



## Technische Information

# Aspekte der Energieeffizienz von Werkzeugmaschinen

In vielen Industriebereichen geraten Fragen zur effizienten Nutzung von Energie verstärkt in die Diskussion. Werkzeugmaschinen weisen zahlreiche Antriebe und Hilfsaggregate auf, deren Energieaufnahme während einer Bearbeitung stark schwanken kann. So arbeiten der Hauptspindelantrieb und das Kühlschmierstoffsystem beim Schrappen mit hohem Zeitspanvolumen nahe dem Nennbetriebspunkt, während die Leistungsaufnahme beim Schlichten deutlich geringer ausfällt. Die Verflechtung der Einzelkomponenten und Aggregate einer Werkzeugmaschine mit Aspekten der Produktivität und Qualität ist eng. Aus einer detaillierten Betrachtung von Fertigungsprozessen bis hin zu der Leistungsaufnahme der Einzelverbraucher lassen sich die Einsparpotentiale bewerten und Maßnahmen zur effizienteren Nutzung der Energie definieren.

In vielen Branchen der Investitionsgüterindustrie entwickelt sich die Energieeffizienz zu einem wichtigen Merkmal eines Produktes. So werden Getriebemotoren für fördertechnische Einrichtungen bereits seit langem in Effizienzklassen eingeteilt. Ansätze zur Steigerung der Energieeffizienz in der Fertigung mit Werkzeugmaschinen sind sehr vielfältig. Potentiale ergeben sich in Bezug auf die Grundlast von Werkzeugmaschinen, welche auch in nichtproduktiven Phasen für eine Energieaufnahme sorgt. Die Grundlast wird maßgeblich von den Nebenaggregaten einer Maschine bestimmt. Neben dem Einsatz von energieeffizienten Motoren in den Nebenaggregaten ergeben sich Möglichkeiten zur Reduktion der Grundlast über ein Energiemanagement. Dabei werden Verbraucher in nichtproduktiven Phasen gezielt von der Maschinensteuerung deaktiviert.

Maßnahmen zur Unterstützung des Bedieners beim Einrichten verbessern ebenfalls die Energieeffizienz, da die nichtproduktiven Phasen verkürzt und damit der Einfluss der Grundlast auf die Energiebilanz verkleinert wird. Ausschussteile erhöhen unweigerlich die Energieaufwendungen pro Gut-



teil. Eine Genauigkeit ab dem ersten Teil zu fertigen kann daher ein entscheidender Faktor für die Energieeffizienz einer Werkzeugmaschine werden.

Maschinenkonzepte mit einem ausgewogenen thermischen Verhalten und einer präzisen Positionsmesstechnik sind hier klar im Vorteil.

## Leistungsbedarf beim Fräsen

Der Energiebedarf eines Fräsprozesses verteilt sich auf die Verbrauchergruppen

- Kühlschmierstoffaufbereitung,
- Drucklufterzeugung,
- elektrisch gespeiste Nebenaggregate der Fräsmaschine sowie
- CNC-Steuerungspaket mit Hauptspindel und Vorschubantrieben.

Hinzu kommt die anteilig einzurechnende Energie zur Beleuchtung, Lüftung und Klimatisierung der Fertigungshalle. Der Energiebedarf eines Fräsprozesses hängt stark von der Größe der Fräsmaschine und von der Bearbeitungsaufgabe ab.

Im betrachteten Beispiel wird ein Aluminiumgehäuse mit den Abmessungen 150 mm x 50 mm x 25 mm auf einem Bearbeitungszentrum mit der Arbeitsraumgröße 850 mm x 700 mm x 500 mm gefräst. Die mittlere Gesamtleistung aller oben angeführten Verbrauchergruppen beträgt beim Schruppen 13 kW und beim Schlichten 7,4 kW. Die Leistungsbilanzen beim Schruppen und Schlichten liefern näheren Aufschluss über die Verteilung des Energieverbrauchs auf die einzelnen Verbrauchergruppen.

Der Kühlschmierstoff wird außerhalb der Fräsmaschine zentral aufbereitet (Pumpen, Temperierung). Beim Schruppen werden hierfür im Mittel 5,1 kW benötigt. Bei Schlichten reduziert sich der mittlere Leistungsbedarf auf 1,5 kW. In der Produktionsbereitschaft wird nahezu keine Leistung aufgenommen. Die Trockenbearbeitung bietet hier große Potentiale zur Steigerung der Energie- und Ressourceneffizienz. In vielen Fräsanwendungen kann ein Wegfall des Kühlschmierstoffs jedoch zu einer deutlichen Erhöhung des Ausschusses und damit zu einer Verschlechterung der Energiebilanz führen.

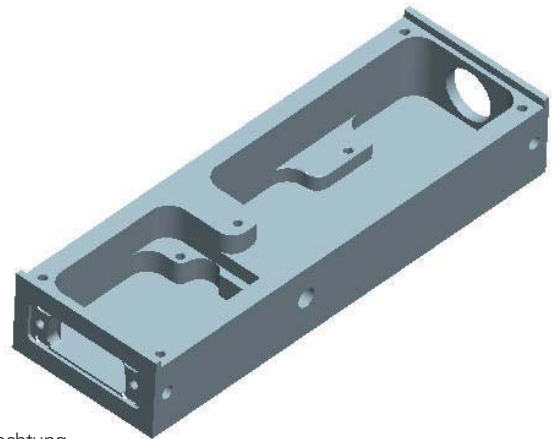
Die mittlere Druckluftleistung ändert sich in den Phasen Produktionsbereitschaft, Schruppen und Schlichten nur geringfügig und liegt im Mittel bei ca. 1,3 kW.

Druckluft wird für die Minimalmengenschmierung der Spindel, beim Werkzeugwechsel sowie zum Reinigen des Werkstücks und in geringen Mengen als Sperrluft (Spindel, Werkzeugvermessung, Längenmessgeräte) benötigt.

