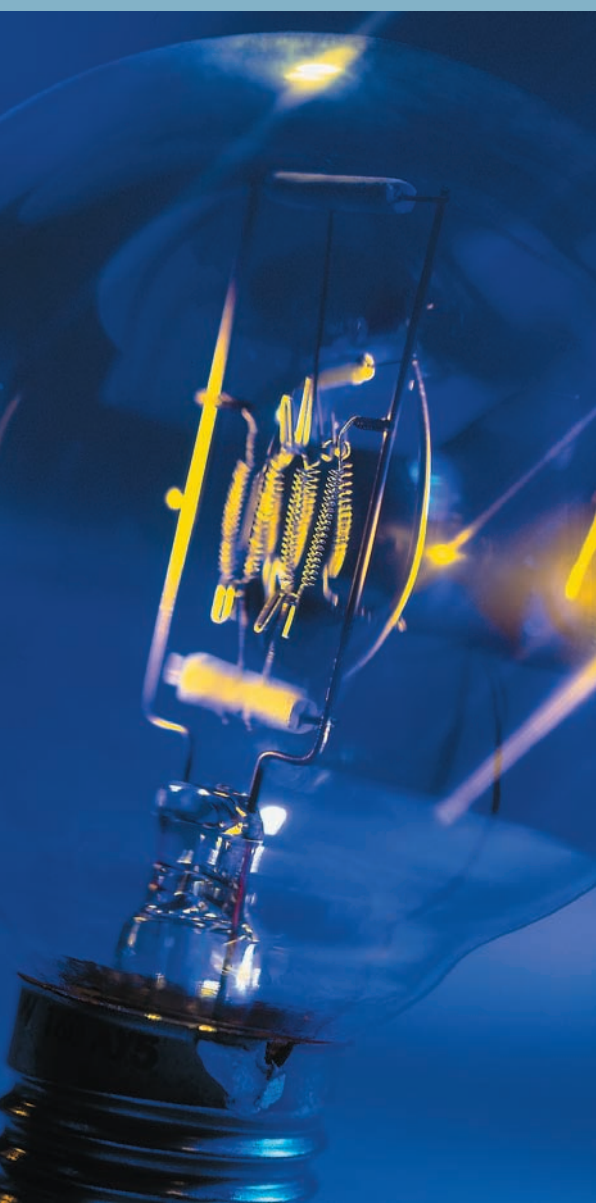


GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Energieeffizienz in der Produktion

Untersuchung zum
Handlungs- und
Forschungsbedarf



Fraunhofer Gesellschaft

Inhalt

Einleitung/Vorwort	1
Ressourceneffizienz und Produktionstechnik	2
Die Handlungsfelder	5
Energie- und Materialeffizienz durch Steigerung der Prozessstabilität	6
Energie- und Materialeffizienz in mechanischen, thermischen und chemischen Fertigungsprozessen und -systemen	8
Geschlossene Ressourcenkreisläufe/Ressourcen- vernetzung in Prozessketten und Systemen	11
Verlustfreier Infrastrukturbetrieb von Produktions- anlagen und Fabriken	13
Methodenentwicklung für eine nachhaltige Energie- und Materialwirtschaft	15
Periphere Handlungsfelder	16
Kontakt	17

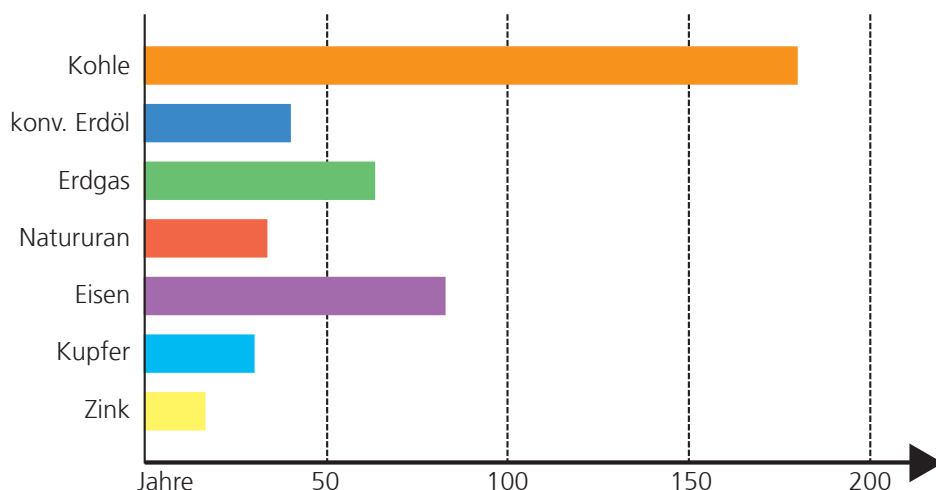
Effizienz beschreibt das Verhältnis zwischen dem erreichten Ergebnis und den eingesetzten Ressourcen. (ISO 9000:2000)

Das 21. Jahrhundert führt die Menschheit an ihre natürlichen Grenzen. Bei wachsender Erdbevölkerung geht die Verfügbarkeit von Rohstoffen wie Erdöl, Erdgas, Erz oder Wasser für die Industriegesellschaften, aber auch für Entwicklungs- und Schwellenländer zurück. Das sich an den wohlhabenden Nationen orientierende Konsumverhalten in Schwellenländern wie China oder Indien erfordert die massive Erhöhung des weltweiten Bruttosozialproduktes. Gleichzeitig gilt es, den CO₂-Ausstoß deutlich zu senken, um weiteren Klimaveränderungen entgegen zu wirken.

Schon in jüngster Zeit ist die weltweite Rohstoffnachfrage stark gestiegen, Rohstoffe werden zunehmend knapper und teurer, von 2001 bis 2008 bereits insgesamt um mehr als 70 Prozent. Der Anteil der Rohstoffkosten an den Gesamtherstellungskosten liegt mit 30 bis 80 Prozent oftmals deutlich über dem Kostenfaktor Arbeit.

Die Notwendigkeit des noch effizienteren Umgangs mit Ressourcen rückt als gesellschaftliche Aufgabe immer stärker in den Fokus von Wirtschaft, Forschung und Politik. Eine wesentliche Fragestellung lautet: Welche Möglichkeiten haben die Unternehmen des produzierenden Gewerbes, durch effizientere Technologien sowohl Kosten als auch Ressourceneinsatz und Emissionen zu reduzieren?

Im Rahmen einer vom Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF innerhalb des Rahmenkonzeptes »Forschung für die Produktion von morgen« geförderten Untersuchung (Förderkennzeichen: 02PU1000) wurde von Fraunhofer-Instituten und weiteren Forschungseinrichtungen das Potenzial zur Ressourceneinsparung, insbesondere zur Energieeinsparung, im produzierenden Gewerbe analysiert und Handlungsbedarf für die Produktionsforschung abgeleitet.



Endlichkeit natürlicher Ressourcen; Quelle: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2000



Das gesamtwirtschaftliche Niveau eines Standortes wird in erster Linie von der dort erbrachten Wertschöpfung bestimmt. In Europa werden jährlich 1.500 Milliarden Euro Umsatz in der Produktion erwirtschaftet. Das bedeutet gleichzeitig 34 Millionen Beschäftigte in diesen Branchen, was wiederum 30 Prozent aller Arbeitsplätze entspricht. Die Produktion ist an vorderster Stelle direkt an natürliche Ressourcen gebunden und von deren Verknappung unmittelbar betroffen.

Aus dieser Abhängigkeit – und unter Beachtung der wachsenden Konkurrenz in den Schwellenländern – resultiert die Notwendigkeit, bei steigendem Produktausstoß die Menge der eingesetzten Ressourcen zu senken und somit die Ressourcenproduktivität zu steigern. Das heißt, so viel wie möglich aus dem Einsatz einer bestimmten Menge an Rohstoffen und Energie herzustellen. Um das zu erreichen, ist ein Paradigmenwechsel notwendig:

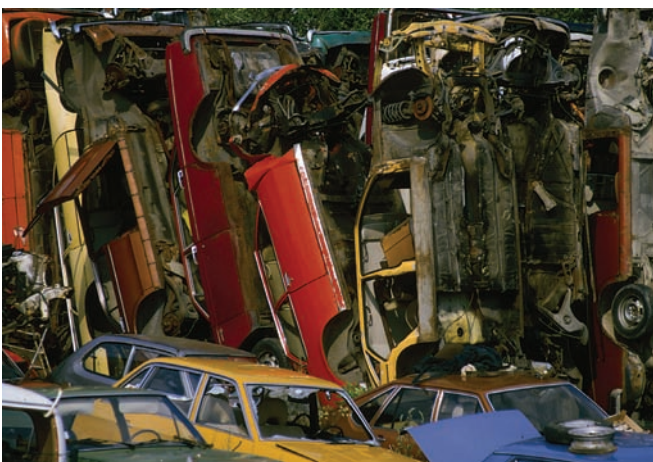
An die Stelle von „maximaler Gewinn aus minimalem Kapital“ muss „maximaler Gewinn aus minimalen Ressourcen“ treten.



