Abschlussbericht für das Verbundprojekt

Bewertung der Energieeffizienz alternativer Prozesse und Technologieketten (BEAT)

Forschung für die Produktion von morgen

Schwerpunkt: Simulation und Bewertung

Förderkennzeichen: 02PO2161

Laufzeit: 01.09.2009 – 31.10.2012

BETREUT VOM

PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BOSCH

DAIMLER

EFA
Effizienz-Agentur NRW

IEM RWTH
INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE MASCHINEN
RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN

PE INTERNATIONAL
EXPERTS IN SUSTAINABILITY

WZL
RWTH AACHEN

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung 5

1.1 Motivation und Potenzial 5
1.2 Konsortium 5

2 Stand der Wissenschaft und Technik 9

3 Problemstellung 11

4 Lösungsansatz im Projekt BEAT 12

4.1 Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040/14044 12
4.2 Modellierung mit der GaBi-Software 15
4.3 Arbeitsplan 18

5 Ergebnisse 20

5.1 Auswahl der Referenzbauteile und Technologieketten 20
5.2 Datenaufnahme 21
5.2.1 Bilanzrahmen und Detaillierungslevel der Datenerfassung 21
5.2.2 Berücksichtigung zentraler Einheiten 24
5.2.3 Verwendete Messsysteme 25
5.3 Modellierung der Prozessketten 30
5.4 Ökologische Dimension des Zerspanprozesses 34
5.4.1 Werkzeugmaschine 34
5.4.2 Zerspanprozess 35
5.4.3 Zerspanwerkzeuge 39
5.5 Softwarewerkzeug BEA*T*ool 46
5.5.1 Analysemöglichkeiten 50
5.5.2 Fallbeispiele der Anwender 52

6 Verwertungsplan 56

6.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten 56
6.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten 56
6.3 Wissenschaftliche und/oder wirtschaftliche Anschlussfähigkeit 57

7 Zusammenfassung und Ausblick 58

8 Literaturverzeichnis 59

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

a_e	[mm]	radialer Eingriff
a_p	[mm]	Schnitttiefe
b	[mm]	Spanungsbreite
C_v	[m/min]	Schnittgeschwindigkeit Standzeit 1 min
D	[mm]	Durchmesser
$E_{Bauteil}$	[kWh]	Energie pro Bauteil
$E_{Grundlast}$	[kWh]	Energie umgesetzt durch die Grundlast
$E_{Prozess}$	[kWh]	Energie umgesetzt durch den Prozess
$E_{Leerlauf}$	[kWh]	Energie umgesetzt im Leerlauf
E_{Stby}	[kWh]	Energie im StandBy
$E_{Werkzeug}$	[kWh]	Energiebedarf pro Werkzeug
$E_{Werkzeugwechsel}$	[kWh]	Energiebedarf pro Werkzeugwechsel
$E_{c,spez}$	[kWh/mm³]	Spezifische Zerspanenergie
E_{el}	[kWh] bzw. [MJ]	Elektrische Energie
F	[Hz]	Frequenz
f_z	[mm]	Zahnvorschub
F_c	[N]	Schnittkraft
h	[mm]	Spanungsdicke
I	[A]	Stromstärke
k		Geradensteigung Taylorgerade
k_a		Exponent erw. Taylorfunktion
k_{fz}		Exponent erw. Taylorfunktion
$k_{c1.1}$	[N/mm²]	Spezifische Schnittkraft
K_{vc}		Korrekturfaktor Schnittgeschwindigkeit
l	[mm]	Werkzeuglänge
MW	[W]	Wirkleistungsmesswert
m	[kg]	Masse
$(1-m_c)$		Steigung Kraftverlauf
P	[W]	Leistung

P_c	[W]	Schnittleistung
Q	[Var]	Blindleistung
S	[VA]	Scheinleistung
t	[s]	Zeit
T	[°C]	Temperatur
T_c	[s]	Standzeit
t_h	[s]	Hauptzeit
t_n	[s]	Nebenzeit
t_z	[s]	Zykluszeit
U	[V]	Spannung
$\dot{V}$	[Nm³/h]	Druckluftstrom in Normkubikmeter
v_c	[m/min]	Schnittgeschwindigkeit
z		Zähnezahl Fräswerkzeug
φ	[°]	Phasenverschiebung

Abkürzungen

ADP	[kg Sb_e]	Abiotic Depletion Potential / Abiotischer Ressourcenverbrauch (elementar)
ADP fossil	[MJ]	Abiotic Depletion Potential / Abiotischer Ressourcenverbrauch (fossil)
AP	[kg SO_{2e}]	Acidifcation Potential / Versauerungspotential
BAZ		Bearbeitungszentrum
CO_{2e}	[kg]	Äquivalenter CO_2-Ausstoss
CML		Center voor Milieukunde, Leiden
CVD		Chemical Vapor Deposition
EP	[kg $PO_4^{3}{}_e$]	Eutrophication Potential / Eutrophierungspotential
Fa.		Firma
GaBi		Ganzheitliche Bilanzierung
GWP	[kg CO_{2e}]	Global Warming Potential / Treibhauspotenzial
HSS		High Speed Steel / Schnellarbeitsstahl
I/O		Input/Output
KSS		Kühlschmierstoff
LCA		Life Cycle Assessment / Ökobilanzierung
LCIA		Life Cycle Impact Assessment
ODP	[kg $R11_e$]	Ozone Depletion Potential / Ozonzerstörungspotential
PED	[kg]	Primary Energy Demand / Primärenergiebedarf
POCP	[kg C_2H_{2e}]	Photochemical Ozone Creation Potential / Sommersmog Potential
PVD		Physical Vapor Deposition
VB	[µm]	Verschleißmarkenbreite
WZM		Werkzeugmaschine

1 Einleitung

1.1 Motivation und Potenzial

Um in einer globalisierten Welt mit wachsender Bevölkerung sowie steigendem Material- und Energieverbrauch auch weiterhin die Bedürfnisse der Menschen befriedigen zu können, muss eine nachhaltige Entwicklung angestrebt werden. Nachhaltiges Handeln bedeutet, die gegenwärtigen Bedürfnisse der Menschen zu befriedigen, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihrerseits die eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können [UN87].

Eine Schlüsselrolle bei der nachhaltigen Entwicklung nimmt die Produktion von Gütern ein, da sie nicht nur einen erheblichen Teil des Material- und Energieverzehrs in der Herstellungsphase bedingt, sondern auch ein Stellhebel für die nachhaltige Nutzung und Entsorgung darstellt. Unter Berücksichtigung des gesamten Lebenszyklus von Produkten ist die Fertigung daher nicht lediglich ein Verbraucher, sondern auch ein Befähiger von Energie- und Ressourceneffizienz [BÄUM11, S. 161 ff.]. Für die nachhaltige Ausrichtung produzierender Unternehmen ist die Einführung lebenszyklusbasierter Bewertungsmethoden für Fertigungsprozesse und -technologieketten erforderlich [BRÜH11]. Der vorliegende F&E-Abschlussbericht entstand innerhalb des vom BMBF geförderten Projektes „Bewertung der Energieeffizienz alternativer Prozesse und Technologieketten“ (BEAT). Der Schwerpunkt des Projektes lag auf der Entwicklung eines methodischen Vorgehens zur Erfassung und Bewertung von Technologieketten am Beispiel einer Zahnradfertigung und einer Injektorfertigung.

1.2 Konsortium

Das Konsortium bestehend aus den zwei Anwendern Robert Bosch GmbH und Daimler AG, den zwei Dienstleistern Effizienz-Agentur NRW und PE International sowie den zwei Forschungsinstituten Institut für Elektrische Maschinen (IEM) und dem Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen hat sich in dem Projekt BEAT der Thematik der Bewertung der Energieeffizienz alternativer Technologieketten gewidmet.

Die Robert Bosch GmbH ist Teil der Bosch Gruppe, einem führenden Technologie- und Dienstleistungsunternehmen. Bosch fertigt Produkte für die Kraftfahrzeug- und Industrietechnik sowie Gebrauchsgüter und Gebäudetechnik. Hierbei wird der Umweltfreundlichkeit der Produkte eine hohe Bedeutung beigemessen. Beispielhaft sind Start-Stop Systeme für PKW, Einspritztechnik für alternative Kraftstoffe, Komponenten für Hybridantriebe, Brennstoffzellen und Elektrofahrzeuge sowie Abgasturbolader zu nennen.

In der Vergangenheit wurden bei Bosch bereits Anstrengungen zur Verbesserung der Material- und Energieeffizienz unternommen. In öffentlich geförderten Projekten zur Trockenbearbeitung oder umweltschonenden Fertigungstechniken wurde bereits eine Kompetenz im Bereich der Ressourceneffizienz erworben. Seit Jahren erreicht

die Robert Bosch GmbH Energie- und Materialeinsparung durch konsequente Wiederaufbereitung von gebrauchten Aggregaten.

Unternehmerische Verantwortung bedeutet für das Technologieunternehmen Bosch, großen Herausforderungen wie dem Klimawandel oder knapper werdenden Ressourcen vor allem mit Innovation zu begegnen. Zur Schonung der Umwelt ist nicht weniger, sondern mehr Technik erforderlich. Nicht zuletzt dank der Hochdruckdirekteinspritzung von Bosch konnten seit Anfang der 90er Jahre die Emissionen von Diesel-Pkw um mehr als 90 Prozent gesenkt werden. Zur weiteren Stickoxid-Reduktion bietet Bosch die Denoxtronic für Pkw und leichte Nutzfahrzeuge an. Das von Bosch gelieferte System besteht aus einem Dosiermodul, einem AdBlue-Tank mit integriertem Fördermodul und einem Steuergerät. Es gilt, sowohl die Effizienz bestehender Techniken weiter zu verbessern als auch sich verstärkt mit Alternativen zu Öl, Kohle und Gas zu beschäftigen. Dabei geht es um die Nutzung regenerativer Energien, deren Wandlung in wirtschaftliche Energieträger und deren Speicherung. Beiträge dazu leistet Bosch in allen Unternehmensbereichen. In der Kraftfahrzeugtechnik arbeiten Experten an Lösungen, die Kraftstoffverbrauch und Kohlendioxidausstoß bei allen Antriebstechniken weiter verringern. Auch auf dem Gebiet der kohlendioxidfreien Stromerzeugung ist Bosch stark engagiert. Für den Betrieb von Windkraftanlagen liefert Bosch Rexroth Kernstücke wie Getriebe und Antriebe zur Flügelverstellung. Für private Haushalte bietet Bosch Solarkollektoren und Wärmepumpen. Diesen Anstrengungen bei den Produkten stehen zunehmend Aktivitäten zur ökologisch verträglichen Herstellung der Produkte gegenüber.

Das Thema der nachhaltigen Produktion nimmt bei Bosch einen hohen Stellenwert ein. So heißt es im Geschäftsbericht 2010:

„Ein grundlegendes Anliegen ist die Balance zwischen der langfristigen Weiterentwicklung des Unternehmens und wirtschaftlichen, technologischen, gesellschaftlichen sowie ökologischen Belangen. So ist bereits der Produktentstehungsprozess darauf ausgerichtet, zur Umwelt- und Ressourcenschonung beizutragen. Ziel ist es, den auf die Eigenleistung bezogenen CO_2-Ausstoß unserer Standorte bis 2020 um mindestens 20% gegenüber 2007 zu verringern. Durch die Erholung aus der Krise stieg zwar der CO_2- Ausstoß im Jahr 2010 auf 2,4 Millionen Tonnen gegenüber 2,1 Millionen Tonnen im Krisenjahr 2009. Bezogen auf den Eigenleistungsanteil liegen wir damit allerdings um 4,4% unter dem Bezugsjahr 2007. Zur Senkung der Emissionen arbeiten wir kontinuierlich an der Verbesserung der Energieeffizienz an unseren Standorten. Der gesamte Energiebedarf summierte sich 2010 auf 6.285 Gigawattstunden (Vorjahr 5.602 Gigawattstunden). Gegenüber dem Bezugsjahr 2007 ging der Energiebedarf jedoch um 7,3% zurück.“

Die Daimler AG ist ein führendes Unternehmen der Automobilindustrie. Zu den mit hoher Fertigungstiefe hergestellten Produkten zählen neben PKWs auch Nutzfahrzeuge und Dienstleistungen.

Bei der Daimler AG ist der verantwortungsvolle Umgang mit Ressourcen Teil der Unternehmensphilosophie. Zu den wichtigsten Zielen im Bereich der Fertigung zählt die Entwicklung von Kennwertsystemen und Methoden zur frühzeitigen Planung von Fertigungsprozessen unter Berücksichtigung von Stoff- und Energieflüssen auf Pro-

zessebene. Es sollen im Rahmen des Projektes kurz-, mittel- und langfristige Einsparpotenziale identifiziert und nach Möglichkeit umgesetzt werden.

Als fertigendes Unternehmen steckt sich die Daimler AG in ihrem Nachhaltigkeitsbericht klare Ziele für die Zukunft:

„Wir wollen alle Stufen unserer Fahrzeugproduktion möglichst umweltverträglich gestalten. Dazu haben wir uns in unserer dritten Umweltleitlinie verpflichtet, die integraler Bestandteil unserer Unternehmensstrategie ist. Unser Anspruch ist es, Maßstäbe für umweltschonende Produktions- und Verfahrenstechniken zu setzen und den betrieblichen Umweltschutz voranzubringen. Schwerpunkte liegen für uns in der Anwendung und Weiterentwicklung von Techniken zur Energie- und Wassereinsparung und zur Verringerung von Emissionen und Abfall. Die wichtigsten Handlungsfelder in unserer Verantwortung für die Produktionsprozesse sind der Klimaschutz, die Luftreinhaltung und die Ressourcenschonung.
Unsere Zielrichtung lautet also:

- Reduzierung des direkten und indirekten CO_2-Ausstoßes,
- Verringerung der Lösemittelemissionen,
- Erhöhung der Ressourceneffizienz und die Vermeidung von Abfall.„

Konkret: „Der Klimaschutz hat als Umweltziel in unserem Produktionsprozess oberste Priorität. Konzernweit haben wir uns vorgenommen, die produktionsbedingten CO2-Emissionen pro Fahrzeug bis 2015 gegenüber den Werten von 2007 um 20 Prozent zu senken. Auf dem Weg dahin setzen wir an unterschiedlichen Stellhebeln an, um Strom- und Wärmeenergie möglichst umweltgerecht bereitzustellen und Energie effizient zu nutzen. Neben technischen Maßnahmen zur Reduktion unseres Energieverbrauchs können auch Energiemanagementsysteme einen Beitrag zur Reduktion der produktionsbedingten CO_2-Emissionen leisten…“

Die Effizienzagentur NRW ist ein Dienstleistungsunternehmen, dass speziell ausgerichtet auf klein- und mittelständische Unternehmen (KMU) Beratungsprojekte im Auftrag der Landesregierung NRW durchführt. Die Fragestellungen beziehen sich dabei stets auf den produktionsintegrierten Umweltschutz.

In bereits über 1400 bearbeiteten Projekten hat die Effizienzagentur bei Unternehmen Einsparpotenziale zur Steigerung der Effizienz und somit der Wettbewerbsfähigkeit finden und heben können. Mit der langjährigen Erfahrung speziell im Umgang mit KMU war es Aufgabe der Effizienzagentur im Rahmen des Projektes, die Perspektive von kleineren Unternehmen einzunehmen und somit neben den Anwendern, die zu den Großunternehmen zählen, das Anwendungsspektrum zu vervollständigen.

Das IEM der RWTH Aachen ist eine Forschungseinrichtung, deren Forschungsschwerpunkt im Bereich der Berechnung, Auslegung und Konstruktion elektrischer Maschinen liegt.

Das IEM der RWTH Aachen beschäftigt sich mit der Auslegung, Simulation, Regelung und Inbetriebnahme von elektromechanischen Energiewandlern, die für einen Großteil des elektrischen Energiebedarfs in der industriellen Fertigung verantwortlich sind [VDE08].

Die PE International AG ist ein Beratungsunternehmen, das im Auftrag seiner Kunden an der Lösung von Fragestellungen der ökonomischen, technischen und ökologischen Nachhaltigkeit von Produkten, Prozessen und Serviceleistungen arbeitet.

PE entwickelt und vertreibt die Ökobilanzsoftware GaBi (Ganzheitliche Bilanzierung) und kann daher auf langjährige Erfahrung im Umgang mit ökologischem Expertenwissen und dessen Umsetzung in IT-Lösungen zurückgreifen. Ebenfalls verfügt das Unternehmen über große Erfahrung in der Ökobilanzierung von Prozessen der verschiedensten Industriebereiche.

Der Lehrstuhl für Technologie der Fertigungsverfahren hat sich in den vergangenen Jahrzehnten intensiv mit zerspanenden Prozessen mit geometrisch bestimmter und unbestimmter Schneide, dem Umformen sowie den abtragenden Fertigungsverfahren beschäftigt. Im Bereich der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide sind grundlegende Untersuchungen zur Zerspanbarkeit leicht und schwer zerspanbarer Werkstoffe durchgeführt worden und deren Ergebnisse direkt in die Fertigung der beteiligten Partner übertragen worden.

Im Bereich der Ressourceneffizienz wird technisches Prozesswissen mit Wissen über Energie- und Rohstoffbedarf kombiniert, welches durch Mitarbeit im Sonderforschungsbereichen 144 (Methoden zur Energie- und Rohstoffeinsparung für ausgewählte Fertigungsverfahren) und 442 (Reduzierung des Kühlschmierstoffverbrauchs durch Trockenbearbeitung) oder Projekten wie PROLIMA erworben wurde. Darüber hinaus bringt das WZL die methodische Erfahrung zur Bilanzierung technischer Prozesse mit, die ebenfalls Gegenstand der Projekte ReVista und InnoCaT ist.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Während die Thematik Ressourcen- und Energieeffizienz auf Produkt- und Erzeugungsebene bereits seit Jahren einen hohen Stellenwert auf der politischen, wirtschaftlichen sowie gesellschaftlichen Agenda eingenommen hat (bspw. verbrauchsarme Personenkraftwagen, erneuerbare Energien etc.), wurde sie auf Produktionsebene bisher zurückhaltend behandelt. Rohstoffe waren für die Industrie in der Vergangenheit auf den Weltmärkten in ausreichendem Maße und – verglichen etwa mit Lohnkosten – zu vergleichsweise niedrigen Kosten vorhanden. Da sie zu jeder Zeit problemlos beschafft werden konnten, bestand für viele Betriebe zunächst nur ein vergleichsweise geringes Interesse, die Ressourcen in der Produktion effizient einzusetzen [BREC08].

Um trotz hoher Verfügbarkeit und niedriger Kosten ein Bewusstsein für die Notwendigkeit ressourcenschonender Produktion zu schaffen, wurde im Rahmen einer vom BMBF geförderten Untersuchung von Fraunhofer-Instituten und weiteren Forschungseinrichtungen das Potenzial zur Energie- und Ressourceneinsparung im produzierenden Gewerbe analysiert. Dabei ergaben sich Handlungsfelder, von denen im Rahmen dieses Forschungsvorhaben insbesondere die Handlungsfelder „Energie- und Materialeffizienz in mechanischen, thermischen und chemischen Fertigungsprozessen und -systemen“ und „Methodenentwicklung für eine nachhaltige Energie- und Materialwirtschaft“ adressiert werden. [NEUG08]

Die Fertigung wird im Normalfall unter technologischen und ökonomischen Gesichtspunkten ausgelegt. Die meisten Firmen nutzen für die Berechnung der Fertigungskosten die Maschinenstundensatzrechnung, die oft viele Kostenfaktoren, wie Energie und Hilfsstoffe, mit einem Gemeinkostenanteil veranschlagt. Neben der Ungenauigkeit in der Kostenrechnung führt dieser Ansatz dazu, dass die Energie- und Stoffströme in produzierenden Betrieben auf Prozessebene unbekannt sind. Im Zuge der zunehmenden Verbreitung von Energiemanagementsystemen nach DIN EN ISO 50001 ist eine Verbesserung der Transparenz aller Energieströme zu erwarten, allerdings erfolgt die Betrachtung auf höheren, gröberen Aggregationsebenen und erfordert zumindest für die Erstzertifizierung nicht die Detailtiefe, die für die ökologische Bewertung von komplexen technischen Prozessketten nötig ist.

Die Methode der Ökobilanzierung, genormt nach DIN EN ISO 14040/44 sieht eine Bewertung von Prozessen mitsamt der Datenerfassung und Wirkungsabschätzung vor. Am Markt sind Datenbanken und Software vorhanden, die eine Ökobilanzierung unterstützen, dazu zählen beispielsweise SimaPro, Umberto und GaBi. Diese Systeme basieren auf Datenbanken, die viele Hintergrundinformationen zu Materialien, Energieformen und Energiesystemen sowie deren ökologische Bewertbarkeit beinhalten. Insofern unterliegt es den Anwendern, die passenden Modelle zu erstellen und zu validieren. Die implementierten Methoden erlauben eine ökologische Beurteilung von Produkten im gesamten Lebenszyklus.

Da die Erstellung der Modelle aufwendig ist und die Stoffströme vorher erfasst werden müssen, ist die Modellbildung bisher nur für Produkte mit Nachweispflicht bzw. Erzeugnisse der Verfahrenstechnik üblich, da bei diesen Verfahren hohe Prozesskenntnisse bzgl. des Stoff und Energieverbrauchs vorhanden sind. Durch die Wahl einer großen Bilanzhülle ist es mithilfe dieser bestehenden Lösungen nicht möglich, eine differenzierte Betrachtung der Technologiekette in der Fertigung durchzuführen, zumal viele der Werte bekannt sein bzw. gemessen werden müssen. Auch die Methode „Eco-Indicator99“ [GOED99] zur Beurteilung der ökologischen Auswirkungen eines Produktes befasst sich beispielsweise mit der Wirkungsabschätzung von Sachbilanzen und kann somit Datensätze oder Prozessinformationen im Sinne einer Ökobilanz interpretieren. Viele Datensätze oder Prozessinformationen aus Ökobilanzdatenbanken behandeln zum Beispiel die spanenden Fertigungsverfahren wie Drehen und Fräsen unabhängig von ihren Prozessparametern identisch. Bei Detailbetrachtungen ist dies fraglich, da Studien durchaus große Energieeinsparpotenziale z.B. bei der Umstellung von einer Nass- auf eine Trockenbearbeitung beim Fräsen von Zylinderköpfen identifiziert haben [BODE07].

Da der Energieanteil für Kühlschmierstoffe in dem Anwendungsfall bei über 50% lag, kann hierfür mit auf „Eco-Indicator99“ beruhenden Software- und Datenbanklösungen keine differenzierte Bewertung der spanenden Fertigungsprozesse erfolgen. Optimierungspotenziale bleiben unter diesen Umständen unentdeckt. Ein weiterer Nachteil der bestehenden Systeme besteht darin, dass eine Verfahrens- und Lebenszyklusbetrachtung nur bei bekannten Input- und Outputströmen möglich ist. Zu einer realen Bewertung alternativer Technologieketten sind diese Eingangsgrößen besonders in der mechanischen Fertigung oft nicht entsprechend detailliert vorhanden.

Trotz der Defizite im Bereich der Bewertungsmethoden wurden Ziele hinsichtlich ökologischer Zielgrößen wie dem CO_2-Aussstoß auf europäischer, nationaler und auch auf Unternehmens-Ebene formuliert. Ein Großteil der deutschen Großunternehmen fertigt Nachhaltigkeitsberichte an, in denen über die Aktivitäten im Streben nach nachhaltigem Wirtschaften berichtet wird. Es fehlt somit das Bindeglied zwischen Detailanalysen der Fertigung und Unternehmensweiten Reduktionszielsetzungen. Aus der Fertigung und deren Optimierung müssen entsprechende ökologische Indikatoren erzeugt werden, die sowohl dafür genutzt werden können Vorteile zu finden wie auch zu dokumentieren, um wiederum Aussagen treffen zu können, wann gesetzte Ziele durch welche Maßnahmen erreicht werden können.