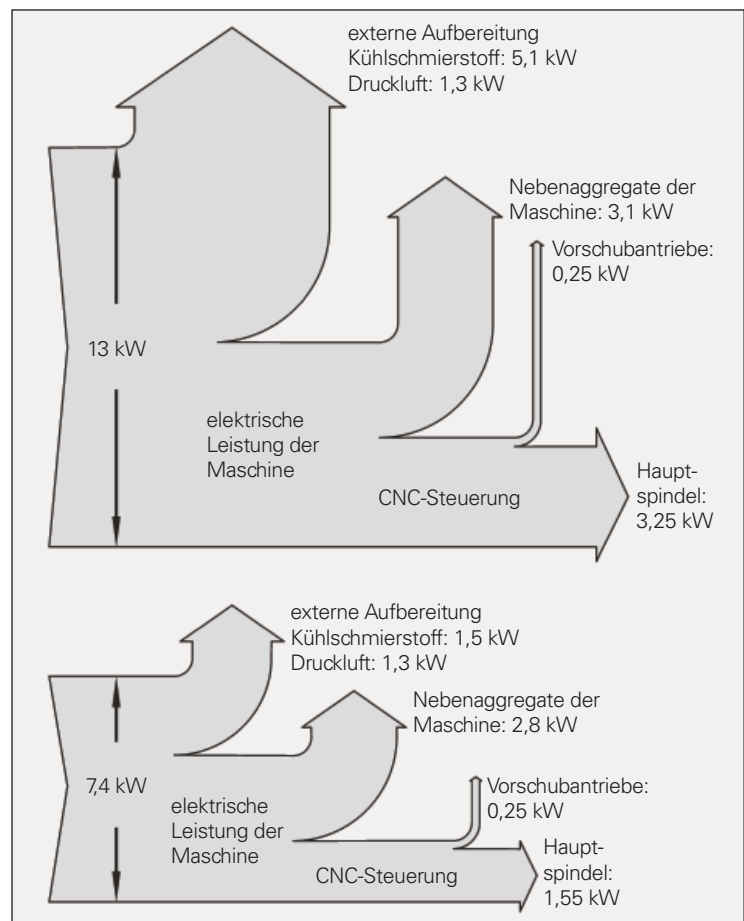
Zu den elektrischen Verbrauchern der Maschine zählen neben der CNC-Steuerung mit Hauptspindel und Vorschubantrieben zahlreiche Nebenaggregate (Palettenwechsler, Kühlung, Hydraulik, Automatisierung). Die Leistungsaufnahme der Nebenaggregate variiert in den Betriebszuständen Produktionsbereitschaft, Schruppen und Schlichten nur um 600 W. Mit einer Leis-

tungsaufnahme von 2,5 kW bestimmen die Nebenaggregate maßgeblich die Energieaufnahme in der Produktionsbereitschaft. Eine bedarfsgerechte Deaktivierung von Nebenaggregaten bietet daher erhebliche Potentiale.

Das CNC-Steuerungspaket mit allen Vorschubmotoren und Hauptspindel benötigt



Gehäuse für die Betrachtung des Leistungsbedarfs eines Fräsprozesses



Mittlerer Leistungsbedarf für die Fertigung eines Gehäuseteils, oben: Schruppen, unten: Schlichten

im betrachteten Fall sowohl beim Schruppen als auch beim Schlichten gerade 27 % der Gesamtleistung. Die mittlere Leistung der Vorschubantriebe liegt in beiden Fällen bei 250 W und wird maßgeblich durch die Haltekraft der vertikalen Achse bestimmt. Lediglich in Beschleunigungs- und Abbremsvorgängen treten kurzzeitig Spitzenwerte auf.

## Energieeffizienz der Antriebskomponenten

Hauptspindel- und Vorschubantriebe gehören zu den zentralen Komponenten einer Werkzeugmaschine. Die Energieeffizienz einer Antriebskomponente ist abhängig vom Verhältnis der abgegebenen zur aufgenommenen Leistung und spiegelt sich somit im Wirkungsgrad wieder. Der Antriebsverbund einer Werkzeugmaschine setzt elektrisch aufgenommene in abgegebene mechanische Leistung um. Zu den Komponenten des Antriebsverbunds zählen ein Versorgungsmodul, Antriebsmodule, Motoren und die mechanischen Komponenten. Wirkungsgradangaben beziehen sich typischerweise auf den Nennbetriebspunkt. In anderen Betriebspunkten kann der Wirkungsgrad einzelner Komponenten deutlich abweichen. HEIDENHAIN Versorgungs- und Antriebsmodule erreichen Wirkungsgrade von über 95 %.

### Leistungsaufnahme beim Fräsen

Die Leistungsaufnahme von Hauptspindel und Vorschubantrieben wird für zwei Bearbeitungen aufgeschlüsselt.

#### Beispiel 1: Planschrappen

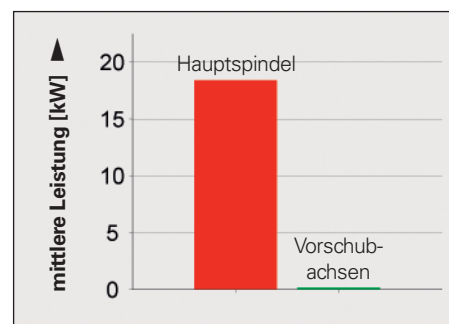
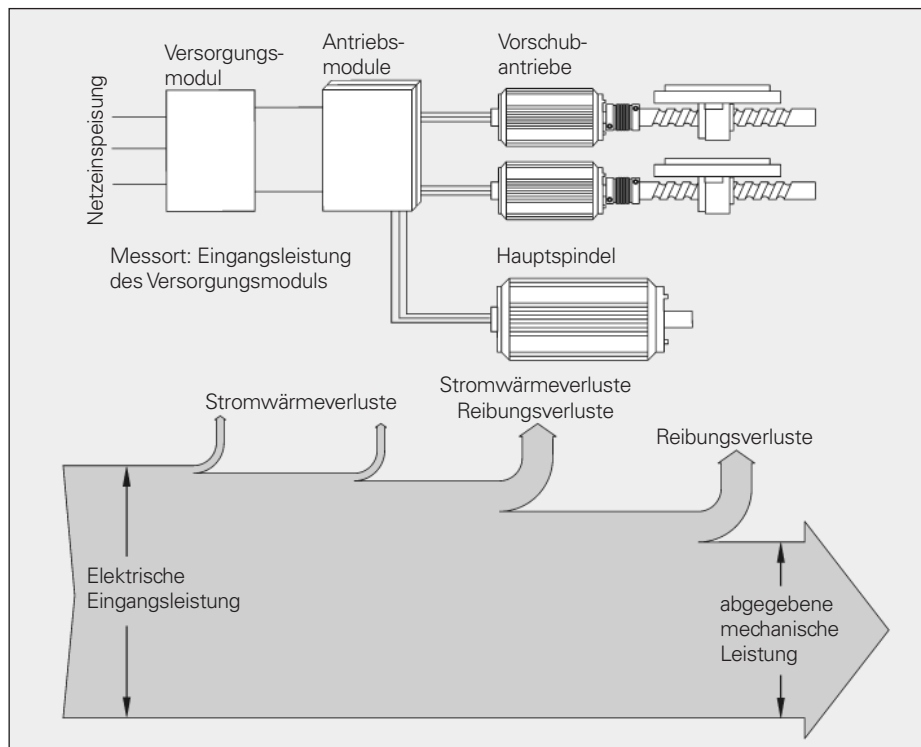
Beim Planschrappen mit achsparallelem Vorschub nehmen die Vorschubmotoren im Mittel nur 200 W auf. Die Hauptspindel erreicht mit ca. 19 kW ihre Nennleistung.