Was in einem Prozess Abfall oder Wärme ist, muss in einem anderen Herstellungsverfahren sinnvoll eingesetzt werden. Die Herausforderung besteht immer noch darin, den Ressourcenverbrauch vom Wirtschaftswachstum zu entkoppeln.

Der spezifische Endenergieverbrauch im produzierenden Gewerbe in Deutschland konnte zwischen 1960 und 2000 um 64 Prozent gesenkt werden.

Voraussetzung für diese Steigerungen der Ressourceneffizienz waren und sind technologische Innovationen sowie langfristige Investitionen.



Unternehmen, die sich durch Effizienztechnologien heute einen Kostenvorteil erarbeiten, werden diesen in Zukunft überproportional weiter ausbauen. Ebenso sind klare und international abgestimmte politische Rahmenbedingungen notwendig, denn die erforderliche drastische Steigerung der Ressourceneffizienz ist nur in Kombination von politischen und gesetzlichen Vorgaben, Anreizen und Anregungen zu erreichen.

Eine Befragung von ca. 450 Entscheidern und Experten aus Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Industrieverbänden im Rahmen der Untersuchung zeigt, dass bisher die Energiekosten bei Investitionsentscheidungen meist eine untergeordnete Rolle spielen. Von Effizienzinvestitionen werden Amortisationszeiten von ein bis drei Jahren erwartet. In so kurzen Zeiträumen sind aber nur Optimierungen möglich, nicht jedoch die Substitution oder gar Eliminierung ressourcenintensiver Prozessstufen.

Nur ein Drittel der im Rahmen der Studie befragten Unternehmen verfügt über Ansätze zur systematischen Bewertung der Ressourceneffizienz und zur Optimierung von Produktionsabläufen.

Die Dynamik der Preisentwicklung der letzten Jahre für Rohstoffe und Energie wird tendenziell anhalten. Globale Fragestellungen wie der gesamte Wettbewerb um Ressourcen, gesetzlich festgelegte Emissionsgrenzen und demografische Effekte werden die Rahmenbedingungen von Unternehmen zukünftig noch stärker bestimmen. Welche Potenziale lassen sich für das verarbeitende Gewerbe in Deutschland ableiten?

In der gesamten industriellen Produktion sind mittelfristig Energieeinsparungen von 25 bis 30 Prozent möglich. Allein für die in der Untersuchung betrachteten Produktklassen ergab sich ein Energie-Einsparpotenzial von ca. 210 Petajoule pro Jahr, was etwa der Hälfte des Stromverbrauchs der privaten Haushalte in Deutschland oder vier Kraftwerken mit je 1,4 Gigawatt Leistung entspricht.

Die Produktionstechnik ist einer der wichtigsten Wirtschaftszweige in Deutschland. Eine Steigerung der Produktivität, die eine Schlüsselrolle im Ringen um Wettbewerbsfähigkeit einnimmt, kann jedoch nur erreicht werden, wenn mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen wie Energie, Material und Personal intelligent und effizient umgegangen wird. Die entstehende Lücke zwischen notwendiger Produktivitätssteigerung und einer zunehmenden Ressourcenverknappung muss durch Effizienzsteigerung geschlossen werden.



Die Untersuchung zur Energieeffizienz in der Produktion zeigt Handlungsfelder zukünftiger Forschung auf.

Beginnend mit der Analyse der Produkte, einschließlich der Festlegung von Produktkategorien, über die Prozesskettenanalyse einschließlich der Untersuchung der verarbeiteten Materialien bis hin zur Identifikation von Hauptenergietreibern wurde der notwendige Handlungsbedarf für die Produktionstechnik eruiert, aus dem sich der zukünftige Forschungsbedarf ableitet.

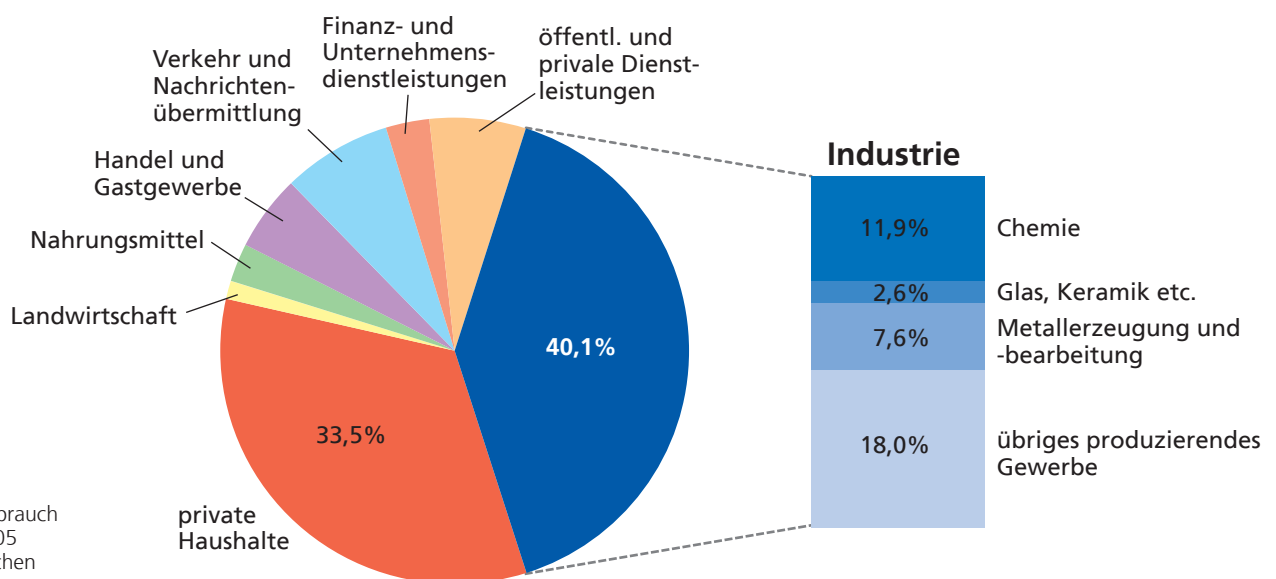
Die Basis für die Betrachtungen bildeten für den Produktionsstandort Deutschland wichtige Industriegüter, die in die Produktkategorien »hochwertige Investitionsgüter«, »hochwertige Konsumgüter« und »Massenkonsumgüter« eingeteilt wurden. Ein Schwerpunkt lag dabei bei der Betrachtung der Effizienz des Einsatzes der Ressource Energie aus Sicht der Prozessketten.

Die Industrie trägt mit etwa 40 Prozent zum Gesamtenergieverbrauch Deutschlands bei. Das entspricht einer Leistung von 5.640 Petajoule pro Jahr (2005). Dem sich aus der Auswahl der genannten Produktkategorien ergebenden Betrachtungsraum der Untersuchung entsprechen davon etwa 680 PJ/a, wovon etwa 30 Prozent eingespart werden könnten.

Um dieses Einsparpotenzial auszuschöpfen, besteht dringender Forschungs- und Handlungsbedarf zu folgenden Schwerpunkten:

- Energie- und Materialeffizienz durch Steigerung der Prozessstabilität
- Energie- und Materialeffizienz in mechanischen, thermischen und chemischen Fertigungsprozessen und -systemen
- Geschlossene Ressourcenkreisläufe/Ressourcenvernetzung in Prozessketten und Systemen
- Verlustfreier Infrastrukturbetrieb von Produktionsanlagen und Fabriken
- Methodenentwicklung für eine nachhaltige Energie- und Materialwirtschaft

Diese Schwerpunkte werden im Folgenden näher beschrieben.