3 Problemstellung

Die Fertigung ist ein zentraler Stellhebel für die Nachhaltigkeit von Produkten. In den frühen Phasen der Produktplanung und Fertigung wird ein Großteil der ökologischen Auswirkungen von Produkten für den gesamten Lebenszyklus festgelegt. Vor diesem Hintergrund ist die Produktion nicht nur als Verbraucher, sondern auch als Befähiger von Ressourceneffizienz in der Nutzungsphase anzusehen. [BÄUM11]

Um allerdings Produkte ganzheitlich zu bewerten, müssen alle Lebenszyklusphasen inklusive Fertigung, Nutzungsphase, Entsorgung/Recycling bewertet werden. Dazu ist es notwendig, geeignete Bewertungsmodelle zu entwickeln und zu verknüpfen, um den gesamten Produktlebenszyklus zu bewerten.

Weiterhin sehen sich Unternehmen zunehmend mit steigenden oder sehr volatilen Rohstoffpreisen, mangelnder Verfügbarkeit und ökologisch geprägter Gesetzgebung sowie Kundeninteresse konfrontiert. Aufgrund begrenzter Ressourcenvorkommen und steigender Nachfrage, besonders aufgrund der Nachfrage aufstrebender Schwellenländer, wird der effiziente Umgang mit Ressourcen in Zukunft zu einem zentralen Wettbewerbsvorteil produzierender Unternehmen.

Aus dem Stand der Technik ergibt sich, dass es an Bewertungsmodellen und Effizienzkennzahlen mangelt, die auf Prozessebene ansetzen. Ein zentrales Problem bei der nachhaltigen Ausrichtung der Produktion ist die mangelnde Bewertungsgrundlage. Es fehlt sowohl an Wissen über anfallende Energie- und Stoffströme in der Produktion als auch einem einheitlichen Bewertungskonzept. Das wiederum stellt jedoch die notwendige Voraussetzung für Verbesserungen der Ressourceneffizienz dar. Es fehlen strukturierte Maßnahmen zur Reduzierung der ökologischen Wirkung von Produkten in der Produktionsphase, da in den meisten Unternehmen keine oder wenig Informationen über die Energie- und Stoffverbräuche von Technologieketten und Prozessen verfügbar sind. [NEUG08]

Innovationen und deren schnelle und erfolgreiche Umsetzung in qualitativ hochwertige Produkte ermöglichten es Deutschland bisher, sich auf dem Weltmarkt erfolgreich zu positionieren und den Entwicklungsvorsprung als Wettbewerbsvorteil gegenüber aufstrebenden Industrienationen zu verteidigen. Aktuell schrumpft dieser Wettbewerbsvorteil jedoch kontinuierlich und es wird erwartet, dass Deutschland schon in den nächsten Jahren zumindest China im Export unterliegen wird. Da diese aufstrebenden Industrienationen ihren Erfolg oft mit einem unangemessen hohen Ressourcen- und Energieaufwand erkaufen, kann Deutschland bei der langfristigen Energiepreisentwicklung mit energieeffizienten Fertigungsmethoden seine Wettbewerbsfähigkeit dauerhaft ausbauen. Die Preissteigerungen auf den weltweiten Energiemärkten waren in den letzten Jahren enorm, sodass der effiziente Umgang mit Energie und Ressourcen eine zentrale Herausforderung für Unternehmen ist. Zwar sank bedingt durch die Rezession Ende 2008 der Preis für Erdöl drastisch ab, aber der langfristige Trend bei Energie und Rohstoffen geht weiterhin kontinuierlich aufwärts.

4 Lösungsansatz im Projekt BEAT

Aus dem Stand der Technik leitet sich die Forderung nach einer Methode ab, nicht nur den Lebenszyklus eines Produktes bewerten zu können, sondern bis auf Prozessebene hinab Fertigungsketten in Abhängigkeit von verfügbaren Daten wie Schnittparametern vergleichen und unter energetischen Gesichtspunkten deren Einzelprozesse auslegen zu können.

Hier ist es besonders wichtig, auch die nichtlinearen physikalischen Zusammenhänge darstellen zu können. Dieser Forderung wurde sich im Projekt mit insgesamt 8 Arbeitspaketen genähert. Die Ergebnisse des Projektes wurden in einem Leitfaden zur energetischen Prozessauslegung mechanischer Fertigungsverfahren, wie z.B. Drehen und Fräsen, zusammengefasst. Darüber hinaus wurde ein generisches Softwaretool („BEA*T*ool“) entwickelt, das Anwendern ohne ökologisches Fachwissen und methodische Erfahrung ermöglicht, eine Ökobilanzierung technischer Produkte durchzuführen. Dazu wurden die Ergebnisse und Erfahrungen im Projekt genutzt, um ein möglichst präzises Ergebnis bei vertretbarem Aufwand zu erzielen. Gespeist wird das Softwarewerkzeug aus ausgewählten Daten der GaBi Datenbank.

Im Rahmen des Projektes wurden die Energie- und Stoffströme der untersuchten Technologieketten mit einem sehr hohen Detaillierungsgrad untersucht. Um den Aufwand derartiger Untersuchungen in Zukunft zu reduzieren, wurden neben der Entwicklung des Softwaretools sinnvolle Kennwerte entwickelt, mit denen die Prozesseffizienz zu beziffern ist. Weiterhin wurden die maßgeblichen Stellgrößen innerhalb der Technologieketten identifiziert, um praktikable Bilanzierungen nach dem Pareto Prinzip in Zukunft zu ermöglichen. Vor Beginn des Projektes lagen beispielsweise keine Informationen dazu vor, ob und wie relevant zentrale Anlagen in industrieller Serienproduktion für die ökologische Bilanz einzelner Produkte sind. Wie sich im Rahmen des Projektes gezeigt hat, können die Zentralanlagen für einen großen Teil der ökologischen Wirkung verantwortlich sein und sollten im Rahmen von Ökobilanzierungen und Effizienzuntersuchungen miteinbezogen werden. Ein Vorgehen zur verursachungsgerechten Zuordnung der Aufwände zentraler Anlagen ist in Abschnitt 5.2.2 beschrieben.

Anhand der guten Ergebnisse und Einblicke beider Anwendungspartner sollen produzierende Unternehmen animiert werden die Transparenz der Energie und Materialströme innerhalb der Fertigung ebenfalls zu steigern und von Einsparungen zu profitieren.

4.1 Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040/14044

Das Vorgehen einer Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040/14044, dargestellt in Abbildung 1, ist vier-schrittig. Die vier Schritte *Definition des Untersuchungsziels und -rahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung* sowie *Auswertung* erfolgen nicht streng sequenziell, sondern haben oft iterativen Charakter. [DIN14040, S.23]

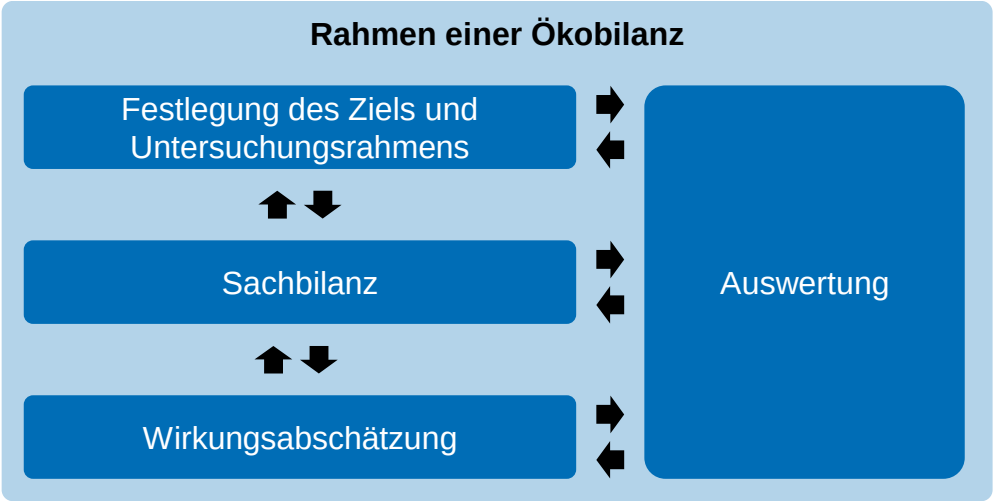

Abbildung 1: Vorgehen einer Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040/14044

Da die Vorgehensweise der Ökobilanzierung relativ ist, bezieht sie sich stets auf eine funktionelle Einheit. Die zu erfassenden Energie- und Stoffströme und ökologischen Auswirkungen werden auf diese funktionelle Einheit bezogen. [DIN14040, S. 23] Im Falle des Projektes BEAT wurden zwei Bauteile als funktionelle Einheit herangezogen. Sowohl die Umweltwirkungen als auch die Energie- und Stoffströme werden auf die Produktion einer solchen Einheit normiert. [KLOC12b, KLOC12d]

Weiterhin müssen als Voraussetzung einer erfolgreichen Bilanzierung das Ziel und die Adressaten einer Untersuchung festgelegt werden. Die weiteren Entscheidungen innerhalb einer Ökobilanzierung müssen vor dem Hintergrund der Zielerreichung getroffen werden. Beispielsweise muss die Definition des Untersuchungsrahmens und somit der Bilanzgrenzen hinreichend sein, um die gesteckten Ziele zu erreichen. [DIN14040 S. 24 f.] Im Falle des Projektes BEAT wurden als Adressaten vor Allem Linienverantwortliche identifiziert, was die Simulation der Technologieketten anbelangt. Die Ergebnisse dienen jedoch Allen, die in Bezug auf gefertigte Bauteile Aussagen zu ökologischen Indikatoren je Bauteil treffen wollen oder müssen, also damit im Grunde allen Fertigungs- und Produktverantwortlichen.

Zu Beginn einer Ökobilanzierung wird der Grundstein für die Qualität des Ergebnisses gelegt. Mit einer detaillierten, breit angelegten Bilanzierung steigen gleichermaßen die Aussagekraft und der Aufwand.

Im Anschluss an die Definition der Rahmenbedingungen wird innerhalb der Sachbilanz die Datenerhebung durchgeführt. Es müssen die relevanten Input- und Outputflüsse eines Produktsystems identifiziert und quantifiziert werden. Die Ermittlung der Flüsse kann durch Messung, Berechnung und Schätzung erfolgen, wobei die Qualität der Aussage einer Studie in hohem Maße von der Qualität der Datengrundlage abhängt. Demnach ist die möglichst genaue Erfassung der Daten erstrebenswert. Unabhängig von der Datenerfassungsart muss die Herkunft der Daten transparent und sorgfältig dokumentiert sein. [DIN14040 S. 25 ff.] Die zu erfassenden Daten umfassen Energieströme wie elektrische Energie, thermische Energie oder Druckluft,

Material und Stoffströme wie Rohmaterial, Halbzeuge, Kühlschmiermedien, Wasser sowie Nebenprodukte und Abfälle wie Späne, Ausschleppungen und Absaugungen.

Nach der Sachbilanz liegen die Energie- und Stoffströme innerhalb der Bilanzgrenzen offen. Es handelt sich dabei um Ströme unterschiedlichster Arten, die nicht hinsichtlich ihrer Umweltwirkung vergleichbar sind. Durch die Wirkungsabschätzung werden sämtliche Ströme nach einer Kategorie bewertet und so eine Vergleichbarkeit hergestellt. Das Vorgehen der Wirkungsabschätzung ist abgebildet in Abbildung 2. Bei der Bewertung innerhalb der Wirkungsabschätzung werden die zuvor ausgewählte Wirkungskategorie oder mehrere Wirkungskategorien zu Grunde gelegt. Die Wirkungskategorie ist die Bewertungsgröße, in Abbildung 2 ist es der Primärenergiebedarf in MJ/Stück, in der alle zuvor erfassten Ströme bewertet werden. Die Bewertung eines Stroms basiert auf Charakterisierungsmodellen, die die Sachbilanzergebnisse mit Wirkungsindikatoren in Verhältnis setzt. [DIN14044 S. 34]

Wirkungskategorien sind anthropogen verursachte schädliche Effekte auf die Umwelt. Typische Wirkungskategorien sind Klimaerwärmung, Ozonabbau, Versauerung oder Eutrophierung und Ressourcenverbrauch. Wirkungskategorien werden quantifiziert mittels Indikatoren. Indikator der Wirkungskategorie Klimaerwärmung ist beispielsweise der Ausstoß an CO_2-Äquivalenten.

Bei der Wirkungsabschätzung ist zu beachten, dass sie lediglich die Umweltwirkungen einer Wirkungskategorie widerspiegelt. Die Ergebnisse einer Wirkungsabschätzung können nicht als allgemeingültige Umweltwirkung herangezogen werden.

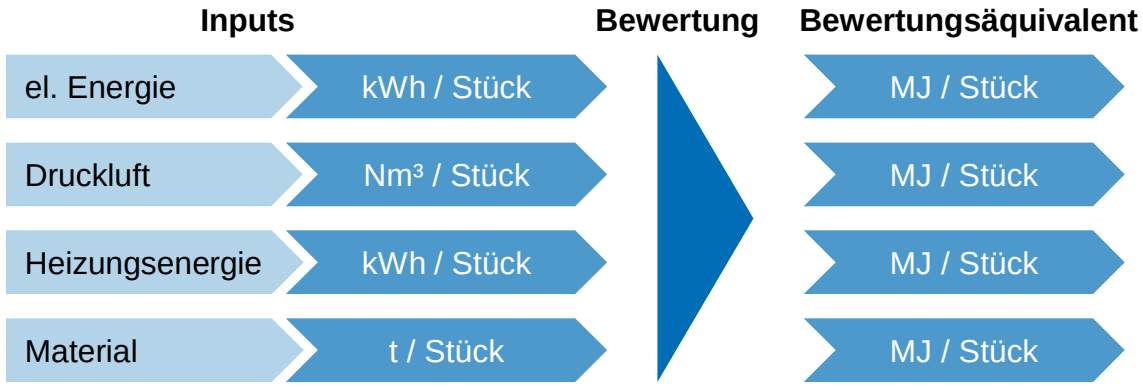

Abbildung 2: Prinzip der Wirkungsabschätzung zur Bewertung von Energie- und Stoffströmen

Die Bewertung der Sachbilanzdaten mittels Wirkungsabschätzung kann unter Verwendung sogenannter Life Cycle Inventory Datenbanken geschehen. Diese Datenbanken enthalten Datensätze für weit verbreitete Energie- und Stoffströme und können, teilweise kostenpflichtig, teilweise kostenfrei, verwendet werden, um die Energie- und Stoffströme der Sachbilanz zu bewerten. Zumeist enthalten diese Datenbanken die geläufigsten Umweltkategorien und werden laufend erweitert und aktualisiert.

Die bekanntesten Datenbanken sind GaBi, Ecoinvent und Probas. Während die Software GaBi Datenbank und Bilanzierungstool ist, greifen die Tools Simapro und

Umberto auf die Ecoinvent Datenbank zu. Innerhalb des Projektes wurde auf die GaBi Datenbank und Software zurückgegriffen, da die Software das günstigste Paket aus Funktionsumfang und umfassenden Stammdatensätzen bietet.

Im vierten Schritt der Ökobilanzierung erfolgt die Auswertung. Es werden die Ergebnisse von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung betrachtet, um Schlussfolgerungen zu ziehen. Ebenfalls sollten alle Ergebnisse nochmals vor den gesteckten Zielen kritisch reflektiert werden und die Einschränkungen der Studie in Verhältnis zu den Schlussfolgerungen gestellt werden. Sollte in der Auswertungsphase offenbart werden, dass die Ziele unter den getroffenen Annahmen nicht zu erreichen sind, muss die Studie in einer Iteration an die Erfordernisse angepasst werden. Ebenfalls sollte bei der Auswertung und Kommunikation der Ergebnisse beachtet werden, dass die ermittelten Umweltwirkungen potenzielle Wirkungen sind und keine tatsächlichen. [DIN14040, S. 31 f.] Im Falle des Projektes BEAT wurde eine interaktive Berichtsversion gewählt, die innerhalb des Modells „BEATool“ automatisch entsprechend der Wahl der Parametereinstellungen auf Basis des Ökobilanzmodells Ergebnisse in Tabellen- und Diagrammform angepasst liefert. Entsprechender Text erklärt die Informationsdarstellungen, die unterschiedlich gegliedert und mit unterschiedlichen Sichten/Aggregationsoptionen einen Einblick auf das System geben anhand von acht typisch für Ökobilanzen genutzten Wirkungskategorien.

4.2 Modellierung mit der GaBi-Software

Die Software GaBi (Ganzheitliche Bilanzierung) ermöglicht dem Nutzer die Analyse von Produktlebenszyklen oder Prozesstechnologien unter ökonomischen, ökologischen sowie sozialen Aspekten. Die Hauptfunktionalität besteht darin, Prozesse (oder vollständige Prozessketten) zu modellieren. Die realen Prozessketten werden abgebildet, indem Prozesse definiert werden und diese durch Flüsse verbunden werden. Das analysierte System oder Subsystem ist als Plan gekapselt und enthält Prozesse und Flüsse. Auch mehrere Pläne können mit Flüssen verbunden werden.

Alle Flüsse, die die Systemgrenzen schneiden und aus der Umwelt stammen oder in die Umwelt abfließen sind Elementarflüsse, eingangsseitig Ressourcen, ausgangsseitig Emissionen. Sämtliche Flüsse in einem System müssen daher auf Elementarflüsse zurückgeführt werden, um eine ganzheitliche Bilanzierung zu erreichen. Es ist daher nicht vorgesehen, als Eingangsgröße z.B. eine Tonne Stahl zu bilanzieren, weil dies kein Elementarstrom ist. In einem vorgelagerten Prozess wird die Stahlerzeugung behandelt, die ebenfalls berücksichtigt wird. Bei der Stahlerzeugung selbst werden wiederum Inputgrößen in Form von Flüssen vorliegen. Das Prinzip ist beispielhaft an einem Drehprozess dargestellt in Abbildung 3.

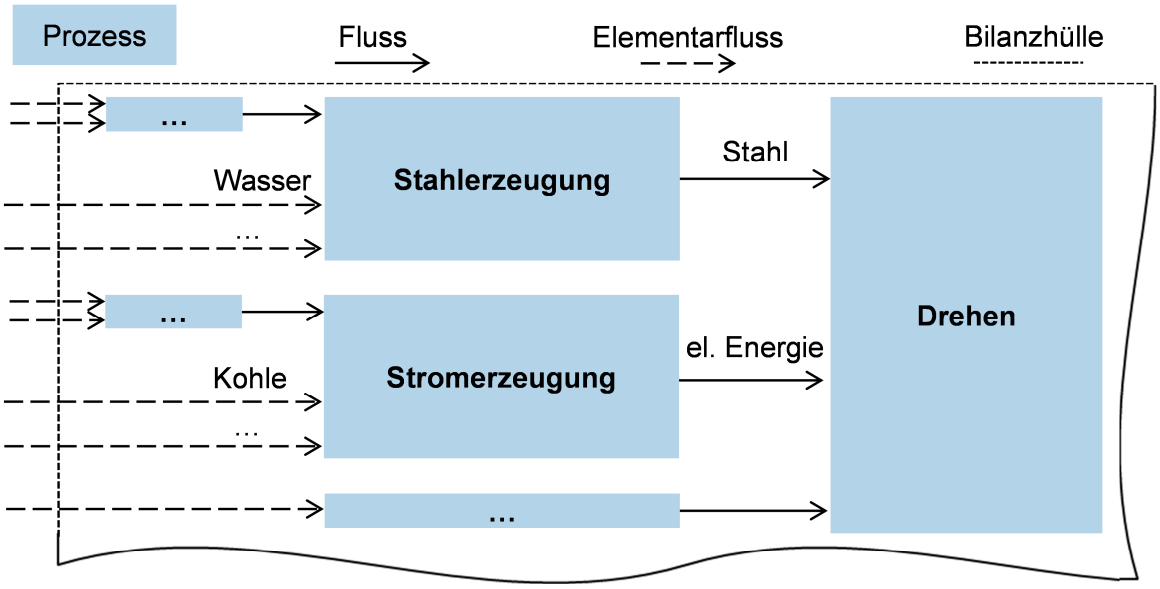

Abbildung 3: Modellierung mittels GaBi-Software

In der Software GaBi sind gewisse, wiederkehrende Prozesse (wie bspw. Stahlerzeugung oder Erzeugung elektrischen Stroms) bereits hinterlegt. Der Nutzer der Software kann deshalb Ströme an elektrischer Energie oder Ströme üblicher Werkstoffe verwenden. Die Software berücksichtigt automatisch den Prozess der Erzeugung des Stroms oder des Werkstoffes. Outputseitig ist ein ähnliches Vorgehen implementiert. Der Nutzer modelliert einen Strom aus Schrott, beispielsweise für Spanabfälle, in der Software ist automatisch ein Prozess zur Wiederaufbereitung hinterlegt. Für das recycelte Material wird der Prozesskette eine Gutschrift an Material zugeordnet.

Neben der festen Zuordnung von Input und Outputflüssen ist es ebenfalls möglich, in Prozessen Modelle zu hinterlegen. Beispielsweise kann im Drehprozess ein Modell hinterlegt werden, das je nach Prozessparametern die Ein- und Ausgangsgrößen quantifiziert werden. Diese Modelle beinhalten Submodelle für Prozesskräfte und Leistungsaufnahme (z.B. Kienzle), Werkzeugverschleiß (z.B. Taylor) und Prozesszeiten etc. In den folgenden Abschnitten werden solche Modelle, beispielsweise für die Zerspanung, beschrieben.

Auf die skizzierte Weise werden die Daten der Sachbilanz und der Prozessmodelle in der GaBi-Software modelliert und hinterlegt. [SCHL12, KLOC12] Die Wirkungsabschätzung erfolgt über die Verknüpfung der Software mit der Datenbank. Die Elementarflüsse werden mit Faktoren in die Wirkungskategorien umgesetzt.

Sowohl die in der Datenbank hinterlegten Daten als auch die vorgefertigten Prozesse wie die Stromerzeugung werden laufend aktualisiert. Beispielsweise verändert sich im Rahmen der Energiewende in Deutschland die Stromerzeugung laufend. Der Mix der unterschiedlichen Energiequellen verschiebt sich zu mehr regenerativen Ener-

gien. Diese Änderungen werden durch Updates an der Software und den zugehörigen Datenbanken automatisch berücksichtigt.

4.3 Arbeitsplan

Zur Bearbeitung des Projektes mit einer Laufzeit von 3 Jahren wurde ein Arbeitsplan erstellt, der sich in die folgenden Arbeitspakete gliedert.

Tabelle 1: Arbeitspakete und federführender Partner im Konsortium

Arbeitspaket	Federführung	Beschreibung
A	Daimler	Identifizierung und Quantifizierung der Energie- und Stoffströme in den Prozessketten
B	WZL	Abgleich der erfassten Daten mit physikalischen Wirkprinzipien und Plausibilitätscheck
C	EFA	Bildung von Kennwerten zur Beschreibung
D	Bosch	Bilanzierung von Technologieketten und alternativen Technologieketten
E	Daimler	Bewertung der alternativen Technologieketten
F	PE International	Implementierung der Modelle und Kennwertsysteme in einem generischen Softwaremodul
G	WZL	Erstellung des Leitfadens
H	Daimler	Koordination, Dokumentation, Öffentlichkeitsarbeit
I	WZL	Konzeption und Implementierung eines integrativen Messdatenerfassungssystems
J	WZL	Detaillierte Bewertung von Zerspanwerkzeugen

Die zeitliche Planung der Projekttätigkeiten ist dargestellt in Abbildung 4. In Grau dargestellt ist die ursprüngliche Planung der Tätigkeiten laut Antrag. Im Arbeitspaket A wurde zusätzlicher Bedarf innerhalb des 2. Projektjahres festgestellt. Die Datenerfassung musste zur Sicherstellung des hohen Detaillierungsgrades um zwei Quartale ausgedehnt werden. Die zusätzlichen Arbeiten sind schraffiert dargestellt.