#### Beispiel 2: Kreistasche

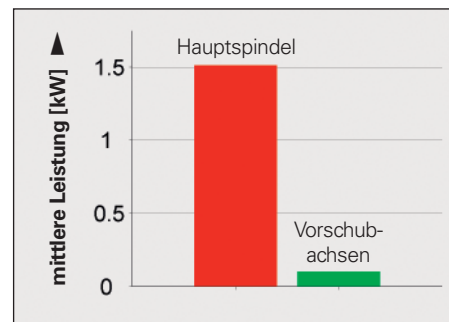
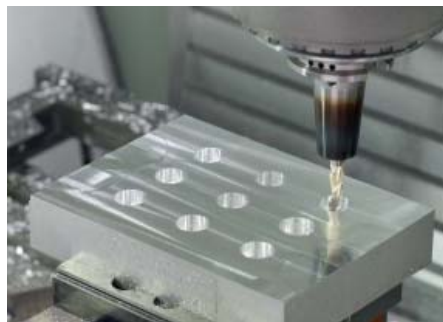
Die Kreistasche wird mit einem Schrupp- und einem Schlichtzyklus gefertigt. Die mittlere Leistung der Vorschubantriebe beträgt hier 100 W. Die Hauptspindel benötigt eine Leistung von 1,5 kW.

### Fazit

Vorschubantriebe gehen nur mit einem geringen Anteil in die Gesamtleistung der CNC ein und können daher die Energieeffizienz nur geringfügig steigern. Im Gegensatz dazu kann sich die Wahl der Hauptspindel spürbar auf die Energiebilanz auswirken. Arbeitet ein Hauptspindelantrieb weit unterhalb vom Nennbetriebspunkt so erhöhen sich anteilig die Eigenverluste des Antriebs mit negativen Folgen für die Energieeffizienz. Begrenzt die Hauptspindel das maximal mögliche Zeitspanvolumen eines Fräsprozesses, so dauert der Fräsprozess unweigerlich länger. Die Folge: Die Energieeffizienz wird aufgrund der über Nebenaggregate generierten Grundlast schlechter. Potential zur effizienteren Gestaltung von Fräsprozessen liegt auch in der Berücksichtigung des Wirkungsgrads von Spindelmotoren, zum Beispiel durch den Einsatz eines Synchronanstatt eines Asynchronmotors.



Mittlere Leistungsaufnahme der Antriebe beim Planschrappen  
Messerkopf: D = 60 mm, Drehzahl: 4 100 U/min, Tiefenzustellung: 4 mm



Mittlere Leistungsaufnahme der Antriebe beim Fräsen einer Kreistasche  
Kreistasche: D = 20 mm, Schaftfräser: D = 10 mm, seitliches Aufmaß: 5 mm, Tiefenzustellung 2 x 5 mm, Drehzahl: 16 000 U/min

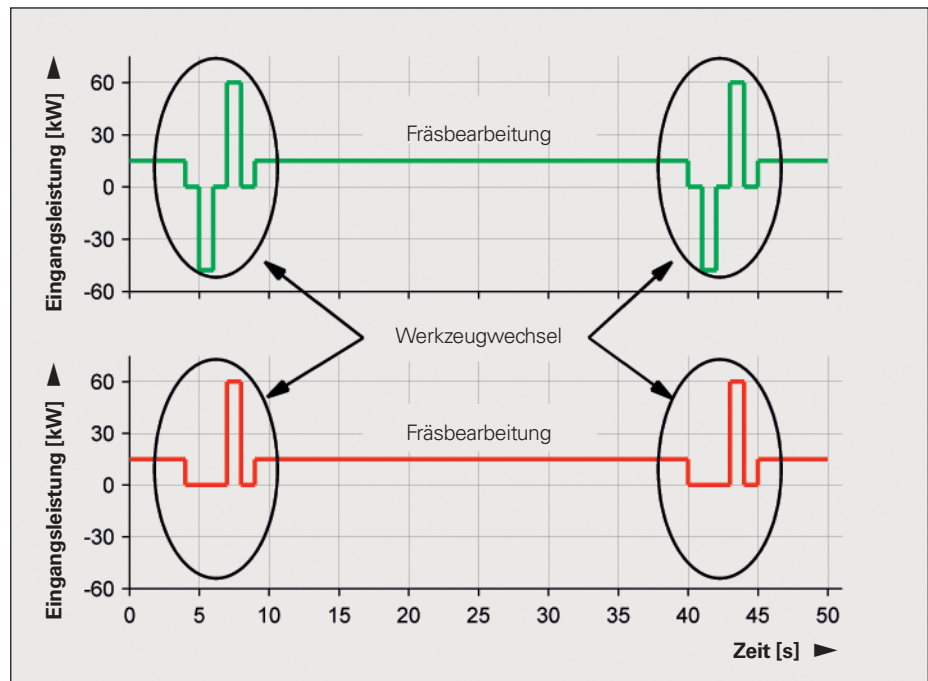
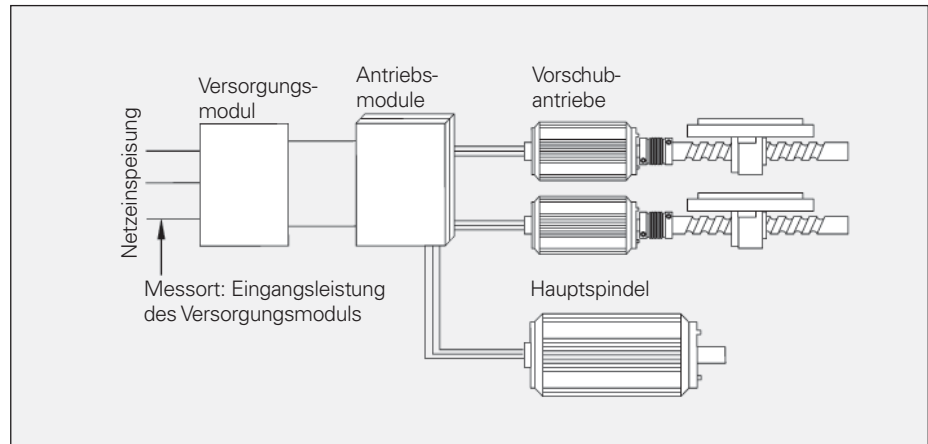
## Effizienz von rückspeisefähigen Versorgungsmodulen

Jeder Beschleunigungsvorgang eines Antriebs erfordert im Gegenzug auch ein Abbremsen. Dabei wird die Energie aus den bewegten Massen der Antriebe wieder größtenteils in elektrische Energie umgewandelt.