Primärenergieverbrauch Deutschlands 2005 nach wirtschaftlichen Aktivitäten;
Quelle: Statistisches Bundesamt; Umwelt-ökonomische Gesamtrechnungen 2007

Energie- und Materialeffizienz
durch Steigerung der
Prozessstabilität

Energie- und Materialeffizienz
in mechanischen, thermischen und
chemischen Fertigungsprozessen
und -systemen

Geschlossene Ressourcenkreisläufe/
Ressourcenvernetzung
in Prozessketten und Systemen

Verlustfreier Infrastrukturbetrieb
von Produktionsanlagen
und Fabriken

Methodenentwicklung
für eine nachhaltige Energie-
und Materialwirtschaft

Energie- und Materialeffizienz durch Steigerung der Prozessstabilität

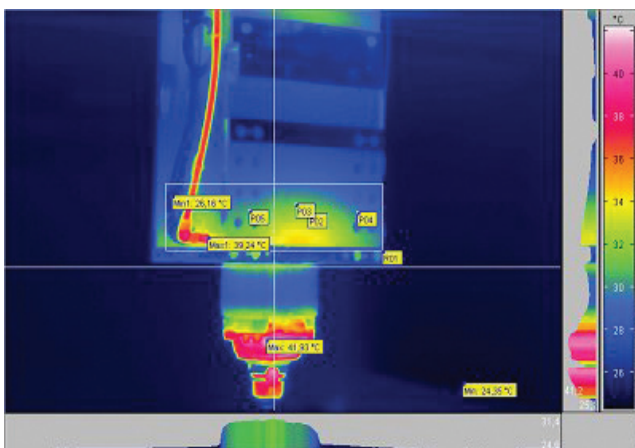
Bei einem Ausschussteil am Ende einer spannenden Prozesskette entspricht ein Kilogramm Bauteilmasse einem Energieverlust von 60 bis 80 MJ.

Bei einem Ausschussteil am Ende einer Prozesskette der Massivumformung entspricht ein Kilogramm Bauteilmasse einem Energieverlust von 45 MJ.

Der wohl wichtigste Faktor im Hinblick auf Ressourcenschonung ist die Einsparung von Material: Zum einen bringt der Materialeinsatz immer Materialverluste mit sich. Zum anderen ist der durch den Werkstoff eingebrachte kumulierte Energieaufwand, also die Energie, die zur Gewinnung und Herstellung des Materials aufgewendet wurde, ein ebenso wichtiger Punkt. Gelingt es, durch „Null-Ausschuss-Produktion“ die Herstellung fehlerhafter Teile zu vermeiden, kann ein bedeutender Beitrag zu Ressourcenschonung gelingen. Besonders hoher Ausschussanteil entsteht in allen Bereichen des Maschinen- und Anlagenanlaufs. Forschungsarbeiten und Entwicklungen zum schnellen und sicheren Hochfahren von Fertigungsprozessen sowie Methoden zur Steigerung der Prozessstabilität dienen wesentlich der Schonung der Ressourcen Zeit, Material und Energie.

Regelung von Anlaufprozessen

Schwankungen im Prozessablauf durch Störfaktoren wie abweichende Materialeigenschaften oder sich verändernde Umgebungseinflüsse verursachen häufig Produktionsfehler, die dann Nacharbeit oder Ausschuss zur Folge haben. Dies gilt ebenso für Anlauf- wie für Wiederanlaufprozesse von Maschinen und Anlagen, in denen die optimalen Betriebsparameter wie Betriebstemperaturen oder Arbeitsdrücke, aber auch Technologieparameter wie Arbeitskräfte oder Vorschubgeschwindigkeiten noch nicht erreicht bzw. eingestellt sind.



Temperaturüberwachung an einer Werkzeugmaschinen-Spindel

Aufwendige Nacharbeiten und Ausschussteile mit hohem, bereits eingebrachtem Wertschöpfungsanteil verursachen einen immensen Verlust aller Ressourcen.

Durch Entwicklung und Bereitstellung geeigneter Messmethoden können der Maschinenzustand und das Erreichen des optimalen Betriebsbereiches aufgenommen werden. So würde zum Beispiel ein Monitoring der Betriebstemperatur verbunden mit einer Warmlaufstrategie den Hochlauf einer Maschine verkürzen, den Prozess optimieren und nicht wertschöpfende Aktivitäten minimieren.

Prozessregelung zur Vermeidung von Ressourcenverlusten

Insbesondere im Bereich der Werkzeugmaschinen und der Umformtechnik sind integrierte Rückkopplungssysteme, die Einfluss auf die Prozesssteuerung nehmen, kaum zu finden.

Konsequenterweise müssen die Systeme so entwickelt werden, dass sich anbahnende Maschinenfehler, auftretende Prozessschwankungen und die daraus resultierenden Abweichungen nicht nur gemessen, sondern auch kompensiert bzw. ausgeglichen werden können. Durch den Einsatz regelnder Systeme kann nicht nur die unproduktive Zeit im Hochlauf der Maschinen und Anlagen verkürzt, sondern auch die Betriebs- und Prozesssicherheit wesentlich verbessert werden.

Das rechtzeitige Erkennen von Prozessabweichungen und die entsprechend frühzeitige Reaktion darauf ermöglichen in allen Ressourcenbereichen deutliche Einsparungen. Der entstehende Mehraufwand durch Investitionen kann sich innerhalb kürzester Zeit amortisieren.

Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Punkt ist die Möglichkeit der hundertprozentigen Qualitätskontrolle. Eine lückenlose Überwachung trägt dazu bei, auch in weit nachgelagerten Prozessen Fehler zu minimieren und so Aufwand und Kosten, also Ressourcen zu sparen.

Für die erfolgreiche Umsetzung entsprechender Überwachungskonzepte ist es wichtig, sowohl die Belange der Maschinen als auch die der Technologie vertiefend zu durchdringen sowie ihre untereinander bestehenden Wechselwirkungen



zu verstehen. Dabei sind Einflüsse aus vorhergehenden Prozessen genauso zu berücksichtigen wie die möglichen Auswirkungen vorgesehener Maßnahmen auf nachfolgende Prozessstufen. Forschungsbedarf besteht vor allem hinsichtlich des vertieften Verständnisses von Prozesseinflussgrößen, deren Modellierung, Simulation und der Ableitung signifikanter Merkmale sowie bezüglich multisensorieller Datenerfassungssysteme und multikriterieller Regelungsalgorithmen.

Je nach Komplexität der Maschine und Art des Prozesses divergieren die Einsparpotenziale deutlich. Aufgrund der Einsparungen in allen Ressourcenbereichen sind sie jedoch in Summe ausgesprochen hoch.

Energieeffiziente Gestaltung von Fertigungsabläufen durch Optimierung von Wartungs- und Instandhaltungszyklen

Einen dritten Ansatz zur Steigerung der Prozessstabilität bildet das Plant Asset Management, also die Planbarkeit von Maßnahmen zur Betriebs- und Prozessführung, sowie die werterhaltende Instandhaltung bei gleichzeitiger Minimierung des damit einhergehenden Aufwandes. Die Bereiche Device Management, Condition Monitoring und Performance Monitoring müssen in Zukunft sowohl auf technischer als auch organisatorischer Ebene wesentlich stärker verknüpft werden. Hierzu ist die Entwicklung entsprechender Methoden notwendig, um die bislang ungenügende Interoperabilität der Bereiche zu überwinden und eine Aufweitung vom Bereich einer einzelnen Maschine auf komplexe Anlagensysteme zu erreichen.

Funktionelle Eigenschaften von Hochleistungswerkstoffen (z. B. Keramiken) erschließen zusätzliche Einsparpotenziale beim Energieeinsatz über den gesamten Lebenszyklus. Der Einsatz langlebiger, verschleißfester Schlüsselkomponenten verkürzt bzw. vermeidet durch Wartung und Instandsetzung entstehende Stillstandszeiten und leistet damit einen wesentlichen Beitrag zur energieeffizienten Gestaltung von Fertigungsabläufen.