Über die ursprüngliche Arbeitsplanung hinausgehend wurde ein integratives Messdatenerfassungssystem im ersten Halbjahr des 3. Projektjahres konzipiert und in Betrieb genommen.

Weiterhin wurden in einem zusätzlichen Arbeitspaket J Zerspanwerkzeuge und Beschichtungen detaillierter als ursprünglich vorgesehen modelliert. Die Detailtiefe zeigte sich als zusätzliches Erfordernis, da ein erhebliches Potenzial zur Reduzierung des Energiebedarfes von Zerspanoperationen über die Steigerung von Prozessparametern identifiziert wurde. Da durch höhere Schnittgeschwindigkeit und höhere Vorschübe die Belastung auf das Werkzeug zunimmt, verschleißt es schneller. Um eine ganzheitliche energieoptimale Prozessauslegung zu erreichen, wurde die detaillierte Modellierung der Werkzeugherstellung und -nutzung vorgenommen.

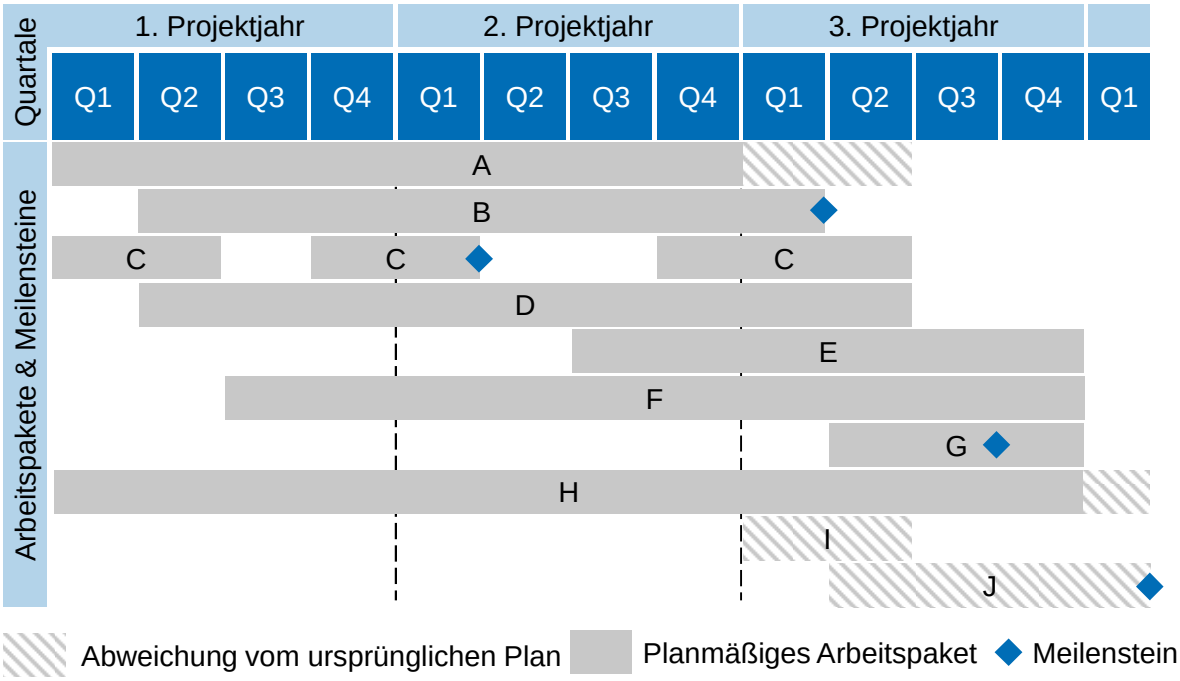

Abbildung 4: Arbeitsplanung im Projekt BEAT

5 Ergebnisse

5.1 Auswahl der Referenzbauteile und Technologieketten

Bei der Ökobilanzierung handelt es sich um einen relativen Ansatz. Dies bedeutet, dass alle Energie- und Stoffströme nicht als absolute Größen betrachtet werden, sondern auf eine funktionelle Einheit bezogen werden. Folglich werden auch die Umweltwirkungen, die aus den bewerteten Strömen ermittelt werden, auf die funktionelle Einheit bezogen.

Da der Fokus in BEAT auf Technologieketten und Fertigungsprozessen lag, wird jeweils ein Referenzbauteil bei den Anwendungspartnern Bosch und Daimler ausgewählt, dessen Fertigung analysiert wird. Die gewählten Fertigungsketten sind repräsentativ für die gefertigten Produkte der Anwender Bosch und Daimler. Die ausgewählten Produkte sowie deren Prozessketten sind dargestellt in Abbildung 5.

Abbildung 5: Referenztechnologieketten der Anwender Daimler (links) und Bosch (rechts)

Bei der Firma Bosch wird ein Ventil für das Commonrail Diesel Einspritzsystem ausgewählt. Das Bauteil wird mit sehr hohen Stückzahlen in Bamberg gefertigt. Die Fertigung enthält für die Metallbearbeitung typische Prozessschritte wie die Zerspanung mit geometrisch bestimmter und geometrisch unbestimmter Schneide, Wärmebe-

handlung oder Waschprozesse. Das Bauteil wird gefertigt aus Stangenmaterial des niedriglegierten Werkzeugstahls 100Cr6 (1.3505).

Auf Seiten der Firma Daimler wird ein Gangrad des Getriebes für die A und B-Klasse betrachtet. Es wird gefertigt im Werk Rastatt. Im Gegensatz zu der vollständig betrachteten Technologiekette beim Ventil können beim Getrieberad erst die Prozessschritte nach dem Schmiedeprozess betrachtet werden. Die Technologiekette enthält ebenfalls Zerspanung in einigen Verfahrensvarianten, Waschen, Wärmebehandlung und Entgraten, wie Abbildung 5 zu entnehmen. Das Zahnrad wird gefertigt aus dem Einsatzstahl 20MoCr4 (1.7321).

5.2 Datenaufnahme

Gemäß der Methodik nach DIN EN ISO 14040, folgt auf die Festlegung des Betrachtungsrahmens und des Ziels einer Ökobilanz die Sachbilanz. Innerhalb dieses Schrittes werden Energie- und Stoffströme, die zur Fertigung der funktionellen Einheit benötigt werden, gemessen, berechnet oder geschätzt, je nach Möglichkeit und Detaillierungslevel. Die Belastbarkeit der Ergebnisse einer Ökobilanz auf der einen Seite hängt stark ab von der Qualität der Datengrundlage. Andererseits stellt die Datenerfassung den Großteil des Aufwandes einer solchen Untersuchung dar.

Die Bilanzierung, die im Rahmen von BEAT durchgeführt wird, zeichnet sich durch ein hohes Detaillierungsniveau aus. Die Datenaufnahme umfasst eine Vielzahl von Energie- und Stoffströmen, wie beispielsweise elektrische Energie, Erdgas, Druckluft, technische Wärme, Prozessgase, VE-Wasser, Öl, Frischluft, Kühlwasser, Absaugungen, Schleifschlämme und Reiniger. Ein Großteil der erfassten Daten wird durch Sensorik erfasst. Einige Daten können lediglich auf Basis von Verbrauchsdaten oder Schätzungen ermittelt werden, werden aber der kritischen Reflexion unterzogen und auf Plausibilität geprüft.

5.2.1 Bilanzrahmen und Detaillierungslevel der Datenerfassung

Die funktionellen Einheiten der Studie werden mit den Referenzbauteilen Getrieberad und Ventil festgelegt. Die unten stehenden Abbildung 6 und Abbildung 7 veranschaulichen den Bilanzrahmen und die betrachteten Energie- und Materialströme für beide Prozessketten. Es ist zu erkennen, dass neben der direkten Ebene der Prozessschritte auch die indirekte Ebene von zentralen Einheiten betrachtet wird. Die Energie- und Stoffströme zur Erzeugung von zentralen Medien wie KSS oder Druckluft wird ebenfalls erfasst und letztendlich bauteilbezogen zugeordnet, wie in Abschnitt 5.2.2 im Detail beschrieben.

Die unten stehenden Abbildungen demonstrieren die Komplexität und die Interdependenz der betrachteten Ströme. Um eine systematische Datenerfassung zu gewährleisten, werden zunächst alle Ströme identifiziert und visualisiert. Im Anschluss werden alle dargestellten Ströme, sofern messbar und zugängig, gemessen. Da es ein Ziel der Untersuchung ist, festzustellen, welche Ströme eine Relevanz für die Bewertung einer vollständigen Technologiekette haben, wird die Datenaufnahme

sehr detailliert durchgeführt. Es lässt sich vorwegnehmen, dass für die Sachbilanz im Sinne des Paretoprinzips einige Energie- und Stoffströme vernachlässigbar sind.

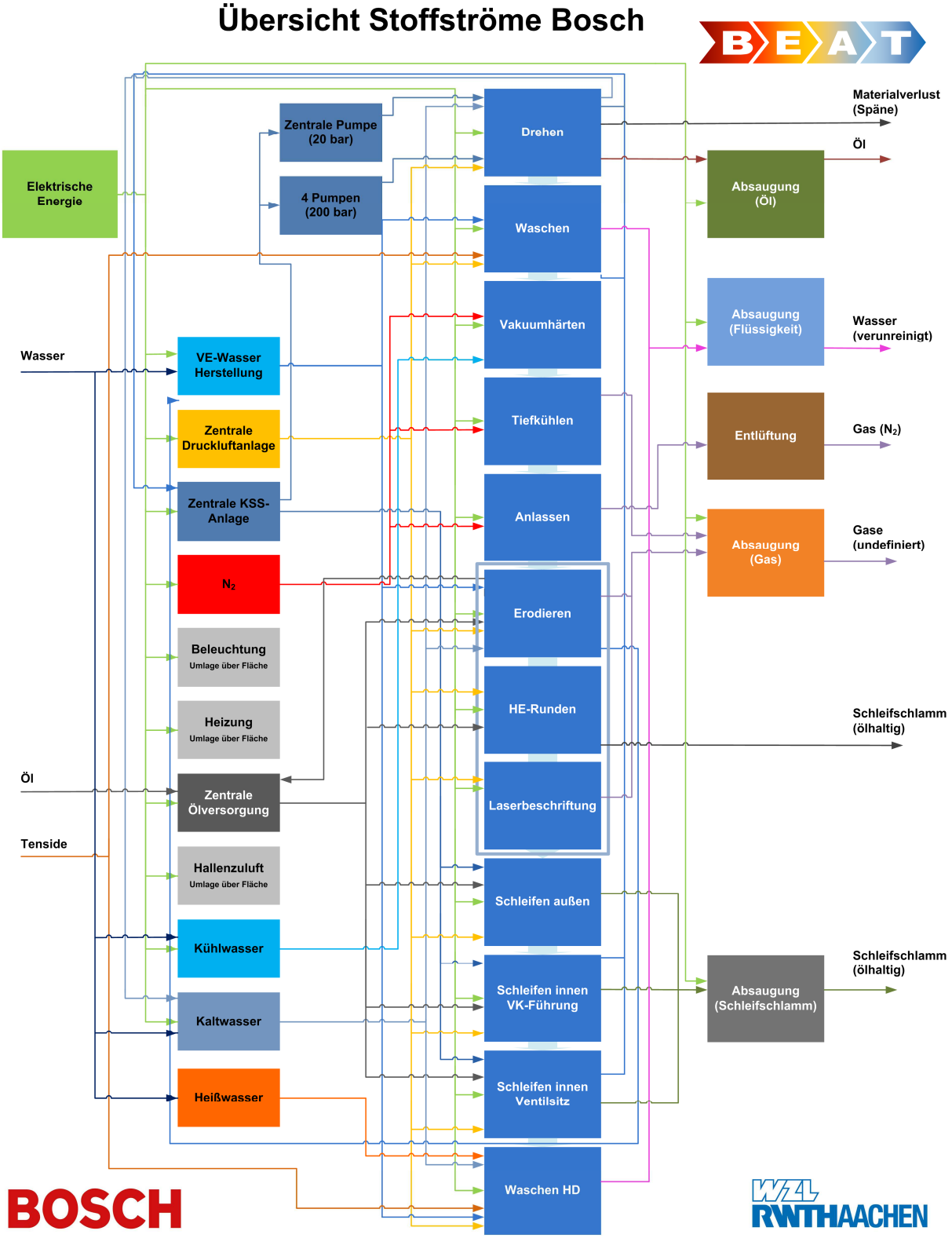

Abbildung 6: Übersicht der bilanzierten Energie- und Stoffströme der Fertigungskette bei Bosch

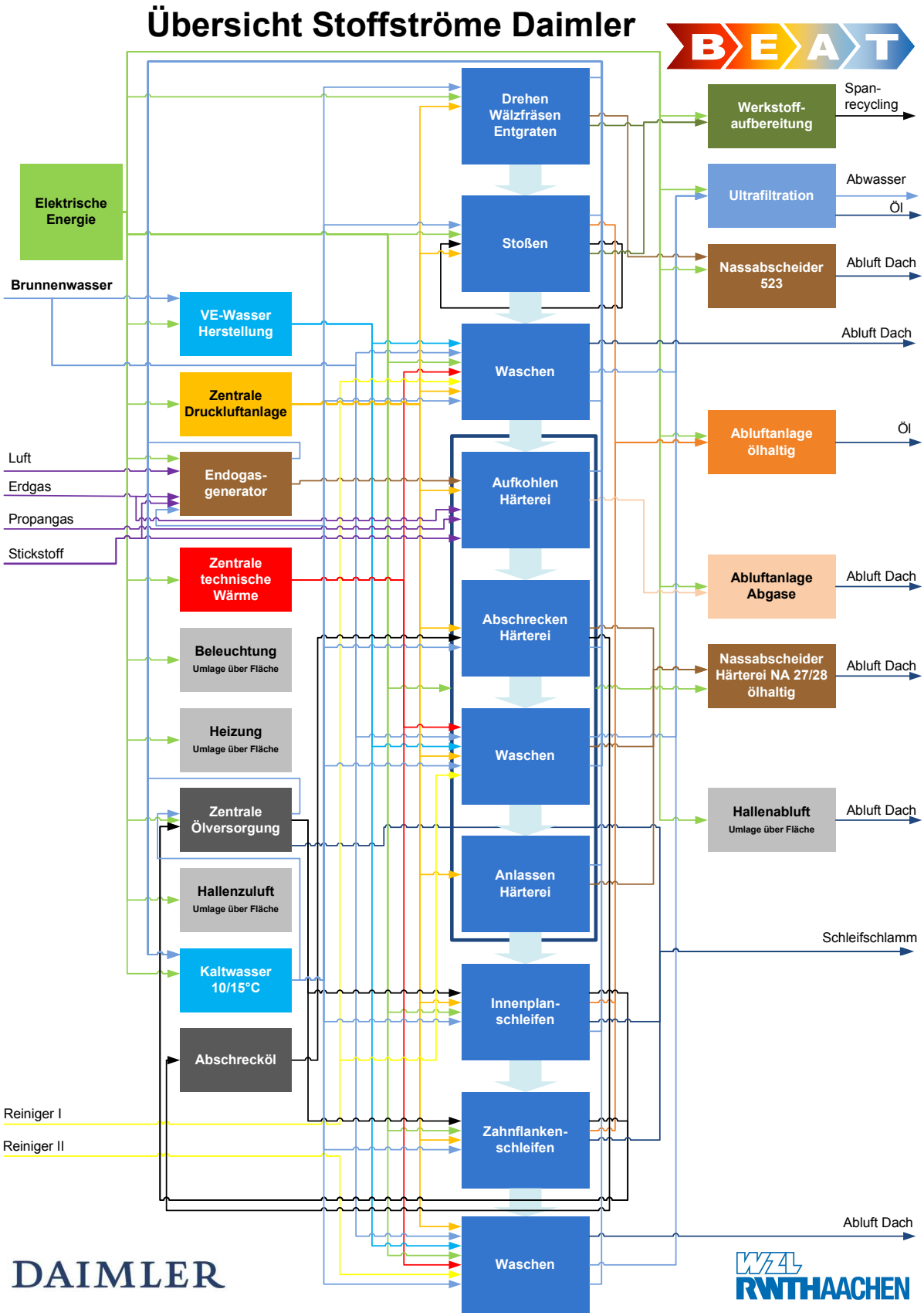

Abbildung 7: Übersicht der bilanzierten Energie- und Stoffströme der Fertigungskette bei Daimler

5.2.2 Berücksichtigung zentraler Einheiten

Die betrachteten Prozessketten bei den Partnern Bosch und Daimler sind jeweils der industriellen Serienfertigung zuzuordnen. Es ist charakteristisch für diese Art der Fertigung, dass ein Teil von Betriebsmitteln wie Druckluft und Kühlschmierstoff oder auch Endogas und Frischwasser zentral bereitgestellt und aufbereitet wird.

Die Energie- und Materialströme, die bei diesen zentralen Anlagen anfallen, sollten gemäß dem relativen Ansatz einer Ökobilanz trotzdem bauteilbezogen auf die funktionelle Einheit bezogen werden. Dazu werden im Verlauf des Projektes alle zentralen Einheiten, die Medien für Prozessschritte zur Verfügung stellen, ebenso wie die Fertigungsanlagen selbst umfassend bilanziert und vermessen. Die Zurechnung zu dem jeweiligen Prozessschritt und letztendlich zu dem gefertigten Bauteil geschieht mittels der Gewichtung über das bereitgestellte Medium.

Das Vorgehen zur Zurechnung der zentralen Anlagen ist grafisch aufbereitet in Abbildung 8.

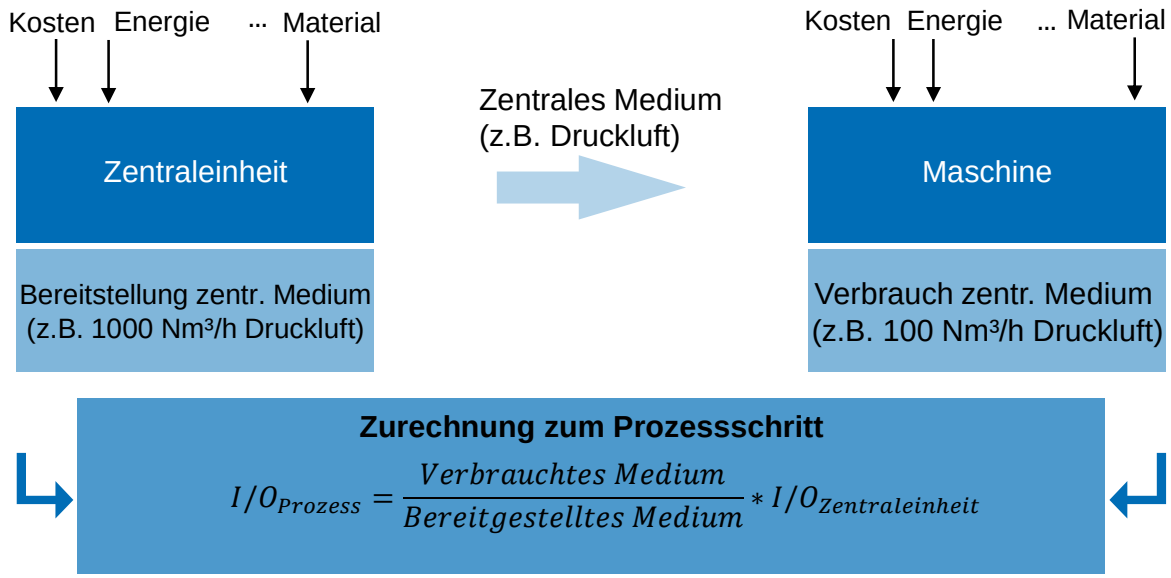

Abbildung 8: Die Berücksichtigung zentraler Anlagen

Das vorgestellte Verfahren stellt eine Zurechnung der verursachten Energie- und Materialströme zentraler Anlagen auf die Prozesse im Verhältnis der aufgenommenen zur insgesamt zur Verfügung gestellten Menge sicher. So kann der ökologische Einfluss von zentralen Anlagen, der in den betrachteten Fällen nicht zu vernachlässigen ist (siehe Auswertungen und Darstellungen im weiteren Verlauf, Abbildung 15), verursachergerecht auf die Bauteile zugerechnet werden.

Eine weitere Klasse von zentralen Anlagen bzw. Medien wie Raumklimatisierung, Belüftung oder Beleuchtung, die nicht unmittelbar an Maschinen und Anlagen angeschlossen sind, wird auf Basis der Stellfläche auf die Prozesse verteilt.

5.2.3 Verwendete Messsysteme

Innerhalb des Arbeitspaketes A ist es eine zentrale Anforderung, Messequipment zu bestimmen, das alle Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit, Auflösung und Qualität der Datenerfassung erfüllt, im Hinblick auf Anwendungsfreundlichkeit, Flexibilität und Anschaffungspreis aber nicht impraktikabel für die Anwendung ist. Für die Erfassung der Messdaten im Rahmen des Projektes BEAT kommen unterschiedliche Sensoren, Messsysteme und Datenerfassungskonzepte zum Einsatz. Für die Erstellung der Sachbilanz in der Produktion werden vorwiegend für jeden Energie- und Stoffstrom separate Messgeräte verwendet. Bei den Untersuchungen im Labormaßstab werden hochauflösende und integrative Messsysteme eingesetzt, die die gesamten Energie- und Stoffströme einer Anlage synchron erfassen. Diese werden im Arbeitspaket I eigens für die Anforderungen im Projekt entwickelt.

In den einzelnen Messungen wird die jeweils zu erfassende Größe gemessen und mit dem Prozess synchronisiert, oder im integrativen Ansatz ein vollständiger Bilanzrahmen mit ganzheitlichen Messsystemen um eine Maschine gezogen. Die zwei Ansätze werden im Folgenden separat behandelt.

Messung elektrischer Wirkleistung

Werkzeugmaschinen werden in der Regel mit Drehstrom und herausgeführten Nullleiter betrieben. Die Messung der elektrischen Leistung muss, aufgrund einer möglichen unsymmetrischen Belastung der drei einzelnen Phasen, dreiphasig nach Abbildung 9 erfolgen.

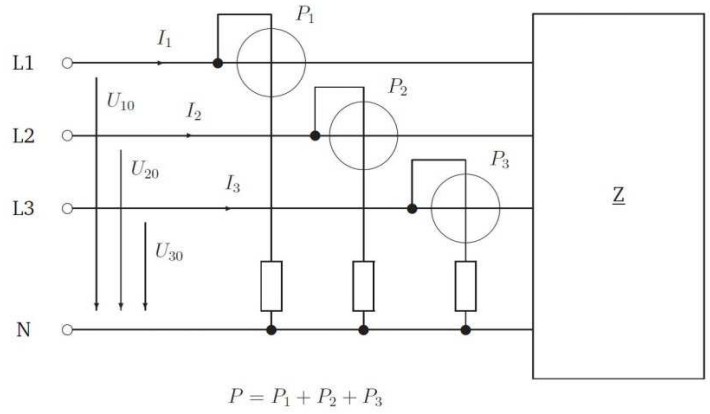

Abbildung 9: Dreiphasige Leistungsmessung im Drehstromnetz

Bei der dreiphasigen Leistungsmessung werden alle drei Phasenströme und Phasenspannungen gegenüber dem Neutralleiter gemessen. Die dreiphasige Leistungsmessung kann mit drei einphasigen Leistungsmessgeräten oder einem dreiphasigen Leistungsmessgerät (z.B. Netzanalysator) durchgeführt werden. Leistungsmessgeräte bestimmen die Wirkleistung und die Effektivwerte der Ströme und Spannungen [SCHL11]. Damit sind Scheinleistung, Leistungsfaktor und Blindleistung bekannt. Die aufgenommene Leistung ergibt sich aus der Addition der drei gemessenen Wirkleistungswerte

$$P_g=P_1+P_2+P_3$$

Einzelne Hilfsverbraucher, z.B. Asynchronmotoren für Pumpenantriebe, werden dreiphasig ohne herausgeführten Neutralleiter betrieben. Zur Messung der elektrischen Leistung kann hier über die Innenwiderstände der Spannungsmessung ein künstlicher Sternpunkt erzeugt oder die Aronschaltung nach Abbildung 10 angewendet werden. Die Aronschaltung benötigt zur Leistungsmessung zwei einphasige Leistungsmessgeräte. Es werden nach Abbildung 10 zwei Leiterströme und zwei Leiterspannungen gemessen. Die Wirkleistung ergibt sich aus der Addition der gemessenen Wirkleistungswerte:

$$P_g=P_1+P_2$$

Die Blindleistung lässt sich bei unsymmetrischen Verbrauchern, d.h. bei Verbrauchern, die nicht alle drei Phasen gleich belasten, nicht unmittelbar bestimmen. Es ist eine weitere Schaltung nach Abbildung 10 notwendig. Die Blindleistung ergibt sich zu:

$$Q_g=\sqrt{3}\cdot(MW_2-MW_1),$$

wobei MW_x der angezeigte Wirkleistungsmesswert des jeweiligen Messgerätes ist. Sofern kein drittes Leistungsmessgerät zur Bildung eines künstlichen Sternpunktes vorhanden ist, kann ein Widerstand gleicher Größe wie der Spannungsinnenwiderstand des Messgerätes eingesetzt werden. Bei der Leistungsmessung mittels Aronschaltung ist unbedingt darauf zu achten, dass der Neutralleiter des Verbrauchers nicht angeschlossen ist. Die Leistungsmessung führt ansonsten bei unsymmetrischen Belastungen zu fehlerhaften Ergebnissen.