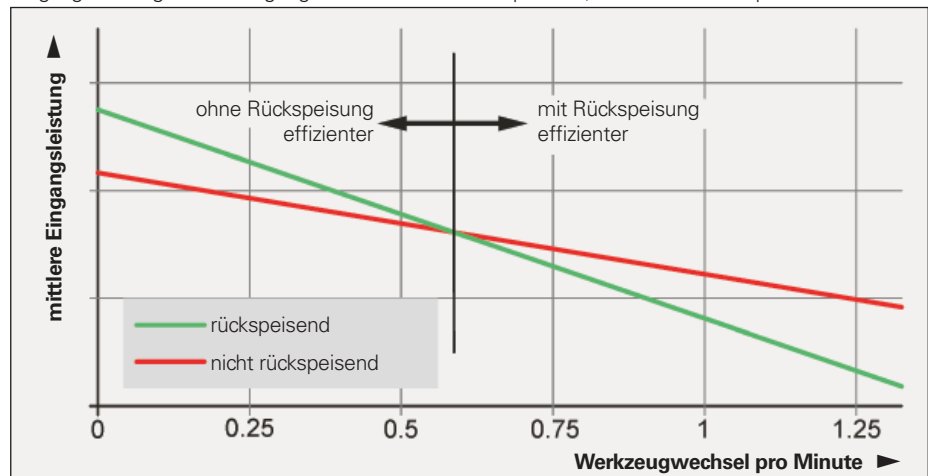
Die Versorgungsmodule der CNC-Steuerungen von HEIDENHAIN werden sowohl rückspeisend als auch nicht rückspeisend ausgeführt. Bei einem nicht rückspeisenden Versorgungsmodul wird die während eines Abbremsvorganges frei werdende kinetische Energie über Bremswiderstände in Wärme umgesetzt. Ein rückspeisendes Versorgungsmodul speist diese Energie ins Netz zurück. Der dafür notwendige Rückspeisestrom und die erforderlichen Komponenten zur Glättung der Netzspannung erzeugen jedoch auch dann Verluste, wenn die Antriebe keine Leistung benötigen. Auch im normalen Speisebetrieb erhöht sich die Verlustleistung geringfügig. Ein rückspeisendes Versorgungsmodul arbeitet dann effizienter als ein nicht rückspeisendes Modul, wenn die rückgespeiste Energie die höhere Verlustleistung überwiegt. Die Entscheidung für ein rückspeisendes oder für ein nicht rückspeisendes Versorgungsmodul hängt somit auch von den zu erwartenden Bearbeitungen auf einer Maschine ab.

Für die Energiebilanz ist die Anzahl der Werkzeugwechsel wichtig. In einem Beispiel wird eine Fräsbearbeitung mit 15 kW zyklisch durch Werkzeugwechsel unterbrochen. Für das Hochlaufen benötigt die Hauptspindel eine Spitzenleistung von ca. 60 kW. Während das rückspeisende Versorgungsmodul beim Abbremsen mit kurzzeitig 48 kW in das Netz zurückspeist, wird die kinetische Energie beim nicht rückspeisenden Versorgungsmodul in Wärme umgesetzt.

Aufgrund der hohen Zerspanleistung sinkt die mittlere Eingangsleistung, je häufiger die Fräsbearbeitung für einen Werkzeugwechsel unterbrochen wird. Dabei arbeitet das rückspeisende Versorgungsmodul effizienter, sobald der Zeitabstand zwischen zwei Werkzeugwechseln kürzer als 100 s ist (entspricht 0,6 Werkzeugwechseln pro Minute). In Prozessen mit vielen Werkzeugwechseln pro Minute erweist sich ein rückspeisendes Versorgungsmodul häufiger als die bessere Wahl. Beim Konturfäsen mit seltenen Werkzeugwechseln liegen die Vorteile beim nicht rückspeisenden System.



Eingangsleistung des Versorgungsmoduls – oben: rückspeisend, unten: nicht rückspeisend



Effizienzbetrachtung eines Versorgungsmoduls in den Ausführungen mit und ohne Rückspeisung

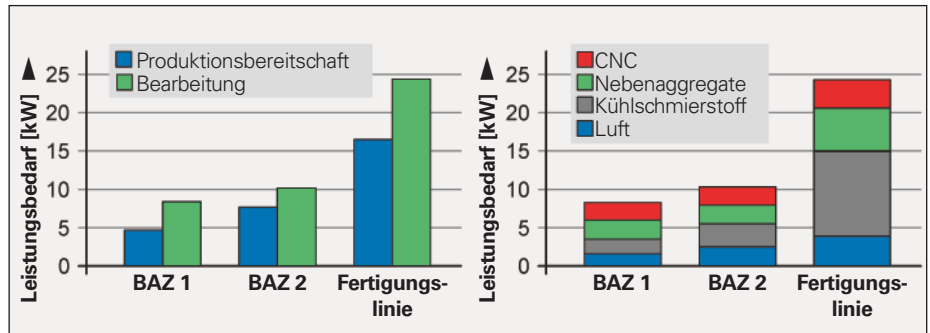


## Bedarfsgerechte Deaktivierung von Nebenaggregaten

Ein Vergleich der Leistungsaufnahme von zwei Bearbeitungszentren (BAZ) und einer Fertigungslinie mit drei Bearbeitungsstationen verdeutlicht noch einmal die Potentiale: Da sich der Energiebedarf einiger Verbrauchergruppen in der Produktionsbereitschaft nur unwesentlich reduziert, müssen die nichtproduktiven Phasen so kurz wie möglich gehalten werden. Bei Bearbeitungszentren für kleinere Fertigungslose kann die Energiebilanz durch ein gezieltes Deaktivieren von Nebenaggregaten erheblich verbessert werden. Darüber hinaus ergeben sich Einsparpotentiale durch den Einsatz von energieeffizienten Pumpen im Kühlschmierstoffkreislauf.

Ein konsequentes Abschalten von Nebenaggregaten (Hydraulik, Spindelkühlung) oder der Druckluftversorgung kann jedoch auch gegenteilig wirken. Führt der schlagartige Wegfall der Abwärme von Nebenaggregaten oder der temperierenden Wirkung von Medien zu thermischen Verlagerungen im Maschinengestell, so können Ausschussteile entstehen, welche die Energiebilanz eines Fertigungsprozesses verschlechtern. Nebenaggregate lassen sich daher besonders auf Maschinen mit geringer Neigung zu thermischen Verlagerungen bedarfsgerecht abschalten. Eine sorgsame Auslegung des Energiesparkonzeptes wird in jedem Fall vorausgesetzt.

Die CNC kann dabei als zentrale Steuereinheit für das Energiemanagement einer Werkzeugmaschine und der zugehörigen Peripherie genutzt werden. Für die iTNC 530 sind hierzu spezielle PLC-Funktionen zur Verknüpfung von Ereignissen im Fertigungsablauf (z. B. NC Stopp) mit Ausgängen zur Ansteuerung von Nebenaggregaten verfügbar. Den Ereignissen können Verzögerungszeiten zugewiesen werden, so dass z. B. Antriebe nach einer Stillstandszeit geklemmt und stromlos geschaltet werden. Auf dieser Basis können Funktionen zur Deaktivierung verschiedener Nebenaggregate, Achsen, Licht im Bearbeitungsraum, etc. erstellt werden. Diese Grundfunktionen können vom Maschinenhersteller nach eigenen Wünschen erstellt und an den jeweiligen Maschinentyp angepasst werden. Für den Anwender ist eine weitere Kapselung hilfreich, in der das Energiemanagement an die jeweiligen Nutzungsgewohnheiten angepasst werden kann. Im gezeigten Beispiel können die Deaktivierungsfunktionen (Antriebe Klemmen, Standby, Not Aus, Abschalten) für unterschiedliche Betriebsarten konfiguriert werden.