Um die Fertigung der Hochleistungskomponenten selbst energieeffizienter zu gestalten, bieten keramische Hochleistungswerkstoffe ein zusätzliches Einsparpotenzial: Für die optimierte Auslegung eines Systems ist es erforderlich, bestimmte Materialeigenschaften genau an der Stelle zu erzielen, an der sie tatsächlich benötigt werden. Der Entwicklung werkstoffspezifischer und beanspruchungsgerechter Verbindungstechnologien kommt dabei eine Schlüsselrolle zu, da in immer kleiner werdenden Systemen immer komplexere Vorgänge und Funktionen umgesetzt werden müssen.

60 Prozent der Bleche (Ausgangsmaterial) in der Automobilindustrie sind Abfall.

Jedes in der Produktion eingesparte Kilogramm Stahl entspricht 6 bis 21 MJ eingesparter Energie.



Einsatz von Hochleistungskeramik als Schneidstoff

Energieverluste in Fertigungsprozessen werden heute oft als notwendiges Übel einer qualitativ hochwertigen Produktion in Kauf genommen. Besonders die Prozesse, die mit Materialzustandsänderungen, Wärmebehandlungen oder mit hohen Materialverlusten einhergehen, müssen energetisch überdacht werden. Maschinen- und anlagenseitig lassen sich durch Grundlastreduzierung und Spitzenlastvermeidung, z. B. durch steuerungsgeregelte Motoren, partielle Systemabschaltungen und Ähnliches, hohe Einsparungen erzielen. Prozessseitig kann die Substitution spanender durch umformende Prozesse Material eingesparen und bei verbesserter Produktqualität gleichzeitig die Prozessketten verkürzen. Kurzfristig können Prozesse optimiert werden. Langfristig ist es Aufgabe der Forschung, energie- und materialintensive Prozesse zu substituieren oder sogar zu eliminieren.



Eine Erwärmungstemperatur von 1.000 °C eines Kilogramms Stahl entspricht 0,5 MJ Energie.

Integrative Produktion und Prozesskettenverkürzung

Die zunehmende Individualisierung von Produkten führt zu steigender Komplexität der Bauteile und spiegelt sich in einer Vielzahl verschiedener Fertigungsschritte wider. Zusätzlich steigt die Anzahl der an der Wertschöpfung beteiligten Elemente, da Unternehmen sich auf ihre Kernkompetenzen konzentrieren. Energieintensive Logistikprozesse zwischen den einzelnen Wertschöpfungsstufen sind die Folge. Meist werden die einzelnen Fertigungsschritte separat betrachtet und optimiert, ohne vor- und nachgelagerte Prozesse zu berücksichtigen. Energieintensive Prozesstechnologien werden so nicht auf synergetisch optimalen Ressourceneinsatz hin untersucht. Die Betrachtung der Gesamtprozesskette erfolgt unzureichend. Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz z. B. durch Verfahrenskombination bleiben dadurch oft ungenutzt.

Um hier Verbesserungen zu erreichen, muss untersucht werden, welche Technologien und Prozesse effizient miteinander zu kombinieren sind, ohne die Vorteile durch die neu geschaffene Komplexität zu überkompensieren. Im Anschluss an die Identifikation sinnvoller Verfahrensschnittstellen können angepasste Systeme und Prozesse zur Funktionsintegration entwickelt werden. Ziel

muss es sein, modulare, leicht konfigurierbare Technologieplattformen zur Erzielung flexibler Verfahrenskombinationen verfügbar zu machen. Die Steigerung der Fertigungsflexibilität und der Ressourceneffizienz durch Prozesskettenverkürzung wäre das Resultat. So kann beispielsweise die Kombination mechanischer, fügender und wärmebehandelnder Bearbeitungen deutliche Einsparungen ermöglichen.

Durch Prozesskettenverkürzung und Verfahrenintegration ist je nach Umfang der Applikationen und ihrer Interoperabilität eine Steigerung der Ressourceneffizienz um bis zu 30 Prozent zu erreichen.

Reduzierung von Energieverlusten durch Steuerungskonzepte

Produktionsanlagen werden üblicherweise hinsichtlich Installationskosten und Technologieparameter optimiert; energetische Gesichtspunkte werden in der Regel außer Acht gelassen. Für Steuerungskonzepte spielt die effiziente Energienutzung bisher kaum eine Rolle. So sehen die meisten Steuerungsapplikationen keine Energiesparmodi vor, die allerdings aufgrund noch fehlender Informationen auch nur selten bedient

werden könnten. Es wäre z. B. energetisch sinnvoll, Hilfsantriebe nur dann laufen zu lassen, wenn sie wirklich benötigt werden. Dies setzt jedoch die Kenntnis des Maschinenzustandes und optimalerweise die Kenntnis des Gesamtproduktionsprozesses voraus.

Handlungs- und Forschungsbedarf besteht in mehrere Richtungen: Ein Bereich ist die Erfassung und Verarbeitung energierelevanter Informationen zur Aufnahme und Auswertung energierelevanter Parameter. Hierfür ist die hard- und softwaretechnische Gestaltung von Sensor- und IT-Strukturen mit dezentralen Maschine-Maschine-Kommunikationslösungen notwendig. Dabei muss der Kostendruck in diesem Segment beachtet werden: Für eine Akzeptanz der Systeme müssten z. B. die Kosten für Sensoren um den Faktor 10 bis 100 gegenüber herkömmlichen Industrielösungen gesenkt werden.

Des Weiteren besteht eminenter Handlungsbedarf hinsichtlich der Verknüpfung energierelevanter Informationen auf Anlagen- und Fabrikebene. Durch frühzeitiges Erkennen des Beginns und des Endes von Stillstandszeiten lassen sich Maschinen rechtzeitig ab-, aber auch wieder einschalten. Eine Optimierung ist durch intelligente Systemüberwachung, Systemdiagnose und Selbstkorrektur möglich.

Einen weiteren Ansatzpunkt für eine ressourcensparende Maschine bildet die bedarfsgerechte Auslegung der Antriebe und Strukturen und damit die Vermeidung von Überdimensionierungen. Zu entwickeln sind hybride, bedarfsgerechte Antriebskonzepte für eine flexible Adaption der Parameter des Antriebssystems an die technologischen Arbeitspunkte und an die Umweltparameter der Maschine.

Untersuchungen an Werkzeugmaschinen haben ergeben, dass die Grundlasten bis zu drei Viertel der Gesamtleistungsaufnahme betragen und nur ein Viertel vom Prozess selbst verbraucht wird. Zusätzlich kann man davon ausgehen, dass Werkzeugmaschinen in Kleinserien teilweise nur zu 15 Prozent und in der Großserie u. U. nur bis zu 40 Prozent der Betriebszeit tatsächlich arbeiten. Die restliche Zeit verbringt die Maschine in Warte- oder Rüstzuständen, in denen sie dennoch die volle Grundlast fährt. Damit ergeben sich Einsparpotenziale von 10 bis 25 Prozent.

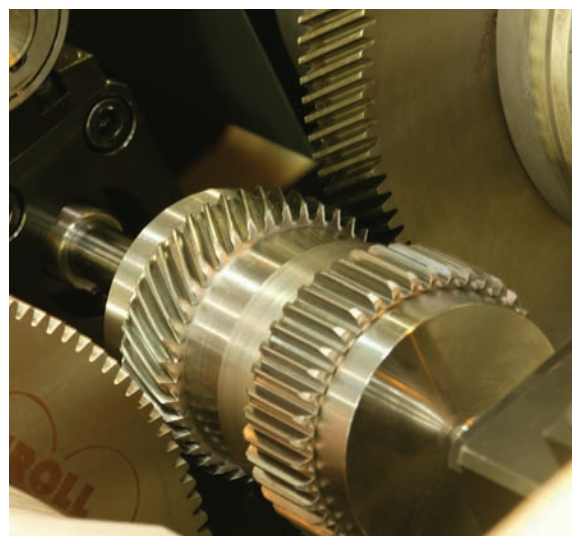
Energieeffiziente Umformung und Net-Shape-Techniken

In vielen Bereichen der Fertigungstechnik sind spannende Verfahren aufgrund ihrer Flexibilität erste Wahl. Dagegen erlauben Umformverfahren hohe Materialeffizienz, so dass deren breitere Anwendung anzustreben ist. Dies wird durch flexiblere Verfahren und Werkzeuge auch für geringere Stückzahlen möglich. Viele Werkstoffe müssen allerdings erwärmt werden, um sie umformen zu können, wofür sehr viel Energie benötigt wird. So ist die Substitution von Warm- durch Kaltumformprozesse anzustreben. Die Nutzung neuer Werkstoffe und die Entwicklung neuer Technologien zur Kalt- bzw. Halbwarmumformung werden den Energieeinsatz bei gleichen oder besseren Bauteileigenschaften reduzieren.