Eine einphasige Messung eignet sich in der Regel aufgrund möglicher unsymmetrischer Belastungen von Werkzeugmaschinen nicht.

Im Projekt BEAT wird die elektrische Leistungsmessung immer mit einem dreiphasigen Leistungsmessgerät, wie in Abbildung 9Abbildung 10 dargestellt, durchgeführt. Ist der Sternpunkt des Verbrauchers nicht herausgeführt, so wird dieser automatisch über die Spannungseingänge des Messgerätes gebildet.

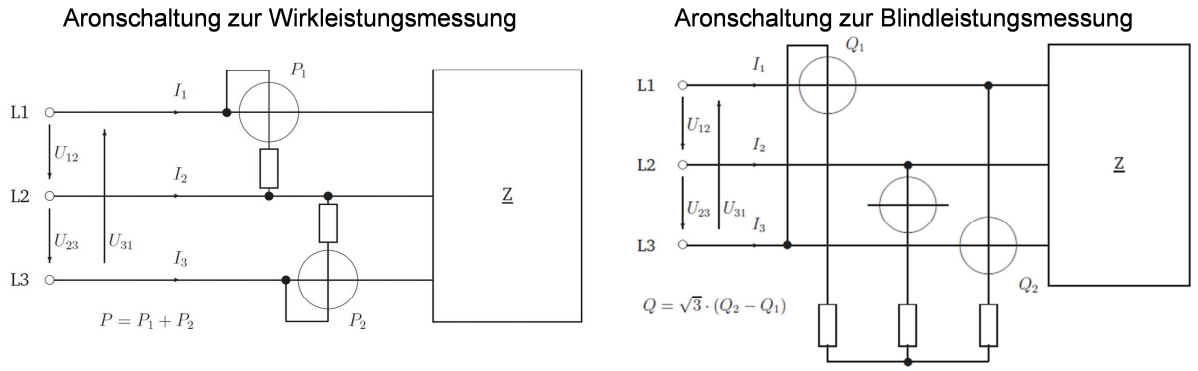

Abbildung 10: Aronschaltung zur Wirkleistungs- und Blindleistungsmessung

Einzelmessungen

Für die Erfassung der elektrischen Leistung von Maschinen und Aggregaten kommt im Projekt BEAT für Messungen in der Produktion ein Netzanalysator der Fa. Chauvin Arnoux zum Einsatz. Das Messgerät C.A. 8335 QualiSTAR, siehe Abbildung 11, ist für den flexiblen und robusten Einsatz in der Fertigung geeignet. In Voruntersuchungen ist die Genauigkeit des Messgerätes für die elektrische Leistungsmessung, durch einen Vergleich mit einem Leistungsanalysator nachgewiesen worden [SCHL11]. Effektivwerte der Ströme und Spannungen werden mit einer Abtastrate von 256 Werten pro elektrische Periode über eine halbe elektrische Periode bestimmt und über einen Zeitraum von einer Sekunde gemittelt. Hierdurch werden die aufgenommenen Daten reduziert und eine schnelle Analyse wird ermöglicht. Dynamische Detailanalysen eines Prozesses wie Spindelbeschleunigungen, Eilgang-Verfahrbewegungen oder Ähnliches können nicht durchgeführt werden. Durch die sekündliche Mittelwertbildung werden Leistungsspitzen wie in Abbildung 12 dargestellt nicht korrekt abgebildet. Da die in diesen Leistungsspitzen enthaltene elektrische Energie jedoch im Vergleich zur gesamten Prozessenergie vernachlässigbar klein ist, ist das mobile Messgerät trotzdem für die elektrische Energiemessung gut geeignet.

CA 8335 QualiSTAR

- f_{Abtast} = 12,8 kHz
- Berechnung W, VA, Var, cosφ
- Mittelwertbildung über eine Sekunde
- handlich, flexibel

Abbildung 11: Verwendetes Messgerät CA8335 QualiSTAR und Stromwandlerzange

Abbildung 12 stellt die simultanen Messungen des C.A. 8335 Messgeräts und die eines integrativen Messsystems mit höherer zeitlicher Auflösung gegenüber. Man erkennt deutlich die Abweichung bei dynamischen Effekten, jedoch auch die gute

Übereinstimmung der elektrischen Leistung/ Energie im weiteren Verlauf des Prozesses.

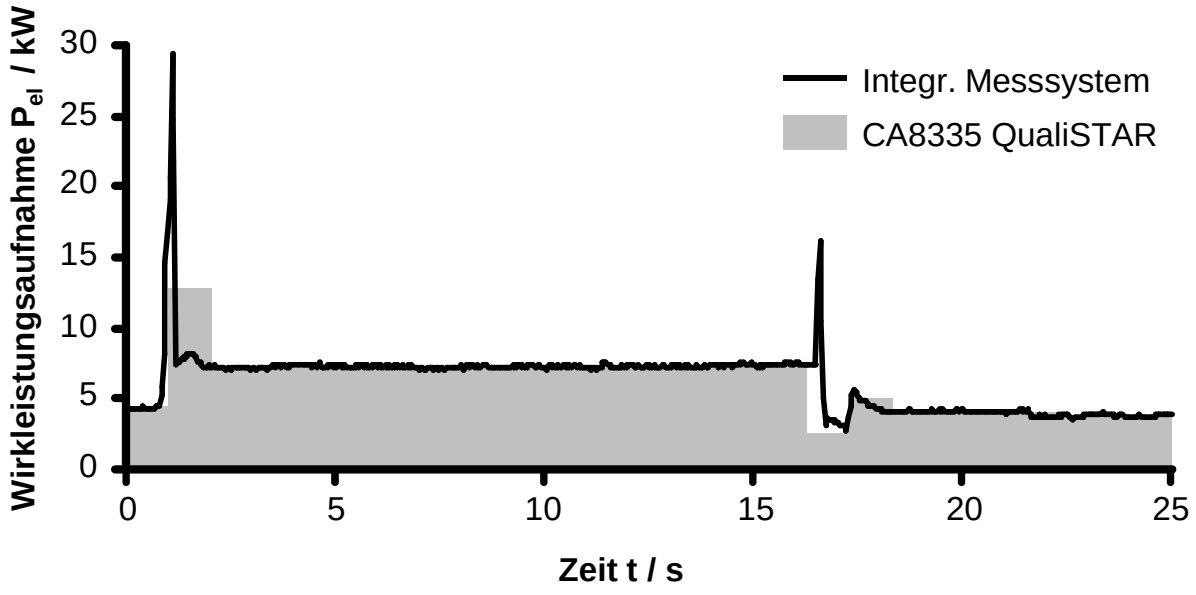

Abbildung 12: Gegenüberstellung von Messsystemen unterschiedlicher zeitlicher Auflösung

Die Stoffströme wie Druckluftströme, KSS-Verbräuche oder Absaugungen werden mit entsprechenden Sensoren und einem Messlaptop erfasst. So werden beispielsweise die Druckluftverbräuche mit Druckluftzählern der Fa. Ifm gemessen. Zusätzlich kann im Verlauf des Projektes zum Teil auf unternehmenseigene Sensorik zurückgegriffen werden, die an einigen der Versuchsmaschinen verbaut wurde. Für die Messungen von Wärme- und Kälteströmen werden Mitarbeiter der Robert Bosch GmbH bei beiden Herstellern der Referenzbauteile eingesetzt, die ebenfalls entsprechendes Messequipment bereitstellen können.

Ebenfalls gibt es Stoffströme, die mittels Messtechnik aufgrund von Zugänglichkeit nicht mit vertretbarem Aufwand zu messen sind (z.B. Ölverbrauch der Härterei). Diese werden durch betriebswirtschaftliche Daten wie Monats- oder Jahresabrechnungen berechnet und mit physikalischen Wirkprinzipien auf ihre Konsistenz geprüft.

Integrative Messsysteme

Integrative Messsysteme bieten den Vorteil, dass sämtliche Energie und Stoffströme, die an einer Werkzeugmaschine anfallen, zentral und synchron erfasst werden können und so unmittelbar ein vollständiger ökologischer Fingerabdruck eines Prozesses aufgenommen werden kann.

Zu diesem Zweck werden am WZL Messsysteme entwickelt, realisiert und getestet. Sie basieren auf einer Controllereinheit, die die Messroutine ausführt und modularen Messkarten, die die entsprechenden Daten der Sensoren bzw. der Maschine aufnehmen.

Das Schema eines realisierten Datenerfassungssystems ist abgebildet in Abbildung 13. Der sogenannte cRIO Controller der Fa. National Instruments ist die zentrale Logikeinheit des Messsystems und führt das Messprogramm zur Datenerfassung und -verarbeitung aus. Der Controller ist Teil eines Chassis mit acht Steckplätzen für die Module bzw. Messkarten. Es steht eine Vielzahl von Modulen zur Verfügung, sodass das Messsystem auf nahezu beliebige Anwendungsfälle angepasst werden kann.

Innerhalb des Projektes BEAT wurde das Chassis mit Modulen ausgestattet, die Schnittstellen zur Steuerung des Typs Sinumerik bieten (Profibus), Spannungsmodulen, die für die Netzspannung von 230 V geeignet sind, Strommodulen, die gewandelte Ströme von bis zu 5 A messen und Standard-Analog-Input-Modulen, die beispielsweise analoge Sensorsignale von 4..20 mA wandeln.

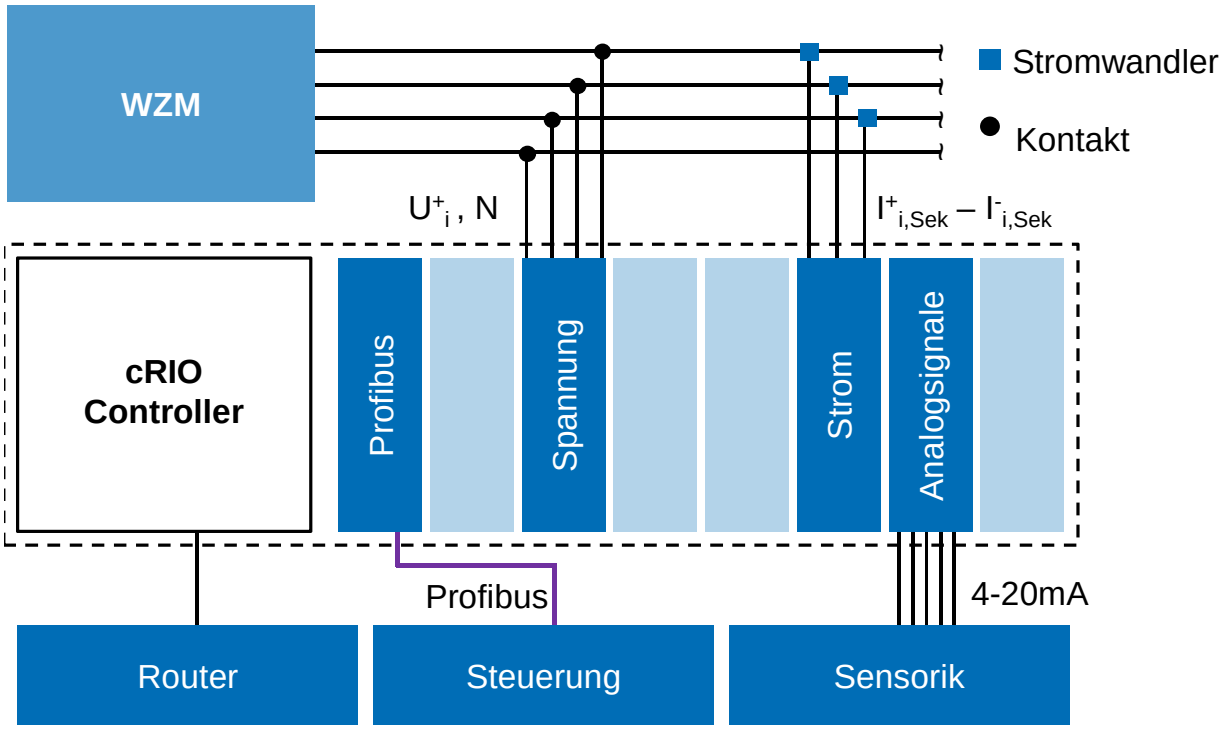

Abbildung 13: Integratives Datenerfassungssystem auf Basis von Hardware der Fa. National Instruments

Mit dem skizzierten Aufbau ist das Messsystem in der Lage, Sensorsignale aus der Peripherie der Maschine zu messen, die elektrische Wirkleistung aus den Größen Strom und Spannung zu ermitteln und Daten über den Profibus aus der Steuerung zu empfangen. Diese letztgenannte Funktionalität erlaubt es, im NC-Programm genaue Triggersignale zu setzen und einen vollständigen ökologischen Fingerabdruck automatisch durch Integration der Verbrauchswerte zu erzeugen. Ebenfalls ist es möglich genau zwischen Haupt und Nebenzeiten zu unterscheiden und somit die Datenerfassung und -interpretation zu erleichtern. Die Daten können über das Netzwerk direkt in eine Datenbank transferiert werden, sodass eine wiederverwertbare und sichere Datenablage gewährleistet ist.

Neben dem vorgestellten Messsystem basierend auf Hardware der Fa. National Instruments wurde ein Messsystem auf Basis von Hardware der Fa. Phoenix Contact erstellt und in einem portablen Messaufbau installiert. Es verfügt grundsätzlich über die identischen Funktionen wie das oben skizzierte Messsystem, weist aber nicht die hohe Flexibilität der Entwicklungsumgebung LabVIEW auf und erreicht auch nicht die hohe Auflösung des in Abbildung 13 dargestellten Systems. Dargestellt ist das alternative System in Abbildung 14. Auf der linken Seite ist die Hardware im Gehäuse abgebildet. Rechts oben ist die Rückseite des Messkoffers dargestellt mit den Schnittstellen für den Anschluss an ein dreiphasiges Stromnetz. Insgesamt sind 4 Leistungsmessgeräte eingebaut, die es ermöglichen, separat Leistungen an vier Messpunkten simultan zu erfassen. Ebenfalls können bis zu 12 Standard Analogsensoren mit 4..20 mA angeschlossen werden. Ebenfalls ermöglicht das Gerät den Anschluss digitaler Signale und den Anschluss eines Profibus- sowie eines Netzwerkkabels zur Übertragung der Messdaten.

Der entscheidende Vorteil des Messsystems ist, dass es portabel und universell einsetzbar ist. Mit den entsprechenden Sensoren kann flexibel auf die Anforderungen einer Sachbilanz reagiert werden.

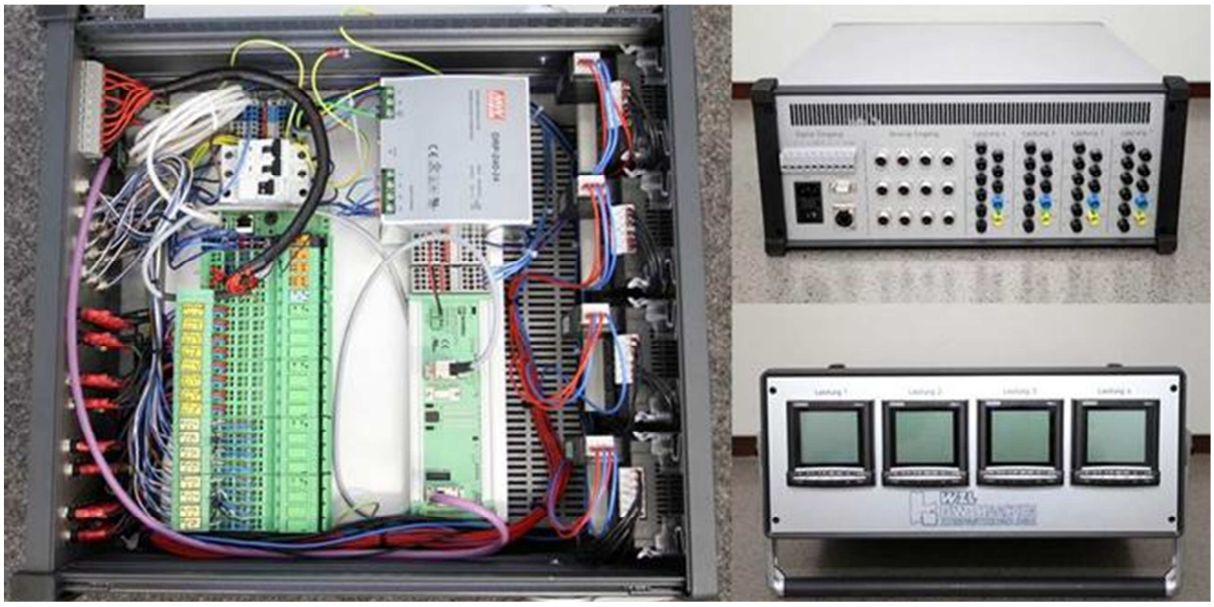

Abbildung 14: Integratives, portables Datenerfassungssystem auf Basis von Hardware der Fa. Phoenix Contact

5.3 Modellierung der Prozessketten

Die Prozessketten der Anwender werden in der Ökobilanzierungssoftware GaBi (Ganzheitliche Bilanzierung) abgebildet. In der Software können Prozesse und Ströme modelliert werden, die Prozessschritte und die Energie- und Materialströme nachbilden. Alle Ströme, die originär in die Fertigung fließen, werden bewertet mit Datensätzen, die in der Ökobilanzierungsdatenbank vorliegen. So können unterschiedliche Ströme wie elektrische Leistungen (kW) oder Volumenströme (Nm^3/h) auf dieselbe Bewertungsgröße wie Primärenergiebedarf MJ PED oder Treibhauspoten-

zial kg CO_2-Eq bezogen werden. Ebenfalls wird mit der Software das Halbzeug bzw. der Werkstoff bewertet. Es liegen Datensätze für viele gängige Werkstoffe vor. Sie beinhalten die Aufwände zur Gewinnung und Veredlung der Materialien bis zur tatsächlichen Nutzbarkeit im verarbeitenden Unternehmen. Beispielsweise ist der Primärenergiebedarf von Aluminium durch die aufwendige Gewinnung und Veredelung sehr hoch. Im Verhältnis zu Stahl ist ein Faktor von rund 6-8 realistisch [ALLW12].

Die Modellierung der Prozessschritte und Ströme erlaubt die Auswertung der Ergebnisse nach beliebiger Betrachtungsperspektive. Es können eine Vielzahl von Auswertungskategorien für unterschiedliche ökologische Wirkungskategorien wie Klimaerwärmung, Ressourcenverzehr oder Versauerungspotenzial ausgewählt werden.

Obwohl die Modellierung der Prozesse und Technologieketten die Auswertung nach einer Vielzahl von Kategorien ermöglicht (siehe Tabelle 3 im Abschnitt 5.5.1), werden im Folgenden der Primärenergiebedarf PED (Primary Energy Demand) und das Treibhauspotenzial GWP (Global Warming Potential) im Fokus stehen. Die Kategorie Primärenergiebedarf bietet eine sinnvolle Bewertungsgröße, da sie den kumulierten Energieaufwand zur Erzeugung eines Produktes nach VDI 4600 angibt. Dieser gibt die Menge an Energie an, die letztendlich zur Erzeugung eines Produktes aufgewendet wurde. Damit berücksichtigt der Primärenergiebedarf auch die vorgelagerten Prozessketten von Energieträgern und Materialien. Die Nutzung eines Megajoules elektrischen Stroms ist über den sogenannten Primärenergiefaktor ca. 2,6 MJ Primärenergie zuzuordnen [DIN18599]. Dies bedeutet, dass für elektrische Energie ca. 2,6-fach mehr Energie in Form von Energieträgern verbraucht wird, um die elektrische Energie bereitzustellen (z.B. durch Verluste zur Gewinnung von Energieträgern oder zur Stromerzeugung). Somit stellt der Primärenergiebedarf die eigentliche Menge an Energie dar, die der Umwelt entnommen wurde, sei es in Form von fossilen Energieträgern, Kernenergie oder regenerativen Energien. Der Faktor ist das Ergebnis der Berücksichtigung erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Energien. Daher kann sich der Faktor mit voranschreitender Energiewende für den Standort Deutschland in Zukunft maßgeblich ändern. Diese Änderungen werden in den Aktualisierungen der DIN18599 dokumentiert.

Die Wirkungskategorie des Treibhauspotenzials ist stark vertreten in der öffentlichen Diskussion, der Politik und auch in den Zielstellungen großer, produzierender Unternehmen. Um die formulierten Ziele zur Einsparung des äquivalenten CO_2-Austosses zu erreichen, ist die Bewertung von Produktionsprozessen ein bedeutender Schritt.

Aufgrund der höheren Bedeutung der geschilderten im Vergleich zu den weiteren Wirkungskategorien, werden sich die Auswertungen im Folgenden auf den äquivalenten CO_2-Ausstoss sowie den Primärenergiebedarf beschränken. Um die Veröffentlichung vertraulicher Daten zu vermeiden, werden die Ergebnisse der Anwender relativ dargestellt.

Weiterhin sind die Bewertungsgrößen PED und GWP aus technischer Perspektive gut nachvollziehbar und haben direkten Bezug zu den Anwendungsfällen. Anderen Bewertungsgrößen wie beispielsweise dem Versauerungspotenzial liegen chemische oder biologische Prozesse zugrunde, die für die Bilanzierung von Prozessketten der mechanischen Fertigung weniger geeignet erscheinen.

Zunächst kann unterschieden werden, inwieweit die ökologische Wirkung eines Produktes durch die Bearbeitung und inwieweit durch das genutzte Material verursacht wird. Das Verhältnis dieser Anteile wird bestimmt durch:

- die Wirkung des verwendeten Werkstoffes (z.B. Alu > Stahl > Guss)
- die Menge des verwendeten Werkstoffes
- den Recyclinganteil des getrennten Werkstoffes
- die Wirkung der Bearbeitungsoperationen.

In den betrachteten Prozessketten ist der relative Impact des Materials beim Daimler-Bauteil erwartungsgemäß höher, da die Masse des Bauteils weitaus höher ist bei ähnlichem Impact der niedriglegierten Werkstoffe. Die Aufteilung des äquivalenten CO_2-Ausstosses auf Material und Prozesse ist dem linken Teil der unten stehenden Abbildung 15 zu entnehmen. Während in der Daimler-Technologiekette das Material und die Bearbeitung sich die Waage halten, wird der CO_2-Fußabdruck des Ventils maßgeblich durch die Bearbeitung beeinflusst.