Leistungsbedarf von 3 Fertigungsprozessen aufgeschlüsselt nach Betriebszuständen und Verbrauchergruppen

**Manueller Betrieb** | Programm-Einspeichern

**EnergyOpt**

Einstellungen | Erweitert | INFO

Bereitschaft

- ☒ Spindel: 5 Sekunden
- ☒ Achsen: 30 Sekunden
- ☒ Bildschirme: 3 Minuten

Ausschalten

- ☒ Maschine: 30 Minuten
- ☒ Steuerung: 1 Stunde
- ☒ Licht 1: 24 Stunden
- ☒ Licht 2: 30 Minuten
- ☒ Luft Aggregat: 30 Minuten
- ☒ 01 Aggregat: 2 Stunden

Einschalten

- ☒ Maschine
- ☒ Antriebe
- ☒ Licht

Mo Di Mi Do Fr Sa So Uhrzeit  
P P P P P P 08:00  
TNC:\Waraup.h

100% S-IST P0 -T0  
0% SCNmJ LIMIT 1 08:51

POWER MANAGEMENT AUS EIN | EDITIEREN AUS EIN | ENDE

Beispiel eines Konfigurationsmenüs für Maschinenhersteller zur Deaktivierung von Nebenaggregaten, Achsen, Licht, etc.

**Manueller Betrieb** | Programm-Einspeichern

**EnergyOpt**

Einstellungen

BA Manuell / el. Handrad

- ☒ Standby nach: 30 Minuten
- ☒ Maschine aus nach: 2 Stunden

BA Positionieren m. Handeingabe

- ☒ Standby nach: 45 Minuten
- ☒ Maschine aus nach: 2 Stunden

BA Programmablauf Einzelsatz / Satzfolge

- ☒ Standby nach: 30 Minuten
- ☒ Maschine aus nach: 2 Stunden

Leistungsaufnahme Maschine

Paktuell: 12.4 kW | Pstandby: 0.8 kW

0% S-IST  
0% SCNmJ LIMIT 1 14:49

M S F | ANTAST-FUNKTION | PRESET TABELLE | 3D ROT | WERKZEUG TABELLE

Energiemanagement: Mögliche Konfigurationsmaske für den Anwender

## Verkürzung von Nebenzeiten durch eine optimale Unterstützung beim Einrichten

Durch die relativ hohe energetische Grundlast von Werkzeugmaschinen wirken sich Nebenzeiten entscheidend auf die Energieeffizienz eines Zerspanprozesses aus. Um den Energiebedarf pro Teil zu reduzieren, sollten deshalb Nebenzeiten wie Rüst- oder Einrichtzeiten möglichst kurz gehalten werden. Prinzipiell gilt: Effizient ist, was die Produktivität einer Maschine steigert.

### Nebenzeiten beim Einrichten

Die Sätze von NC-Programmen beziehen sich auf Bezugspunkte am Werkstück, welche zunächst einmal in der Aufspannsituation des Werkstücks erfasst werden müssen. Ein schnelles und sicheres Erfassen von Bezugspunkten lässt sich mit einem Werkstück-Tastsystem erreichen. Vordefinierte Tastzyklen und eine verzögerungsfreie Kopplung zwischen Tastsystem und Steuerung sparen Nebenzeiten in erheblichem Maße und erhöhen gleichzeitig die Bearbeitungsgenauigkeit. In Kombination mit den Antastfunktionen der TNC-Steuerungen lassen sich mit den Tastsystemen TS von HEIDENHAIN Bezugspunkte automatisch setzen. Damit können Fehler beim Einrichten, welche unweigerlich zu Ausschuss führen, vermieden werden.

Tastsysteme reduzieren Nebenzeiten, verbessern die Fertigungsqualität, vermeiden Ausschuss und steigern die Produktivität. Dadurch sinkt der Energiebedarf pro gefertigtes Teil. Die Potentiale zur Einsparung von Nebenzeiten werden anhand von zwei Beispielen verdeutlicht. Dabei werden die Rüstzeiten mit Messuhr und HEIDENHAIN Tastsystem auf einer Werkzeugmaschine mit einer Grundlast von 4 kW gegenübergestellt.

#### Aufgabe 1

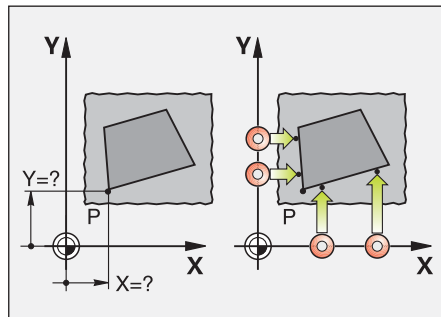
- Rohteil achsparallel ausrichten
- An einer Ecke den Bezugspunkt in der Bearbeitungsebene setzen
- In der Werkzeugachse den Bezugspunkt auf die Oberfläche des Rohteils setzen

#### Aufgabe 2

- Rohteil achsparallel ausrichten über zwei Bohrungen
- Bezugspunkt in der Bearbeitungsebene in die Mitte der ersten Bohrung setzen
- In der Werkzeugachse den Bezugspunkt auf die Oberfläche des Rohteils setzen



#### Aufgabe 1





#### Zeitersparnis

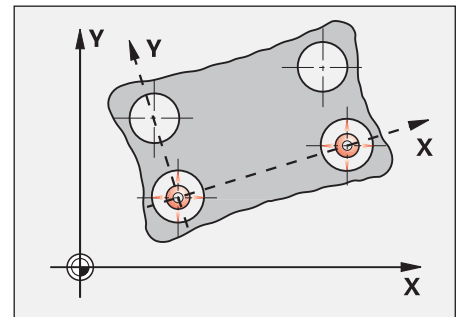
Für diesen Einrichtvorgang ergibt sich mit einem Tastsystem TS von HEIDENHAIN eine Zeitersparnis von ca. 4 min oder ca. 72 %.

#### Energieeinsparung

Bei 10 Einrichtvorgängen pro Tag und 220 Arbeitstagen werden 580 kWh pro Jahr eingespart. Das entspricht etwa dem Jahresenergiebedarf von 5 Kühlschränken der Effizienzklasse A++.

Tastsystem	
	1 min 25 sec
Messuhr	
	5 min 30 sec

#### Aufgabe 2





#### Zeitersparnis

Für diesen Einrichtvorgang ergibt sich mit einem Tastsystem TS von HEIDENHAIN eine Zeitersparnis von ca. 5 min oder ca. 77 %.

#### Energieeinsparung

Bei 10 Einrichtvorgängen pro Tag und 220 Arbeitstagen werden 730 kWh pro Jahr eingespart. Das entspricht etwa dem Jahresenergiebedarf von 6 Kühlschränken der Effizienzklasse A++.