Das Ziel von Net-Shape-Technologien besteht darin, die Endkontur eines Produktes in möglichst frühen Wertschöpfungsstufen herzustellen und so sekundäre Arbeitsschritte zu reduzieren. Obwohl diese Technologien nicht für alle Produktanforderungen qualifizierbar sind, bieten sie aus energetischer Sicht ein überragendes Verbesserungspotenzial.

Die Forschung sollte sich darauf konzentrieren, bestehende Net-Shape-Technologien für weitere Anwendungen zu qualifizieren und neue generative Net-Shape-Verfahren, die mit konventionellen Fertigungsverfahren kombiniert werden können, zu entwickeln.

30 Prozent Energieverbrauch entstehen bei Werkzeugmaschinen im Stand-by-Betrieb zum Erhalt der Prozessstabilität.



Herstellung von Getriebezahnrädern durch Profilwalzen

Bei Substitution eines spanenden Prozesses durch Kaltumformung besteht bei Verwendung von Stahl beispielsweise ein Einsparpotenzial von 6 Megajoule pro Kilogramm; bei Aluminium, in Abhängigkeit des Recyclinganteils, sogar bis zu 100 Megajoule. Weitere Einsparpotenziale ergeben sich, wenn die Warmumformung bei niedrigeren Temperaturen erfolgt. Durch generative (Net-Shape-) Verfahren kann eine Ressourceneffizienzsteigerung um bis zu 25 Prozent erreicht werden. Ein weiteres deutliches Einsparpotenzial liegt in der Optimierung der häufig veralteten Ausstattung.

In der Galvanik (Schicht Hartchrom) werden pro 1 µm Schichtdicke 3,3 kWh oder rund 12 MJ Energie pro Quadratmeter benötigt.

Optimierung von Lackier- und Beschichtungsprozessen

Lackierprozesse werden in vielen verschiedenen Anwendungsbereichen und Branchen durchgeführt. Schätzungen gehen von etwa 100.000 Lack verarbeitenden Betrieben in Deutschland aus. Bei vielen Lackierprozessen sind hohe Einsparpotenziale zu erwarten. So erfordert z. B. die Umstellung von lösemittelbasierten Nasslacken auf die vorteilhaftere Pulverlacktechnologie in vielen Fällen zusätzlich einen Entfettungsprozess der Substratoberflächen, um die gleiche Lackhaftungsqualität wie beim Lösemittellack zu

erreichen. Hierdurch wird das Werkstück zweimal aufgeheizt (Entfettung ca. 65°C, Haftwassertrocknung ca. 120°C). In der blechverarbeitenden Industrie erfolgt die Pulverlackierung nach der Bearbeitung (3-dimensionale Bauteile), was eine aufwändige Anlagentechnik verlangt.

In den Bereichen Vorbehandlungsschemie und Pulverlacke für Niedertemperatur-Anwendungen sind Untersuchungen notwendig, um die Pulverlackbeschichtung von Blechen vor dem Bearbeiten (z. B. Umformen) zu ermöglichen. Handlungsbedarf besteht bei der Optimierung der Biegewerkzeuge und ihrer Abstimmung auf die Pulverlackschichten sowie bzgl. der Verbesserung der Dehnungseigenschaften von Pulverlackschichten unabhängig von der jeweils erreichbaren Schichtdicke.

Lackieranlagen für Platinen oder Coils (2-dimensionale Werkstücke) sind erheblich kleiner und haben mit ihren hohen Durchsatzleistungen bezogen auf die Flächeneinheit einen wesentlich geringeren Energieverbrauch gegenüber großen Anlagen für 3-dimensionale Teile. Von großem Interesse ist daher die Weiterentwicklung von schnellen und kompakten Beschichtungsprozessen auf 2-dimensionalen Platinen oder Coils. Bei der Beschichtung von Produkten aus Vollmaterial (z. B. Getriebegehäuse) ergeben sich ungünstige Oberflächen-Bauteilmassen-Verhältnisse. Hier besteht Forschungsbedarf zu neuen Beschichtungs- und Trocknungsmethoden sowie Lacksystemen, um die Aufheizung des Gesamtbauteils zu reduzieren.

Unter Berücksichtigung des konsequenten Einsatzes der existierenden ressourceneffizientesten Technologien und Produktionsverfahren kann man bei konventioneller Schätzung je nach Weiterentwicklung der Vorbehandlungs-, Lack- und Pulverlacksysteme bzw. der Anlagentechnik von Einsparpotenzialen von ca. 25 Prozent ausgehen.



Lackieren von
Waschmaschinen-
Gehäusen

Geschlossene Ressourcenkreisläufe/Ressourcenvernetzung in Prozessketten und Systemen

Die Nutzung von Energie und Material in möglichst geschlossenen Ressourcenkreisläufen ist weiterhin ein wichtiges Thema. Neben den bisher erreichten Verbesserungen im Bereich des Recyclings und der Medienbereitstellung kommt es zunehmend auf eine Vernetzung der Ressourcenkreisläufe innerhalb der Prozessketten und übergreifend innerhalb von Produktionsgemeinschaften an. Letzteres gewinnt insbesondere dadurch an Bedeutung, dass die Spezialisierung der Unternehmen zu einer geringeren Fertigungstiefe bezüglich des Endproduktes und damit zu einer Zergliederung möglicher Kreisläufe führt. Forschungsthemen der Energiebereitstellung, -übertragung, -wandlung, und -rückgewinnung sowie der Energiespeicherung müssen im Bereich der Produktion zukünftig neben den bislang bearbeiteten Gebieten der Medienversorgung näher an Maschinen und Prozesse gekoppelt werden. Dabei ist eine Betrachtung und Vernetzung über Prozessketten hinweg eminent wichtig.

Energierückgewinnung, -umwandlung, -transport und -speicherung

Auch bei Ausnutzung aller Einsparpotenziale bleiben Energieverluste in Fertigungsprozessen unvermeidbar. Im betrachteten Industriesegment geht Energie größtenteils diffus als Wärme an die Umwelt verloren. Ist mittels marktverfügbarer Technik eine effiziente Abwärmeübertragung an ein Fluid möglich, kann die »gefasste« Abwärme zumeist nur saisonal zur Raumheizung genutzt werden, da keine mengen-, temperatur- und zeitgerechten Nutzungsmöglichkeiten im Fertigungsprozess bestehen.

Energierückgewinnung auf kurzen und direkten Wegen erfordert die Energieintegration von Maschinen und Anlagen innerhalb eines kombinierten Fertigungsschrittes. Höhere Effizienz, Eignung für schwierige Einsatzbereiche und niedrige Investitionskosten sind Entwicklungsziele im Bereich

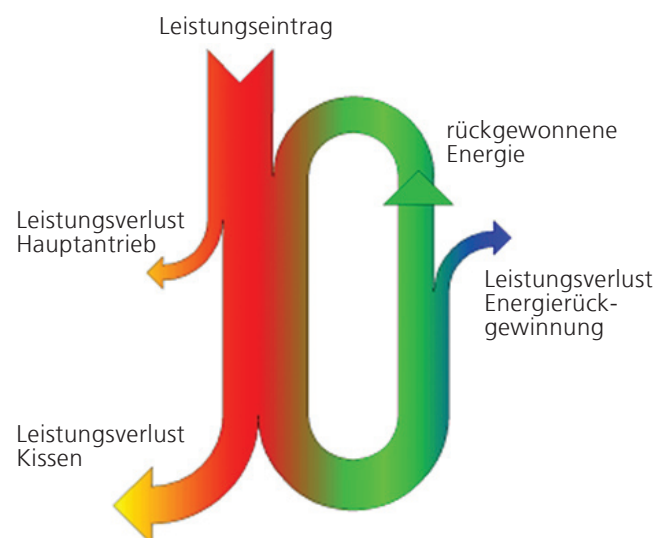


der Wärmeübertragungs- und -transporttechnologien, um größere Anteile diffuser Verluste im Gesamtprozess wirtschaftlich nutzbar zu machen. Als Beispiel sei die Nanobeschichtung von Wärmeaustauscherflächen genannt. Zur zeitlichen und qualitativen Anpassung des Abwärmefalls an den Prozesswärmebedarf sind innovative Wärmespeicher und industrietaugliche Kreisprozesse zur Umwandlung von Niedertemperaturwärme in hochwertigere Prozessenergie erforderlich.