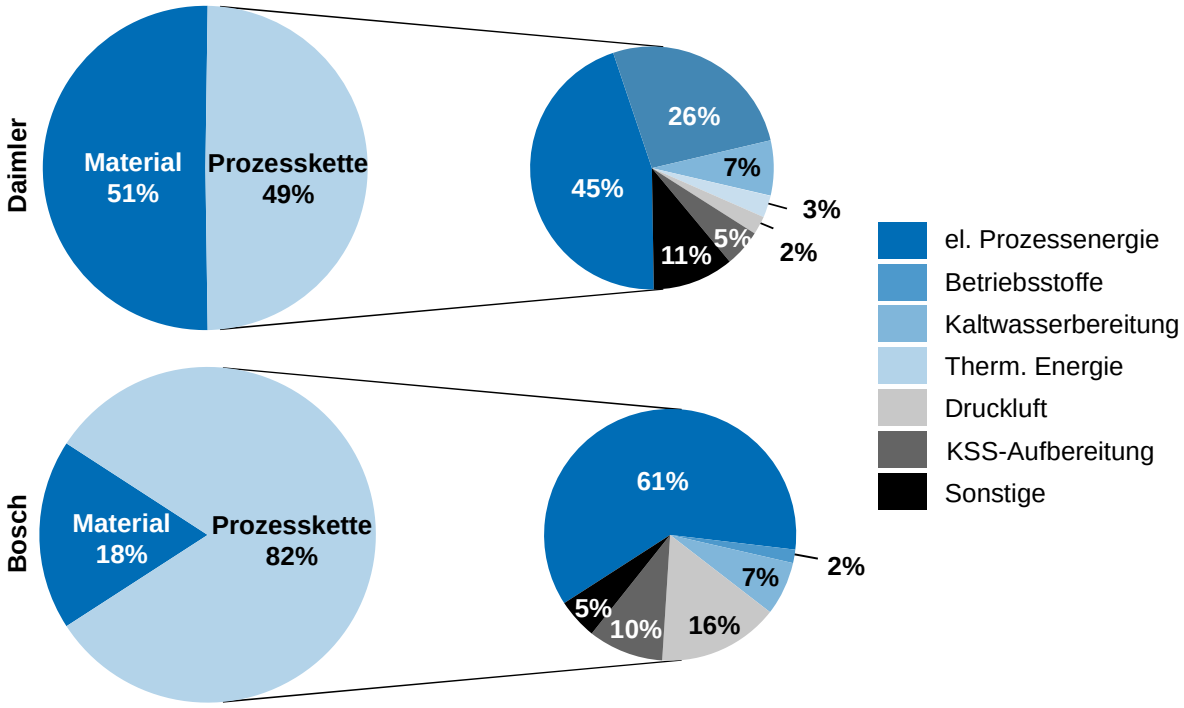

Abbildung 15: Aufteilung des bauteilbezogenen Impacts der Prozessketten (Treibhauspotenzial)

In der Abbildung 15 ist ebenfalls dargestellt, wie sich der anteilige, äquivalente CO_2-Ausstoß auf die wichtigsten Verbrauchergruppen verteilt. Bei beiden Prozessketten nimmt die elektrische Energie, die in den einzelnen Anlagen der jeweiligen Prozess-

schritte verbraucht wird den größten Teil ein. Es wird dabei unterschieden zwischen der Ebene der direkten Prozessanlagen und indirekt für die Fertigung notwendiger, zentraler Anlagen wie Kaltwasseraufbereitung, Drucklufterzeugung und KSS-Aufbereitung. In der Daimler Prozesskette tragen auch die Betriebsstoffe zu etwa einem Viertel zum prozessseitigen äquivalenten CO_2-Austoss bei. Die Betriebsstoffe enthalten Öl, KSS und Werkzeuge. Einen hohen Anteil an dem Impact der genutzten Betriebsstoffe hat im Falle der Daimler-Kette auch der Härteofen, der mit Brennstoff betrieben wird. [KLOC12c]

Die zentralen Anlagen sind in den analysierten Prozessketten von hoher Bedeutung. In beiden Fällen liegt der Beitrag der Zentralanlagen innerhalb der Fertigung bei über 20 %. Daraus lässt sich ableiten, dass zumindest in der industriellen Serienfertigung, für die eine breite Nutzung zentraler Anlagen charakteristisch ist, die Bilanzhülle nicht nur um die in Reihe geschalteten Prozessschritte gelegt werden sollte. Für ein fundiertes Ergebnis sind die Berücksichtigung und die verbrauchsgerechte Zuordnung zentraler Medien nicht zu vernachlässigen. [KLOC12c]

Die bisherigen Ergebnisse stellen dar, auf welche Verbrauchsarten der gesamte äquivalente CO_2-Ausstoss der Prozesskette zurückzuführen ist. Die Modellierung der Prozesskette in der Form einzelner Prozessschritte ermöglicht ebenfalls die Auswertung nach dem Impact der einzelnen Prozessschritte, die in Abbildung 5 für das Ventil und das Getrieberad abgebildet sind. In der folgenden Grafik sind die anteiligen Einflüsse der jeweiligen Prozessschritte auf den Gesamtimpact in CO_2-Äquivalenten dargestellt.

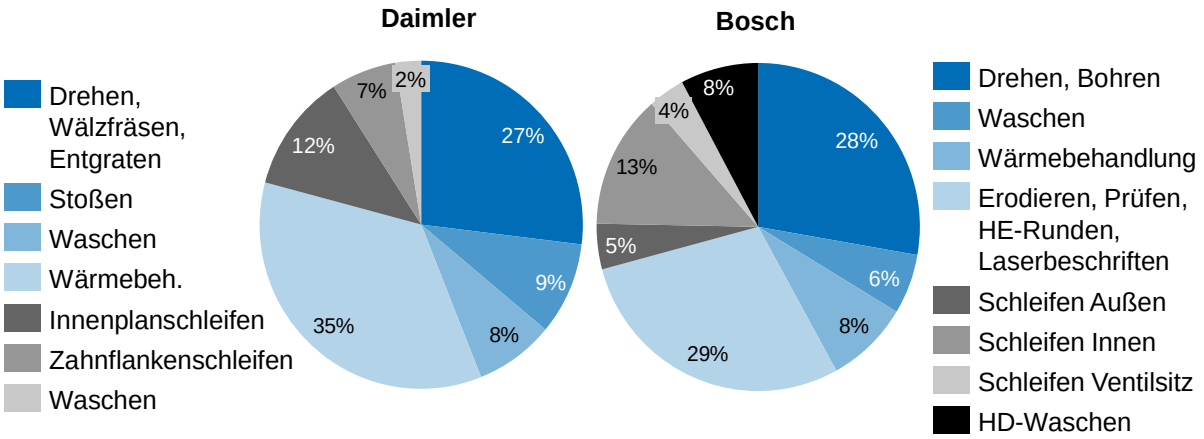

Abbildung 16: Anteilige Verursachung des ökologischen Impacts nach Fertigungsschritten

Es ist auffällig, dass die Wärmebehandlung, obwohl sie im Fall des Getrieberades den größten Anteil hat, nicht den gesamten Impact dominiert, bei Bosch gar nur 8 % ausmacht. Dies ist auf die bauteilbezogene Perspektive im Projekt BEAT und bei der Ökobilanzierung im Allgemeinen zurückzuführen. Obwohl der Bedarf an Energie und Stoffen in der Regel sehr hoch ist, ist die Wärmebehandlung durch die zumeist simultane Behandlung vieler Bauteile aus bauteilbezogener Perspektive nicht zwingend dominierend. Gegenteiliges gilt für Prozesse, die einzeln durchlaufen werden. Folglich sind in der Bosch-Prozesskette die spanenden Prozessschritte und der kombi-

nierte Prozess aus Erodieren, Prüfen, HE-Runden und Laserbeschriften für nahezu 60 % der bauteilbezogenen, äquivalenten Emissionen verantwortlich.

5.4 Ökologische Dimension des Zerspanprozesses

5.4.1 Werkzeugmaschine

Die elektrische Leistung, die zum Betrieb einer spanenden Werkzeugmaschine benötigt wird, kann unterteilt werden in drei Anteile. Zum einen haben moderne Werkzeugmaschinen, wie andere Maschinen und Anlagen, einen Bedarf an elektrischer Energie, der unabhängig vom Betriebszustand anfällt. Dieser Teil, im Folgenden Grundlast genannt, wird benötigt um konstante, bearbeitungsunspezifische Verbraucher zu speisen. Zu diesen Verbrauchern zählen beispielsweise die Hydraulikeinheit(en), die Klimatisierung der Maschine und des Maschinenschaltschrankes, die Steuerung oder die 24 V-Versorgung.

Zum Zweiten benötigt die Werkzeugmaschine elektrische Energie um die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, die notwendig für die Zerspanung ist, herbeizuführen. In der Regel handelt es sich dabei um eine Rotation der Spindel (Fräsen, Bohren) oder des Werkstückes (Drehen). Es fällt ein Bedarf an elektrischer Energie an, obwohl das Werkzeug nicht in Eingriff ist, also kein Span abgehoben wird. Dieser Teil der Leistungsaufnahme wird als Leerlaufleistung bezeichnet. Weiterhin wird hier der Leistungsbedarf für Vorschubachsen hinzugezählt.

Als dritte Komponente erfordert die Zerspanung selbst die Aufwendung von elektrischer Energie. Das Werkzeug wird gegen den Widerstand des Materials durch den Werkstoff geführt, sodass eine mechanische Arbeit verrichtet werden muss, um Späne abzuheben. Die mechanische Leistung der Zerspanung ist verknüpft mit der elektrischen Prozessleistungsaufnahme über den Wirkungsgrad der Hauptspindel(n). Nur dieser Teil der elektrischen Leistungsaufnahme trägt unmittelbar zur originären Aufgabe der Werkzeugmaschine bei, nämlich Späne vom Werkstück abzuheben.

Während die Prozessleistung nur während der Hauptzeit benötigt wird, wird die Leerlaufleistung auch in unproduktiven Nebenzeiten und die Grundlast zumeist während des gesamten Betriebs der Werkzeugmaschine benötigt. Ein exemplarischer Schrieb einer elektrischen Wirkleistungsmessung am Hauptanschluss einer Drehmaschine ist nachfolgend dargestellt.

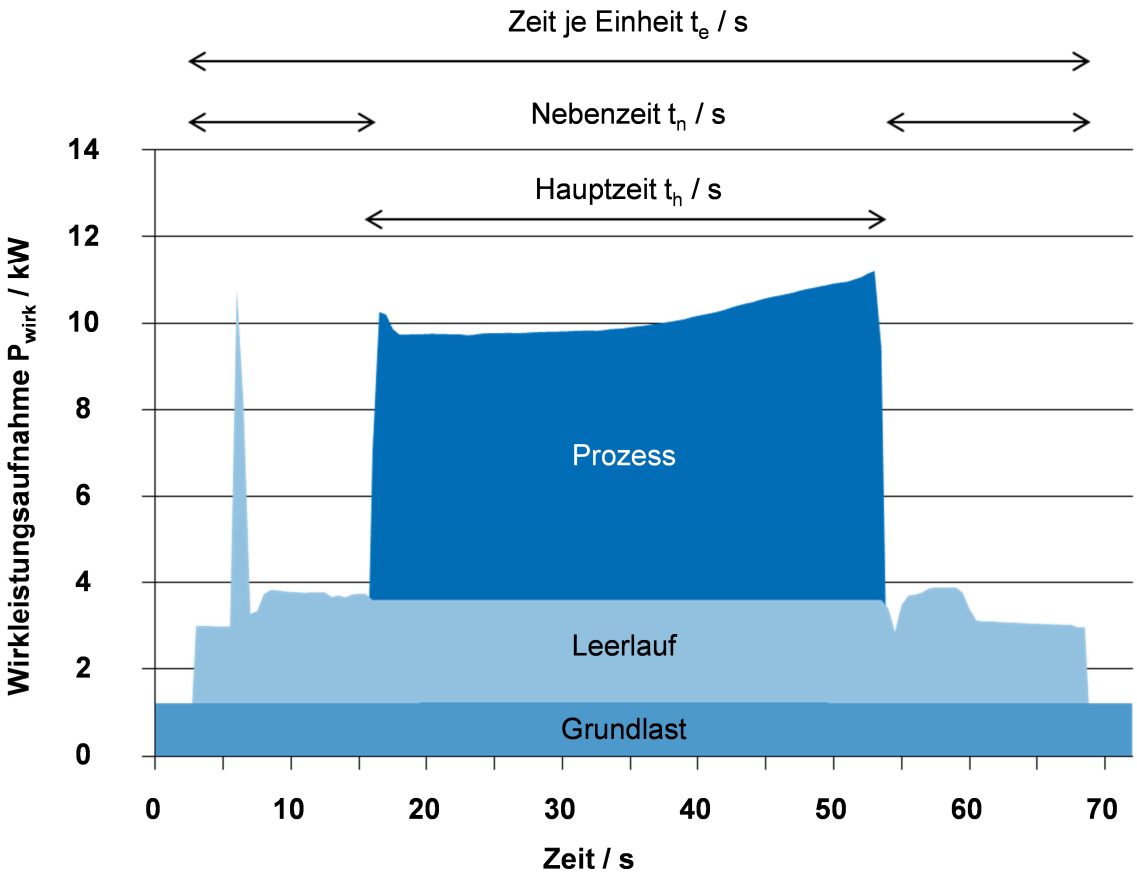

Abbildung 17: Charakteristischer Verlauf der elektrischen Wirkleistungsaufnahme einer spanenden Werkzeugmaschine

5.4.2 Zerspanprozess

Die elektrische Energie, die zur Produktion eines Bauteiles benötigt wird, setzt sich zusammen aus den jeweiligen Anteilen des elektrischen Leistungsbedarfes multipliziert mit der Zeit, in der sie anfallen. Der Energiebedarf der Grundlast, der einem Bauteil zuzurechnen ist, ergibt sich aus der Grundlast multipliziert mit der Zykluszeit eines Bauteils. Diese enthält alle Verteil-, Rüst- und Hauptzeiten, in der Grundlast anfällt, bezogen auf ein gefertigtes Stück.

$$E_{Bauteil}=E_{Prozess}+E_{Leerlauf}+E_{Grundlast}$$

$$=P_{Prozess}\cdot t_H+P_{Leerlauf}\cdot(t_h+t_n)+P_{Grund}\cdot t_{Zyklus}$$

Zur Minimierung des Bedarfes an elektrischer Energie eines gefertigten Bauteils bieten sich einige Optionen an, die im Folgenden aufgelistet und erläutert werden

- Minimierung der Grundlast
- Minimierung der Leerlaufleistung
- Optimierung der Prozesslast
- Minimierung unproduktiver Neben- und Verteilzeiten

Minimierung der Grundlast

Die Herabsetzung der Grundlast ist eine zentrale Bestrebung von Werkzeugmaschinenherstellern, Forschungseinrichtungen und Steuerungsentwicklern weltweit. [BREC12; KONG11; ABEL12; OTTO11] Der Einsatz von effizienterer Hardware (z.B. Einsatz drehzahlgeregelter Pumpen, hocheffiziente Elektromotoren, Energierückgewinnungssysteme, effiziente Spindeln) drosselt die dauerhaft im Betrieb anfallende elektrische Leistungsaufnahme und somit den Energiebedarf von gefertigten Produkten.

Weiterhin sind Standby- und Abschaltstrategien bereits am Werkzeugmaschinenmarkt verfügbar, die in Abhängigkeit des Maschinenzustandes Verbraucher abschalten und so den Grundlastbedarf herabsetzen. In unproduktiven Zeiten kann somit elektrische Energie eingespart werden.

Minimierung der Leerlaufleistung

Die Leerlaufleistung kann durch den gezielten Einsatz von Spindeln reduziert werden, die in ihrem Einsatzbereich hohe Effizienz aufweisen. Dies zählt ebenfalls zu Maßnahmen an der Hardware der Maschine.

Weiterhin können optimierte NC-Programme dazu beitragen, die Nebenzeiten zu verringern. Durch energieoptimale Bahnplanung kann der Energieverbrauch in der Fertigung herabgesetzt werden. [KONG11; N.N.11]

Die oben genannten Ansätze standen nicht im Fokus des Forschungsprojektes BEAT. Im Verbundprojekt EWOTeK (Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb), ebenfalls Teil der Förderinitiative des BMBF Forschung für die Produktion von morgen, stand der Komponentenbetrieb im Vordergrund. [BREC12]

Optimierung der Prozesslast

Während die Leerlauf- und die Grundlast möglichst minimiert werden sollen, kann es sinnvoll sein, die Prozesslast zu steigern, um den Energiebedarf eines gefertigten Bauteils herabzusetzen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei einer Steigerung der Prozessparameter der Zerspanung (Schnittgeschwindigkeit v_c, Vorschub f und Schnitttiefe a_p sowie radiale Eingriffsbreite a_e), die Produktivität im stärkeren Maße steigt als die Leistungsaufnahme. Grundsätzlich ist dabei zu beachten, dass die Prozessparameter Einfluss auf die Zielgrößen Prozessstabilität, Qualität und Werkzeugstandzeit haben. Der Energieverbrauch kann daher nur als eine weitere Zielgröße in einem multikriteriellen Optimierungsproblem betrachtet werden.

Dies kann gezeigt werden am empirischen Schnittkraftmodell nach Victor und Kienzle [KIEN52]. Die mechanische Leistung der Zerspanung P_c ergibt sich aus dem Produkt von Schnittkraft und Schnittgeschwindigkeit.

$$P_c = v_c \cdot F_c$$

Die Schnittkraft ergibt sich nach Kienzle und Victor aus einem spezifischen Schnittkraftwert $k_{c1.1}$, der Spanungsbreite und -tiefe und dem Wert m_c sowie einem Geschwindigkeitskorrekturfaktor K_{vc}.

$$F_c = k_{c1.1} \cdot b \cdot h^{1-mc} \cdot K_{vc}$$

Beispielhaft für den Werkstoff GGG50 (m_c=0,3043, $k_{c1.1}$=1053 N/mm²) [KÖNI82, S. 69] wurde die mechanische Schnittleistung über den Schnittparametern Vorschub und Schnittgeschwindigkeit aufgetragen.

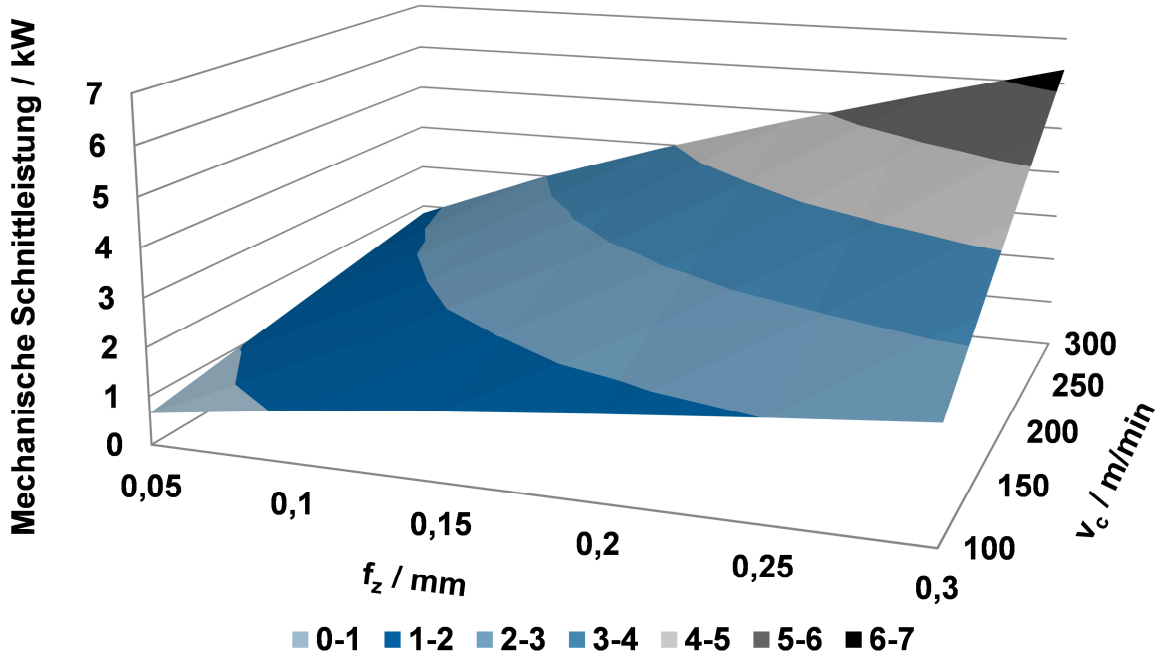

Abbildung 18: Mechanische Schnittleistung basierend auf dem empirischen Schnittkraftmodell nach Kienzle [KIEN52]

Die mechanische Schnittleistung steigt erwartungsgemäß mit höherer Schnittgeschwindigkeit und höherem Vorschub an. Mit erhöhtem Vorschub steigt die Schnittleistung unterproportional an, da der Ausdruck (1-mc) immer kleiner eins ist. Die Schnittleistung steigt ebenfalls unterproportional mit der Schnittgeschwindigkeit, da sich der Korrekturfaktor für die Schnittgeschwindigkeit oberhalb von 100 m/min wie folgt ergibt. [KÖNI82, S. 69]

$$K_{vc} = \left(\frac{100}{v_c}\right)^{0,071}$$

Zwar steigen die mechanische Schnittleistung und die elektrische Leistung, die aufgrund des Zerspanprozesses von der Werkzeugmaschine aufgenommen wird, jedoch steigt die Produktivität in höherem Maße. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird die spezifische Zerspanenergie gebildet, die ausdrückt, welche Energie aufgewendet werden muss, um eine Volumeneinheit Werkstoff zu zerspanen. Sie errechnet sich aus dem Quotient von Schnittleistung und korrespondierendem Zeitspanvolumen Q_z bzw. aus dem Quotienten von gesamter aufgenommener Zerspanenergie $E_{c,ges}$ und zerspantem Volumen V.

$$E_{c,spez} = \frac{P_c}{Q_z} = \frac{E_{c,ges}}{V}$$

Die spezifische Zerspanenergie ist ein Maß dafür, wie effizient der eigentliche Prozess abläuft. Sie klammert jedoch sämtliche Einflüsse von Nebenaggregaten zunächst aus. Trägt man die spezifische Zerspanenergie ebenfalls, wie die mechanische Schnittleistung, über Vorschub und Schnittgeschwindigkeit auf, zeigt sich, dass der Zerspanprozess mit zunehmenden Schnittwerten effizienter wird. [SCHL11b]

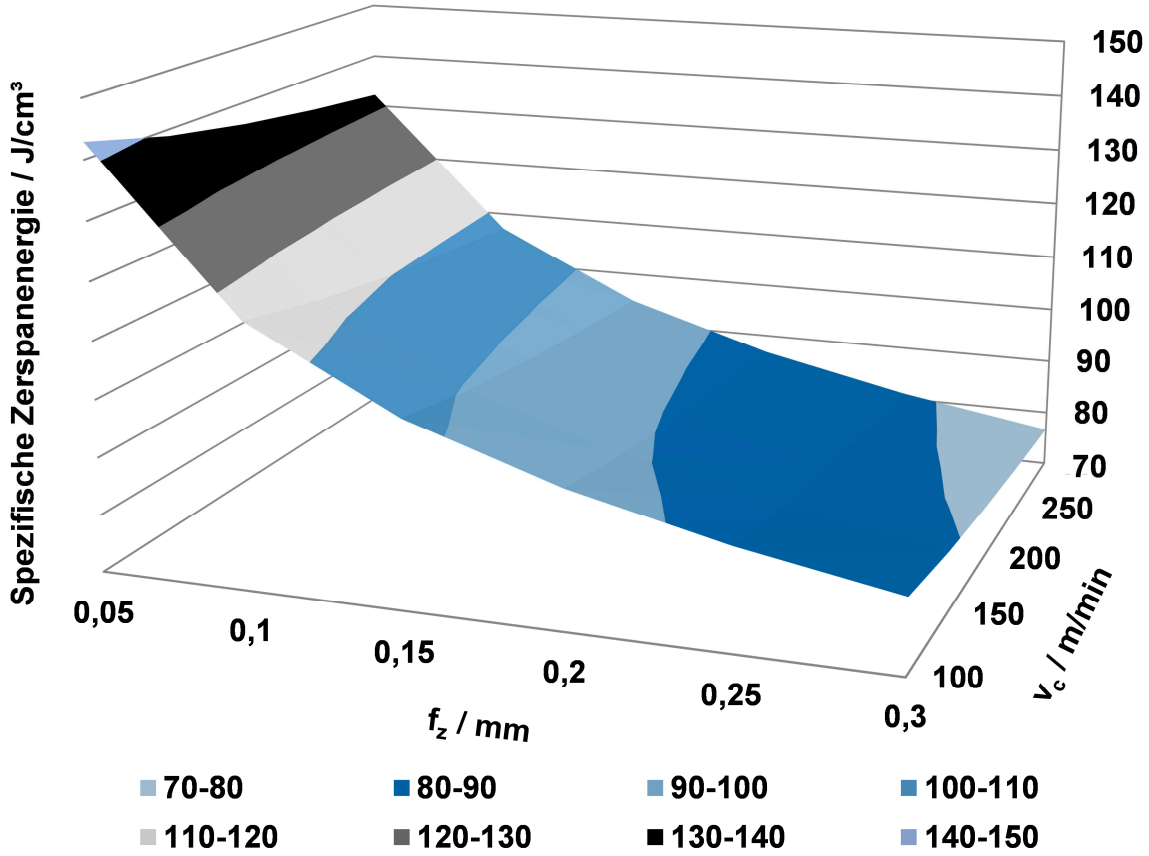

Abbildung 19: Spezifische Zerspanenergie basierend auf dem empirischen Schnittkraftmodell nach Kienzle

Der vorgestellte Zusammenhang, der auf einem empirischen Modell basiert, wurde im Rahmen von Zerspanversuchen am WZL weiter untersucht. In diesen Versuchen wurde die Gültigkeit des empirischen Modells anhand von experimentellen Ergebnissen nachgewiesen. [SCHL10, SCHL11b]

Neben dem positiven Effekt, den eine Steigerung der Schnittwerte auf die Prozesslast hat, wird die Menge an Energie reduziert, die für die Grundlast während der Herstellung eines Stückes benötigt wird. Dies ist auf eine Verkürzung der Hauptzeit zurückzuführen. Positiv wirkt sich dieser Effekt nur dann aus, wenn die Werkzeugmaschine in der eingesparten Zeit entweder in einen verbrauchsärmeren Zustand versetzt (StandBy), abgeschaltet oder zur Fertigung weiterer Bauteile genutzt wird.