Tastsystem	
	1 min 30 sec
Messuhr	
	6 min 30 sec

## Messsysteme für den energieeffizienten Betrieb von geregelten Antrieben

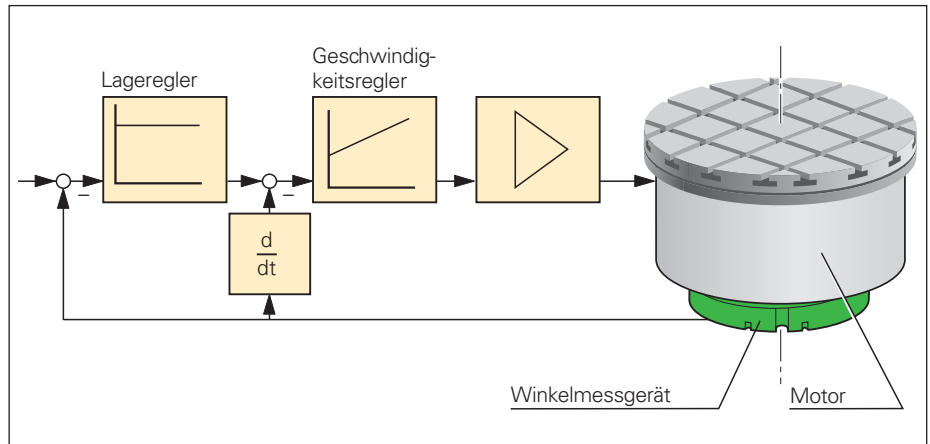
In den Regelkreisen von Hauptspindelmotoren und direktangetriebene Vorschubachsen können bereits kleinste Störungen in den Feedbacksignalen zu großen Schwankungen im Motorstrom führen.

Bei der Interpolation der Signale eines Positionsmessgeräts entstehen kurzperiodische Abweichungen innerhalb einer Signalperiode (Interpolationsabweichungen), die typischerweise ca. 0,5 % der Signalperiode betragen. Mit zunehmender Frequenz der Interpolationsabweichungen zusätzliche Stromkomponenten generiert. Bei gleichem Drehmoment steigt folglich die Energieaufnahme des Motors, und der Wirkungsgrad wird schlechter. Die zusätzlich aufgenommene Energie wird in Wärme umgesetzt. Typischerweise muss die Wärme mit zusätzlichem Energieaufwand durch eine Motor Kühlung abgeführt werden.

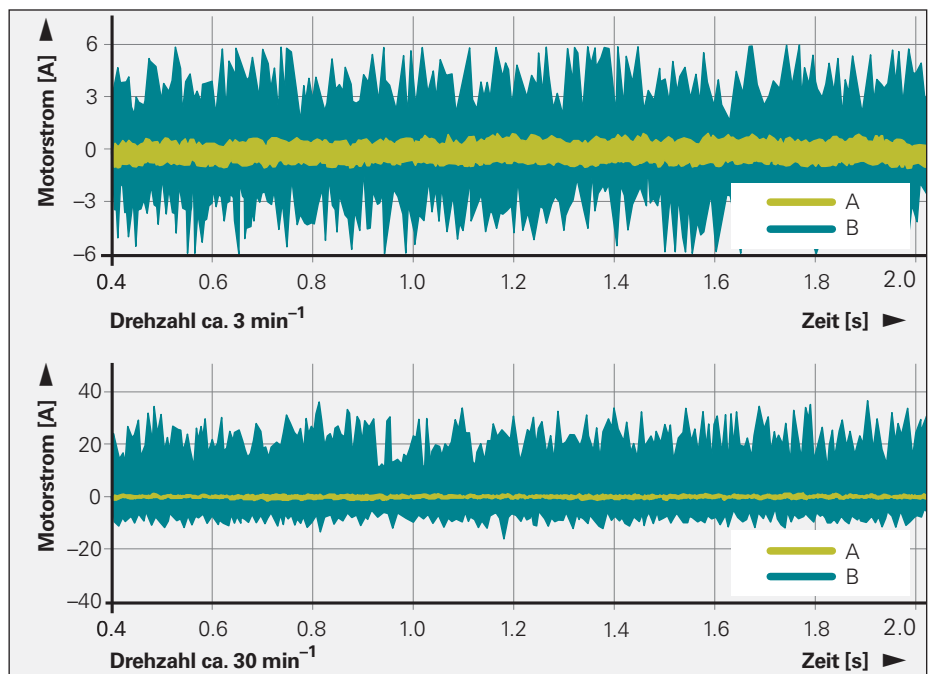
Ein Vergleich der Auswirkungen eines optischen Winkelmessgeräts und eines magnetischen Einbau-Messgeräts auf einen direktangetriebenen Rundtisch unterstreicht die Bedeutung hochwertiger Positionssignale. Das verwendete Winkelmessgerät vom Typ RCN 226 mit 16384 Strichen erzeugt kaum wahrnehmbare Störungen im Motorstrom, der Motor entwickelt wenig Wärme. Das Einbau-Messgerät verfügt aufgrund des magnetischen Abtastverfahrens über deutlich weniger Signalperioden. Bei gleichen Reglereinstellungen entstehen erhebliche Störungen im Motorstrom. So ist zum Beispiel bei einer Drehzahl von ca.  $30 \text{ min}^{-1}$  der Effektivwert des Stroms um 15 A größer als bei einem optischen Messgerät. Eine deutlich größere Erwärmung des Motors ist die Folge.

Durch den Einsatz eines Messgeräts geringer Signalgüte können größere Motorverluste entstehen. Neben diesen muss der zusätzliche Energiebedarf der aktiven Kühlung in der Energiebilanz mit berücksichtigt werden.

Um die Energieeffizienz des Motors zu verbessern, sollten deshalb Messgeräte mit hoher Signalgüte verwendet werden.



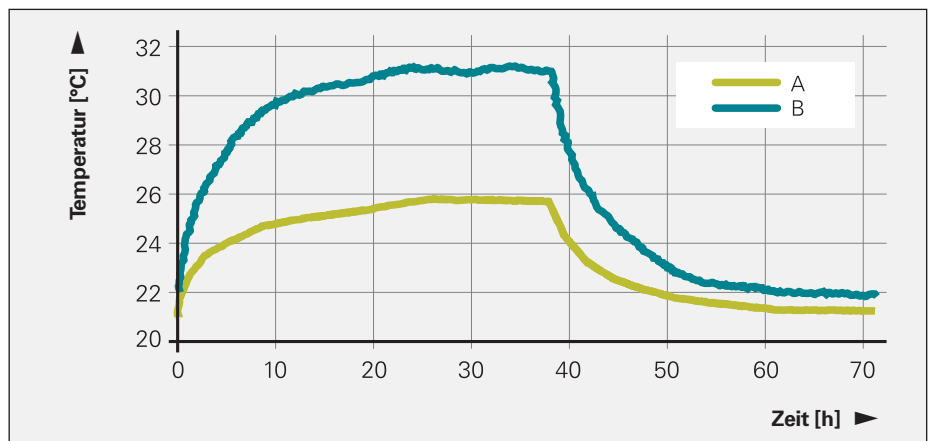
Regelkreis bei rotatorischem Direktantrieb (Torque-Motor)



Motorstrom eines Direktantriebs bei Positionsmessgerät

A: mit niedrigem Interpolationsfehler (optisches Winkelmessgerät)

B: mit hohem Interpolationsfehler (magnetisches Einbau-Messgerät)



Temperaturverläufe eines Direktantriebs mit optischem (A) und magnetischem (B) Positionsmessgerät

## Ausschuss minimieren durch Closed Loop Technologie

Ausschußteile senken die Produktivität eines Fertigungsprozesses und tragen somit erheblich zu den Energiekosten pro gefertigtes Gutteil bei. Eine wesentliche Ursache für die Generierung von Ausschussteilen sind die thermischen Verlagerungen von Vorschubachsen auf der Basis von Kugelgewindespindeln.

