart, 1995, S. 12*
- [14] Günther, E.: *Ökologieorientiertes Management: Um-(weltorientiert) Denken in der BWL*, Lucius & Lucius Verlagsgesellschaft, Stuttgart, 2008, S. 227 ff.
- [15] Mahlendorf, M.: *Entwicklung eines Entscheidungsmodells zur Anwendung von Umweltkostenrechnungssystemen: Aktuelle Entwicklungen und Anwendungsbereiche*, in: Günther, T.; Günther, E.; Hoppe, H. (Hrsg.): *Umweltcontrolling, Dresdner Beiträge zur Lehre der Betrieblichen Umweltökonomie*, Nr. 18/2005, S. 68
- [16] Fichter, K.; Loew, T.; Seidel, E.: *Betriebliche Umweltkostenrechnung: Methoden und praxisgerechte Weiterentwicklung, mit 14 Tabellen*, Springer-Verlag, Berlin u. a., 1997, S. 6
- [17] Kramer, M.; Strebel, H.; Kayser, G.: *Internationales Umweltmanagement, Bd. 3., Operatives Umweltmanagement im internationalen und interdisziplinären Kontext*, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2003, S. XIII
- [18] Götze, U.; Schmidt, A.; Weber, T.: *Vorgehensmodell zur Abbildung und Analyse des Lebenszykluserfolgs von Werkstoffen – Konzeption und beispielhafte Veranschaulichung, zur Veröffentlichung angenommen in Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2010
- [19] Fünfgeld, C.: *Energiekosten im Betrieb*, Solar-Promotion-GmbH Verlag, München, 2000, S. 6 ff.
- [20] Bauer, U.: *Kennzahlensystem zum betrieblichen Energiemanagement*, Dissertation, Technische Universität Graz, 1988, S. 110 ff.

- [21] *Osten-Sacken, D. v. d.: Lebenslauforientierte, ganzheitliche Erfolgsrechnung für Werkzeugmaschinen, Dissertation, Universität Stuttgart; Fraunhofer-Institut Produktionstechnik und Automatisierung, Stuttgart, 1999, S. 57 ff.*
- [22] *Schweiger, S. (Hrsg.): Lebenszykluskosten optimieren: Paradigmenwechsel für Anbieter und Nutzer von Investitionsgütern, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2009*