Interessante Entwicklungsfelder sind sorptionsgetriebene Wärmepumpen, Kältemaschinen und Wärmetransformatoren sowie die Stromerzeugung aus Abwärme, beispielsweise Organic-Rankine-Cycle-Anlagen für industrielle Anwendungen. Im Falle mechanischer Verluste durch gebremste Massen sollte die mechanische Energie direkt innerhalb der Antriebstechnik über Speichersysteme zurückgewonnen werden.

Das Potenzial derzeit wirtschaftlich sinnvoller Forschungsbereiche im betrachteten Industriesegment wird auf ca. 20 PJ Primärenergieeinsparung geschätzt. Hinzuweisen ist auf die Synergie der im letzten Absatz genannten Technologien mit der Forschung im Bereich der regenerativen Energietechnik.

Im Bereich der Warmumformung ist nahezu die gesamte Erwärmungsenergie Verlustenergie. Das entspricht 166 KWh oder 600 MJ pro Tonne.



Die Wiederverwendung von Sekundäraluminium benötigt nur 1/5 der Energie der Erzeugung von Primäraluminium.

Nur etwa 1/3 des deutschen Jahresverbrauchs an Stahl, Kupfer und Aluminium wird durch Sekundärmaterial abgedeckt.

Recycling

Der Einsatz von Recyclingmaterial aus Produktionsabfällen leistet einen signifikanten Beitrag zur Verbesserung der Energieeffizienz. Dieser Beitrag resultiert vorrangig aus dem deutlich geringeren Energieeinsatz, der zur Erzeugung von Sekundärmaterial erforderlich ist.

Im Idealfall kann Recyclingmaterial aus der Produktion ohne weitere energieintensive Schmelzprozesse o. ä. weiter genutzt werden, was die Energieeffizienz weiter verbessert.

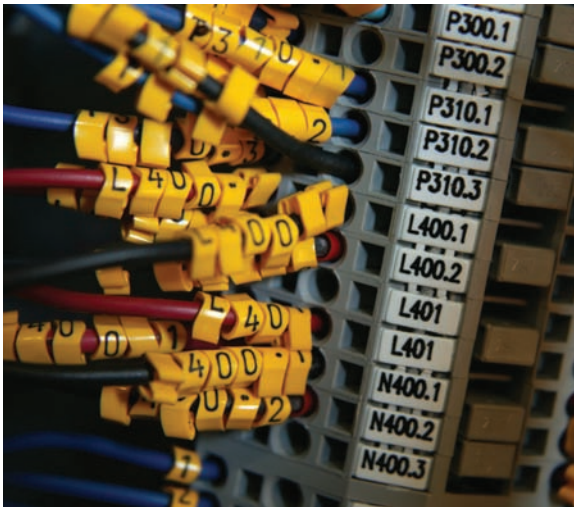
In der Metallverarbeitung liegt ein großes Potenzial insbesondere im Bereich der Blech- und Stanzabfälle. So werden beispielsweise bis zu 60 Prozent der eingesetzten Bleche in der Automobilproduktion zu Produktionsabfällen. Gleiches gilt für andere Bereiche. Als Beispiel sei die Produktion technischer Gläser genannt. Hier kommt derzeit aus Mangel an geeigneten Erfassungs- und Rückführlogistikkonzepten kein Sekundärmaterial zum Einsatz, da dafür qualitativ hochwertiges und sortenreines Recyclingmaterial benötigt wird.

Handlungs- und Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Entwicklung intelligenter Weiternutzungskonzepte für Produktionsabfälle entweder im verarbeitenden Betrieb selbst, durch unternehmensübergreifende Kooperationen oder im Aufbau von Systemen zur sortenreinen Erfassung und Rückführung von Stoffen wie z. B. technischen Gläsern und Aluminium. Ziel ist es, die Einsatzquoten von Primärmaterial zu reduzieren.

Blech- und Stanzabfälle werden zurzeit über Altmetallhändler dem Stahlrecycling zugeführt. Das direkte Wiederverwenden dieser Abfälle erfolgt bisher nur marginal in einzelnen Unternehmen. Detaillierte Kennzahlen liegen hierfür noch nicht vor. Hohe Potenziale ergeben sich ebenfalls bei technischen Gläsern, da hier aktuell keine sortengerechte Rückführung stattfindet.



Verlustfreier Infrastrukturbetrieb von Produktionsanlagen und Fabriken



Der Energieverbrauch und die energieeffiziente Erstellung von Gütern in einer Supply-Chain spielen bislang nur eine sehr untergeordnete Rolle; die Auswirkungen einer energiebezogenen Parametrisierung eines Produktionsnetzwerkes auf die konventionellen logistischen Zielgrößen wurden bisher kaum untersucht. Wichtige Aufgaben in diesem Bereich sind daher die Erstellung und Verifizierung von »Energy-Supply-Chain«-Modellen und die Analyse ihrer Auswirkungen auf die Produktionsnetzwerke. Dabei werden das Supply-Chain-Management und die klassische Logistik bzw. Intralogistik weiter zusammenwachsen müssen und ebenfalls Bereiche der Versorgungs- und Peripherieprozesse mit aufnehmen.

Supply-Chain-Management

Für eine ganzheitliche Bewertung und Optimierung der Energieeffizienz in der Produktion ist es unerlässlich, neben den Fertigungstechnologien und Maschinen auch das Produktionsumfeld in die Betrachtungen mit aufzunehmen. Derzeit werden energetische Aspekte bei der Wertschöpfungsverteilung, -gestaltung und -bewertung in Produktionsnetzwerken nur unzureichend berücksichtigt. Der Energieverbrauch und die energieeffiziente Erstellung von Gütern in einer Supply-Chain spielen nur eine untergeordnete Rolle. Zwar liegt die optimale Gestaltung der Informations- und Materialflüsse innerhalb eines

Produktionsnetzwerkes im Fokus des Supply-Chain-Managements; ganzheitliche Versorgungskonzepte für Medien, Energie und sonstige Hilfs- und Betriebsstoffe existieren jedoch nicht.

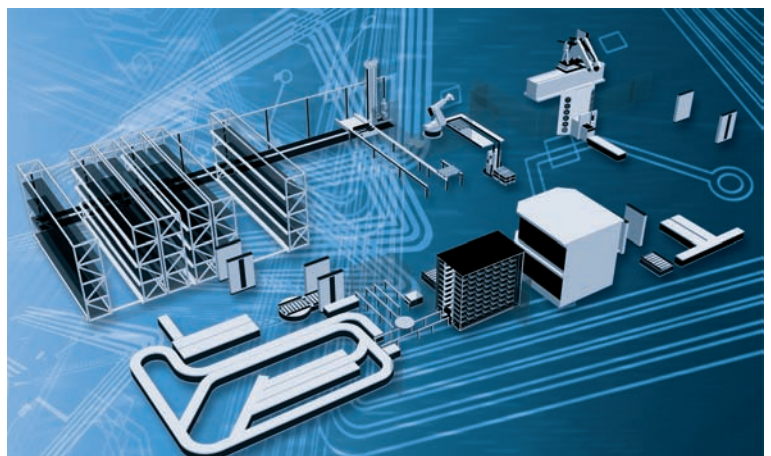
Darüber hinaus erfolgt die Gestaltung von Supply-Chains ausschließlich nach den klassischen logistischen Zielgrößen. Unter Berücksichtigung der Interdependenzen dieser Zielgrößen sind Unternehmen bzw. Unternehmensnetzwerke um möglichst hohe Wirtschaftlichkeit ihrer Logistikprozesse bemüht.