Abhängig von den Vorschubgeschwindigkeiten und -kräften können sich die Temperaturverteilungen auf den Kugelgewindespindeln sehr schnell ändern. Die dabei entstehenden Längenänderungen (typisch: 100 µm/m innerhalb von 20 min) können auf Werkzeugmaschinen im Semi-Closed Loop (ohne Längenmessgeräte, Abbildung 1 oben) zu signifikanten Fehlern am Werkstück führen.

Wird ein Längenmessgerät zur Erfassung der Schlittenposition verwendet (Abbildung 1 unten), so hat eine Temperaturerhöhung des Kugelgewindetriebs (Abbildung 2) keinen Einfluss auf die Genauigkeit. Man spricht auch von einem Betrieb im Closed Loop da die Fehler der Antriebsmechanik im Positionsregelkreis gemessen und somit kompensiert werden.

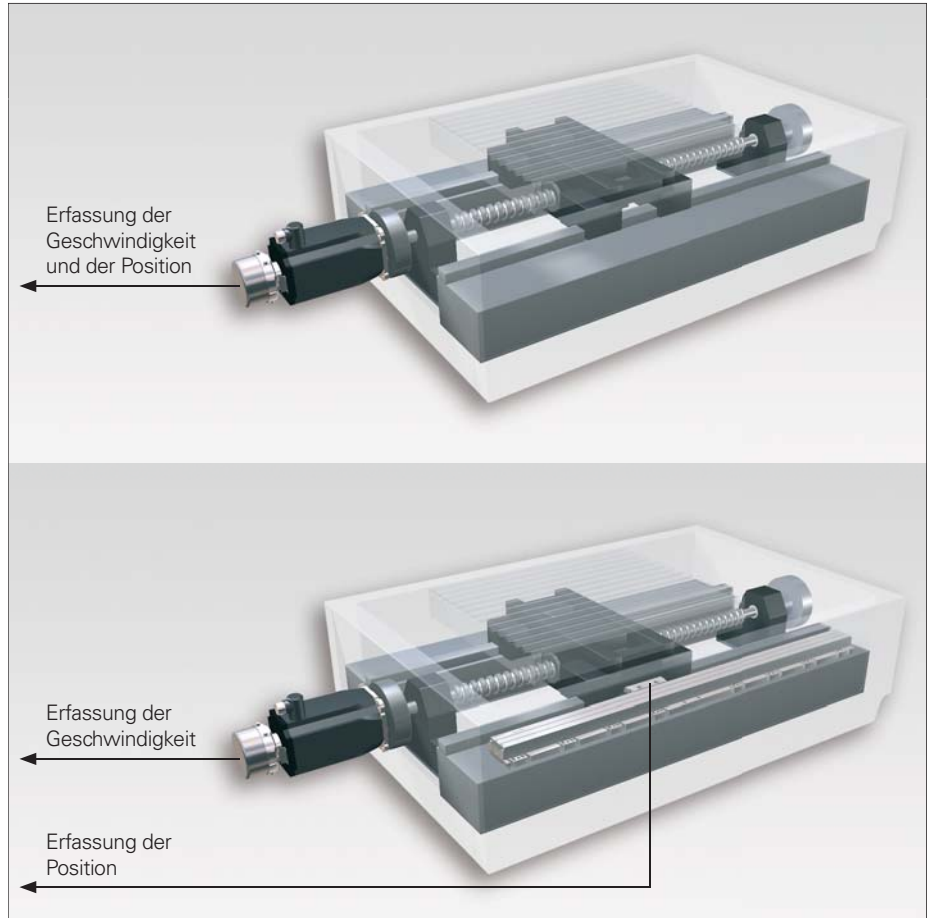


Abbildung 1

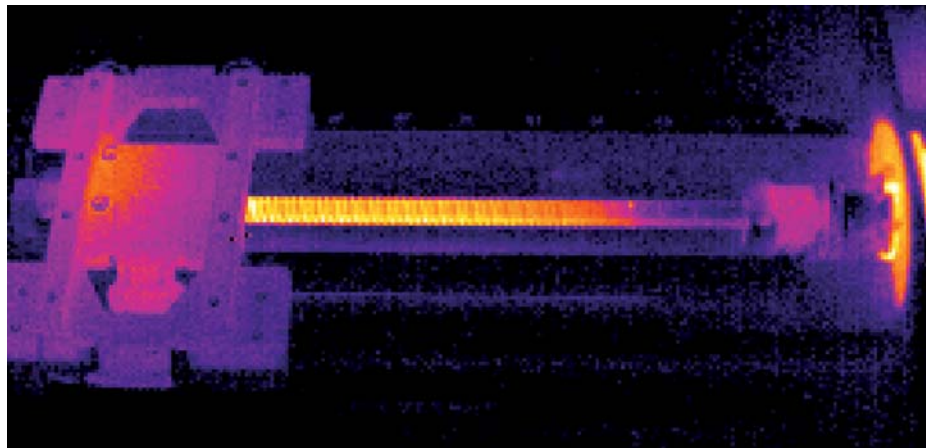


Abbildung 2



### Bearbeitungsbeispiel: Anlenkhebel für Flächenleitwerk

Um die erreichbare Genauigkeit in der Fertigung von kleinen Losgrößen zu bewerten, wird ein Anlenkhebel zweimal aus dem gleichen Rohteil gefertigt. Dabei wird das zweite Werkstück lediglich um 10 mm nach unten versetzt gefräst. Zwischen beiden Bearbeitungen werden zwanzig Bearbeitungszyklen des gleichen Teils über dem Rohteil abgearbeitet. Wird im Semi-Closed Loop bearbeitet, so weichen die beiden Konturen der Werkstücke voneinander ab, was durch eine Kante zu erkennen ist. Dieser Versatz zwischen den Werkstücken beträgt im Semi-Closed Loop 44 µm. Bei Verwendung von Längenmessgeräten im Closed Loop entsteht keine Kante. Auf diese Weise kann eine reproduzierbare Genauigkeit vom ersten Teil an gewährleistet werden.

### Energieeinsparung im Closed Loop

Die Fertigung von 22 Anlenkhebeln dauert im betrachteten Beispiel 2 h. Dabei soll das Stichmaß zweier Bohrungen mit einem Abstand von 350 mm mit der Toleranz IT7 gefertigt werden, was einer zulässigen Abweichung von  $\pm 28 \mu\text{m}$  entspricht.

Für die Fertigung von 22 Gutteilen muss die Maschine im Semi-Closed Loop das NC-Programm zunächst 25 min zyklisch abarbeiten, um die Toleranz IT7 sicher einhalten zu können. Die Energieaufnahme liegt beim Warmfahren nur ca. 10 % unter dem Wert beim Fräsen.