Die Auswahl der Prozessparameter geschieht unter Berücksichtigung vieler Gesichtspunkte, wie Oberflächengüte, Werkzeugstandzeit, zur Verfügung stehende Ma-

schinenleistung etc. Deshalb steht die energieoptimale Auslegung eines Prozesses zumeist nicht im Fokus des Technologieplaners. Mit der spezifischen Zerspanenergie steht ein Effizienzkennwert zur Verfügung, der sich auf den Kernprozess der Zerspanung bezieht.

Minimierung unproduktiver Neben- und Verteilzeiten

Im industriellen Betrieb werden Werkzeugmaschinen selten abgeschaltet. Zumeist laufen sie komplette Schichten, Tage oder sogar dauerhaft. Dies liegt zum Teil an Unwissenheit über die hohe Grundlast, zum Teil an organisatorischen Abläufen und zum Teil an langen Wiederanlaufzeiten, die notwendig sind, um die geforderte Bauteilqualität zu erzeugen.

5.4.3 Zerspanwerkzeuge

Um die ganzheitliche, präzise Bewertung von Zerspanprozessen zu gewährleisten, sind die Zerspanwerkzeuge als Betriebsmittel zu bewerten und anteilig auf die hergestellten Produkte anzurechnen. Insbesondere vor dem Hintergrund der aufgezeigten Potenziale im Prozess erlangt das Zerspanwerkzeug hohe Relevanz, da höhere Schnittwerte zu höheren mechanischen und thermischen Belastungen der Werkzeuge und letztendlich zu höherem Verschleiß führen. Damit ein Prozess gesamtoptimal hinsichtlich ökologischer Zielgrößen ausgelegt werden kann, muss daher der Aufwand zur Bereitstellung der Werkzeuge bekannt sein.

In der Zerspanung kommen je nach Anwendungsfall unterschiedliche Schneidstoffe zum Einsatz. Je nach spezifischer Anforderung des Prozesses und vordergründiger Zielgröße werden Schneidstoffe wie Schnellarbeitsstähle (HSS), Hartmetall, Cermets, Keramiken, CBN oder Diamant genutzt. [KLOC08, S. 103 ff.] Im Folgenden soll der Schwerpunkt auf Hartmetall- und HSS-Werkzeugen liegen, die einen großen Teil der Anwendungen abdecken.

Die betrachteten Aufwände zur Herstellung der Werkzeuge umfassen die Rohmaterialgewinnung und -aufbereitung, die Pulverherstellung, das Sintern, Schleifen und Beschichten der Werkzeuge. Die Aufwände wurden teilweise aus der Literatur zusammengetragen, teilweise aus Messungen bei den Herstellern und aus Expertenabschätzungen gewonnen.

Durch das Beschichten werden Hartstoffschichten auf das Werkzeugsubstrat aufgebracht, um den direkten Kontakt des Substrats und des Werkstücks zu unterbinden. Die Beschichtungen vermindern Adhäsions-, Abrasions- sowie Diffusionsvorgänge und steigern somit die Leistungsfähigkeit der Zerspanwerkzeuge. [KLOC08] Zur Beschichtung von Zerspanwerkzeugen werden sowohl PVD als auch CVD-Beschichtungsverfahren eingesetzt. Beim PVD-Verfahren erfolgt die Abscheidung der Beschichtung auf dem Substrat auf physikalischem Wege, bei der CVD-Beschichtung erfolgt die Beschichtung durch eine chemische Reaktion. Beiden Verfahren ist gleich, dass es sich um Chargenprozesse handelt, bei denen eine Vielzahl von Objekten beschichtet wird. Je nach Bedarf, Beschaffenheit der zu beschichten-

den Objekte und Verfahren schwankt die Beladung einer Beschichtungsanlage. Aufgrund dessen ist die Zurechnung der Aufwände des Beschichtungsprozesses nicht präzise möglich.

Zur Implementierung im BEA*T*ool werden drei Vollhartmetallwendeschneidplatten und drei HSS-Vollwerkzeuge modelliert [DAHM04; KARP11]. Für die Wendeschneidplatten wurde als Grundmaterial Wolframcarbid in einer Kobaltmatrix angenommen. Die Schaftwerkzeuge werden bestehend aus Schnellarbeitsstahl modelliert. Um dem Nutzer eine möglichst übersichtliche Auswahl zu ermöglichen, werden jeweils drei Größen für Schaftwerkzeuge und Wendeschneidplatten definiert. Tabelle 2 enthält die Maße und den Impact der Werkzeuge.

Tabelle 2: Eigenschaften der modellierten Werkzeuge

Material	**HSS-Vollwerkzeug**			**VHM-Wendeschneidplatte**		
Größe	Klein	Mittel	Groß	Klein	Mittel	Groß
D / mm	6	10	16	-	-	-
l / mm	60	70	90	-	-	-
V /mm³	1696	5495	18095	260	1000	2500
m / g	13,4	43,4	143	4,1	15,6	39
PED / MJ	12	27	46	4,5	16	40
GWP / kg CO_{2e}	0,86	1,9	3,3	0,257	0,921	2,22

Für die Abschätzung der Werkzeuge wird sowohl auf die Literatur zurückgegriffen, als auch auf Messungen, die im Rahmen des Projektes durchgeführt werden. Die Abschätzung der Wendeschneidplatten wird „zur sicheren Seite“ durchgeführt, da ein Schleifprozess berücksichtigt ist. Heutzutage werden viele Wendeschneidplatten direkt mittels pulvermetallurgischer Verfahren in ihre finale Form gebracht. Ein Schleifprozess ist bei komplexen Formen bspw. Spanleitgeometrien erforderlich. Dies bedeutet, dass der Impact der Wendeschneidplatten eher über- als unterschätzt wird. Die der Modellierung zugrunde liegenden Fertigungsschritte sowie die Quelle der jeweiligen Daten sind dargestellt in Tabelle 3.

Tabelle 3: Abschätzung des ökologischen Impacts von Zerspanwerkzeugen

Fertigungsschritt	Abschätzung basierend auf
Materialgewinnung	Expertenabschätzung PE International
Pulverherstellung	[KARP11]
Sintern	[KARP11]
Schleifen	Messungen WZL, Expertenabschätzung

Da rund 80 % der eingesetzten Zerspanwerkzeuge heute beschichtet werden, um die Verschleißfestigkeit weiter zu steigern [KLOC08, S. 137], erfolgt die Bewertung der Beschichtung über die Bewertung der Vorteile, die sie im Prozess erbringt. Beschichtungen ermöglichen es in der Regel, höhere Prozessparameter zu wählen, bzw. die Standzeit eines eingesetzten Werkzeuges bei gleichbleibenden Parametern zu steigern.

Für die ökologische Auslegung eines Zerspanprozesses ist es notwendig, die gegenläufigen Effekte hoher Zerspanparameter gegeneinander abzuwägen. Auf der einen Seite reduzieren hohe Schnittwerte die spezifische Zerspanenergie sowie die erforderliche anteilige Grundlast. Auf der anderen Seite verschleißen Zerspanwerkzeuge in der Regel mit höheren Schnittwerten aufgrund der intensiveren thermomechanischen Belastung schneller. Insofern müssen die Aufwände zur Herstellung der Werkzeuge auf weniger hergestellte Bauteile verteilt werden. Um den Zusammenhang zwischen Verschleiß und Schnittparametern zu modellieren, bietet sich die Taylor-Gleichung an.

Aus der Literatur ist der von Taylor erstmalig dokumentierte Zusammenhang zwischen Werkzeugstandzeit und Schnittgeschwindigkeit bekannt: In einem doppelt-logarithmischen System sind Werkzeugstandzeit T_c und Schnittgeschwindigkeit v_c linear voneinander abhängig. [KLOC08, S. 265]

$$T_c = C_v \cdot v_c^k$$

Durch weitere Arbeit wurde diese Gleichung erweitert und die erweiterte Taylor-Gleichung folgt:

$$T_C = C \cdot v_c^k \cdot f_z^{k_{fz}} \cdot a_p^{k_a}$$

Aus dieser Formel wird ersichtlich, dass die Standzeit und die Prozessparameter gegenläufig reagieren. Da gesteigerte Prozessparameter wie in 5.4.2 erläutert einen positiven Einfluss auf den Energiebedarf des Prozesses haben, liegen zwei gegenläufige Zusammenhänge vor, die gegeneinander abzuwägen sind. [SCHL11b]

Im Einsatz unter üblichen Schnittbedingungen werden Zerspanwerkzeuge ausgetauscht oder wiederaufbereitet, nachdem sie infolge von Verschleiß ihr Einsatzende erreichen. [KLOC08, S. 75] Die Hauptverschleißmechanismen sind Abrasion, Adhä-

sion und Diffusion. In der Regel schreitet der Verschleiß S-kurvenförmig über der Schnittzeit fort. Zunächst steigt der Verschleiß degressiv, gefolgt von einem nahezu linearen Fortschritt und anschließend einem progressiven Anstieg. [KLOC08, S. 263]

Die ökologische Abschätzung der Beschichtung von Zerspanwerkzeugen wird in Versuchen im Rahmen des Projektes angewendet. In einem Fräsprozess in ADI 900 mit einem mit Wendeschneidplatten besetzten vierschneidigen Werkzeug wird systematisch eine beschichtete und eine unbeschichtete Schneidplatte gegenübergestellt. Es werden die Aufwände zur Herstellung und Beschichtung bewertet und unter Verwendung von empfohlenen Schnittparametern Standzeitversuche durchgeführt. Währenddessen wird die elektrische Wirkleistungsaufnahme der Werkzeugmaschine erfasst. Es wird ein Block aus ADI 900 mit einer Schnitttiefe $a_p = 3$ mm und einem radialen Eingriff $a_e = 8$ mm plangefräst. Um für die Auswertung den Bezug auf ein Bauteil zu gewährleisten, wird für die Berechnungen ein Vorschubweg von 300 mm festgelegt.

In Abbildung 20 ist die Verschleißentwicklung auf der Freifläche über dem Vorschubweg dargestellt. Eingesetzt wird neben einer unbeschichteten Wendeschneidplatte eine mit (Ti,Al)N mittels PVD beschichtete Wendeschneidplatte. Zum einen ist der angesprochene S-förmige Verlauf der Verschleißentwicklung zu erkennen, zum anderen ist auch der Vorteil der beschichteten Platten sowohl hinsichtlich des Standweges, als auch hinsichtlich der Produktivität zu erkennen. Das Ende der Standzeit wird mit einer Verschleißmarkenbreite von VB=200 µm festgelegt, die Entwicklung des Verschleißes ist anhand der Bilder in Abbildung 20 zu erkennen.

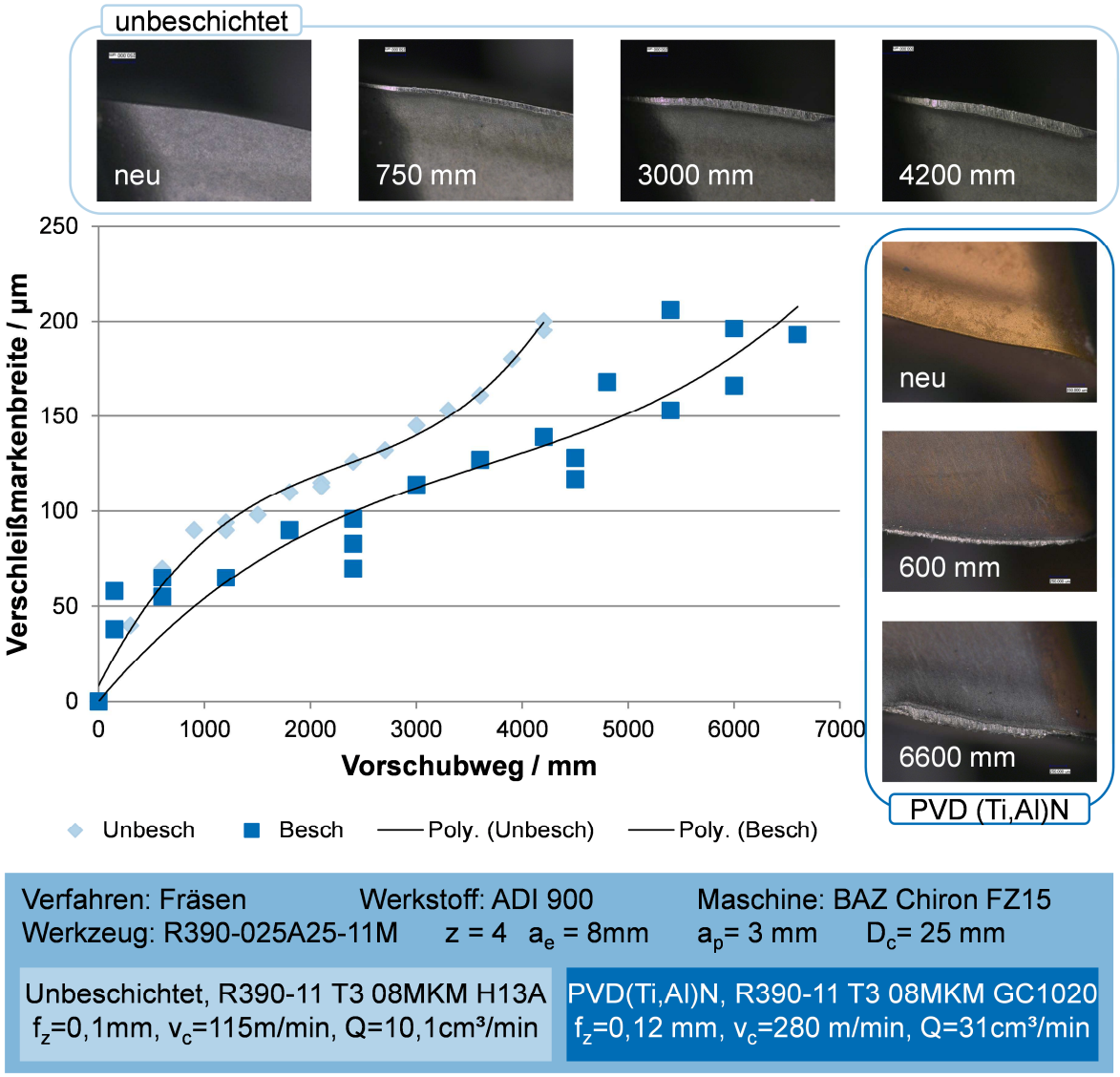

Abbildung 20: Verschleißentwicklung und Produktivität beim Fräsen von ADI 900

Durch die Beschichtung der Wendeschneidplatten kann in diesen Versuchen eine Steigerung der Standmenge um 57 % erreicht werden und die Produktivität während der Hauptzeit um 200 % erhöht werden. Dies hat auch auf den ökologischen Impact des Zerspanprozesses einen hohen Einfluss. Zur Abschätzung des Effektes werden die folgenden Annahmen getroffen:

- Ein fiktives Bauteil erfordert 300 mm Vorschubweg (7,2 cm³ zerspantes Volumen)
- Ein Werkzeugwechsel dauert 120 s bei anliegender Grundlast (3,61 kW)

$$E_{Werkzeugwechsel}=120s\cdot 3{,}61kW=120Wh=0{,}432\ MJ$$

- Es fallen pro Werkstück 40s Nebenzeit an, in denen ebenfalls die Grundlast anliegt

$$E_{Nebenzeit}=40s\cdot 3{,}61kW=40{,}1Wh=0{,}144\ MJ$$

- Die Ausschussquote beider Prozesse ist identisch bei 2 %

Die Erhöhung der Prozessparameter führt, wie beschrieben, zu einer Steigerung der elektrischen Leistungsaufnahme, zu einer Reduzierung der spezifischen Zerspanleistung und zu einer Verkürzung der Hauptzeiten. Dies ist abzulesen an Abbildung 21.

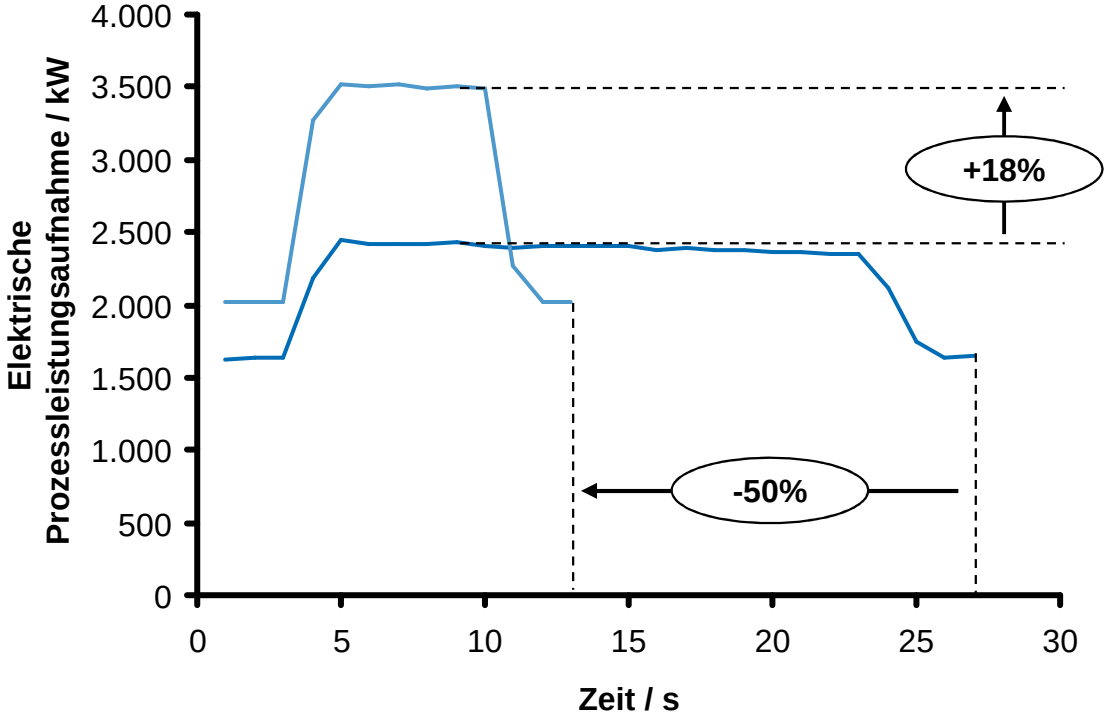

Abbildung 21: Elektrische Prozesswirkleistungsaufnahme bei der Zerspanung mit unterschiedlichen Prozessparametern

Es ist die elektrische Prozesswirkleistungsaufnahme über der Zeit aufgetragen, in Hellblau mit beschichteten Werkzeugen, in Dunkelblau mit unbeschichteten Werkzeugen. Die Prozesswirkleistung wird gebildet, indem von der gemessenen Wirkleistung am Hauptanschluss der Maschine die konstante Grundlast von 3,61 kW subtrahiert wird. Somit bleibt die Leistungsaufnahme der Achsantriebe. Durch die höheren Schnittwerte steigt die Leistungsaufnahme um 18 % während des Eingriffes an, die Hauptzeit reduziert sich um 50 %. Die elektrische Energie, die während des Prozesses „verbraucht“ wird, ist gleich der Fläche unterhalb der beiden Kurven. Die für den Prozess benötigte elektrische Energie reduziert sich von 36 Wh auf 20 Wh. Hinzu kommt, dass durch die Prozesszeitverkürzung auch die konstante Grundlast 50% weniger lange benötigt wird und somit ein weiterer Einspareffekt durch die gesteigerten Parameter erwirkt wird.

Der gesamte Energiebedarf der Zerspanung eines Bauteils errechnet sich wie folgt:

$$E_{Gesamt}=E_{Prozess}+E_{Werkzeugwechsel}+E_{Neben}+E_{Werkzeug}$$

$$E_{Prozess}=P_C \cdot t_C+E_{jog}$$

$$E_{Werkzeugwechsel}=P_{Stdby} \cdot t_{Werkzeugwechsel}$$

$$E_{Neben}=P_{Stdby} \cdot t_{Neben}$$

$$E_{Werkzeug}=n_{Werkzeug}\cdot E_{Werkzeug}=\frac{t_C}{4\cdot T}\cdot E_{Werkzeug}$$

Der Gesamtenergiebedarf ergibt sich aus dem Prozessenergiebedarf, dem Energiebedarf während der anteiligen Werkzeugwechsel und der Nebenzeit und dem anteiligen Energiebedarf des Werkzeuges, der sich wiederum aus der Schnittzeit, der Standzeit und der Anzahl der Werkzeuge (hier n = 4) und der Anzahl der nutzbaren Schneidenecken ergibt.

Während des Prozesses reduziert sich die aufgenommene elektrische Energie von 120 Wh auf 65 Wh. Dies ist zum einen auf die geringere spezifische Zerspanenergie zurückzuführen. Zum anderen wird durch die kürzere Prozessdauer weiterhin Grundlast eingespart.

Die anteilige Energie, die für die Werkzeugwechsel benötigt wird, ist bei den beschichteten Werkzeugen um 36 % geringer, da sich die Standmenge von 14 auf 22 Bauteile erhöht. Bezogen auf ein Bauteil, reduziert sich die benötigte Energie von 8,6 Wh auf 5,4 Wh.