Die Auswirkungen der energieeffizienten Parametrisierung eines Produktionsnetzwerkes auf die klassischen logistischen Zielgrößen sind bisher nicht bekannt. Konventionelle Standortbewertungen konzentrieren sich beispielsweise u. a. auf Kosten, Arbeitskräfte, gesetzliche Auflagen, Topographie etc., wohingegen energetische Aspekte wie die Nutzung energieeffizienter Verkehrswege oder eventuelle Zugänge zu alternativen Energiequellen kaum Berücksichtigung finden.

Die Ermittlung von Energieeinsparpotenzialen in Supply-Chains ist bisher nicht möglich, allerdings wird prognostiziert, dass in diesem Bereich erhebliche Energieeinsparpotenziale bestehen. Die Entwicklung entsprechender Methoden sollte daher eine Aufgabe zukünftiger Forschungsprojekte sein.

Das Produktionsumfeld inklusive Güterverkehr nimmt mit über 40 Prozent einen überwiegenden Anteil am Energieverbrauch des Betrachtungsbereiches der Studie ein.

1 Kilowatt
Stromeinsparung
bedeutet 1,5 Kilowatt
Primärenergieeinsparung

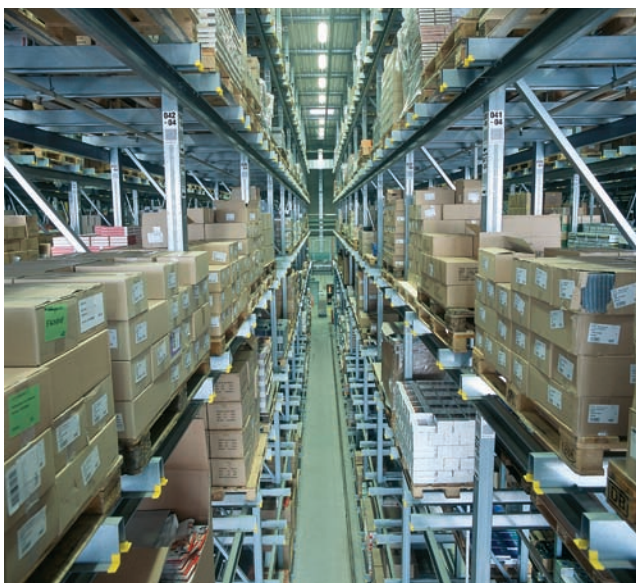


Bei der Druckluft-
erzeugung können durch Umbau
und Modernisierung der Anlagen
bis zu 40 Prozent
Energie eingespart werden.

Energieeffiziente Versorgungssysteme und -strukturen in der Fabrik

Ohne die Ver- und Entsorgungssysteme der betrieblichen Infrastruktur ist der Transformationsprozess zur Erbringung von Wertschöpfungsanteilen nicht denkbar. Die Versorgungs- bzw. Infrastruktursysteme stellen vor allem technische Medien wie Wasser, Strom, Erdgas, Wärme/Kälte, Druckluft, Kühlschmierstoffe, technische Gase usw. für die Produktionstechnik und die Prozesse zur Verfügung. Die Anforderungen werden hauptsächlich von den Produktionssystemen die vorgegeben. Daneben stellen die Produktionsumgebung und das Produkt selbst weitere Anforderungen z. B. an Beleuchtung, Reinheit und Klima. Die diesbezügliche Optimierung wird im Bereich der Versorgungssysteme lokal an einzelnen Stellen oder Systemen betrieben. Eine vernetzte Sichtweise zwischen den Versorgungssystemen und den Produktionssystemen existiert kaum. Alle Versorgungssysteme und -strukturen werden heute zum größten Teil unabhängig von anderen Versorgungs- oder Produktionssystemen projektiert.

Um weitere Steigerungen der Energieeffizienz in diesem Bereich zu erzielen, muss ein systemischer Ansatz zur ganzheitlichen Planung und Optimierung der Versorgungssysteme und -strukturen entwickelt werden. Ziel dabei ist, ein gesamtheitliches Optimum über die Nutzung von Synergien zu erreichen, um energieeffiziente Versorgungs- und Produktionsstrukturen in Fabriken aufzubauen.



Die Steigerung der Energieeffizienz durch lokale Optimierungen einzelner Systeme und Strukturen weist bereits beachtliche Einsparpotenziale auf. Die vernetzte Analyse, Planung und Konzeption stellt den nächsten logischen Schritt dar.

Die erzielbaren Ergebnisse sind stark von den Voraussetzungen abhängig. Es kann aber im Schnitt mit ähnlichen Einsparungen wie bei den lokalen Optimierungen gerechnet werden, die heute bei durchschnittlich 20-30 Prozent liegen.

Intralogistik

Trotz des nachgewiesenen hohen Einspar- und Rationalisierungspotenzials in der Intralogistik steht die Energieeffizienz bei der Planung intralogistischer Systeme im Hintergrund. Bei der Konzeption von Materialflusssystemen werden die Energiekosten bislang pauschal abgeschätzt (i. A. prozentual zu den Investitionskosten, oftmals ca. 3 Prozent p. a. für Energiekosten). Eine Aufstellung der Energiekosten in Abhängigkeit von den eingesetzten förder- und lagertechnischen Gewerken und deren Anordnung bzw. deren Zusammenspiel im System wird nicht vorgenommen, da die dafür benötigten Kennwerte nicht zur Verfügung stehen. Die Fokussierung auf die Investitionskosten hemmt dabei die Verbreitung verbrauchsoptimierter Systeme. Neben der Verfügbarkeit exakter Kennwerte für technische Systemalternativen ist die Schaffung neuer Antriebs- und Bedienkonzepte für die Erschließung alternativer Antriebskonzepte ein wesentlicher Baustein für die Verbreitung energiebezogener Gestaltungsregeln in der Intralogistik.

Allein im Bereich der elektrischen Antriebe ist durch den Einsatz energiesparender Technologien lt. ZVEI eine jährliche Stromeinsparung von 27,5 Mrd. Kilowattstunden möglich. Durch die Vielzahl eingesetzter Elektromotoren im Bereich der Fördertechnik, die maßgeblich die Abläufe innerhalb intralogistischer Systeme bestimmt, liegt das Einsparpotenzial bei bis zu 30 Prozent der gesamten vom ZVEI prognostizierten Stromeinsparung.

Methodenentwicklung für eine nachhaltige Energie- und Materialwirtschaft

Für eine ressourceneffiziente Produktion ist die gesamtheitliche Erfassung aller Quellen und Senken notwendig. Vielen Ressourcenverschwendungen kann zum heutigen Zeitpunkt allein deshalb nicht begegnet werden, weil sie nicht lokalisierbar sind oder nicht gemessen werden. Investitionsplanungen erfolgen vor allem investitionskostenorientiert. Es ist daher notwendig, den bisherigen Kennwertsystemen der Fabrik- und Anlagenplanung Werkzeuge und Methoden hinzuzufügen, die die relevanten Größen bezüglich Energie und Material möglichst vollständig erfassen und die Bewertung, Planung, Optimierung und Senkung des Verbrauchs sowohl in der Investitions- als auch in der Betriebsphase ermöglichen. Unter Total Energy Management wird die Integration und Erweiterung der verschiedenen Methoden zur Planung und Steuerung der Fabrik- und Produktionssysteme und derer Prozesse hinsichtlich der Minderung des Energieverbrauchs verstanden.

Value Added Management of Energy

Bisher existieren kaum belastbare Verbrauchswerte, die einzelnen Technologien oder Verbrauchern zugeordnet werden können. Lediglich bei Systemen, die per se einen hohen Energieverbrauch aufweisen, werden diese durch Zähler erfasst. Des Weiteren fehlt es an Methoden/Kriterien, die einen Vergleich zwischen den Systemen unterschiedlicher Unternehmen ermöglichen. Um Kennzahlensysteme für den Energieverbrauch zu entwickeln, sind adäquat zu Kennzahlen des betrieblichen Ablaufs abgestimmte Kriterien und Handlungsanleitungen für das Messen von Ressourcen- und Energieverbräuchen zu entwickeln.

Die absolute Ressourcen-/Energienmenge kann ohne Bezug zu einem weiteren Wert keine Ausgangsbasis für Benchmarks in diesem Zusammenhang liefern. Daher muss zunächst eine Methodik bzw. ein Leitfaden für die Produktions- und Infrastrukturtechnologien (Logistik- und Versorgungssysteme) entwickelt werden, die einen Vergleich auf Basis der Messung auch bei unterschiedlichen Unternehmen zulässt.