Die Energiekosten pro Gutteil liegen somit im Semi-Closed Loop um 19 % höher als bei einer Fertigung der 22 Bauteile im Closed Loop mit Längenmessgeräten. Werden täglich 50 Teile im Semi-Closed Loop mit vorangegangener Warmlaufphase gefertigt, so entsteht für eine Fräsmaschine mit einem Leistungsbedarf beim Fräsen von 8 kW an 220 Arbeitstagen ein zusätzlicher Energiebedarf von 660 kWh.



## Fazit

Analysen von spanenden Bearbeitungsprozessen zeigen, dass die Leistungsaufnahme der CNC Steuerung mit Vorschub- und Hauptspindelantrieben häufig nur 25 bis 30 % der insgesamt benötigten Leistung ausmacht. Dahingegen nehmen Nebenaggregate in den Maschinen oder in deren Umfeld eine dominante Rolle in der Energiebilanz ein.

Für eine effizientere Nutzung der Energie gibt es zahlreiche Möglichkeiten. Über die Wahl der Komponenten einer Werkzeugmaschine können bereits erhebliche Einsparungen erreicht werden. Abhängig vom Anteil der Werkzeugwechsel beim Fräsen bzw. der Werkstückwechsel beim Drehen kann eine CNC-Steuerung mit oder ohne Möglichkeit zur Energierückspeisung ins Netz sinnvoll sein. Die rückgespeiste Energie steht dann weiteren Verbrauchern im Umfeld der Maschine zur Verfügung.

Sofern Hauptspindeln in Bezug auf Drehzahl und Drehmoment eng an das Bearbeitungsspektrum einer Maschine angepasst werden können, sind weitere Energieein-

sparungen möglich. Ist eine universelle Auslegung der Hauptspindel erforderlich, so könnte der Spindelmotor bei ungünstigen Wirkungsgraden betrieben werden – mit entsprechenden Folgen für die Energiebilanz.

Die Effizienz von Hauptspindelmotoren und Direktantrieben kann durch die Wahl des Positionsgebers empfindlich beeinflusst werden. Geber mit zu geringer Auflösung und Genauigkeit erzeugen erhöhte Stromwerte im Positionsregelkreis. Für einen hohen Wirkungsgrad der geregelten Antriebe sind Positionsgeber mit hoher Strichzahl unumgänglich.

Längenmessgeräte erhöhen nachweislich die Genauigkeit und helfen somit, das Bearbeitungsergebnis genauer und reproduzierbarer zu gestalten. Damit lässt sich Produktionsausschuss und in direkter Folge der Energiebedarf pro Gutteil entscheidend verringern.

Aggregate zur Aufbereitung von Kühlschmierstoffen, zur Druckluft- und Hydraulikversorgung sowie zur Kühlung nehmen einen dominanten Anteil der Gesamtleis-

tung auf. Verfügt die Maschine über besonders effiziente Pumpenantriebe, so können bereits erhebliche Energiemengen eingespart werden. Darüber hinaus bietet sich ein Energiemanagement auf der CNC-Steuerung mit gezielter Abschaltung von Aggregaten an. Dabei können z. B. Antriebe von Pumpen nach Beendigung einer Bearbeitungsaufgabe zeitverzögert abgeschaltet werden.

Auch in der Fertigung selbst sind häufig Einsparpotentiale bezüglich des Energiebedarfs zu finden. Mit der relativen hohen Grundlast von Werkzeugmaschinen steht eine Reduktion von nichtproduktiven Phasen an höchster Priorität. Die CNC-Steuerungen von HEIDENHAIN unterstützen hier in vielfältiger Art. Beginnend bei den Konzepten zur benutzerfreundlichen Programmbearbeitung über Funktionen zum Einrichten von Werkstücken mit HEIDENHAIN Tastsystemen bis hin zur zeitoptimalen und exakten Bewegungsführung in drei- und fünfschigen Bearbeitungen profitieren Anwender von dem über Jahrzehnte gesammelten Erfahrungswissen in der spanenden Bearbeitung.



## Weitere Informationen

Weitere Informationen zu den angeschnittenen Themen und zu den HEIDENHAIN-Produkten erhalten Sie bei HEIDENHAIN über [info@heidenhain.de](mailto:info@heidenhain.de) oder rufen Sie uns an: +49 8669 31-0. Die abgebildeten Kataloge und Technische Informationen sind auch im Internet unter [www.heidenhain.de](http://www.heidenhain.de) im Download-Bereich verfügbar.



Prospekt  
**Längenmessgeräte  
für gesteuerte Werkzeugmaschinen**



Prospekt  
**Magnetische  
Einbau-Messgeräte**



Prospekt  
**Bahnsteuerung  
iTNC 530**  
  
CD-ROM  
**iTNC Presentation**



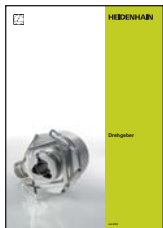
Prospekt  
**Offene Längen-  
messgeräte**



Prospekt  
**Absolute Winkel-  
messgeräte  
mit optimierter  
Abtastung**



Prospekte  
**Bahnsteuerung  
TNC 320  
Bahnsteuerung  
TNC 620**



Prospekt  
**Drehgeber**



Prospekt  
**Winkelmessgeräte  
mit Eigenlagerung**



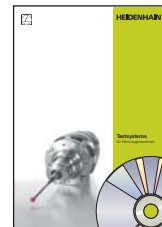
Prospekt  
**Bahnsteuerung  
MANUALplus 620**



Prospekt  
**Messgeräte für  
elektrische Antriebe**



Prospekt  
**Winkelmessgeräte  
ohne Eigenlagerung**



Prospekt, CD-ROM  
**Tastsysteme**



Technische Information  
**Genauigkeit von  
Vorschubachsen**



Technische Information  
**Bearbeitungsgenauig-  
keit von Werkzeug-  
maschinen**



Technische Information  
**Messgeräte für  
Vorschubachsen  
mit Direktantrieben**

Die DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH entwickelt und produziert Längen- und Winkelmessgeräte, Drehgeber, Positionsanzeigen und Numerische Steuerungen. HEIDENHAIN liefert seine Produkte an Hersteller von Werkzeugmaschinen und an Hersteller von automatisierten Anlagen und Maschinen, insbesondere für die Halbleiter- und Elektronik-Fertigung.

HEIDENHAIN ist in mehr als 50 Ländern – meist durch eigene Tochtergesellschaften – vertreten. Vertriebsingenieure und Servicetechniker unterstützen den Anwender vor Ort durch Beratung und Kundendienst.



# HEIDENHAIN

**DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH**

Dr.-Johannes-Heidenhain-Straße 5

**83301 Traunreut, Germany**

☎ +49 8669 31-0

FAX +49 8669 5061

E-mail: [info@heidenhain.de](mailto:info@heidenhain.de)

**[www.heidenhain.de](http://www.heidenhain.de)**