Es wird angenommen, dass die Nebenzeiten durch die beschichteten Werkzeuge nicht beeinflusst werden. Sie werden mit 40 s pro Bauteil angenommen sodass sich der anteilige Energieverbrauch auf 40 Wh summiert.

Bei dem Werkzeug handelt es sich um einen 4-schneidigen Fräser. Eine Wendeschneidplatte wird mit einem Primärenergiebedarf von 4,5 MJ PED und einem äquivalenten CO_2-Ausstoß von 0,257 Kg CO_{2e} veranschlagt. Die verwendeten Schneidplatten verfügen über zwei Schneidenecken. Diese Aufwände verteilen sich auf 28 bzw. 44 Bauteile bei den jeweiligen Alternativen.

Die Abbildung 22 veranschaulicht das Ergebnis der Versuche. Neben der Steigerung der Produktivität um den Faktor 3 ergibt sich ein reduzierter Primärenergiebedarf von 0,77 MJ pro Bauteil anstelle von 1,24 MJ. Ist es möglich, vier Wendeschneidplatten mit weniger als 0,94 MJ Primärenergiebedarf zu beschichten, lohnt sich die Beschichtung auch aus ökologischer Perspektive in diesem Fall. Die Vorteile, die mit der Beschichtung im Prozess erzielt werden können, hängen stark vom Einzelfall ab und in der Regel ist es möglich, längere Standzeiten auch in noch höhere Produktivität umzusetzen oder vice versa, wie im Taylor-Zusammenhang beschrieben.

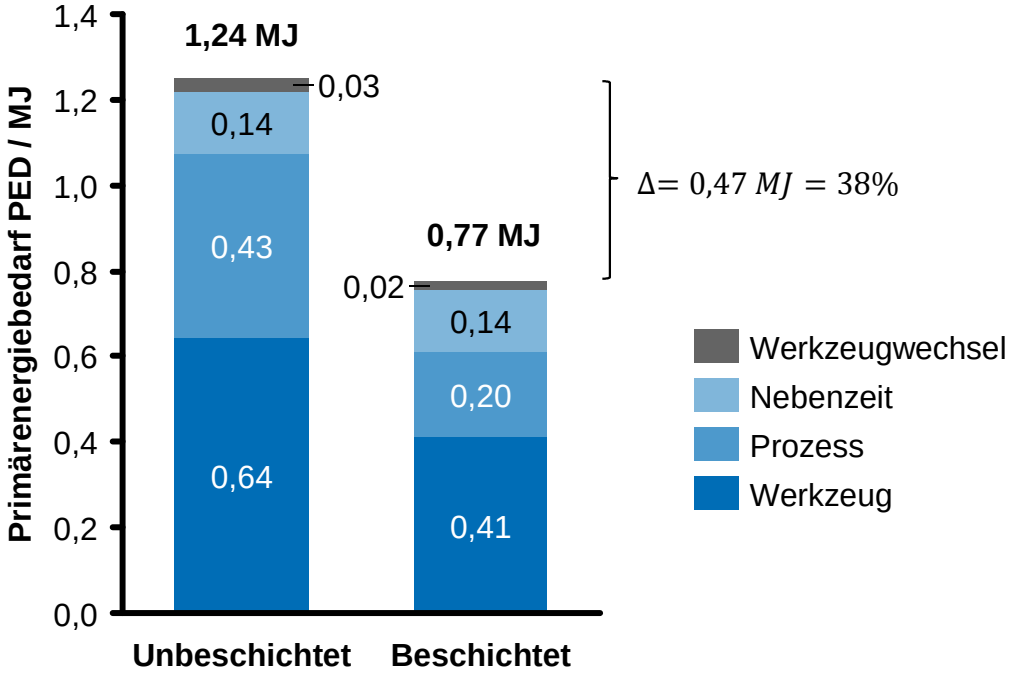

Abbildung 22: Bilanz beschichteter vs. unbeschichteter Werkzeuge

5.5 Softwarewerkzeug BEA*T*ool

Neben der Bilanzierung von Technologieketten ist die Erstellung eines Softwarewerkzeuges Ziel des Forschungsprojektes BEAT. Das Softwarewerkzeug dient dem Zweck, die Erkenntnisse des Projektes verwertbar zu machen für Anwender, deren Wissen über ökologische Fragestellungen gering ist, die aber dennoch eine Bilanzierung ihrer Prozessketten mit vertretbarem Aufwand durchführen wollen. Mit dem BEA*T*ool wird ein frei zugängliches Werkzeug entwickelt, dass basierend auf den umfangreichen GaBi-Modellen, ungeübten Nutzern die Ökobilanzierung von Technologieketten erlaubt. Der Aufbau des Tools ist dabei möglichst generisch gehalten. Dies bedeutet, dass bis zu 15 Maschinen einer Prozesskette modelliert werden können, die jeweils unterschiedliche Bearbeitungsschritte abbilden können. Nicht genutzte Prozessschritte können im Tool abgewählt werden. Schematisch ist der Aufbau dargestellt in Abbildung 23. Je nach Eingaben können die Maschinen spanende Maschinen, Waschprozesse oder andere Maschinen und Anlagen abbilden. Die In- und Outputs der generischen Prozessschritte und somit die verwendbaren Energien, Medien und Hilfsstoffe sind dargestellt in Abbildung 24.

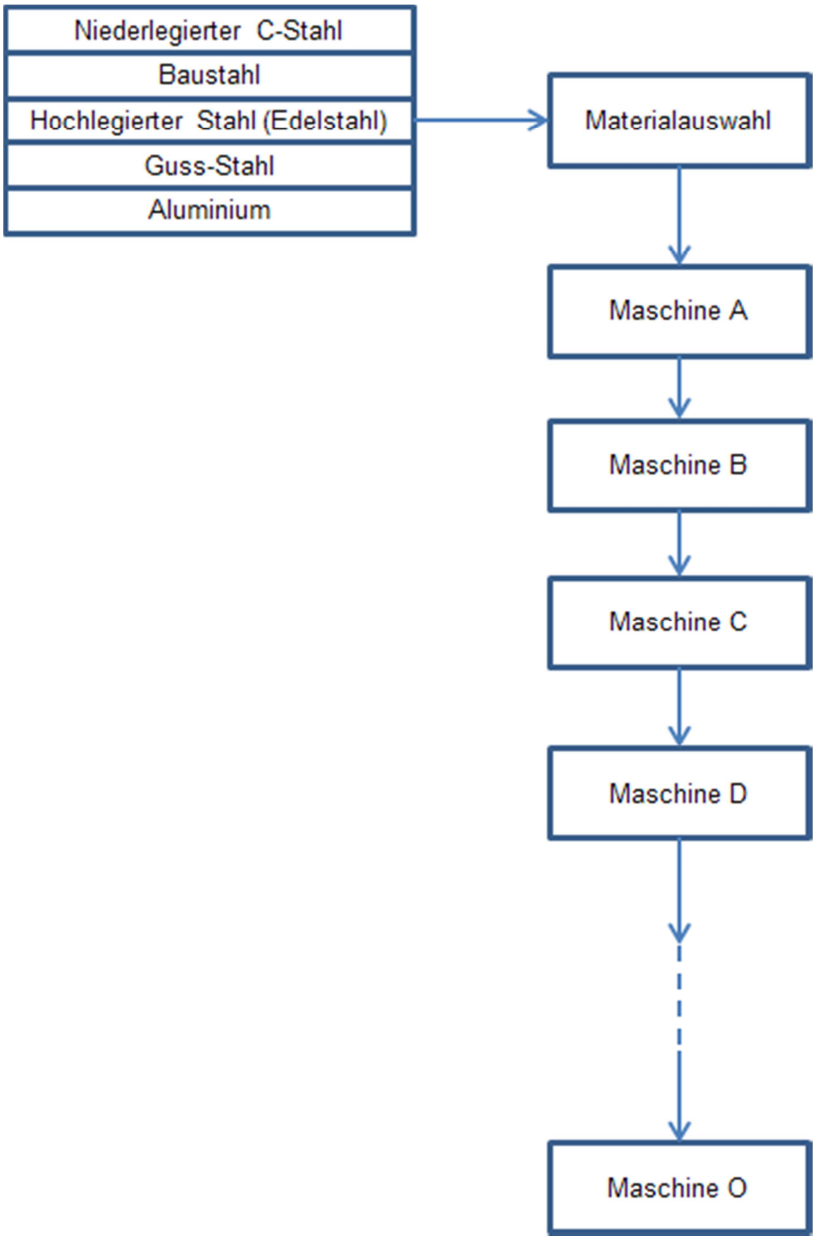

Abbildung 23: Schema der Prozesskettenmodellierung

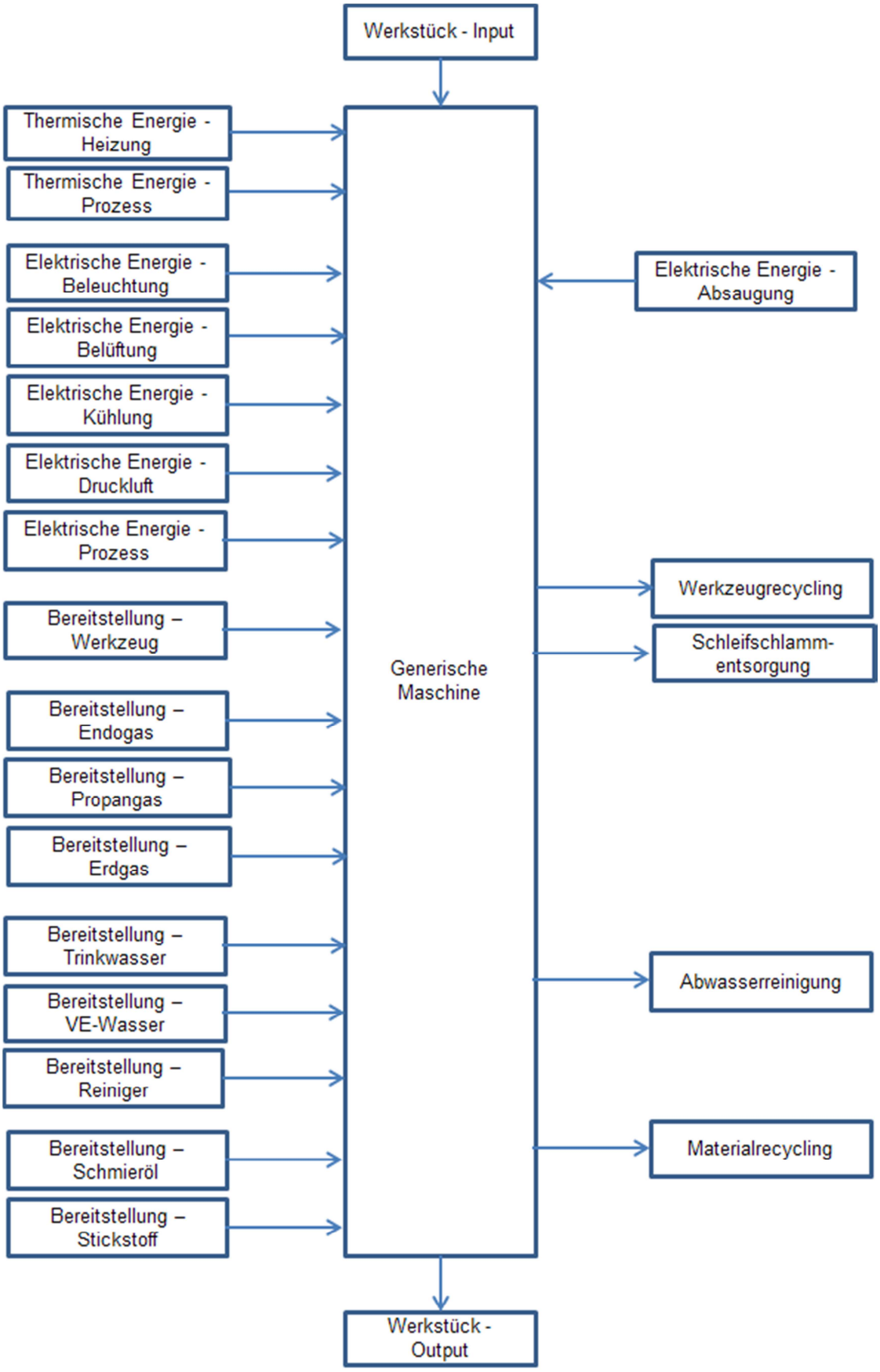

Abbildung 24: Vereinfachtes Schema zum generischen Prozessschritt

Das BEA*Tool* ermöglicht es, zwei Prozessketten simultan zu modellieren und die Ergebnisse direkt gegenüberzustellen, um alternative Prozesse und Technologieketten miteinander vergleichbar zu machen. Dies ermöglicht auch, simulativ Alternativen hinsichtlich ihres ökologischen Impacts zu bewerten, bevor sie in der Praxis umgesetzt wurden. Dies erfordert zumeist Annahmen über den Ressourcenverbrauch solcher Prozesse.

Weiterhin führt das Werkzeug den Nutzer durch die Eingabemasken durch die Ökobilanzierung. Es unterstützt den Nutzer in 3 von 4 Schritten der Ökobilanzierung von Technologieketten, indem es die Erstellung der Sachbilanz unterstützt, die Wirkungsabschätzung vollständig durchführt und die Ergebnisse für die Auswertung aufbereitet.

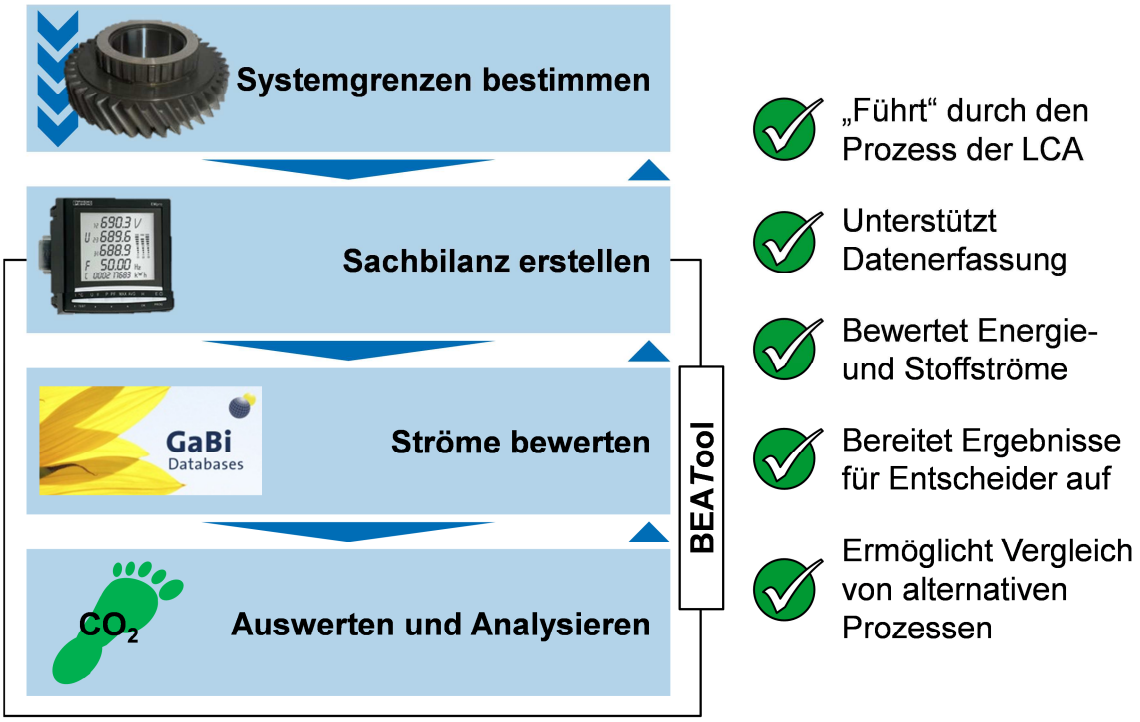

Abbildung 25: Funktionalitäten des BEA*Tool* im Verlauf einer LCA

Die Eingaben, die ein Nutzer vornehmen muss, orientieren sich weitestgehend an verfügbaren Informationen. Es wurde angestrebt, ein Werkzeug zu entwickeln, dass zum einen präzise, belastbare Ergebnisse liefert und zum anderen mit vergleichsweise leicht generierbaren Dateneingaben arbeitet und dem Nutzer somit die Erstellung der Sachbilanz erleichtert.

Die Eingabe von Daten ist strukturiert nach drei Bereichen:

1. Übergeordnete Parameter: Bauteilgewicht, Materialauswahl und Standort (Nation) des Maschinenparks
2. Zentrale Anlagen, die alle Maschinen der Prozesskette betreffen (können)
3. Einzelmaschinen (1-15)

Diese Struktur ist zu sehen in der nachfolgenden Abbildung, die einen Ausschnitt aus dem Softwarewerkzeug zeigt.

	Alias	Prozesskette	Alternative Prozesskette	Kommentar, Einheiten, Standardwerte
-	**Gesamtkette**			
	Bauteilgewicht	0,6	0,6	[kg/Bauteil] Masse des Bauteils nach der Bearbeitung (Output)
	Standort	Deutschland	Deutschland	Erläuterung im Text
	Material Auswahl	Niederlegierter Stahl	Niederlegierter Stahl	Erläuterung im Text
-	**Zentrale Anlagen**			
	Beleuchtung	0,00583	0,00583	[kW/m²] Kennwert für aufgewendete elektrische Beleuchtungsleistung pro Quadratmeter
	Heizung	0,0145	0,0145	[kWh/h] Thermische Energie aus Erdgas (Heizung) pro Stunde und Quadratmeter
	Belüftung	0,02	0,01	[kWh/(h*m2)] Elektrische Energie pro Stunde und Quadratmeter
	Kältefaktor	0,25	0,25	[kWh/kWh] Elektrische Energie pro kWh thermische Kühlenergie (Abschätzung 0,25)
	Abwasservorbehandlung	5,34	5,34	[kWh/m3] Elektrische Energie pro m3 Abwasser
+	**1 Bereitstellung Druckluft**			
+	**2 Nassabscheider**			
+	**3 Absaugung (ölhaltig)**			
-	**4 Absaugung (unspezifisch)**			
	Absaugung unspez. (Energie)	0	0	[kWh/Nm3] Elektrische Energie pro Nm3 abgesaugtes Volumen
+	**5 Bereitstellung VE-Wasser**			
-	**6 Bereitstellung Endogas**			
	Endogas (Ausstrom pro Stunde)	60	0	[Nm3/h] Endogasausgangsstrom pro Stunde
	Thermische Kühlenergie	18	0	[kWh/h] Thermische Energie für Kühlung pro Stunde
	Endogas (Aufgewendete Energie)	32,5	0	[kWh/h] Elektrische Energie für Hauptsystem und Redundanzsystem
	Endogas (Erdgasverbrauch)	8,75	0	[Nm3/h] Erdgasverbrauch pro Stunde
	Endogas (Propanverbrauch)	0,688	0	[Nm3/h] Propangasverbrauch pro Stunde
-	**Maschine A**			
	Schalter	Ein	Ein	Maschine wird berücksichtigt=Ein; Maschine wird nicht berücksichtigt=Aus
-	**1 Allgemeine Parameter**			**Für alle Maschinentypen relevant**
	Taktzeit	55	66	[s] Taktzeit der Maschine
	Fläche Maschine	71	71	[m2] Stellfläche der Maschine
	Massenverlust	0,356	0,356	[kg] Massenverlust (Späne) pro Bauteil
	Ausschuss	0,2	0,2	[%] Ausschussquote im Prozess
+	**1.1 Betriebszustände**			
+	**1.2 Energie Input**			
+	**1.3 Druckluft**			
+	**1.4 Kühlschmiermittel / Öl**			
+	**1.5 Wasser**			
+	**1.6 Absaugung**			**Für Absaugung relevant**
+	**1.7 Werkzeug**			**Für Werkzeug relevant**
+	**2 Waschmaschine**			**Für Waschmaschine relevant**
+	**3 Härten**			**Für Aufkohlen relevant**
+	**Maschine B**			
+	**Maschine C**			

Abbildung 26: Dateneingabe im BEATool

Ebenfalls enthält das BEA*T*ool eine Einführung, eine Erläuterung zur Dateineingabe eine Übersicht der eingegebenen Parameter und eine Funktion zur logischen Überprüfung sowie Erläuterungen zu den genutzten Datensätzen aus der Bilanzierungsdatenbank GaBi.

Das BEA*T*ool ist, da es innerhalb des öffentlich geförderten Projektes BEAT entstanden ist, kostenfrei verfügbar. Anwender müssen auch keine Lizenzen der umfangreichen GaBi-Software erwerben, obwohl auf Datensätze und Modelle aus dieser Software und Datenbank zurückgegriffen wird. Allerdings ist zur Ausführung des BEA*T*ools eine Lizenz des GaBi-Readers zu erwerben, die durch die PE International AG vertrieben wird.

5.5.1 Analysemöglichkeiten

Die Bewertung der eingegebenen Daten erfolgt durch das BEA*T*ool durch die hinterlegten Modelle und unter Zugriff auf die Datensätze der Life Cycle Inventory Datenbank GaBi. Somit erfolgt der in Abbildung 1 dargestellte Schritt 3 der Wirkungsab-

schätzung vollautomatisch. Die Kategorien (Wirkungskategorien), nach denen die Eingaben bewertet werden, orientieren sich an den allgemein anerkannten Wirkungskategorien. Die Berechnungen der Umweltwirkungen werden mit den Charakterisierungsfaktoren nach CML (Center voor Milieukunde, Leiden, NL) durchgeführt.

Aktuell steht die Bewertung des Treibhauspotenzials im Vordergrund. Das Treibhauspotenzial (englisch: Global Warming Potential, GWP) stellt eine Kennzahl für den Klimawandel dar und wird üblicherweise bezogen auf einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren. Dieser Wert wird im Bezug auf Produkte auch als Carbon Footprint bezeichnet. Neben dieser Größe eröffnet das BEA*T*ool die in Tabelle 4 dargestellten Auswertungsmöglichkeiten.

Wirkungskategorie	Beschreibung	Englische Bezeichnung	Ab-kürzung	Einheit
Abiotischer Ressourcenverbrauch (elementar)	Ressourcen-knappheit Mineralien	Abiotic Depletion Potential elements	ADP	kg Sb-Äqv.
Abiotischer Ressourcenverbrauch (fossil)	Ressourcenknappheit fossile Energieträger	Abiotic Depletion Potential fossil	ADP fossil	MJ
Versauerungs-potenzial	Saurer Regen/ Waldsterben	Acidification Potential	AP	kg SO_2-Äqv.
Eutrophierungs-potenzial	Überdüngung von Böden und Gewässer	Eutrophication Potential	EP	kg PO_4^{3-}Äqv.
Treibhausgas-potenzial	Klimaerwär-mung	Global Warming Potential	GWP	kg CO_2-Äqv.
Ozonzerstörungs-potenzial	Ozonloch in oberer Atmos-phäre	Ozone Depletion Potential	ODP	kg R11-Äqv.
Sommersmog-potenzial	Ozonbildung in bodennahen Schichten	Photochemical Ozone Creation Potential	POCP	kg C_2H_2-Äqv.
Primärenergie (erneuerbar)	Maß für erneu-erbare Energieträger	Primary Energy Demand (renewable)	PED (ren.)	MJ
Primärenergie (fossil)	Maß für fossile Energieträger	Primary Energy Demand (fossil)	PED (fossil)	MJ

Tabelle 4: Auswertungsmöglichkeiten der Technologieketten im BEA*T*ool

Das BEA*T*ool ermöglicht es, die Ergebnisse der genannten Wirkungskategorien nach der Herkunft innerhalb der Technologiekette aufzuschlüsseln. So kann aus den Ergebnissen abgelesen werden, wie hoch der absolute wie relative Anteil des Materials, der Betriebsstoffe, der zentralen Anlagen und der Prozesse ist, vgl. Abbildung 15.