Aufgrund zukünftig vorhandener qualifizierter und bewerteter Kennzahlen können bei der Planung ganz bewusst energieeffiziente Anlagenkomponenten bzw. Technologien eingesetzt werden. Die bei den Unternehmen diesbezüglich momentan herrschende Unsicherheit wird beseitigt.

Ressourcen- bzw. energierelevante Kennzahlen werden nur in seltenen Fällen aufgenommen und wenn, dann beziehen sie sich auf ausgewählte Bereiche der Produktion sowie der Energie- bzw. Medienversorgung. Handlungsbedarf besteht in der Erarbeitung einer gesamtheitlichen Bewertungssystematik/-methodik zur Erkennung der energieeffizienten Technologien bzw. zur Beurteilung und wirtschaftlichen Optimierung der Energieeffizienz firmenspezifischer und firmenübergreifender Prozessketten in der Produktionstechnik.

Im Sinne eines Methodenbaukastensystems müssen die Methoden für die produktionsbezogene Planung, existierende Bewertungssystematiken und Methoden der Input-Output-Analysen-Planung der Energieverbräuche miteinander kombiniert werden.

Mit Hilfe der erarbeiteten Bewertungssystematik sollen Synergiepotenziale hinsichtlich Energie- und Materialverbrauch identifiziert werden, das heißt die gezielte Bereitstellung von Prozesstechnik, Versorgungstechnik und Material auf Anforderung soll ermöglicht und optimiert werden.

Derzeit können keine belastbaren Zahlen für das Total Energy Management (TEM) angegeben werden, da dies noch nicht praktiziert wird. Bei der Expertenbefragung wurde TEM jedoch als wichtiger Lösungsansatz zur Steigerung der Energieeffizienz eingeschätzt.



Im Rahmen der Untersuchungen stellten sich die Produktentwicklung und die Humanressourcen als eng verknüpfte und für den effizienten Umgang mit Ressourcen ebenfalls wichtige Aspekte dar.

Prospektive Produktentwicklung

80 Prozent der Produktkosten werden im Produktentstehungsprozess festgelegt. Mit Konzepten wie »Design to Logistics« und »Design to Recycling« wird versucht, Aspekte der Logistik und des Recyclings bereits bei der Produktentwicklung zu berücksichtigen. Die Problematik der Energie- und Ressourceneffizienz fand in diesem Zusammenhang bisher jedoch kaum Beachtung.

Um die Ressourceneffizienz bei der Herstellung von Produkten im Rahmen der Produktentwicklung berücksichtigen zu können, ist das frühzeitige Erkennen ressourceneffizienter Produkt-, Produktions- und Materialtechnologien essentiell. Insbesondere sind die Fragen zu beantworten, wie ökologische Trends bei technologischen Überlegungen berücksichtigt und wie junge, ressourceneffiziente, aber noch nicht qualifizierte Technologien bewertet, geplant und umgesetzt werden können. Außerdem müssen Verfahren zur Generierung sowie zur Sicherung des Wissens über ressourceneffiziente Technologien entwickelt werden.

Insofern sind Methoden und Konzepte zu entwickeln, die eine Beachtung von Ressourceneffizienzaspekten bei der Produktentwicklung sicherstellen.



Werden bereits bei der Produktentwicklung ressourceneffiziente Technologien berücksichtigt, sind je nach Branche und Produkt Einsparungen von 10 bis 40 Prozent möglich.

Humanressourcen

Die Steigerung der Energieeffizienz in der Produktion kann nur von den betrieblichen Akteuren selbst vorangetrieben und umgesetzt werden. Für diesen Prozess sind drei Einflussfaktoren entscheidend: Wille, Kompetenz und förderliche organisatorische Rahmenbedingungen. Folgende Handlungsbedarfe können identifiziert werden:

Organisation: Einbettung des Themas Energieeffizienz in bestehende Abläufe, Strukturen und Verantwortlichkeiten bzw. Schaffung neuer Funktionen, Anreize und Vorgehensweisen.

Qualifikation: Bereitstellung von fachlichem Wissen, das für unterschiedliche Zielgruppen aufzubereiten ist, und Durchführung entsprechender Weiterbildungsmaßnahmen.

Kultur: Veränderung der handlungsleitenden Einstellungen und Wahrnehmungen der Akteure, um die Umsetzungswahrscheinlichkeit zu erhöhen.

Durch Weiterbildung und Organisation kann der Auswahl-, Einführungs- und Umsetzungsprozess systematisiert und beschleunigt werden. Es ist zu erwarten, dass Akzeptanz und Beherrschbarkeit neuer Lösungen zunehmen und gleichzeitig die Energie- und damit Kostenersparnis der Unternehmen wesentlich gesteigert wird.

**Fraunhofer-Institut für
Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU**
Reichenhainer Straße 88
09126 Chemnitz
Telefon: +49 (0)3 71 / 53 97-0
www.iwu.fraunhofer.de
Leitung:
Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c.
Reimund Neugebauer

**Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnik und Automatisierung IPA**
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Telefon: +49 (0)7 11 / 9 70-00
www.ipa.fraunhofer.de
Leitung:
Prof. Dr.-Ing. Prof. e.h. Dr.-Ing. e.h. Dr. h.c. mult.
Engelbert Westkämper

**Fraunhofer-Institut für
Produktionstechnologie IPT**
Steinbachstraße 17
52074 Aachen
Telefon +49 (0)2 41 / 89 04-0
www.ipt.fraunhofer.de
Leitung:
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Fritz Klocke

**Fraunhofer-Institut für
Arbeitswirtschaft und Organisation IAO**
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
Telefon: +49 (0)7 11 / 9 70-01
www.iao.fraunhofer.de
Leitung:
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dieter Spath

**Fraunhofer-Institut für
Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF**
Sandtorstraße 22
39106 Magdeburg
Telefon: +49 (0)3 91 / 40 90-0
www.iff.fraunhofer.de
Leitung:
Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. Michael Schenk

**Fraunhofer-Institut für
Keramische Technologien und Systeme IKTS**
Winterbergstraße 28
01277 Dresden
Telefon: +49 (0)3 51 / 25 53-7 00
www.ikts.fraunhofer.de
Leitung:
Prof. Dr. Alexander Michaelis

**Fraunhofer-Institut für
Materialfluss und Logistik IML**
Joseph-von-Fraunhofer-Straße 2-4
44227 Dortmund
Telefon: +49 (0)2 31 / 97 43-0
www.iml.fraunhofer.de
Leitung:
Prof. Dr. Michael ten Hompel

**Fraunhofer-Institut für
Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik
UMSICHT**
Osterfelder Straße 3
46047 Oberhausen
Telefon +49 (0)2 08 / 85 98-0
Telefax +49 (0)2 08 / 85 98-12 90
www.umsicht.fraunhofer.de
Leitung:
Prof. Dr.-Ing. Eckhard Weidner

Weitere Partner:

- Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK, Berlin
- TU Chemnitz, Professur Arbeitswissenschaften
- RWTH Aachen, Institut für Kunststoffverarbeitung IKV
- TU Dortmund, Institut für Umformtechnik und Leichtbau IUL
- TU Darmstadt, Institut für Produktionsmanagement, Technologie u. Werkzeugmaschinen PTW
- InnoMat GmbH, Chemnitz

Die vorliegende Untersuchung entstand im Zeitraum Juni 2007 bis Februar 2008 und wurde im Auftrag des BMBF vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe (PTKA), Außenstelle Dresden betreut (weitere Informationen unter www-produktionsforschung.de).



Fraunhofer Institut
Werkzeugmaschinen
und Umformtechnik



Fraunhofer Institut
Produktionstechnik und
Automatisierung



Fraunhofer Institut
Produktionstechnologie



Fraunhofer Institut
Arbeitswirtschaft und
Organisation



Fraunhofer Institut
Fabrikbetrieb
und -automatisierung



Fraunhofer Institut
Keramische Technologien
und Systeme



Fraunhofer Institut
Materialfluss
und Logistik



Fraunhofer Institut
Umwelt-, Sicherheits-,
Energietechnik UMSICHT

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM



Projektträger
Forschungszentrum
Karlsruhe (PTKA)