Neben dieser Auswertung der genannten Kategorien, können die Umweltwirkungen den Prozessschritten zugeordnet werden und so die maßgeblichen Treiber identifiziert werden. Dies ist exemplarisch durchgeführt worden für die betrachteten Anwendungsfälle in Abbildung 18.

Die Ergebnisse werden in einem automatisch erzeugten, interaktiven Bericht in Form von Tabellen und Diagrammen dargestellt. Durch den zweigeteilten Aufbau des Softwaretools können auf der einen Seite des Fensters die Prämissen und Eingaben verändert werden und auf der anderen Seite direkt die Ergebnisse abgelesen werden. Der interaktive Bericht liest direkt aus dem Rechenmodell die Zahlenwerte aus. Der Bericht selbst ist mit Erklärungen und Beschreibungen so gestaltet, dass die Ergebnisse der Umweltwirkung direkt genutzt und interpretiert werden können.

5.5.2 Fallbeispiele der Anwender

Nach der detaillierten Analyse der Referenztechnologieketten werden bei den Anwendern alternative Technologieketten gebildet. Diese alternativen Technologieketten berücksichtigen teils umgesetzte Anpassungen der Fertigungslinie, teils mögliche, nicht unmittelbar umgesetzte Anpassungen. Die alternativen Prozessketten werden ebenfalls modelliert und die Ergebnisse mit den ursprünglichen Technologieketten verglichen.

An der Prozesskette werden bei Bosch drei maßgebliche Änderungen an den eigentlichen technischen Prozessen vorgenommen, siehe auch Abbildung 27.

1. Die Waschprozesse werden nunmehr bei geringerer Temperatur durchgeführt, sodass elektrische Energie zur Erhitzung des Wassers eingespart werden kann. Im Gegenzug ist die Hinzunahme zusätzlichen Reinigers erforderlich.
2. Drei separate Schleifprozesse, die sich in der Referenzkette hinter Schleifen verbergen, werden nunmehr auf einer kombinierten Schleifmaschine durchgeführt. Zuvor wurden für die gleiche Bearbeitung drei sequenziell angeordnete Maschinen eingesetzt.
3. Der mit dem Hochdruckentgraten gekoppelte Waschprozess erfolgt ebenfalls nunmehr kalt.

Abbildung 27: Gegenüberstellung der alternativen Prozesskette und der Referenzprozesskette zur Fertigung des Ventils bei Bosch

Im BEA*T*ool wird sowohl die originäre Referenzprozesskette als auch die Alternative modelliert. Als Ergebnis der ökologischen Bewertung, in diesem Fall nur anhand einer Wirkungskategorie Treibhauspotenzial, bedarf die Fertigung eines Bauteils mit der alternativen Prozesskette 91,5 % des Ausstoßes an CO_2-Äquivalenten. Rein bezogen auf die Effekte der Fertigungstechnologien, die Materialgewinnung ausklammernd, reduziert sich der verbundene Ausstoß an CO_2-Äquivalenten auf 89,7 %.

Darüber hinaus können bei Bosch in der Fertigung andere, nicht direkt mit der Prozesstechnologie in Verbindung stehende Einsparmaßnahmen durchgeführt werden. Beispielsweise wird bei den Kühlschmierstoffzentralanlagen die KSS-Temperatur erhöht. KSS-Temperaturschwankungen haben negative Auswirkungen auf die Maßhaltigkeit. Aus diesem Grund wird die KSS-Temperatur von Zentralanlagen über Kaltwasserwärmetauscher reguliert. Untersuchungen bei der Robert Bosch GmbH haben gezeigt, dass eine Erhöhung der KSS-Temperatur um 1 °C, z.B. von 23 °C auf 24 °C, die erforderliche Kühlenergie um ca. 10 % reduziert, ohne sich negativ auf die Prozesse auszuwirken. Diese Maßnahme kann in der Regel ohne Invest umgesetzt werden, da lediglich eine Änderung des Temperatursollwertes erforderlich ist.

Auch in der Fertigungslinie von Daimler werden Änderungen vorgenommen oder zumindest für die Neuplanung in Erwägung gezogen. Die alternative Prozesskette für die Fertigung des Getrieberades ist untenstehend abgebildet. Die maßgeblichen Änderungen sind nachfolgend aufgelistet.

1. Durch eine angepasste Strategie beim Wälzfräsen wird die Taktzeit zwar erhöht, der Standbyanteil der Maschine kann aber auf nahezu Null reduziert werden. (Fertigfräsen)
2. Der erste Waschprozess entfällt aufgrund neuer Ofentechnik vollständig.
3. Anstelle der konventionellen Wärmebehandlung wird ein Vakuumaufkohlprozess eingesetzt. Durch die fehlende Beeinträchtigung der Atmosphäre kann die Temperatur herauf- und damit die Taktzeit herabgesetzt werden. Es wird kein Endogas mehr benötigt. Anstelle wird Stickstoff eingesetzt.
4. Der ebenfalls kombinierte Schleifprozess der Referenzkette entfällt. Er wird durch das zusätzliche Fertigfräsen und das Hartdrehen ersetzt, welches trocken stattfindet.

Abbildung 28: Gegenüberstellung der alternativen Prozesskette und der Referenzprozesskette zur Fertigung des Getrieberades bei Daimler

Ein weiterer interessanter Aspekt kann anhand der Substitution von der konventionellen, mittels gasbeheizten Wärmebehandlung zu der induktiv betriebenen Vakuumbehandlung illustriert werden, denn die Ergebnisse einer Ökobilanz sind keinesfalls für die Zukunft festgelegt. In der Interpretation und Analyse müssen zukünftige Entwicklungen und deren Auswirkungen auf die Resultate miteinbezogen werden. Am Beispiel der Wärmebehandlung wird deutlich, dass der Vergleich der alternativen Prozesse durch eine ökologisch günstigere Stromerzeugung im Rahmen der Energiewende massiv beeinflusst wird.

Neben diesen Ergebnissen können bei der Daimler AG erhebliche Einsparungen an der zentralen KSS-Anlage durch den Einbau von Frequenzumrichtern sowie die Um-

stellung des Rückförderkonzeptes erzielt werden. Insgesamt wird der Verbrauch der Zentralanlage an elektrischer Energie auf 50% herabgesetzt. Durch den Frequenzumrichter wird die Fördermenge nunmehr bedarfsgerecht geregelt. Ganz analoge Resultate lassen sich im Fall der Hallenbelüftung sowie an den Absauganlagen der Werkzeugmaschinen durch auslegungstechnische Überprüfung (Simulation) und Anpassung der elektrischen Antriebe erreichen.

Die erzielten Verbesserungen im Bereich der Zentralanlagen sind das Ergebnis der erhöhten Transparenz und dem besseren Verständnis der Energie- und Stoffströme durch die Bilanzierung der Prozessketten.

In Abbildung 29 sind die Maßnahmen und die äquivalenten Einsparungen des CO_2-Ausstosses dargestellt.

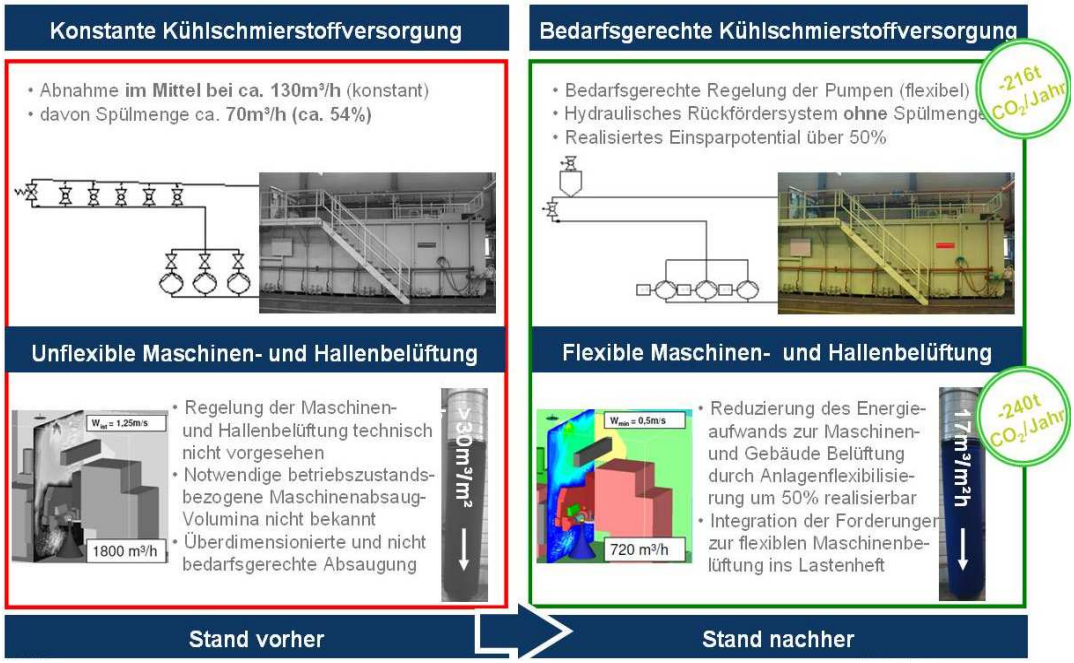

Abbildung 29: Erzielte Effekte im Bereich von Zentralanlagen

6 Verwertungsplan

6.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Angesichts der wachsenden Weltbevölkerung, ansteigendem Konsum in Schwellenländern und knapper Ressourcen kommt der Energie- und Ressourceneffizienz in Zukunft eine wachsende Bedeutung bei. Neben der gesellschaftlichen sowie ökologischen Verantwortung, die Unternehmen für ihr Wirtschaften haben, ist die Effizienz im Umgang mit Material und Energie in hohem Maße kostenrelevant. Vor diesem Hintergrund können Unternehmen die gewonnenen Erkenntnisse im Projekt und das Softwarewerkzeug BEA*T*ool nutzen, um in Zukunft ihre Produktionsprozesse effizienter zu gestalten. Ein Vorteil im Umgang mit Ressourcen kann dazu beitragen, den Produktionsstandort Deutschland langfristig zu sichern.

Weiterhin haben die Ergebnisse des Projektes aufgezeigt, dass künftig neben bestehende Kaufkriterien wie Preis, Qualität oder Verfügbarkeit auch ökologische Kriterien treten können. Es zeigte sich, dass selbst komplexe Prozessketten technischer Produkte unter vertretbarem Aufwand bilanziert und bewertet werden können, sodass Kenngrößen wie der bauteilspezifische Primärenergiebedarf oder der Carbon Footprint in Zukunft ein weiteres Entscheidungskriterium bei der Kaufentscheidung werden können.

Das im Projekt entwickelte, auf ökobilanzunerfahrene Anwender ausgerichtete BEA*T*ool wird auch nach Projektablauf durch PE International weiter angeboten und nach Marktbedürfnissen entwickelt. Das Softwarewerkzeug, welches sich in erster Linie für die Metall verarbeitende Fertigung eignet, könnte bei gegebener Nachfrage als Beispiel und Ausgangspunkt für weitere Entwicklungen, beispielsweise für andere Industriezweige dienen.

6.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Die Datenerfassung der Energie- und Ressourcenströme in der industriellen Fertigung liefert fundamentale Daten zur Bilanzierung von Maschine, Prozess und Produkt. Mit dem BEA*T*ool konnte erstmals ein frei zugängliches und für ungeübte Nutzer bedienbares Werkzeug zur prädiktiven Bestimmung des Energie- und Ressourcenkonsums erarbeitet werden. Somit kann für die Technologieplanung direkt ein Hilfsmittel generiert werden, mit dem Technologieketten nicht mehr ausschließlich unter dem technischen Gesichtspunkt, sondern zusätzlich aus Energie- und Ressourcensicht beurteilt werden.

Die erarbeiteten Ergebnisse fließen direkt als Lehrinhalte in die Ausbildung von angehenden Ingenieuren aus dem Bereich der Produktionstechnik ein. Weiterhin wurden eine Vielzahl von Veröffentlichungen in einschlägigen Fachzeitschriften der Produktions- und Simulationstechnik platziert sowie Vorträgen auf nationalen und internationalen Tagungen und Konferenzen gehalten, um die Forschungsinhalte der Öffentlichkeit und den Anwendern bekannt zu machen.

Die aufgebauten Messsysteme werden auch in Zukunft an den Forschungseinrichtungen genutzt, um innovative Verfahren der produktbezogenen Bewertung von Fertigungsprozessen zu entwickeln.

6.3 Wissenschaftliche und/oder wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Ergebnisse des Projektes decken weiteren Forschungsbedarf im Bereich der energie- und ressourceneffizienten Auslegung von Fertigungsprozessen auf, die ein breites Feld weiterer Forschungsschwerpunkte für die beteiligten Institute eröffnen. Weiterhin wurde wichtiges Know-how an den Instituten aufgebaut, das sowohl hinsichtlich der Beurteilung der Prozesse als auch der Maschine von den Instituten bei Forschungs- und Industrieprojekten eingebracht werden kann.

Das BEA*T*ool wird Anwendern kostenfrei zur Verfügung gestellt. Damit steht es Interessenten frei, ihre Prozessketten vergleichsweise aufwandsarm und ohne teure Lizenzen zu bewerten. Für die Nutzung des BEA*T*ools ist lediglich eine Lizenz des Gabi Readers erforderlich. PE International wird weiterführende Dienstleistung zur kundenspezifischen Anpassung des Werkzeuges anbieten. Ebenfalls bietet der Leitfaden, der im Rahmen des Projektes erstellt wurde, eine Einführung für Interessenten der Software.

Die Ergebnisse der Ökobilanzen, die im Rahmen des Projektes durchgeführt wurden, beziehen sich auf die Herstellungsphase. Sie berücksichtigen die Energie- und Stoffströme, die ein gefertigtes Produkt bis zum Hallentor des fertigenden Unternehmens verursacht, einschließlich der Anteile für die Material- und Stromgewinnung und -bereitstellung. Die Nutzungsphase stand im Projekt nicht im Fokus der Betrachtungen. Allerdings können die Ergebnisse, sowohl die der detaillierten Ökobilanzierung auf Basis des GaBi Modells als auch die des BEA*T*ools, mit Ergebnissen von Studien über die Nutzungsphase und Entsorgung verknüpft werden, um den gesamten Lebenszyklus eines Produktes zu bewerten.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projektes BEAT wurden zwei Technologieketten umfassend hinsichtlich ihres Energie- und Materialbedarfes bilanziert, in der Ökobilanzierungssoftware GaBi modelliert und hinsichtlich der Optimierungsmöglichkeiten analysiert. Es wurden alternative Prozessketten zur Fertigung der Referenzprodukte gebildet, die hinsichtlich ihrer ökologischen Auswirkungen günstiger sind. Ein Modell innerhalb der bestehenden Softwareumgebung GaBi zur bedienerfreundlichen Bilanzierung von Technologieketten wurde entwickelt, basierend auf Daten der GaBi Software und den Erfahrungen der Bilanzierung beider Technologieketten, dass es auch ökobilanzunerfahrenen Nutzern ermöglicht, mit möglichst geringem Aufwand die Bilanzierung von Prozessen und Technologieketten vorzunehmen.

Weiterhin wurden die Erkenntnisse des Projektes in einem Leitfaden zusammengefasst, der Unternehmen dabei unterstützen kann, ihre Technologieketten zu bilanzieren und ressourceneffizienter zu produzieren. Dabei wurde besonders auf die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf kleine und mittelständische Unternehmen geachtet, da diese einen bedeutenden Teil des verarbeitenden Gewerbes darstellen.

Die Bedeutung der Thematik Ressourceneffizienz wird in Zukunft aus ökonomischen Gründen weiter wachsen, da sich das Spannungsfeld zwischen limitierten Ressourcen und wachsender Nachfrage infolge steigender Weltbevölkerung und zunehmendem Streben nach hohen Lebensstandards in Schwellenländern weiter verschärft. Darüber hinaus wurden auf nationaler und europäischer Ebene Ziele zur Einsparung Treibhausgasemissionen formuliert. Mit der in diesem Projekt aufgezeigten Bewertungsmethodik ist es möglich, die Fertigung technischer Produkte zu bewerten und die Umweltwirkungen in Zukunft systematisch zu minimieren, um die gesteckten Ziele zu erreichen.

Die ökologische Bewertungsdimension kann in Zukunft als weiteres Bewertungskriterium neben der Qualität und der Kosten bei der Beschaffung von Gütern herangezogen werden. Bereits heute verpflichten Automobilunternehmen ihre Zulieferer auf Anfrage, den zur Fertigung erforderlichen Gesamtenergieaufwand oder die resultierenden CO_2-Emissionen anzugeben.

Die ganzheitliche Bilanzierung von Technologieketten stellt eine systematische Vorgehensweise dar, um die ökologischen Konsequenzen eines Produktes über den gesamten Lebenszyklus zu bewerten. Im Zuge des Strebens nach nachhaltiger Entwicklung ist die Ökobilanzierung daher ein wirksames Instrument, um die ökologische Dimension eines Produktes zu beleuchten.

8 Literaturverzeichnis

References

[ABEL12] Abele, E.; Sielaff, T.; Beck, M. (2012): Konfiguration energieeffizienter Werkzeugmaschinen. Energieeffiziente Auslegung von Werkzeugmaschinen und Bearbeitungszentren für die Großserienfertigung. In: wt - Werkstatttechnik online. Jg. 102, Nr. 5, S. 292–298

[ALLW12] Allwood, J.; Cullen, J.; Carruth, M. (2012): Sustainable materials with both eyes open, UIT Cambridge, Cambridge

[BÄUM11] Bäumler, S.; Bode, H.; Brecher, C.; Breitbach, T.; Hansch, S.; Hennes, N.; Prust, D. (2011): Ressourceneffizienz im Werkzeugmaschinenbau. In: Brecher, C.; Klocke, F.; Schuh, G.; Schmitt, R. (Hrsg.): Tagungsband Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium 2011. Aachen Shaker

[BODE07] Bode, H.-O. (2007): Einfluss einer energieeffizienten Produktion auf Planungs- und Produktprämissen am Beispiel der Motorenfertigung

[BREC08] Brecher, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (2008): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. Aachener Perspektiven, Tagungsband AWK, Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium '08, 5. bis 6. Juni Aachen: Apprimus Verlag

[BREC12] Brecher, C. T. J. H. C. J. D. (2012): Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb – EWOTeK Aachen: Apprimus Verlag

[BRÜH11] Brühl, J.; Döbbeler, B.; Essig, C; Hein, C.; Herrmann, C.; Jahns, P.; Kleinjans, M.; Klocke, F.; Lung, D.; Schlosser, R.; Werner, A.: Nachhaltige Produktion. In: Brecher,C.; Klocke, F.; Schuh, G.; Schmitt, R. (Hrsg.): Tagungsband Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium 2011. Aachen. Shaker, 2011, S. 196–227

[DAHM04] Dahmus J., G. T. (2004): An Environmental analysis of machining. In: ASME (Hrsg.): Proceedings of IMECE2004. 2004 ASME International Mechanical Engineering Congress and RD&D Expo. Anaheim, California USA, November 13-19, 2004: ASME, S. 1–10

[DIN 14040] DIN EN ISO 14040 – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen

[DIN14044] DIN EN ISO 14044 – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen

[GOED99] Goedkoop, M; Spriensma, R.: Pré The Eco-indicator 99 – A damaged oriented method for Life Cycle Impact Assessment, Methodology Report. Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, 2000

[KARP11] Karpuschewski, B.; Kalhöfer E.; Joswig, D.; Rief, M. (2011d): Energiebedarf für die Hartmetallherstellung. In: ZWF. Jg. 106, Nr. 7-8, S. 496–501

[KIEN52] Kienzle, O. (1952): Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugmaschinen. Bd. 94)

[KLOC08] Klocke, F.; König, W. (2005-2008): Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren. 8. Aufl. Berlin: Springer Verlag

[KLOC12] F. Klocke, R. Schlosser, H. Sangermann (2012): Evaluation of the Energy Consumption of a Directed Lubricoolant Supply with Variable Pressures and Flow Rates in Cutting Processes. In: G. Seliger (Hg.): Sustainable Manufacturing – Shaping Global Value Creation. Proceedings of the 9th Global Conference on Sustainable Manufacturing., Berlin: Springer, Berlin, S. 203-209

[KLOC12b] F. Klocke, B. Döbbeler, M. Binder, D. Lung (2012): The ecological footprint on product level in machining – WGP Jahreskongress 2012, Berlin

[KLOC12c] F. Klocke, B. Döbbeler, M. Binder, R. Schlosser, D. Lung (2012): Ecological evaluation of main consumers in manufacturing within the automotive sector, – GCSM 2012, Istanbul

[KLOC12d] F. Klocke, B. Döbbeler, R. Schlosser, M. Binder, D. Lung (2012): Life Cycle based Evaluation and Interpretation of Technology Chains in Manufacturing – A methodology for industrial use, – Buchkapitel Springer Buch: Technology and Manufacturing Process Selection: the Product Life Cycle Perspective

[KONG11] Kong, D.; Choi, S.; Yasui, Y.; Pavanaskar, S.; Dornfeld, D.; Wright, P. (2011a): Software-based tool path evaluation for environmental sustainability. In: Journal of Manufacturing Systems. Jg. 2011

[KÖNI82] König, W. A.; Essel, K.; Witte, L. (1982): Spezifische Schnittkraftwerte für die Zerspanung metallischer Werkstoffe. Specific cutting force data for metal-cutting: Verein Deutscher Eisenhüttenleute Düsseldorf: Stahleisen; Verlag Stahleisen

[N.N.11] N.N. (2011): EnoPRO – Energieoptimiert Bahnplanung zur Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen in der Produktion. Abschlussbericht.

[NEUG08] Neugebauer, R. (2008): Ergebnisse der Untersuchung zur Energieeffizienz in der Produktion (Vollfassung). EffPro Öffentlicher Diskurs: Untersuchung zur Energieeffizienz in der Produktion Frankfurt.,

[OTTO11] Otto, C. (2011c): Nachhaltigkeitsinitiative macht Blau zum neuen Grün. Blue Competence. In: Maschinen Markt. Jg. 2011, Nr. 47, S. 28–30

[SCHL10] Schlosser, R.; Klocke, F.; Lung, D. (2010): Energy and Resource Consumption of Cutting Processes. How Process Parameter Variations can Optimise the Total Process Efficiency. In: CIRP (Hrsg.): 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering (LCE 2010). 19.05-21.05, Anhui, China, 19.05-21.05

[SCHL11] Schlosser, R.; Klocke, F.; Döbbeler, B.; Riemer, B.; Hameyer, K.; Herold, T.; Zimmermann, W.; Nuding, O.; Schindler, A.; Niemczyk, M.; Schindler, B. A. (2011): Assessment of Energy and Resource Consumption of Processes and Process Chains within the Automotive Sector. In: Hesselbach, J.;Potenzial Hermann, C. (Hrsg.): Glocalized Solutions for Sustainability in manufacturing. 18th CIRP Conference on Life Cycle Engineering, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th, 2011. Berlin: Springer, S. 45–50

[SCHL11b] R. Schlosser; F. Klocke; D. Lung (2011): Sustainability in Manufacturing. Energy Consumption of Cutting Processes. In: G. Seliger, M. M.K Khraisheh, I.S Jawahir, M. K. Khraisheh und I. S. Jawahir (Hg.): Advances in Sustainable Manufacturing. Proceedings of the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing., Berlin: Springer Berlin; Springer, S. 85-90.

[SCHL12] R. Schlosser, F. Klocke, B. Döbbeler, M. Binder (2012): Energieeffizienz von Prozessketten innerhalb der Automobilindustrie – Nachhaltigkeitsbewertung der Herstellung von Powertrain-Komponenten. In: R. Neugebauer (Hg.): Ressourceneffiziente Technologien für den Powertrain, ICMC2012, Chemnitz, S. 557-572.

[UN87] United Nations (1987): Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future.

[VDE08] VDE (2008): Effizienz- und Einsparpotentiale elektrischer Energie in Deutschland – Perspektive bis 2025 und Handlungsbedarf